

PRINTED BUILDING IN MOROCCO: 3D PRINTED CONCRETE PROTOTYPE FOR THE SOLAR DECATHLON AFRICA 2019 Marrakech. Morocco

UNA VIVIENDA IMPRESA EN MARRUECOS:
PROTOTIPO MEDIANTE IMPRESIÓN 3D EN HORMIGÓN PARA EL SOLAR DECATHLON ÁFRICA 2019
Marrakech. Marruecos

Sánchez Gómez, Santiago^a; Alapont Ramón, José Luis^b; Bono Cremades, Javier^c; Catalán Tamarit, Francisco José^d

^aUniversitat Politècnica de València. *sansncgm@arq.upv.es*

^bUniversitat Politècnica de València. *jalapont@upv.es*

^cArchitect. *jabocre@arq.upv.es*

^dArchitect. *fracata@arq.upv.es*

Architect / Arquitecto: G. Gómez, J. Gamón, F. Catalán, S. Sánchez, A. Ramón, J. Bono, J.L. Alapont, **Constructor / Constructora:** Be More 3d, **Structures / Asesoramiento Estructural:** Be More 3D, **Project-Completion Date / Finalización obra:** 2019, **Photographer / Fotografía:** ©Be More 3D.

<https://doi.org/10.4995/CIAB9.2020.10653>

Abstract: This paper describes the architectural proposal designed to show the capacity of 3D concrete printing for the first edition of the Solar Decathlon Africa competition, which took place recently in Morocco. This approach was a response to specific logistic and programming problems that will be described in this document related to questions of functionality and materials. The planning method used in both the conception and execution phase was based on the concept of parametric design, for which a specific software was developed by the Valencia company Be More 3D, who designed the building according to the required standard characteristics. The idea behind this prototype was to obtain a practical and useful model that would satisfy the future demand for mass-produced low-cost housing.

Key Words: 3D concrete printing; parametric design; additive manufacturing; low-cost housing; Solar Decathlon.

Resumen: Se presenta la propuesta arquitectónica diseñada con motivo de demostración de la tecnología de impresión 3D en hormigón, realizada en el marco de la primera edición del concurso Solar Decathlon África en Marruecos. El planteamiento responde a unas necesidades logísticas y programáticas concretas que se abordarán en esta comunicación, y que tienen que ver con aspectos funcionales y materiales. Se ha empleado una metodología de proyecto basada en el diseño paramétrico, tanto en la fase de concepción como en la de la propia ejecución, para la que se ha desarrollado software específico, y que fue llevada a cabo con la tecnología de la empresa valenciana Be More 3d, diseñando la vivienda según unos determinados estándares y características solicitadas. Este prototipo se enfocó a la obtención de un modelo con utilidad real, destinado a cubrir las necesidades de futuras viviendas concebidas para la producción masiva y de bajo coste.

Palabras clave: impresión 3D hormigón; diseño paramétrico; fabricación aditiva; vivienda de bajo coste; Solar Decathlon.

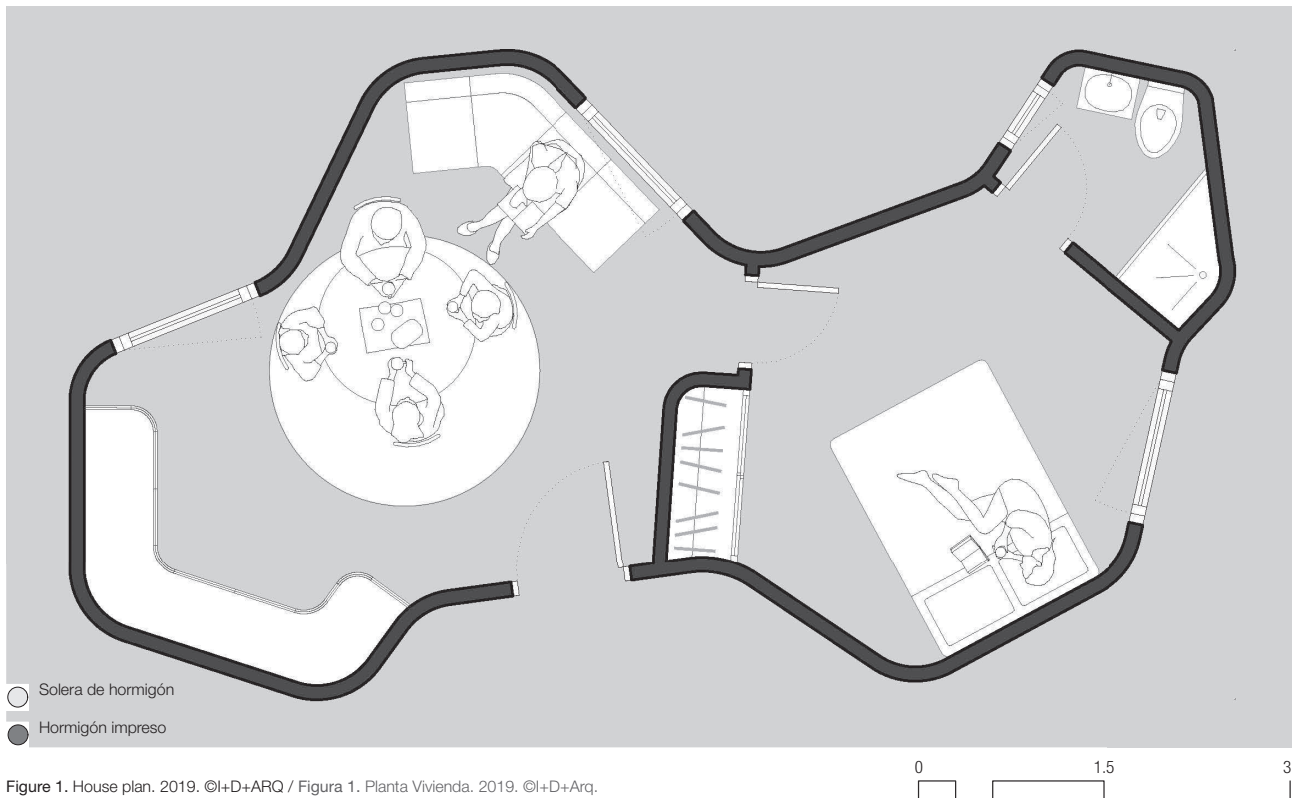


Figure 1. House plan. 2019. ©I+D+ARQ / Figura 1. Planta Vivienda. 2019. ©I+D+Arq.

Approach

The international architectural competition *Solar Decathlon Africa*¹ was held last September in Morocco. The different events involved in the competition included research activities on new building methods. The organization got into contact with *Be More 3D*,² and proposed that they should prove that they could build a house in less than one week. *I+D+Arq*, the design group that belongs to the UPV's *Generación Espontánea* carries out research on "Architecture 4.0" and adaptive design³ by means of innovative building methods.⁴

The design was for a 40 m² house with a simple functional program, consisting of a dining/living-room, one bedroom and a bathroom on a single floor (fig. 1).

Planteamiento

El pasado septiembre se celebró en Marruecos el Solar Decathlon África.¹ Entre los distintos actos programados para esta competición internacional de arquitectura, se plantearon actividades sobre investigación en vivienda y sistemas constructivos novedosos. La organización contactó con *Be More 3D*,² proponiéndole construir una vivienda en menos de una semana. El grupo de investigación *I+D+Arq*, perteneciente a *Generación Espontánea* de la UPV, como su equipo de diseño, investiga en *arquitectura 4.0* y diseño adaptativo,³ empleando metodologías innovadoras en la construcción.⁴

El diseño debía responder a una vivienda de 40 m² con un programa funcional sencillo, formado por un aseo, una habitación y un salón-comedor-cocina, en una sola planta (fig. 1).



Figure 2. Early stage of construction. 2019. ©Be More 3D / Figura 2. Comienzo de la construcción. 2019. ©Be More 3D.

Planning method: place, program and technology

The idea was based on the traditional design of rural houses in Morocco, in which baked clay and adobe are the widely used raw materials and the dwellings have curved outlines but not always orthogonal geometries (fig. 2).

Due to the site available and the required surface area, the house was designed as a free plan bi-nuclear organism and the bedroom was separated from the living room by a single partition at its narrowest point.

The characteristics of both rooms did not simply depend on their size, but also on their relationship with the continuously curved outer wall, so that the bedroom and bathroom were placed in the narrowest section, leaving the larger area for the living/dining room and kitchen in the bi-lobular section, to give the appearance of more space.

The angles of the continuous outer wall were smoothed out into curves and are perfectly adapted to both the geography and the climate as regards taking full advantage of the technological potential of 3D printing with structural concrete.

Metodología proyectual: lugar, programa y tecnología

La idea está inspirada en las viviendas tradicionales del entorno rural de Marruecos, que emplean materiales terrosos como barro cocido o adobe, generando geometrías con encuentros curvos y trazados no siempre ortogonales (fig. 2).

A partir del solar disponible y la superficie requerida, se pensó la vivienda como un organismo binuclear de planta libre, separando día y noche con una única partición intermedia, en un estrechamiento de su geometría.

El carácter y la cualificación de ambas estancias reside no sólo en su tamaño, sino en su relación con el perímetro sinuoso y continuo. Así, se ubicó la habitación con el aseo en el ámbito más reducido, dejando el más amplio para el estar-comedor-cocina, cuyo contorno bilobulado permite disponer de más un ambiente en tan reducido espacio.

El trazado continuo y unitario del cerramiento, con ángulos suavizados por curvas, se adapta perfectamente, tanto al entorno geográfico y climático, como al uso y al aprovechamiento máximo del potencial de la tecnología de impresión 3D con hormigón estructural.

Software: adaptive parametric design

The project was carried out on parametric design computer software, which generates different adaptive designs with dimensions that vary according to the parameters selected, such as surface area, position, and any special relations between the different parts of the building.

The final design was the result of these conditions and was in the shape of a polygon that defined the outline of the building by means of a curved cell, with the maximum condition being the availability of a continuous printing space measuring 9 x 5.4 x 2.7 m as the optimum printing volume.

On this premise the optimum volume geometry was defined and a 3cm high printing layer was programmed, leaving a 7 cm space between the joints to ensure adequate adherence and structural strength. The final design was entered in the parametric design program, which defined the layers and planned the most precise and effective 3D concrete printing paths.

Software: developing the G-code

The 3D printer and other digital production tools such as laser cutters and CNC milling machines use an automated system known as numerical control (NC), which consists of issuing a series of programmed commands executed by the machine's various motors to carry out diverse tasks, including moving the extruder or extruding material without human intervention. These commands are executed by means of specific codes that contain the coordinates along the extruder's path and its working speed or the amount of material to be extruded at any time. The G-Code or RS-274 programming language was used for this purpose.

I+D+Arq developed a tool able to transform a 3D digital model into a building in the G-Code required by the concrete printing machine to build walls. For this the Grasshopper 3D visual programming software integrated in CAD Rhinoceros 3D modelling software was used.

Rhinoceros 3D was used to model the geometry of the walls by means of 3D surfaces. In this phase of the process it is essential to bear in mind the machine's limitations as regards the size of the model to be printed and the maximum inclination of the parameters.

The geometry with 3D surfaces is uploaded into the definition programmed by Grasshopper 3D so that it can automatically

Software. Definición para diseño paramétrico y adaptativo

El proceso de proyecto se ha desarrollado mediante herramientas de diseño paramétrico informatizado. Así, se generan diferentes diseños de viviendas adaptativas, que cambian su configuración en función de parámetros determinados, como superficie, emplazamiento y las relaciones visuales o espaciales entre las distintas partes de la vivienda.

El diseño final surge como respuesta a estas condiciones, con formas poligonales que definen la unidad de la vivienda, mediante una curva a modo de célula, estableciendo como máximo condicionante la disponibilidad de un espacio de impresión de forma continua de 9x5.4x2.7 metros, como volumen óptimo para la impresora.

Con esta premisa se define una geometría inscrita en el volumen mencionado, programando 3 cm de altura de capa de impresión, dejando una separación entre encuentros de 7 cm para garantizar la adherencia adecuada y resistencia estructural. Una vez finalizado el diseño, se introdujo en el programa de diseño paramétrico para su definición de capas, estableciendo los recorridos precisos y eficientes a seguir por la impresora 3D de hormigón.

Software. Desarrollo de G-code

Las impresoras 3D y otras herramientas de fabricación digital como máquinas de corte láser o fresadoras CNC, emplean un sistema de automatización conocido como control numérico (CN). Éste consiste en ejecutar una serie de comandos programados que, accionando los diferentes motores de la máquina, permiten desarrollar diversas tareas, como el desplazamiento del extrusor o la extrusión del material, sin necesidad de intervención humana. Estos comandos se ejecutan según un código específico que contiene tanto las coordenadas por las que se desplazará el extrusor en todo su recorrido, como la velocidad dicho desplazamiento o la cantidad de material a extruir en cada momento, empleando un lenguaje de programación conocido como G-Code o RS-274.

Desde I+D+Arq se ha desarrollado una herramienta capaz de transformar un modelo digital 3D de una vivienda, en el código G-Code que necesitará la máquina para la impresión en hormigón de sus muros. Para ello se ha empleado Grasshopper 3D, un software de programación visual integrado en la aplicación de modelado en CAD Rhinoceros 3D.

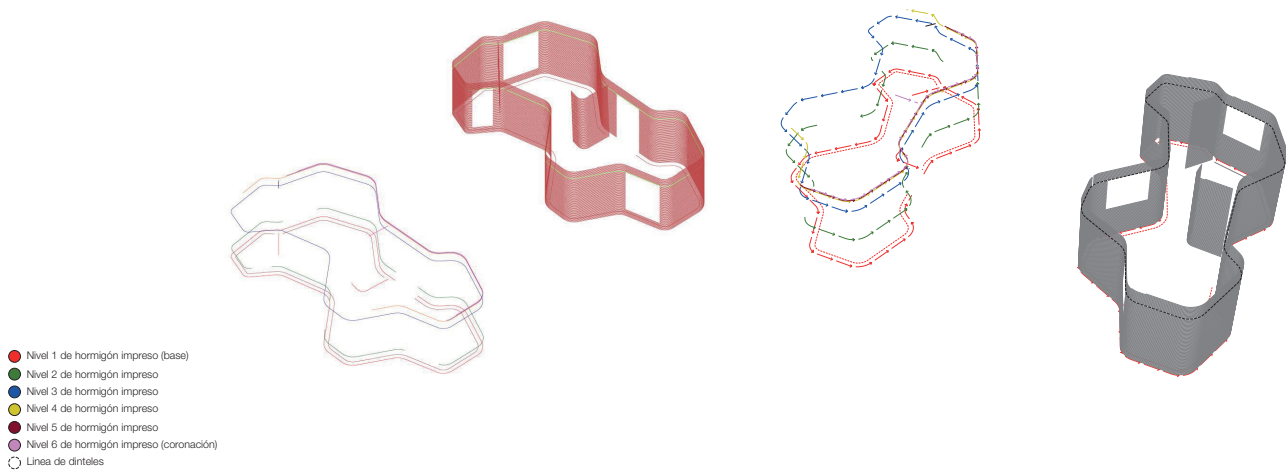


Figure 3. Printing path geometries from two perspectives. 2019. ©I+D+ARQ / Figura 3. Geometría de recorridos desde dos perspectivas. 2019. ©I+D+ARQ.

generate the paths to be followed by the machine and determine its working speed and the amount of material to be extruded. This information is translated by mathematical and logical functions into G-Code programming language as a text file exported from the program to the machine and enables it to carry out the 3D printing (fig. 3).

Building the house and Conclusions

Since the building had to be constructed in Morocco in a very short period of time and without the assistance of certain technical means, the disassembled printer and all the concrete material with the specific dosage for the project had to be transported from Valencia.

After assembling the machine and laying the foundations, the printing process began and was able to produce the house's load-bearing outer walls with the geometry translated into G-Code in only 12 hours (fig. 4).

From this experience it can be concluded that the design is valid, in addition to the spectacular execution speed of a complex geometry at the minimum cost, since cutting execution times always brings down the costs, besides the associated savings in specialised labour, which cannot always be obtained in Africa (fig. 5).

The execution was significantly improved by optimising the printer's working paths, which reduced its movements to the minimum.

Rhinoceros 3D se usa para modelar la geometría de los muros mediante superficies 3d. En esta fase del proceso es fundamental tener en cuenta las limitaciones de la máquina, éstas son las restricciones en cuanto al tamaño del modelo a imprimir, así como la inclinación máxima de los paramentos.

Dicha geometría, con superficies 3D, se carga en la definición programada con Grasshopper 3D, para que ésta, de manera automática, genere los recorridos que deberá realizar la máquina y determine, en cada tramo de éste, cuál debe de ser la velocidad de movimiento y la cantidad de material extruido. Esta información se traduce mediante funciones matemáticas y lógicas al lenguaje de programación G-Code, como un archivo de texto exportado desde el programa y transferido a la máquina para ejecutar la impresión (fig. 3).

Construcción de la vivienda. Conclusiones

Dado que la vivienda debía ser construida en Marruecos en un tiempo muy limitado y sin certeza de contar con medios técnicos adecuadas, fue necesario enviar desde Valencia, además de la impresora desmontada, todo el material de impresión con la dosificación adecuada específica para el proyecto.

Una vez montada la máquina la cimentación proporcionada, se comenzó a imprimir la estructura portante vertical vivienda con la geometría traducida al G-Code, empleando tan solo 12 horas (fig. 4).



Figure 4. Detail of printing. 2019. ©Be More 3D / Figura 4. Impresión al detalle. 2019. ©I+D+ARQ.



Figure 5. Porosities on the ground floor. 2018. ©Be More 3D / Figura 5. Impresión 3D en el SDA. 2018. ©Be More 3D.

One possible improvement would be to limit the maximum concrete volume as a design parameter to be borne in mind when generating the building's geometry, as this would further improve the machine's efficiency.

For all the above reasons, the method and system described here can be considered to now form part of *Industry 4.0* applied to the construction industry, with a prototype with a specific utility, or in other words *Architecture 4.0* can be said to be in the process of being created (fig. 6).

De esta experiencia puede concluirse la validez del diseño, añadiendo a la espectacular velocidad de ejecución de una geometría compleja, la ventaja del mínimo coste, pues reducir tiempos implica siempre reducir costes, ahorrando además en mano de obra especializada, no siempre disponible en el continente africano (fig. 5).

Mediante los sistemas de optimización de recorridos, que disminuyen al mínimo los movimientos de la impresora, se mejoran de forma significativa los tiempos de ejecución.

Como posible mejora, se trabaja con la limitación del volumen de hormigón máximo a emplear como parámetro de diseño a tener en cuenta en la generación de la geometría de la vivienda, para mejorar la eficiencia de la maquinaria empleada.

Por todo lo expuesto, se considera que, con la metodología y sistema expuestos, se entra de lleno en la industria 4.0 aplicada a la construcción con un prototipo de utilidad concreta. Es decir, se está produciendo *arquitectura 4.0* (fig. 6).



Figure 6. Final prototype. 2019. ©Be More 3D / Figura 6. Prototipo final. 2019. ©Be More 3D.

Santiago Sánchez Gómez. Degree in Fundamentals of Architecture (2016) and Master in Architecture (2017), PhD student (2017-2020), UPV. Intest FPI in Department of Architectural Projects at the UPV and the Instituto Universitario de Restauración del Patrimonio of the UPV (IRP) with the ROBIM project.

José L. Alapont Ramón. Architect (1997), PhD cum laude (2016), UPV. Associate Professor, Department of Architectural Projects at the UPV since 2001. Deputy Director of Architecture Area at the Instituto Universitario de Restauración del Patrimonio of the UPV (IRP). Associate Professor at the Master's Degree in Building Rehabilitation and Urban Regeneration (RERU), organized by Generalitat Valenciana and UPV through the Instituto Valenciano de la Edificación. Much of his current research is focused on housing, recycling and sustainability of the urban environment, specially in social housing and strategies to improve habitability.

Javier Bono Cremades. Degree in Fundamentals of Architecture (2017) and Master in Architecture (2019). UPV Founding member of R&D + Arq UPV. Architect specialized in computational design. He has worked in this area in national and international offices such as EMBT - Enric Miralles Benedetta Tagliabue, QBA - Quino Bono Arquitectos and Arqueha, the office where he currently works. He is currently researching in the field of digital manufacturing developing software for the generation of gcodes from parametric models, and in terms of programming applied to the BIM environment for the elaboration of architectural projects.

Santiago Sánchez Gómez. Grado en Fundamentos de Arquitectura (2016) y Máster en Arquitectura (2017), Estudiante de Doctorado (2017-2020), UPV. Beca FPI en el Departamento de Proyectos Arquitectónicos en la UPV y el Instituto de Restauración del Patrimonio de la UPV (IRP) con el Proyecto ROBIM, Robótica Autónoma para inspección de edificios existentes con integración BIM.

José L. Alapont Ramón. Arquitecto (1997), doctorado cum laude (2016) en la UPV. Profesor Contratado Doctor, Departamento de Proyectos Arquitectónicos de la UPV desde 2001. Subdirector del Área de Arquitectura del Instituto Universitario de Restauración del Patrimonio de la UPV (IRP). Profesor Asesor en SDE19, equipo Azalea UPV. Gran parte de su investigación actual está centrada en la vivienda, el reciclaje y la sostenibilidad del habitat urbano, en especial en vivienda social y estrategias de mejora de la habitabilidad.

Javier Bono Cremades. Grado en Fundamentos de Arquitectura (2017) y Máster en Arquitectura (2019). Miembro fundador del grupo I+D+Arq en la UPV. Arquitecto especializado en diseño computacional. Ha trabajado en estudios nacionales e internacionales de arquitectura como EMBT - Enric Miralles Benedetta Tagliabue, QBA - Quino Bono Arquitectos y Arqueha, el estudio donde trabaja actualmente. Actualmente investiga en el campo de la fabricación digital desarrollando software para la generación de "G-Codes" para modelos paramétricos, y en temas de programación aplicada al entorno BIM para la elaboración de proyectos arquitectónicos.

Francisco J. Catalán Tamarit. Degree in Fundamentals of Architecture (2018) and Master in Architecture (2019) by the Polytechnic University of Valencia, Superior Technician Researcher (2020) at Institute for the Heritage Restoration of the UPV (IRP). His research line is focused on architectural visualization, advanced visualization techniques and Building Information Modeling Management.

Notes

- ¹ The SD competition was conceived in the US with the idea of promoting sustainable buildings among university students. "SDA – Solar Decathlon Africa 2019," accessed November 25, 2019. <https://www.solardecathlonafrika.com/>.
- ² Start-up by the Universitat Politècnica de Valencia, mainly involved in large-scale 3D printing. "Viviendas, Dispositivos y Construcción 3D I Bemore3D," accessed November 25, 2019. <https://bemore3d.com/language/en/home/>.
- ³ "Method of Enhancing Interlayer Bond Strength in 3D Concrete Printing." Taylor Marchment, and Jay Sanjayan, "Method of Enhancing Interlayer Bond Strength in 3D Concrete Printing," in *First RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication*, ed. Timothy Wangler and Robert J. Flatt (Netherlands: Springer, 2019), 148–56. https://doi.org/10.1007/978-3-319-99519-9_13.
- ⁴ "The Cost Calculation Method of Construction 3D Printing Aligned with the Internet of Things." Hongxiang Yang, Jacky K. H. Chung, Yuhong Chen and Yijia Li, "The Cost Calculation Method of Construction 3D Printing Aligned with Internet of Things," *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking* (2018): 147. <https://doi.org/10.1186/s13638-018-1163-9>.

Bibliographic references

- "Viviendas, Dispositivos y Construcción 3D I Bemore3D." Accessed November 25, 2019. <https://bemore3d.com/language/en/home/>.
- Marchment, Taylor, and Jay Sanjayan. "Method of Enhancing Interlayer Bond Strength in 3D Concrete Printing." In *First RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication*, edited by Timothy Wangler and Robert J. Flatt, 148–56. Netherlands: Springer, 2019. https://doi.org/10.1007/978-3-319-99519-9_13.
- Yang, Hongxiang, Jacky K. H. Chung, Yuhong Chen and Yijia Li. "The Cost Calculation Method of Construction 3D Printing Aligned with Internet of Things." *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking* (2018): 147. <https://doi.org/10.1186/s13638-018-1163-9>.
- "SDA – Solar Decathlon Africa 2019." Accessed November 25, 2019. <https://www.solardecathlonafrika.com/>.

Francisco J. Catalán Tamarit. Grado en Fundamentos de Arquitectura (2018) y Máster en Arquitectura (2019) por la Universitat Politècnica de València, Técnico Superior de Investigación (2020) en el Instituto de restauración del Patrimonio de la UPV (IRP). Su investigación está centrada en visualización arquitectónica, técnicas de visualización avanzada y Gestión BIM.

Notas

- ¹ El SD es una competición que surge en EEUU con el objetivo de mejorar la sostenibilidad en las edificaciones entre los estudiantes universitarios "SDA – Solar Decathlon Africa 2019," accessed November 25, 2019. <https://www.solardecathlonafrika.com/>.
- ² Start Up surgida desde la Universitat Politècnica de Valencia cuya principal actividad consiste en la impresión de gran formato. "Viviendas, Dispositivos y Construcción 3D I Bemore3D," accessed November 25, 2019. <https://bemore3d.com/language/en/home/>.
- ³ "Method of Enhancing Interlayer Bond Strength in 3D Concrete Printing." Taylor Marchment, and Jay Sanjayan, "Method of Enhancing Interlayer Bond Strength in 3D Concrete Printing," en *First RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication*, ed. Timothy Wangler and Robert J. Flatt (Netherlands: Springer, 2019), 148–56. https://doi.org/10.1007/978-3-319-99519-9_13.
- ⁴ Tal y como se dice en el artículo escrito por Yang et al. En 2018, "The Cost Calculation Method of Construction 3D Printing Aligned with Internet of Things." Hongxiang Yang, Jacky K. H. Chung, Yuhong Chen and Yijia Li, "The Cost Calculation Method of Construction 3D Printing Aligned with Internet of Things," *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking* (2018): 147. <https://doi.org/10.1186/s13638-018-1163-9>.