



Los procesos productivos basados en impresión 3D frente a metodologías convencionales: un análisis comparativo en el sector de la construcción

Productive processes based on 3D printing versus conventional methodologies: a comparative analysis in the construction sector



José-Manuel Mesa-Fernández¹, Juan-Carlos Piquero-Cambor², Marina Díaz-Piloñeta¹, Henar Morán-Palacios¹

¹ Universidad de Oviedo. Área de Proyectos de Ingeniería. Calle Independencia, 13 – 33004 Oviedo (España).

² IDONIAL. Parque Científico Tecnológico de Gijón. Zona INTRA. Avda. Jardín Botánico, 1345 – 33203 Gijón (España).

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/9504> | Recibido: 14/11/2019 • Inicio Evaluación: 14/11/2019 • Aceptado: 30/01/2020

ABSTRACT

- 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 usual 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. The results obtained confirm the potential of additive manufacturing as a fast, safe and efficient construction process.
- Key Words:** construction sector; additive manufacturing; 3D printing; conventional manufacturing; productivity

RESUMEN

Aunque las metodologías y tecnologías de producción utilizadas en el sector de la construcción han ido evolucionando, 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 tecnologías de fabricación avanzadas están mucho más implementadas.

En este marco se plantea un análisis comparativo de los procesos productivos basados en impresión 3D (fabricación aditiva) frente a las 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 habituales 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 (comportamiento mecánico) de cada una de las técnicas y que tienen gran influencia en la automatización y en otros aspectos como la seguridad, la productividad o el impacto ambiental. Los resultados obtenidos confirman el potencial de la fabricación aditiva como proceso constructivo rápido, seguro y eficiente.

Palabras Clave: sector de la construcción; fabricación aditiva; impresión 3D; fabricación convencional; productividad.

1. INTRODUCCIÓN

La industria de la construcción constituye una parte significativa de la economía de cualquier país en términos de Producto Interior Bruto (PIB). A pesar de una larga y profunda contracción durante los últimos años, este sector representa alrededor del 6% del PIB de los estados miembros de la Unión Europea [1]. Diversos estudios establecen también una relación directa entre la industria de la construcción y el crecimiento económico de los países [2]. Por otro lado, la industria de la construcción es generalmente considerada una industria tradicional, donde la innovación es bastante limitada [3]. En ese sentido, pese a los importantes avances tecnológicos introducidos de los últimos años en la mayoría de los sectores industriales [3], las ratios de productividad en el sector de la construcción siguen estando muy por detrás de los establecidos en otros sectores [4], [5], e incluso en algunos aspectos han descendido en el tiempo [6].

Junto a esto, la industria constructiva incluye actividades y trabajos en la mayoría de los proyectos que conllevan un importante impacto ambiental [7] based on a growing number of databases and methods in Life Cycle Assessment (LCA, ligados principalmente al consumo de recursos [8] tanto materiales como energéticos. Hoy en día, se están adoptando diversas iniciativas [9] and the subsequent amendments (ISO 14001, 2004 para reducir dichos impactos sobre el medio ambiente [10], aunque no existe una línea de trabajo que defina una estrategia común.

A la vista de todo lo anterior, parece clara la necesidad del sector de la construcción de mejorar sus procesos tanto para incrementar la productividad como para reducir su impacto sobre el medioambiente y el consumo de recursos. Una de las vías puede ser la utilización de sistemas de producción automatizada [11], más versátiles en su manejo y que optimicen el uso de materiales y accesorios.

En este contexto, en este trabajo se plantea un análisis comparativo de los procesos productivos basados en impresión 3D (fabricación aditiva) frente a los métodos convencionales de fabricación en el sector de la construcción. Con tal objetivo se llevó a cabo un conjunto de experimentos de fabricación de elementos constructivos habituales que se describen a continuación.

1.1. LA FABRICACIÓN ADITIVA

La fabricación aditiva se define como un proceso de fabricación en el cual se hace uso de una serie de tecnologías que permiten generar objetos tridimensionales directamente desde un modelo digital sin necesidad del uso de moldes ni utillajes. Desde ya

algunos años, estas tecnologías han irrumpido en distintos procesos productivos, primero como sistemas accesorios centrados en el desarrollo de prototipos no funcionales, hasta los últimos avances donde se fabrican piezas totalmente operativas para sectores tan exigentes como el aeronáutico [12], la medicina [13] o la automoción [14]. Este novedoso método de fabricación lleva asociadas una serie de ventajas en cualquier sector industrial, incluido el de la construcción [15]:

- Reducción del tiempo necesario de puesta en el mercado para productos personalizados (*Time-to-market reduction*). Esta disminución del tiempo es consecuencia de que los procesos de fabricación son directos desde el fichero CAD 3D, sin la necesidad de fabricar utillajes específicos previamente al producto personalizado, tal como sucede en muchos procesos convencionales de fabricación en los que se requiere una adaptación en los cambios de producto.
- Completa libertad y flexibilidad en el diseño de producto. A diferencia de otros procesos de producción, 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, dado que 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 [16].
- 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 fabricación aditiva sean competitivas en la producción de series cortas y medias, donde el tamaño de la producción dependerá generalmente de la tecnología de fabricación aditiva, tipo de material, complejidad de la geometría de la pieza y de la competitividad de los procesos convencionales para este caso.

Frente a estas significativas ventajas la fabricación aditiva también tiene algunos inconvenientes, muchos derivados de ser una tecnología todavía en desarrollo. Entre ellos es posible citar:

- La necesidad de desarrollo de nuevos materiales o transformación de los existentes y, como consecuencia, un alto coste de la materia prima.
- La baja disponibilidad de software específico de diseño para estas tecnologías.
- Dificultad de caracterización de las propiedades de los materiales procesados mediante fabricación aditiva, dado que al tratarse de un proceso aditivo discontinuo las propiedades de los materiales pueden ser distintas en función de la dirección de fabricación.
- Mejora de la calidad superficial y de la precisión dimensional. Dependiendo de la aplicación y el acabado obtenido por la tecnología aditiva puede ser necesario realizar un mayor número de postprocesos y acabados superficiales.

1.2. LA FABRICACIÓN ADITIVA EN LA CONSTRUCCIÓN

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 de la construcción. Autores como Joseph Pegna [17] comenzaron a investigar sobre nuevos sistemas constructivos basados en impresión 3D. Posteriormente, en el año 2004, el profesor Behrokh Khoshnevis de la Universidad de Carolina del Sur construyó el primer muro mediante impresión 3D [18], propuso la idea de construir viviendas individuales utilizando impresoras 3D a gran escala y denominó a esta tecnología "Contour Crafting". En las mismas fechas, Enrico Dini [19] patentó un sistema de impresión a gran escala denominado D-Shape, un sistema electromecánico que utiliza resina epoxi como material de impresión y que permite construir estructuras complejas. Otro grupo destacado en la investigación sobre la aplicación de la fabricación aditiva en la construcción es el Departamento de Obra Civil e Ingeniería de Construcción de la Universidad de Loughborough (Reino Unido). Ya en el año 2007 este grupo presentó una investigación [20] sobre las posibilidades que ofrece esta tecnología para la industria constructiva.

En los últimos años se han llevado a cabo diversos trabajos relativos al estudio de la impresión 3D con materiales de construcción [21], en los cuales se han abordado análisis de los materiales en estado fresco [22], el desarrollo de morteros específicos para procesos de fabricación aditiva [23], así como estudios teóricos sobre metodologías de fabricación teniendo en cuenta la complejidad de componentes, necesidad de soportes, etc. [24]. En la actualidad, como indican distintos autores [25], [26], la fabricación aditiva aplicada a la construcción aún se encuentra en una fase de investigación y desarrollo. Se mantienen distintos retos o problemas como, por ejemplo, la adecuada verificación de las propiedades estructurales mediante la simulación [27] construction on the Earth to construction on the other planets, additive manufacturing (AM) y las limitaciones existentes para el ensayo experimental de los elementos fabricados [3], [28]. Es necesario desarrollar y mejorar completamente esta tecnología como refleja que las máquinas industriales a gran escala no están todavía disponibles en el mercado, ni tampoco materiales apropiados o modelos comerciales claros.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Como se ha indicado anteriormente, se estableció un desarrollo experimental con el objetivo de analizar el efecto de la introducción en la construcción de la tecnología de fabricación aditiva. En primer lugar, se seleccionaron los elementos constructivos más adecuados que posteriormente se fabricaron tanto por metodología convencional mediante encofrado, como por impresión 3D de gran escala. Posteriormente, el análisis comparativo permitió estudiar la productividad vinculada a los tiempos de proceso, así como un control de la calidad basado en el comportamiento mecánico de las estructuras.

Las variables que se tuvieron en cuenta a la hora de realizar el análisis de los procesos constructivos son las siguientes:

- Tiempo de proceso: se consideró como el tiempo desde que se comienza la fabricación hasta que se cuenta con la pieza totalmente terminada y disponible para su aplicación, es decir, con el hormigón totalmente endurecido.
- Consumo de materiales: se tuvieron en cuenta tanto los materiales que componen los elementos a fabricar como los diferentes materiales accesorios requeridos en cada caso, tales como moldes o encofrados.
- Personal necesario: se evaluó la cantidad de personal requerido para la ejecución del proceso de fabricación de componentes.

- Calidad estructural: en este caso se valoró mediante el análisis de la resistencia a compresión.

Aunque una de las ventajas que ofrece la fabricación aditiva es la versatilidad para producir componentes geométricamente complejos, la elección de los elementos a estudiar estuvo condicionada fundamentalmente por dos requisitos a cumplir. En primer lugar, ser altamente representativos del sector de la construcción y, además, facilitar la evaluación de las tecnologías de fabricación. Como consecuencia se optó por la utilización de los dos elementos constructivos más utilizados, es decir, los pilares y las vigas.

En estas condiciones se definieron dos estructuras patrón con unas dimensiones representativas y comparables con los componentes utilizados habitualmente en los procesos constructivos. Las dimensiones son las siguientes:

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

A continuación, se describe la realización de los dos métodos constructivos aplicados a los elementos descritos en el apartado anterior.

Modelo pilar encofrado

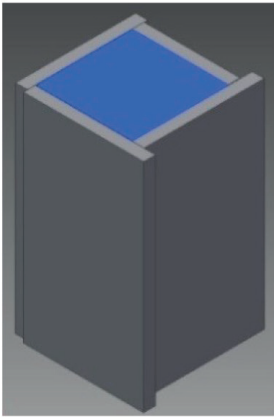


Fig. 1: Fabricación de la columna mediante métodos convencionales

2.1. TECNOLOGÍA CONVENCIONAL MEDIANTE ENCOFRADO MANUAL

El proceso constructivo convencional de la viga y de la columna (Fig. 1) se desarrolló con las siguientes tareas:

- 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.

2.1. TECNOLOGÍA DE FABRICACIÓN ADITIVA

El sistema de fabricación aditiva implementado para el desarrollo del proceso constructivo mediante fabricación aditiva se basó en una celda robotizada Kuka [29]. Sobre dicha celda se implementaron diferentes sistemas auxiliares destinados a realizar la alimentación de material, así como un cabezal específico para la impresión de hormigón.

Para llevar a cabo el proceso de fabricación mediante tecnologías de fabricación aditiva o impresión 3D es necesario realizar

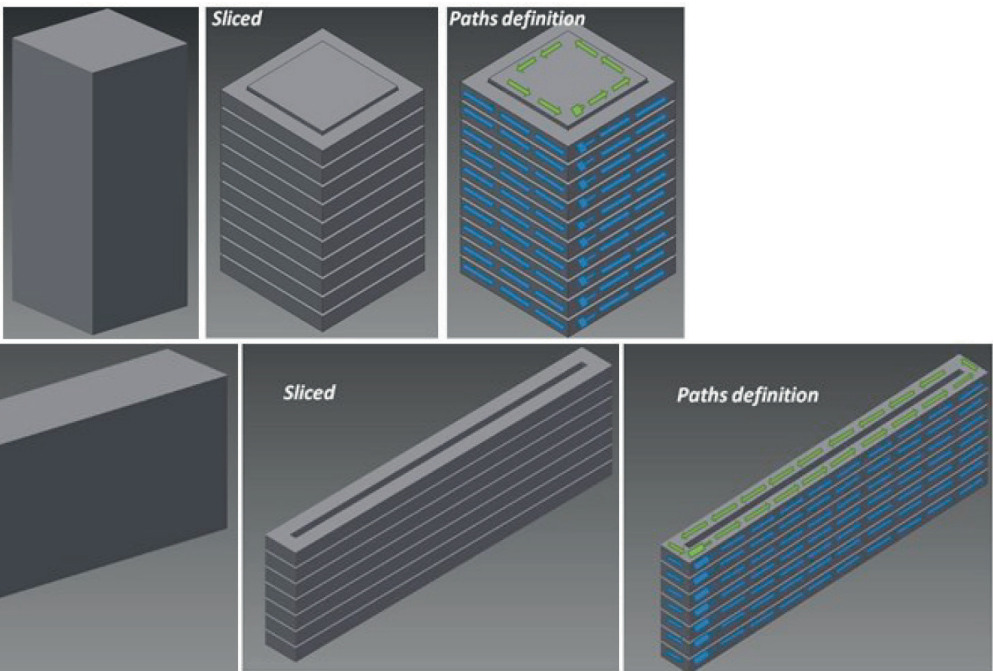


Fig. 2: Definición de las capas y trayectorias de impresión

una definición previa de las trayectorias de impresión a seguir por el sistema robotizado, así como de las características que deben tener las capas que serán depositadas en el mismo.

A tal fin, se utilizó un software informático con el que, en primer lugar, se diseñaron los elementos constructivos teniendo en cuenta las capacidades de fabricación y los sistemas empleados en la misma. A continuación, se ejecutó sobre ellos el proceso de definición de capas (sliced) (Fig. 2) teniendo en cuenta parámetros fundamentales como el espesor de capa a imprimir y el número de estas. Una vez hecho esto, se definieron las trayectorias de fabricación a seguir por el equipo de fabricación (paths definition) para la obtención de dichas capas. En la Fig. 2 se observa dicha definición de capas y trayectorias de impresión en el pilar y la viga considerados.

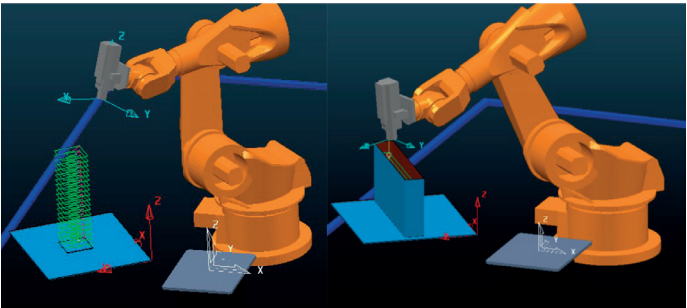


Fig. 3: Simulación del proceso de fabricación con la celda robotizada Kuka

Los archivos generados en el proceso previo de definición de las capas y trayectorias de impresión se introducen en el software específico de la celda robotizada Kuka para realizar una simulación virtual del procedimiento de fabricación que se llevó a cabo (Fig. 3). Dicha simulación es de gran utilidad, pues permite comprobar si existen desviaciones o errores a corregir tanto en las trayectorias definidas como en los movimientos que el sistema robótico realiza para su consecución.

Una vez comprobado que no existían desviaciones o errores en la fase de generación de capas y trayectorias, se fabricó una estructura con forma de pilar de base cuadrada de 400 milímetros de lado, y una altura aproximada de 900 milímetros mediante la impresión de 16 capas de material de un espesor aproximado de 55 milímetros. La impresión comenzó realizando la parte interna o núcleo del pilar, para luego realizar la impresión de su periferia hasta completar las dimensiones.

En segundo lugar (Fig. 4), se fabricó una estructura con forma de viga de base rectangular, con unas dimensiones aproximadas de 400 milímetros de alto, 200 milímetros de ancho y 1300



Fig. 4: Impresión 3D en hormigón de la viga

	Proceso convencional	Fabricación aditiva
Pilar		
Tiempo de proceso (minutos)	120	13
Personal implicado (operarios)	2	0,5
Volumen de material (m³)	316	316
Material de encofrado (kilogramos)	307	0
Viga		
Tiempo de proceso (minutos)	129	14
Personal implicado (operarios)	2	0,5
Volumen de material (m³)	158	158
Material de encofrado (kilogramos)	153	0

Tabla 1: Datos comparativos entre el proceso convencional y la fabricación aditiva

milímetros de longitud. El proceso de fabricación se llevó a cabo mediante la impresión de 7 capas de 55 milímetros de espesor aproximado.

Durante el proceso de impresión de las estructuras se realizaron varias paradas en la deposición del material para conseguir el nivel de fraguado necesario para la correcta sustentación de las capas siguientes.

3. RESULTADOS

En la Tabla 1 se recogen los tiempos de realización de los elementos en el proceso constructivo convencional y en la fabricación aditiva, así como el personal implicado, el volumen de material constructivo y de encofrado. Como se puede observar, los tiempos de fabricación del proceso de fabricación aditiva 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.

El volumen de material empleado en ambos casos es idéntico, mientras que evidentemente en el proceso aditivo no se utiliza material de encofrado y el personal involucrado es sensiblemente menor.

Por otro lado, mediante un ensayo de velocidades de proceso se comprobaron y evaluaron las velocidades máximas y mínimas admisibles para que el proceso de impresión 3D pudiera ejecutarse de forma efectiva, esto es, pudiendo imprimir piezas en mortero/hormigón sin fallos en el mismo. Se ejecutaron diferentes pruebas donde se varió la cantidad de agua añadida al material, así como las velocidades de bombeo de material y de impresión/movimiento del propio sistema cartesiano destinado a tal fin. De forma adicional, durante tales ensayos se probaron diferentes configuraciones de capa de material impresión, variando en éstas su ancho y alto constituyente. En este proceso de ensayo, se estipularon las configuraciones de capa de forma que fueran realizables teniendo en cuenta dos exigencias fundamentales:

- La relación de baja esbeltez en la capa, es decir, que no existieran grandes diferencias en la relación ancho-alto de la capa, de forma que se pueda imprimir sin generar un riesgo en su integridad estructural en forma de colapso o derrumbe de ésta.
- El establecimiento de los límites de velocidad asumibles por el sistema de impresión, tanto en términos de su propia integridad como en términos de la integridad de las estructuras impresas, y sin presentar carencias de material por una velocidad excesiva de deposición.

En el plan de ensayos se trabajó con capas de 100 x 40 mm, 100 x 50 mm, 100 x 60 mm, 100 x 70 mm, 100 x 80 mm y con velocidades de avance de entre (1m/min) y máximo (7m/min), en base a esto se obtuvieron diversas productividades y calidades. El siguiente gráfico (Fig. 5) muestra la productividad del nuevo sistema de impresión 3D a gran escala en base a estos parámetros:

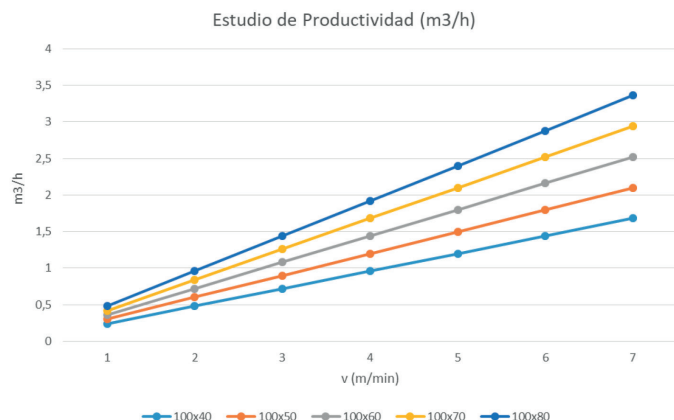


Fig. 5: Tasas productivas (m³/h) en base a la velocidad de avance del robot (eje y) y a las dimensiones de capa

El sistema ensayado presenta, por tanto, una clara reducción de los tiempos de proceso (alrededor del 80%), vinculada a la ausencia de encofrados, los cortos tiempos de fraguado y los altos valores de productividad que pueden llegar a más de 3m³/h con velocidades de avance de hasta 420 m/h con capas de hasta 100 x 80 milímetros.

Finalmente, con el objetivo de evaluar la calidad de los elementos resultantes, se llevó a cabo el ensayo y posterior validación de las propiedades físico-mecánicas de los elementos fabricados (pilar y viga) por ambos métodos. Para tal fin, se estableció la siguiente metodología de ensayo:

- Elaboración de probetas patrón: el procedimiento consistió en el rellenado de moldes de probetas cúbicas convencionales de 150 x 150 x 150 milímetros, directamente desde el cabezal de impresión. De este modo, se asegura que la mezcla de hormigón se deposita de la misma forma en que se hace en el proceso de impresión 3D.
- Elaboración de probetas mediante impresión 3D: posterior a la generación de las probetas patrón, se procede a fabricar por fabricación aditiva, una pieza de forma prismática de unas dimensiones aproximadas de 700 x 700 x 400 milímetros, generando de este modo un bloque macizo. Tras el proceso de fraguado del material y esperando 24 horas, se procedió a extraer del bloque macizo previamente impreso, por métodos mecánicos, probetas de 150 x 150 x 150 milímetros, cuyas propiedades mecánicas se compararon con los datos del patrón establecido.
- Realización de ensayos físico-mecánicos: una vez elaboradas las probetas, se realizaron ensayos de resistencia a flexión. En esta línea se han llevado a cabo ensayos de rotura a 30 horas y 7 días. Dado que el proceso productivo es rápido, es interesante conocer el comportamiento de las muestras a corto plazo, siendo éste el motivo de realizar roturas a las 30 horas.

Los resultados de los ensayos realizados arrojaron unos valores de resistencia adecuados, destacando no obstante una reducción de entorno al 25%, respecto a los valores de resistencia arrojados por las probetas obtenidas mediante métodos convencionales de fabricación (Fig. 6). Esta reducción está ligada con el proceso de

deposición de material capa a capa y con ausencia de proceso de vibrado, pero los valores obtenidos en los ensayos están, ya a 7 días, por encima de los 25 MPa exigidos por normativa [30] a los hormigones convencionales a los 28 días.

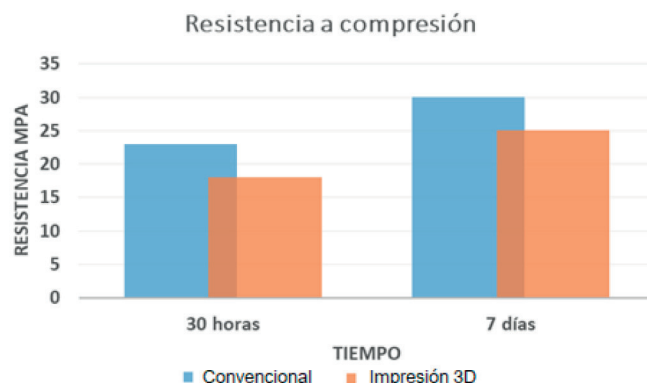


Fig. 6: Rotura de probetas obtenidas por impresión (izquierda) y por método tradicional (derecha)

Cabe destacar como en la probeta de la imagen izquierda, obtenida mediante fabricación aditiva, la rotura sigue una tendencia paralela a las capas de fabricación (Fig. 7), mientras que, en las obtenidas de forma convencional, la rotura es predominante en la dirección de aplicación de la carga (dirección vertical y transversal a la misma).



Fig. 7: Rotura de probeta de hormigón fabricada mediante impresión 3D

4. CONCLUSIONES

El nuevo sistema planteado supone un salto tecnológico considerable y necesario con respecto a las metodologías constructivas actuales. El estudio comparativo, utilizando elementos constructivos habituales, llevado a cabo en este trabajo permite extraer las siguientes conclusiones en relación con el uso de la fabricación aditiva en la construcción:

- Reducción de la dependencia del factor humano. Una vez comprobado el diseño mediante simulación, el robot es capaz de ejecutar el trabajo a través de los datos tomados directamente de un archivo digital.
- Se ha comprobado que al eliminar las operaciones de encofrado se obtienen una serie de ventajas:
 - Una reducción muy significativa de los tiempos de fabricación, al eliminar todos los tiempos de diseño, montaje y retirada del encofrado.
 - El menor personal necesario en el proceso de fabricación.
 - La disminución de los costes asociados a los materiales auxiliares necesarios.
 - Los riesgos asociados a estas operaciones.

- Es preciso controlar los materiales (por ejemplo, el contenido en agua), la definición de capas y trayectorias de impresión, así como de la velocidad de impresión para obtener resultados adecuados.
- Mejora en los costes unitarios de proceso debido a que, una vez superada la etapa inicial de desarrollo del sistema, la notable disminución de la mano de obra necesaria, materiales auxiliares y del tiempo empleado para la obtención de las piezas, supondrá una importante reducción en los costes derivados del proceso de fabricación.
- Los resultados preliminares de los ensayos efectuados, en relación con las propiedades físico-mecánicas de los elementos fabricados, muestran unos valores de resistencia adecuados, aunque inferiores a los obtenidos por medios convencionales. Es necesario profundizar en el futuro en el desarrollo de materiales específicos, así como en el estudio del efecto de las trayectorias de impresión.

REFERENCIAS

- [1] J. Nazarko y E. Chodakowska, «Measuring Productivity of Construction Industry in Europe with Data Envelopment Analysis», *Procedia Eng.*, vol. 122, pp. 204-212, ene. 2015, doi: <http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2015.10.026>.
- [2] S. Dixit, S. N. Mandal, J. V. Thanikal, y K. Saurabh, «Evolution of studies in construction productivity: A systematic literature review (2006–2017)», *Ain Shams Eng. J.*, vol. 10, n.o 3, pp. 555-564, sep. 2019, doi: <http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.asej.2018.10.010>.
- [3] F. Craveiro, J. P. Duarte, H. Bartolo, y P. J. Bartolo, «Additive manufacturing as an enabling technology for digital construction: A perspective on Construction 4.0», *Autom. Constr.*, vol. 103, pp. 251-267, jul. 2019, doi: <http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2019.03.011>.
- [4] T. Snyman y J. Smallwood, «Improving Productivity in the Business of Construction», *Procedia Eng.*, vol. 182, pp. 651-657, ene. 2017, doi: <http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.175>.
- [5] B. García de Soto et al., «Productivity of digital fabrication in construction: Cost and time analysis of a robotically built wall», *Autom. Constr.*, vol. 92, pp. 297-311, ago. 2018, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2018.04.004>.
- [6] T. Bock, «The future of construction automation: Technological disruption and the upcoming ubiquity of robotics», *Autom. Constr.*, vol. 59, pp. 113-121, nov. 2015, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2015.07.022>.
- [7] I.-F. Häfliger et al., «Buildings environmental impacts' sensitivity related to LCA modelling choices of construction materials», *J. Clean. Prod.*, vol. 156, pp. 805-816, jul. 2017, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.052>.
- [8] J. A. Bamgbade, A. M. Kamaruddeen, y M. N. M. Naw, «Towards environmental sustainability adoption in construction firms: An empirical analysis of market orientation and organizational innovativeness impacts», *Sustain. Cities Soc.*, vol. 32, pp. 486-495, jul. 2017, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scs.2017.04.015>.
- [9] A. Zutshi y A. Creed, «An international review of environmental initiatives in the construction sector», *J. Clean. Prod.*, vol. 98, pp. 92-106, jul. 2015, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.06.077>.
- [10] S. H. Ghaffar, J. Corker, y M. Fan, «Additive manufacturing technology and its implementation in construction as an eco-innovative solution», *Autom. Constr.*, vol. 93, pp. 1-11, sep. 2018, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2018.05.005>.
- [11] I. Agustí-Juan, F. Müller, N. Hack, T. Wangler, y G. Habert, «Potential benefits of digital fabrication for complex structures: Environmental assessment of a robotically fabricated concrete wall», *J. Clean. Prod.*, vol. 154, pp. 330-340, jun. 2017, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.002>.
- [12] R. Liu, Z. Wang, T. Sparks, F. Liou, y J. Newkirk, «13 - Aerospace applications of laser additive manufacturing», en *Laser Additive Manufacturing*, M. Brandt, Ed. Woodhead Publishing, 2017, pp. 351-371.
- [13] H. H. Malik et al., «Three-dimensional printing in surgery: a review of current surgical applications», *J. Surg. Res.*, vol. 199, n.o 2, pp. 512-522, dic. 2015, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jss.2015.06.051>.
- [14] I. S. Yoo et al., «Model Factory for Additive Manufacturing of Mechatronic Products: Interconnecting World-class Technology Partnerships with Leading AM Players», *Procedia CIRP*, vol. 54, pp. 210-214, ene. 2016, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2016.03.113>.
- [15] C. Weller, R. Kleer, y F. T. Pillar, «Economic implications of 3D printing: Market structure models in light of additive manufacturing revisited», *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 164, pp. 43-56, jun. 2015, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2015.02.020>.
- [16] P. Reeves, «ATKINS: Manufacturing a Low Carbon Footprint: Zero Emission Enterprise Feasibility Study», presentado en 2nd International Conference on Additive Technologies (iCAT), 2008.
- [17] J. Pegna, «Exploratory investigation of solid freeform construction», *Autom. Constr.*, vol. 5, n.o 5, pp. 427-437, feb. 1997, doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0926-5805\(96\)00166-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0926-5805(96)00166-5).
- [18] D. Hwang, B. Khoshnevis, D. Hwang, y B. Khoshnevis, «An Innovative Construction Process-Contour Crafting (CC)», *ISARC Proc.*, vol. 2005 Proceedings of the 22nd ISARC, Ferrara, Italy, pp. 0-0, 2005.
- [19] G. Cesaretti, E. Dini, X. De Kestelier, V. Colla, y L. Pambaguian, «Building components for an outpost on the Lunar soil by means of a novel 3D printing technology», *Acta Astronaut.*, vol. 93, pp. 430-450, ene. 2014, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.actaastro.2013.07.034>.
- [20] R. A. Buswell, R. C. Soar, A. G. F. Gibb, y A. Thorpe, «Freeform Construction: Mega-scale Rapid Manufacturing for construction», *Autom. Constr.*, vol. 16, n.o 2, pp. 224-231, mar. 2007, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2006.05.002>.
- [21] S. Lim, R. A. Buswell, T. T. Le, S. A. Austin, A. G. F. Gibb, y T. Thorpe, «Developments in construction-scale additive manufacturing processes», *Autom. Constr.*, vol. 21, pp. 262-268, ene. 2012, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2011.06.010>.
- [22] A. Kazemian, X. Yuan, E. Cochran, y B. Khoshnevis, «Cementitious materials for construction-scale 3D printing: Laboratory testing of fresh printing mixture», *Constr. Build. Mater.*, vol. 145, pp. 639-647, ago. 2017, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.015>.
- [23] N. Khalil, G. Aouad, K. El Cheikh, y S. Rémond, «Use of calcium sulfoaluminate cements for setting control of 3D-printing mortars», *Constr. Build. Mater.*, vol. 157, pp. 382-391, dic. 2017, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.109>.
- [24] R. Duballet, O. Baverel, y J. Dirrenberger, «Classification of building systems for concrete 3D printing», *Autom. Constr.*, vol. 83, pp. 247-258, nov. 2017, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2017.08.018>.
- [25] D. D. Camacho et al., «Applications of Additive Manufacturing in the Construction Industry: A Prospective Review», *ISARC Proc.*, pp. 246-253, jul. 2017.
- [26] I. Krimi, Z. Lafhaj, y L. Ducoulombier, «Prospective study on the integration of additive manufacturing to building industry—Case of a French construction company», *Addit. Manuf.*, vol. 16, pp. 107-114, ago. 2017, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.addma.2017.04.002>.
- [27] F. Hamidi y F. Aslani, «Additive manufacturing of cementitious composites: Materials, methods, potentials, and challenges», *Constr. Build. Mater.*, vol. 218, pp. 582-609, sep. 2019, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.140>.
- [28] A. Paolini, S. Kollmannsberger, y E. Rank, «Additive manufacturing in construction: A review on processes, applications, and digital planning methods», *Addit. Manuf.*, vol. 30, p. 100894, dic. 2019, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.addma.2019.100894>.
- [29] «Celdas de fabricación | KUKA AG». [En línea]. Disponible en: <https://www.kuka.com/es-es/productos-servicios/instalaciones-de-produccion/C3%B3n/celdas-de-fabricacion/C3%B3n-estandarizadas>. [Accedido: 10-ene-2020].
- [30] AENOR-ISO, «UNE-EN 12390-2 Ensayos de hormigón endurecido. Parte 2: Fabricación y curado de probetas para ensayos de resistencia.» 2009.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo ha podido ser llevado a cabo gracias a la participación de las empresas Cementos Tudela Veguín S. A. y Digafer S.A. Esta publicación ha sido financiada por Plan de Ciencia, Tecnología e Innovación del Principado de Asturias (Ref: FC-GRUPIN-IDI/2018/000225).