

REIA #07-08 / 2017  
298 páginas  
ISSN: 2340-9851  
www.reia.es

---

## Adolfo Nadal\*, Juan Pavón\*\* y Oscar Liébana\*\*\*

\* Autor principal. Universidad Europea de Madrid. EAID / [adolfo.nadal@universidadeuropea.es](mailto:adolfo.nadal@universidadeuropea.es)

\*\* Universidad Complutense de Madrid. FDI / [jpavon@fdi.ucm.es](mailto:jpavon@fdi.ucm.es)

\*\*\* Universidad Europea de Madrid. EAID / [oscar.liebana@universidadeuropea.es](mailto:oscar.liebana@universidadeuropea.es)

### *Perspectivas para la impresión 3D en la construcción / 3D Printing for construction*

Las técnicas y aplicaciones de impresión 3D para construcción se encuentran en una fase inicial de desarrollo. Especialmente en lo referente a materiales como a procedimientos constructivos, hay mucho espacio de desarrollo. Esto se debe diversos factores: la especificidad del sector, el coste de la maquinaria necesaria, y una ausencia de un patrón procedimental característico. El artículo presenta una metodología innovadora para superar estas limitaciones mediante un flujo de trabajo sencillo que permita el uso generalista de brazos robóticos mediante software integrativo y un uso optimizado de materiales. Asimismo, se expone la integración de diseño y fabricación combinando sistemas de producción mediante brazos robóticos y técnicas de fabricación por deposición.

3D printing for construction is an emerging technology. Especially regarding materials and procedures, there is still space for large improvements. The specificity of the building sector, along with its associated costs and lack of standardized procedures play an important role in the definition of design and fabrication techniques. The paper presents an innovative methodology to transcend these limitations through a simple yet efficient workflow that includes both an integrative software paradigm and an optimized material approach. Moreover, an integration between design and fabrication combining robotics-oriented production and fused deposition is discussed.

---

Impresión 3D; Fabricación aditiva; Construcción; Diseño; Fabricación; Robótica; Optimización de materiales; Sostenibilidad /// 3D Printing; Additive Manufacturing; Construction; Design; Fabrication; Robotics; Material Optimization; Sustainability

Fecha de envío: 12/05/2016 | Fecha de aceptación: 12/12/2016

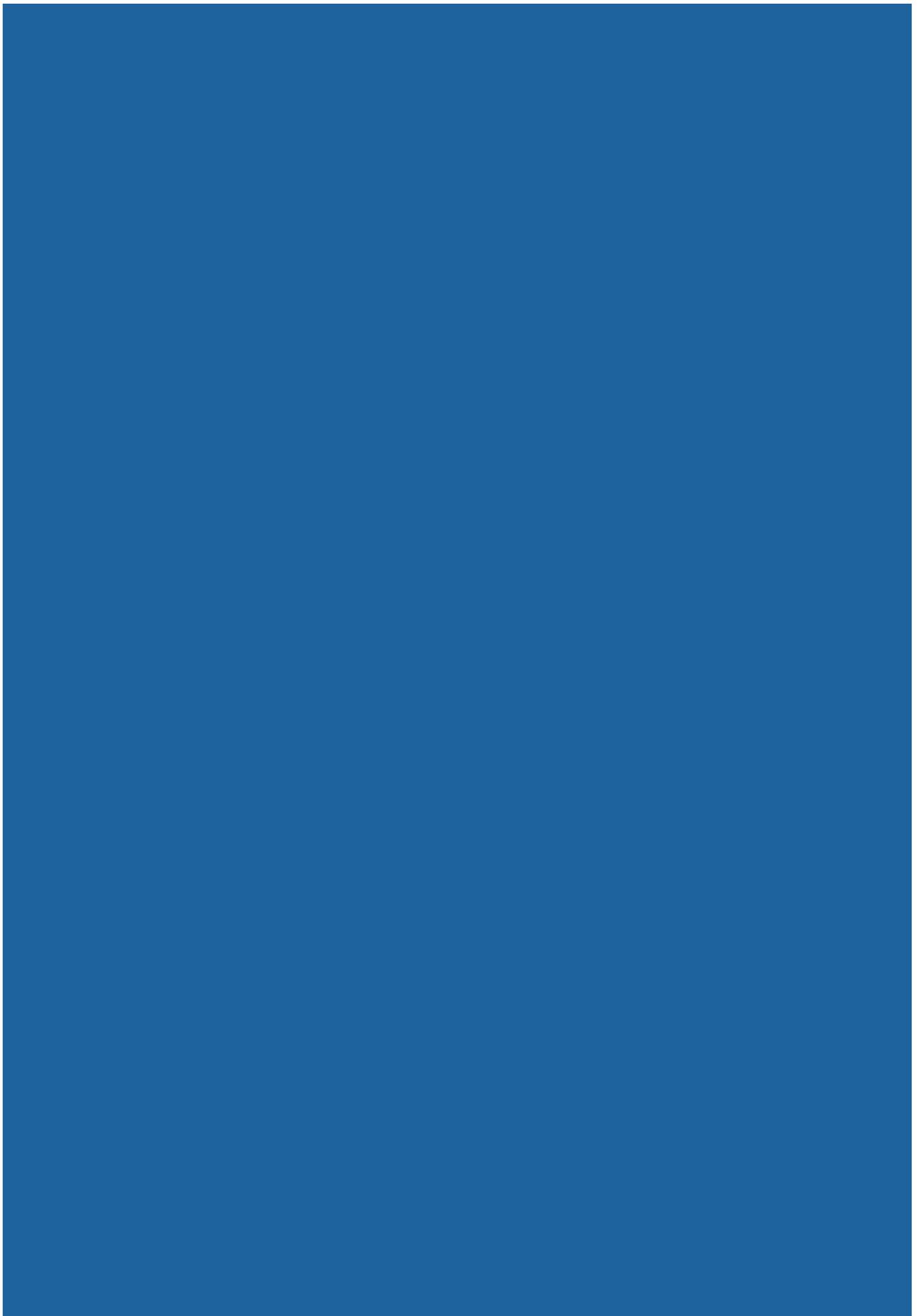




Figura 1 Diagrama de ensamblaje del proyecto "3D printed Canal House" (Créditos: DUS architects)

Figura 2. Visualización del proyecto "3D printed Canal House" (DUS architects), una aplicación de FDM a impresión 3D a escala real. (Créditos: DUS Architects)



### Tendencias actuales en impresión 3D para la construcción

Los procesos de impresión 3D actuales se centran principalmente en el prototipado rápido (RP). Tanto la estereolitografía (SLA), el sinterizado selectivo por láser (SLS) como la deposición fundida (FDM) se basan en una técnica de creación capa por capa, que presenta una serie de limitaciones tales como: (i) la necesidad de tener continuidad en las capas, (ii) la presencia de material de soporte en ciertas partes, y (iii) el refinamiento manual del acabado.

Las adaptaciones a impresión de gran escala imitan las máquinas de escritorio aumentando su tamaño. Hasta el momento, se pueden mencionar dos métodos principales, ejemplarizados por D-Shape (Dini, 2016) o el proyecto WASP por un lado; y Winsun o la Canal House por otro (fig.1 y fig. 2). El primero (fig. 3) trabaja con una estructura de puente grúa y trabaja con una boquilla que vierte aglutinante adhesivo sobre una capa de material estructural en bruto. Este sistema requiere enormes cantidades de material, lo que produce altos volúmenes de desperdicio. Debido al coste de la infraestructura, no es eficiente deslocalizar la factorización mediante este sistema, lo que es un inconveniente añadido. Por otro lado, Contour Crafting (Khosnevis, 2004) está basado también en grandes infraestructuras, aunque su sistema de deposición por capa resulta más eficiente. En este caso la boquilla vierte hormigón o material fundido directamente en las zonas necesarias (Khosnevis 2010). Ambas técnicas son inexactas y geométricamente imprecisas, produciendo efectos inaceptables para ser considerados finales.



Figura 3. Proyecto Radiolaria, demostrador tecnológico de la impresora D-Shape (Enrico Dini)

Figura 4. Diseño de MX3D para un puente metálico "impreso" en Amsterdam



La impresión de metal 3D es otra técnica relacionada con la construcción que puede ser explorada para la creación de piezas de gran tamaño. Dicha tecnología nació y se ha desarrollado través de técnicas de SLS, aunque su adaptación a los objetos de gran volumen se consigue hoy en día mediante la aplicación de las técnicas de soldadura estándar. Se abren así nuevas oportunidades para la exploración de formas geométricas complejas, refuerzos intrincados, construcciones temporales, y sistemas de prefabricación avanzadas. El proyecto MX3D, por ejemplo, tiene como objetivo la construcción de un puente de metal a gran escala en Amsterdam.

Como puede verse, hay un amplio espectro de enfoques, estrategias y procedimientos relacionados directamente con construcción integrada con ordenadores, y particularmente involucrados a tecnologías de impresión 3D a escala real. Así pues, es posible identificar oportunidades excepcionales en torno a:

- la mejora de flujos de trabajo, mediante la estandarización y la escalabilidad
- la minimización del impacto ecológico, desde una doble vertiente (Liébana y Nadal, 2016):
  - la optimización del uso de materiales,
  - el uso de materiales reciclados y respetuosos con el medio ambiente
  - el ahorro de energía mediante el uso de fuentes de energía locales y renovables
- la localización específica sin coste añadido de los centros de producción in situ
- la fabricación de piezas ad-hoc sin costo adicional

### **Estandarización, prefabricación, oportunidades de la impresión 3D para la construcción**

La prefabricación es una realidad en los procesos de construcción de los países desarrollados, donde la mano de obra se ha convertido en un activo altamente especializado y costoso. La industria es capaz de producir todo tipo de elementos de construcción en una amplia gama de materiales y formas: paneles sándwich, partes estructurales prefabricados, o incluso unidades de vivienda completas son algunos ejemplos extendidos. Técnicas como la fundición, el moldeo, la extrusión, la inyección y otras son muy utilizadas en la fabricación de piezas industriales para casi todos los usos imaginables.

Sin embargo, el sector de la construcción impone una serie de límites por su propia naturaleza metamórfica. El uso de moldes sólo tiene sentido cuando la producción total de parte es muy alto, disminuyendo el impacto en el precio de cada pieza o cuando las formas no se limitan a ciertas restricciones geométricas normalizantes. Dado el carácter específico de los proyectos de construcción, no es posible lograr un proceso de serialización semejante al de la industria del automóvil, por ejemplo.

La impresión en 3D en construcción, puede dirigirse, por tanto, hacia la reducción de la brecha con la serialización personalizada, creando un espacio intermedio entre piezas industriales y la construcción tradicional. Aunque mucho se ha dicho acerca de los beneficios de la impresión en 3D y las previsiones del mercado predicen su crecimiento exponencial, parece lógico para determinar con precisión el efecto real de la impresión 3D para el sector de la construcción, aunque sea con un carácter marcadamente especulativo. La tecnología de impresión 3D adquiere mayor significado precisamente donde otros métodos de fabricación no pueden operar debido a restricciones geométricas o de tamaño. Como consecuencia, se puede aplicar a una serie de productos y métodos, tales como fundiciones complejas, estructuras prefabricadas o monolíticas, construcciones temporales, partes no estructurales, y otros componentes que pueden requerir un alto grado de personalización. Además, puede responder a la demanda de producción rápida de series de partes semejantes pero diferenciadas, tales como paneles de fachada especiales o particulares en su concepción. Dicho panelado está presente en edificios singulares de todo el mundo y ha sido posible gracias a la implementación de software paramétrico para arquitectura y construcción (Strauss y Knaack, 2016) y puede tener repercusiones relevantes en las metodologías de diseño urbano (Nadal, A. y Pavón, J., 2014)

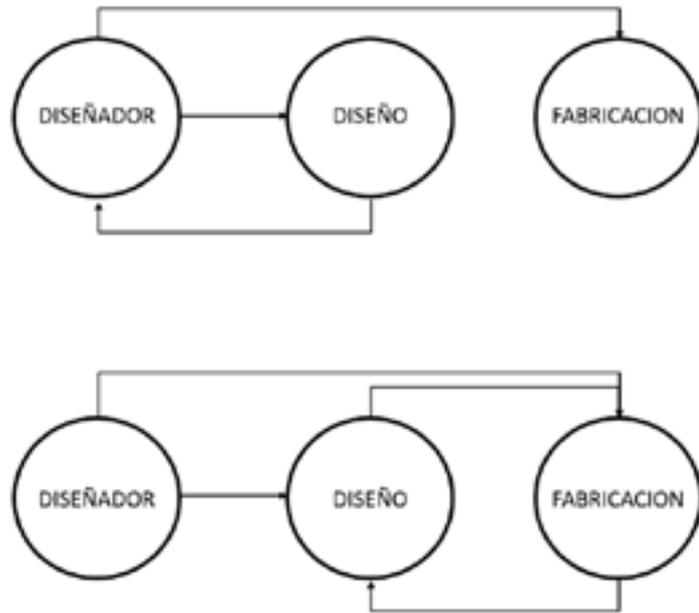
#### *La importancia de los materiales en técnicas de impresión 3D en construcción*

Este artículo propone asimismo un enfoque integral para hacer frente a cuestiones relacionadas tanto con la implementación de un paradigma integrador desde el diseño hasta la producción, como a la optimización de material. Estos extremos se consiguen, por un lado, mediante el empleo de brazos robóticos, y, por el otro, mediante la generación de modelos imprimibles sensibles a las características y comportamientos específicos de materiales de construcción. De este modo, se pretende aunar la metodología de diseño con los procesos constructivos y un control de la lógica estructural de las piezas en un único flujo de trabajo.

El análisis de esfuerzos se lleva a cabo a través de modelos 3D que se caracterizan como representaciones de elementos finitos y se emplean como instrumentos de la búsqueda de forma. Este método permite un comportamiento basado en propiedades del material, así como su organización y comportamiento. La integración de todo el proceso desde el diseño hasta la fabricación combina sistemas integrados de robótica (IRS) y técnicas de fabricación aditiva (Tibaut et al., 2014 y Panetto, 2007) (ALM).

Este enfoque proporciona soluciones factibles, viables tecnológicamente, y asequibles para la producción de piezas de gran escala en el sector de la construcción. Se introduce por tanto un nuevo nivel de inteligencia en los principales aspectos tratados:

Figura 5. Ciclos e interacciones de diseño a fabricación.



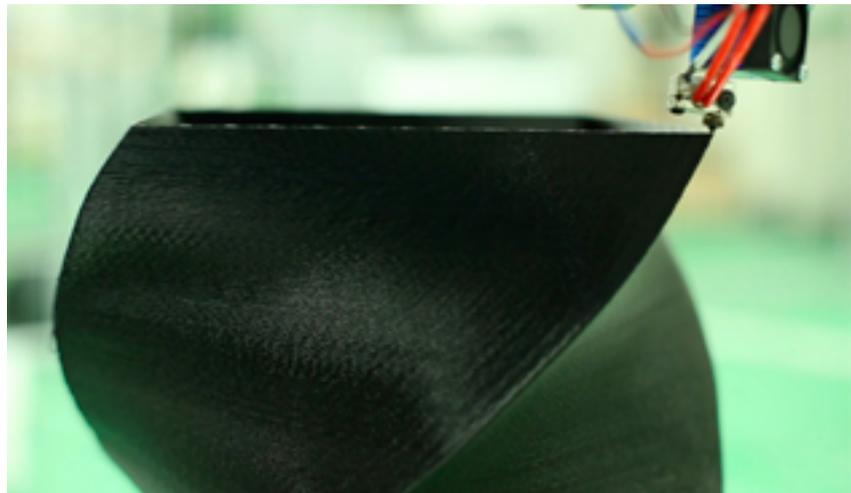
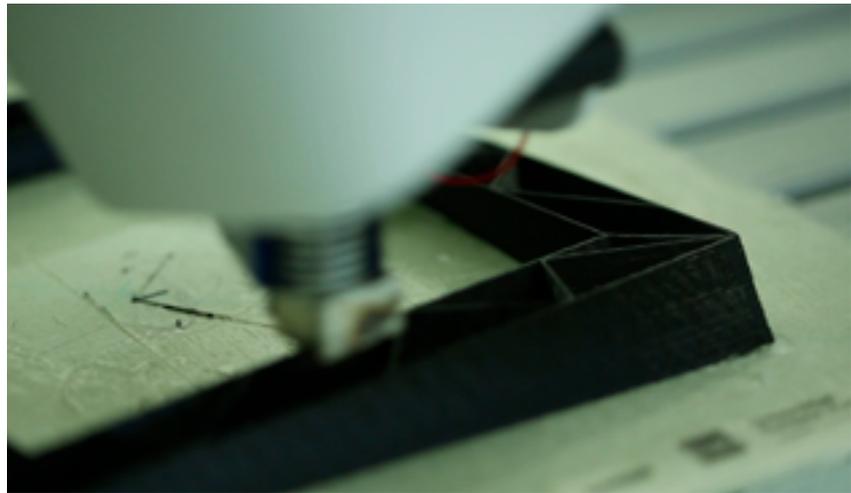
- Flujo de trabajo: la integración de los procesos de diseño a la producción.
- Materiales: reducción del uso de materiales y la huella de carbono asociada a la fabricación a través de un único proceso de producción (Ferrer y Spairani, 2009; Braungart y McDonough, 2003).
- Software: democratización mediante una plataforma que traduce ideas de diseño en código de máquina que hace innecesario que los usuarios tengan altos niveles de experiencia.
- Hardware: uso de robots de 6 ejes. Estos son fácilmente transportables son capaces de moverse libremente en el espacio 3D sin las limitaciones propias de otros métodos de impresión 3D de gran tamaño. Esto resulta en una reducción significativa de los costos de transporte. Por último, es una tecnología particular escalable.

Los flujos de trabajo actuales de diseño y fabricación requieren una gran implicación por parte del usuario. Como solución a la automatización de tareas no críticas, se crea un único ciclo que relaciona de forma automática los modelos virtuales con la propia fabricación, incluyendo soluciones de refinamiento de diseño para su adaptación.

Esto se logra mediante la inclusión de todos los requisitos de fabricación en pequeños paquetes de software que funcionan como “intérpretes” o “traductores”. Los diseños son analizados por el software, que resuelve posibles defectos o informa al usuario de las modificaciones que deben llevarse a cabo. Estos paquetes se integran en plataformas de modelado 3D existentes (tales como Rhinoceros), y resuelven, como se ha dicho, la interacción con la máquina y su configuración, así como la interacción física presente en cualquier paradigma CNC (Reintjes, 1991). No se desea crear una interfaz de usuario de diseño universal, sino aprovechar el amplio mercado existente de software CAD-CAM y usarlo como base para herramientas completamente integradas, que se ocupen de los aspectos más oscuros y abstractos de la interacción hombre-máquina.

Figura 6. Imprimiendo un objeto terminado a escala real con un robot ABB IRB 1600 (detalle).

Figura 7. Detalle del acabado de la pieza con una resolución de 0.1mm durante la impresión.



#### *Uso de brazos robóticos como herramientas de impresión a gran escala*

El formato STL ha demostrado ser útil para impresoras de 3 ejes, pero los brazos robóticos tienen un sistema de movimiento dependiente del fabricante, lo que los hace difícilmente estandarizables. Los principales proveedores de robots en el mundo (Technavio, 2016) proporcionan soluciones integradas de software y hardware. Como consecuencia, hay muchas oportunidades emergentes susceptibles de ser exploradas, especialmente en el sector de la construcción (Reboli et al., 2011).

Los robots pueden ser considerados como simples brazos, definidos como una serie de articulaciones y ejes. A diferencia de otros métodos de fabricación, los robots de 6 ejes no tienen limitaciones geométricas inherentes a parte de su propio tamaño -que es fácilmente ampliable mediante la introducción de raíles o ejes externos. El proyecto Space Frame muestra que es posible imprimir sin material de apoyo (Gramazio y Kohler, 2016), lo que demuestra que los robots superan la lógica de capa por capa cuando se utilizan como recurso para la impresión 3D. Por lo tanto, estas máquinas pueden crear estructuras espaciales que pueden reemplazar aquellas creadas con otras técnicas más genéricas.

Una vez más, el empleo de materiales apropiados (PLA o materiales derivados ABS, materiales similares al cemento, o compuestos) favorece la producción de objetos a escala real, ya sea para la automoción, aeroespacial, industrias del sector de la construcción, u otras.<sup>1</sup>

### **Hacia un marco integrador del diseño a la fabricación para la construcción**

#### *Tendencias actuales en el modelado y fabricación de arquitectura.*

Las metodologías de diseño de edificios contemporáneos implementan Building Information Modeling (BIM) como plataformas de integración de bases de datos de construcción. BIM busca unir a toda la información relacionada con los edificios en modelos integrales que permiten una interacción de los diferentes agentes involucrados en el proceso de construcción, y una coordinación de las diferentes disciplinas que intervienen en el mismo. Eventualmente, la implementación global de sistemas BIM permitiría una interacción directa y desde el comienzo del diseño de dichos actores, lo que resultaría en un control sin precedentes del proyecto desde la fase de conceptualización hasta su ejecución y entrega. Asimismo, dichas tecnologías facilitan la gestión posterior del inmueble mediante el modelo virtualizado y la posibilidad de actualizar la base de datos en tiempo real. Sin embargo, estas metodologías ignoran en gran medida las posibilidades de las tendencias actuales de fabricación y construcción. Otra desventaja de este tipo de software es, curiosamente, su tendencia a la estandarización. Aunque dicha tendencia puede entenderse como una perspectiva razonable, puede ser perjudicial en un ámbito tan cambiante como el de la fabricación digital.

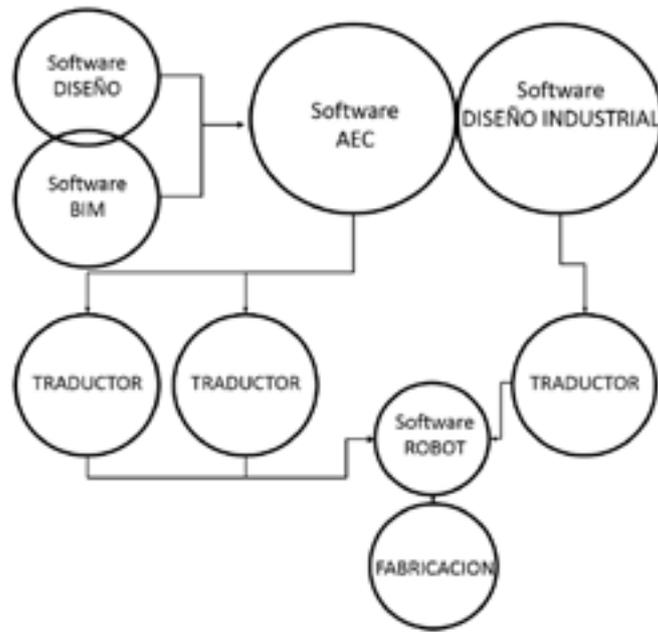
El auge y la popularización de la fabricación digital para la arquitectura e ingeniería han experimentado un crecimiento sin precedentes en los últimos años. Cada vez más escuelas de arquitectura disponen de un espacio de fabricación (Fab Lab), y estándares como el sello FabAcademy del MIT están tomando una importancia cada vez mayor. La cercanía a métodos de fabricación digital está adquiriendo presencia en proyectos de todo el mundo, a las más diversas escalas: corte láser, fresado, e impresión 3D a pequeña escala son métodos presentes en las escuelas de arquitectura de todo el mundo. No obstante, las consecuencias de esta revolución en el desarrollo del ejercicio profesional están por determinar.

A pesar de los importantes progresos realizados en CAD/CAM, el flujo de trabajo actual desde el diseño hasta la fabricación puede ser todavía difícil de recorrer para arquitectos, diseñadores y constructores. La concepción del diseño continúa emergiendo de bocetos bidimensionales que se transforman en modelos CAD tridimensionales en el mejor de los casos. Esto se puede lograr a través de modelado tradicional, o por medio de la captura de un objeto real con un dispositivo de

---

1. Según technavio, “[...] the field of robotics technology demands continuous exploration and innovation, there are a lot of untapped opportunities [...]. This prompts many robot OEMs and new start-ups to innovate and invest in this technology. The major vendors such as ABB, iRobot, and KUKA are investing heavily in R&D to remain ahead in the market”.

Figura 8. Flujo de trabajo propuesto con automatización de tareas de fabricación no críticas.



escaneado 3D. En cualquier caso, tanto diseñadores como fabricantes han de utilizar herramientas propietarias específicas que requieren alta cualificación. Como consecuencia, el proceso sufre de una separación entre el diseñador y la fabricación o construcción.

La expansión de programas de diseño paramétrico en arquitectura y diseño ha dado lugar a varios intentos de hacer frente a esta situación no deseada. HAL, Firefly, Robots.IO, y otros tienen la intención de cerrar la brecha entre el diseño y la producción a través de Grasshopper. Sin embargo, esto añade otro nivel de complejidad a la ecuación, ya que reemplaza el software CAM se ha mencionado anteriormente con una interfaz de programación visual aún más complejo para Rhinoceros.

Así pues, se hace necesario un modelo de software y hardware estandarizable y de uso sencillo.

#### *Un nuevo marco integrador de fabricación.*

El proceso propuesto permite beneficiarse de las ventajas de la verificación de modelos en tiempo real con el fin de reducir el tiempo y coste de proyecto, permitiendo un aumento significativo de la productividad y la calidad.

El software consta, por tanto, de dos núcleos: motor de cálculo de geometría, y traductor. El primero calcula la trayectoria de la herramienta del robot en el programa CAD base, mientras que el segundo traduce este resultado en un código legible por máquina para cada modelo de robot a través de un motor de cinemática inversa (IK). Además de eso, el software realiza comprobaciones básicas a fin que el usuario sea capaz de visualizar durante la fase conceptual si un diseño se puede fabricar. Por último, el software crea los archivos y protocolos que se requieren para mover el robot.

Figura 9. Interfaz de interacción con el brazo robótico para impresión 3D.



Este enfoque constituye un hito para la estandarización de la robótica orientada a la fabricación (Choi et al., 2005) y la evolución de los procesos implicados en ello.

Junto a estas ventajas metodológicas, el enfoque permite:

- La comprobación de diseño en tiempo real, así como minimizar o incluso eliminar errores antes de la ejecución y fabricación: prevención avanzada de errores, colisiones, singularidades, y detecciones de rango. Dichas prevenciones pueden tener consecuencias económicas muy positivas en la puesta en obra, donde se comprueba que el 80% de los defectos proviene de errores humanos (Del Solar et al., 2014)
- Simulación del proceso, incluyendo:
  - Tiempo,
  - Costes de fabricación y,
  - Necesidades materiales y ajustes preestablecidos
- Fácil interacción e información, un aspecto clave de la normalización.

Como muestra la figura 8, la participación del usuario disminuye gradualmente desde el diseño hasta la producción. Los diseñadores se centran en la creación de diseños integrales que responden a sus expectativas sin tener que preocuparse por la fabricación. Asimismo, el software se presenta modularmente para mejorar su implementación como solución integrada.

### *Búsqueda de forma: optimización de material con sistemas de relleno estructurales*

La impresión en 3D de gran tamaño tiene un gran potencial de ahorro de costes de material, que representan aproximadamente un 60% al 70% de los costes totales de construcción (Castañeda et al. 2015). El sector de la construcción, además, es responsable del uso del 40% de

los recursos naturales extraídos en los países más industrializados, así como de la producción de entre el 40% y 60% de los residuos almacenados en vertederos (Franzoni, 2011). Como consecuencia, se propone un método novedoso para la optimización del uso de material a través de un sistema estructural de patrón de relleno que implementa propiedades físicas de los materiales. Este tipo de propiedades son asimismo susceptibles de estudio junto a otros impactos (Alarcón, 2012).

El programa ofrece opciones sencillas de ajustes preestablecidos de diversos materiales que se pueden modificar, clasificar, y extender por el usuario. *Estas* configuraciones incorporan los siguientes comportamientos:

- Los tiempos de endurecimiento,
- Las velocidades máximas del robot, y la orientación de la herramienta,
- Los ajustes de impresión estructurales.

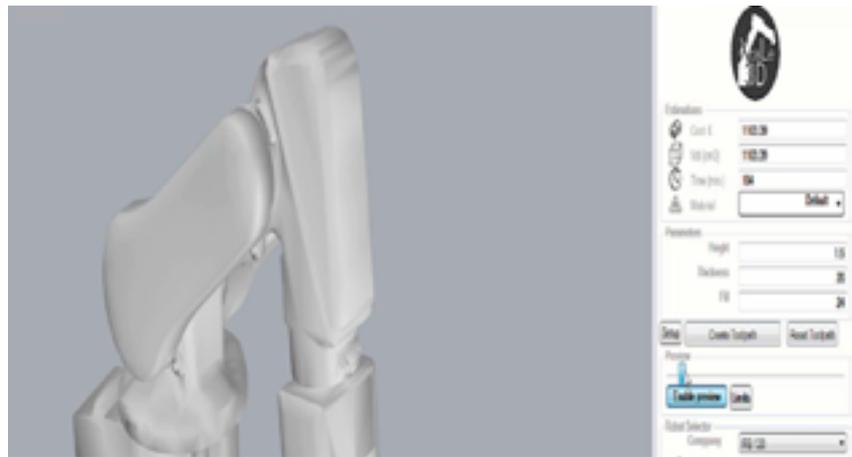
Además de las condiciones materiales, es importante señalar la lógica de los patrones de relleno utilizados en partes impresas en 3D. A diferencia de los patrones espaciales estándar, el sistema presentado en este documento ofrece un enfoque estructural a la optimización de material. La reducción al mínimo el uso de material no sólo es una demanda industrial y una necesidad de viabilidad, sino también una de las mayores contribuciones de la tecnología de impresión 3D. Además, este hecho constituye una reducción directa de la huella energética de los edificios a todos los niveles.

Esta estrategia apoya el análisis estructural de las partes, produciendo patrones de respuesta a esfuerzos. El algoritmo, actualmente en periodo de verificación y testeo, funciona de una manera multi-fase, incluyendo (i) entrada de datos, (ii) la traducción de modelos 3D en elementos finitos, (iii) la exportación al software independiente de cálculo basado en Proceso (Reas y Fry, 2014), (iv) la caracterización de materiales, y (v) el uso de la lógica física para determinar el espesor real del material depositado. El software de cálculo se ha probado en ABS y PLA con fibra de carbono.

Para fines de construcción, el uso de hormigón está ganando adeptos rápidamente (Lim et al., 2012) dentro del ámbito de la impresión 3D a gran escala (Buswell et al., 2007). Las partes se han probado en condiciones autoportantes principalmente, aunque pueden implementarse más fuerzas. El sistema se está desarrollando para cumplir con las fuertes regulaciones presentes en el marco normativo español relativas al hormigón estructural, incluidos en la EHE-08 (Ministerio de Fomento, 2008). Por otro lado, sería interesante incorporar materiales que recojan las cada vez más empleadas Declaraciones Ambientales de Producto (DAP), que están a su vez normalizadas de acuerdo a las normas ISO (ISO14025, ISO 21930) y CEN (prEN 15804 y prEN 15804), y permiten mejorar la toma de decisiones en proyecto y para el cliente final (Gazulla, 2012).

Como resultado de lo anterior, se pretende hacer converger los límites entre elementos de construcción anteriormente separados. En la construcción tradicional, éstos se diferencian no sólo de acuerdo a organizaciones estructurales o arquitectónicas, sino según su correspondiente fase de puesta en obra.

Figura 10. Simulación del proceso de impresión con un brazo robótico IRB 120 (Créditos: XcaLe3D).



Los patrones estructurales optimizados de impresión 3D podrían poner fin a esta diferenciación y dar cuenta de la relación sinérgica entre el rendimiento y la integridad material. En última instancia se trata de aunar los experimentos físicos que clasifican la forma de acuerdo a las aplicaciones de carga y el mundo digital, donde éstos pueden ser simulados y estudiados antes de la toma de decisiones del diseñador. Siguiendo aún más esta línea de la lógica, la noción de “form-finding” (búsqueda de forma) atribuida a Frei Otto (Otto, 1995) adquiriría un significado más amplio.

### Conclusiones

La fabricación aditiva para la construcción es aún una tecnología por explorar. Su capacidad de influir positivamente en el impacto medioambiental del sector ofrece muchas posibilidades, tanto desde el punto de vista procedimental como desde la capacidad que ofrece de repensar la práctica profesional desde la sostenibilidad material a todos los niveles. De las diferentes opciones disponibles en el mercado, la robótica ofrece la mayor versatilidad y capacidad de escala.

En este trabajo se ha presentado un marco para un proceso integrado del diseño a la fabricación y un enfoque basado en el estudio de los. La integración se realiza a través una serie de “traductores” como caso de estudio y demostrador. Asimismo se ha validado el proceso con una variedad de robots de ABB, lo que demuestra la interoperabilidad entre las herramientas de software que apoyan el diseño, la gestión de modelos y adecuación al proceso de fabricación física. Por último, se presenta un algoritmo orientado estructuralmente para la creación de patrones de relleno. El rendimiento global del software, hardware y estudio de material combinado mejora el de las impresoras 3D estándar tanto en velocidad y volumen como en calidad del acabado.

Asimismo, se exponen una serie de ventajas y cuestiones clave en relación con la construcción y la sostenibilidad que han de ser exploradas para determinar el potencial de la impresión 3D en el ámbito de la construcción:

- Control de residuos, la producción sin desperdicios, y la reducción de la huella de la construcción en el momento de la construcción a través de una minimización de los costos de operación y optimización del tiempo, así como de la huella energética.

-----  
Figura 13. Vista desde el Noroeste de la estructura, con forjados y fachadas desnudas, de la Lovell Health House durante su montaje.

Figura 14. El belvedere y la piscina vistos desde el Noroeste de la Lovell Health House ya terminada.

- El uso de materiales orgánicos y reciclados para las partes no estructurales. Los materiales orgánicos, en contraposición a los tradicionales, puede obtenerse fácilmente a partir de sus homólogos de las materias primas y son reciclables. Asimismo, se abre el abanico a la reutilización de material o al aprovechamiento energético de materiales no reciclables.
- Reducción de errores humanos en las obras de construcción a través de la automatización y mecanización del proceso, que representan más del 80% del total de defectos en la construcción de viviendas. La seguridad se vería afectada positivamente.
- El uso de robots in situ permite el acceso a fuentes de energía locales y renovables. Por otra parte, el impacto del transporte se reduce o se elimina, así como sus gastos asociados y la huella de carbono. La impresión 3D tiene la capacidad de recuperar el uso local de materiales esencialmente naturales, que requieran un mínimo nivel de transformación y transporte al proceder de los entornos inmediatos a la construcción
- Mejora de detalles y la calidad del acabado a través de una recualificación de herramientas y mano de obra.

## Referencias y bibliografía

ALARCÓN BARRIO, A. 2012. Sostenibilidad en la construcción. Normalización. *Curso de Sostenibilidad: Eficiencia Energética, Evaluación de Edificios y Estructuras*. S.l.: s.n., pp. 1-13.

BRAUNGART, M., McDONOUGH, W., 2003. *Cradle to Cradle: Remaking the way we make things*. New York: North Point Press. ISBN 0-86547-587-3J

BUSWELL, R.A., SOAR, R.C., GIBB, A.G.F., THORPE, T., (2007) Freeform construction: mega-scale rapid manufacturing for construction. En: *Automation in Construction*, 16(2):224-231, doi: 10.1016/S0926580506000227

CASTAÑEDA E., LAURET B., LIROLA J.M. y OVANDO G., 2015. Free-form architectural envelopes: Digital processes opportunities of industrial production at a reasonable price. En: *Journal of Façade Design and Engineering* 3(1):1-13, doi: 10.3233/FDE-150031

CHOI, H. S., HAN, C. S. K., LEE, Y., LEE, S. H., 2005. Development of hybrid robot for construction works with pneumatic actuator. En: *Automation in Construction*, 14(4): 452-459, doi: 10.1016/S0926580504001219

DEL SOLAR SERRANO, P., DEL RIO MERINO, M., VILORIA, P., NADAL, A., 2015. Analysis of Recurrent Defects in the Execution of Ceramic-Coatings Cladding in Building Construction. *Journal of Construction Engineering and Management*, 142(4):04015093. DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001075

DINI, E. 2016. D-Shape. <http://www.d-shape.com/> [Consulta 24 Enero 2016]

FERRER GRACIA, M.J. y SPAIRANI BERRIO, S. 2009. Análisis de la valoración de la sostenibilidad de los materiales de construcción. *SCTV Barcelona 2009*. Barcelona: s.n., pp. 405-416. ISBN 978-84-8157-601-6.

FRANZONI, E. 2011. Materials Selection for Green Buildings: which Tools for Engineers and Architects? *Procedia Engineering [en línea]*. [Consulta: 20 agosto 2015].

GAZULLA, C. 2012. *Declaraciones Ambientales de Producto: instrumento para la mejora de productos*. S.l.: Universitat Autònoma de Barcelona.

GRAMAZIO, F., KOHLER, M., 2016. Extruded structures gramaziokohler.arch.ethz.ch-web-e-lehre-284.html. [Consulta 30 Marzo 2016]

KHOSHNEVIS, B. 2004. Automated Construction by Contour Crafting –related robotics and information technologies. En: *Automation in Construction*, 13:5-19, doi: 10.1016/j.autcon.2003.08.012

LIEBANA, O., NADAL, A., 2016. Artesanía Digital: 3D Printing in Architecture. En: *Arquitectura Viva: Spanish Solutions: Under 50 the Crisis Generation*. Pp: 70-75. Vol. 187:9. Versión impresa ISSN 0214-1256.

LIM, S., BUSWELL, R.A., AUSTIN, S.A., GIBB, A.G.F., THORPE, T., 2012. Developments in Construction-Scale additive manufacturing processes. En: *Automation in Construction*, 21:262-268, doi: 10.1016/S0926580511001221

Ministerio de Fomento, 2008. Real Decreto 1247/2008, de 18 de Julio, por el que se aprueba la instrucción de hormigón estructural (EHE-08), Anexo 2, Relación de normas UNE recogidas en la EHE-08. Gobierno de España.

NADAL, A. & PAVÓN, J. (2014). The Self-Organizing City: An Agent-Based Approach to the Algorithmic Simulation of City-Growth Processes. Practical Applications of Intelligent Systems, pp. 397-407. The 8th International Conference on Intelligent Systems and Knowledge Engineering, Nov. 20-23, 2013, ShenZhen, China, doi: 10.1007/978-3-642-54927-4\_38. Best Student Paper Award, ISKE, 2014.

OTTO, F., 1995. *Finding Form*, Berlin: Edition Axel Menges.

PANETTO, H., 2007. Towards a classification framework for interoperability of enterprise applications. En: *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 20 (8): 727-740, doi: 10.1080-09511920600996419

REAS, C., FRY, B., 2014. *Processing: A Programming Handbook for Visual Designers and Artists (Second Edition)*, Boston, MT: The MIT Press. ISBN: 9780262028288

REBOLJ D., FISCHER M., ENDY D., et al., 2011. Can we grow buildings? Concepts and requirements for automated nano- to meter-scale building. En: *Advanced Engineering Informatics*, 25(2): pp. 390-398, doi: 10.1016/s1474034610000820

REINTJES, J.F., (1991). *Numerical Control: Making a New Technology, Oxford Series on Advanced Manufacturing, Book 9*, Oxford, Oxford University Press. ISBN-13: 978-0195067729 ISBN-10: 019506772X

STRAUSS, H., KNAACK, U. 2016. The Potential of 3D printed parts for the building envelope, En: *Journal of Façade Design and Engineering*, preprint: pp. 1-12, doi: 10.3233/FDE-150042

TIBAUT, A., REBOLJ D., and NEKREP PERC, M., 2014. Interoperability Requirements for automated manufacturing systems in construction. En: *Journal of Automated Manufacturing*, doi: 10.1007/s10845-013-0862-7, JIMS -1976R2

United States Patent 2010. US Patent No. US 7641461 B2 Khoshnevis, Fecha de Patente: 5 Enero 2010

United States Patent 2010. US Patent No. US 7814937 B2 Khoshnevis, Fecha de Patente: 19 Octubre 2010