

Nuevos métodos de fabricación digital de paneles de GRC de forma libre

New manufacturing digital processes of free-form GRC panels

E. Castañeda ^(*), B. Lauret ^(*), G. Ovando ^(*), J.M. Lirola ^(*)

RESUMEN

Los paneles de forma libre de GRC son de gran aplicación en elementos de fachadas ligeras. Dichos paneles pueden fabricarse a través de una gran variedad de procesos. Sin embargo, a pesar de sus ventajas como la moldeabilidad, durabilidad y ligereza, se ven penalizados por el elevado precio de los correspondientes moldes, sobre todo si no hay una repetición suficiente de las piezas y la forma del panel difiere de lo convencional. Las nuevas tecnologías digitales permiten diversas posibilidades en el campo de la construcción y la producción de moldes con geometrías complejas. En el presente artículo se presenta una serie de métodos recientes en la fabricación de paneles de GRC de forma libre. Se discutirán ventajas e inconvenientes de dichos métodos, sobre todo la importancia del molde y su repercusión económica. Finalmente se extraerán conclusiones sobre la viabilidad técnica y las posibilidades que se abren con este análisis.

Palabras clave: Hormigón reforzado con fibra de vidrio (GRC o GFRC), arquitectura de forma libre, fabricación digital, panel de fachada, molde doble curvatura.

ABSTRACT

Free-form GRC panels are widely used in lightweight facade elements. Such panels can be manufactured through a variety of methods. Nevertheless, its advantages such as moldability, durability and lightness, are penalized by the high price of the corresponding molds, especially if there is not a sufficient repetition of units. New digital technologies enable innovative possibilities in the field of construction and manufacture of molds with complex geometries. In this paper, a series of manufacturing methods for free-form GRC panels are presented. Advantages and drawbacks of these methods are discussed, especially the role played by the mold and its economic impact. Finally, conclusions of this analysis about its technical feasibility and possibilities are drawn.

Keywords: Glass-fiber Reinforced Concrete (GRC or GFRC), free-form architecture digital manufacturing, façade panel, double-curved mold.

^(*) Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Universidad Politécnica de Madrid (UPM).

Persona de contacto/Corresponding author: estefanacastaneda@gmail.com (E. Castañeda)

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5382-7816> (E. Castañeda); <http://orcid.org/0000-0002-3723-5001> (B. Lauret); <http://orcid.org/0000-0001-9585-9560> (G. Ovando); <http://orcid.org/0000-0003-2978-3697> (J.M. Lirola)

Cómo citar este artículo/Citation: E. Castañeda, B. Lauret, G. Ovando, J.M. Lirola. (2018). Nuevos métodos de fabricación digital de paneles de GRC de forma libre. *Informes de la Construcción*, 70(551): e264. <https://doi.org/10.3989/ic.16.161>

Copyright: © 2018 CSIC. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento 4.0 Internacional (CC BY 4.0).

Recibido/Received: 09/11/2016
Aceptado/Accepted: 28/11/2017
Publicado on-line/Published on-line: 10/09/2018

1. INTRODUCCIÓN

Los paneles prefabricados de hormigón reforzado con fibras de vidrio (Glass-fiber Reinforced Concrete, GRC), se han utilizado tradicionalmente para elementos de fachada preferentemente planos. No obstante, dicho material se ha vuelto popular gracias a la arquitectura contemporánea por su aplicación en los edificios de forma libre (1). Dicha tendencia formal está ganando partidarios, debido a que arquitectos de talla internacional han diseñado edificios icónicos, por lo que es un asunto de relevancia en construcción arquitectónica. Dentro de los ejemplos más emblemáticos construidos con paneles de GRC de doble curvatura están, el Centro Cultural de Heydar Aliyev (2012) en Baku, el Centro de Conferencias para las Olimpiadas Juveniles en Nanjing (2016), el Centro de Estudio de Investigación del Petróleo, Rey Abdullah en Arabia Saudí, los tres realizados por Zaha Hadid, la Fundación Louis Vuitton en París (2014) de Frank Ghery, o el Museo Nacional de Qatar diseñado por Jean Nouvel. Por lo tanto, la arquitectura de formas complejas mediante paneles de GRC, requiere de métodos constructivos que puedan resolver las necesidades de fabricación, y ofrecer un nivel de precisión, calidad de acabado, resistencia elevadas, y un precio asequible.

El GRC es una opción adecuada para cubrir dichos requisitos debido a que es un material con unas excelentes propiedades mecánicas, térmicas, de moldeabilidad, esbeltez y ligereza, además de tener la cualidad de adaptarse a una amplia gama de formas y con la que se pueden obtener diversos acabados superficiales.

En este sentido, el GRC es solo la mitad del proceso, ya que el molde o encofrado es el que determina en gran manera no sólo la forma del panel, sino también del precio. A este respecto debemos considerar que de manera habitual se recurre a un maestro artesano ebanista o escayolista, lo que incrementa el precio de la pieza en general, y si a eso añadimos que es una pieza única y singular, el precio del molde puede representar entre un 40-70 % del coste total del panel.

Las tecnologías accesibles de producción de paneles de GRC están limitadas por varios factores como el precio, pero sobre todo por materiales, la repetición, la precisión y las dimensiones del molde. No obstante, la incorporación de las tecnologías digitales en la industria de la construcción favorecen la creación de métodos o procesos que disminuyen o eliminan el uso de la mano de obra, sobre todo para aquellas con formas libres o de doble curvatura que requieren de encofrados complejos y que pueden requerir pocas piezas. Además, tales métodos favorecen la reducción de residuos, mediante software de optimización y disposición del material (2).

Múltiples aplicaciones constructivas aprovechan el potencial del GRC en fachadas arquitectónicas, sobre todo por su adaptabilidad a las formas fluidas y curvilíneas (3). Por tanto, el presente artículo tiene como objetivo proporcionar una breve revisión del estado actual de la técnica y las innovaciones recientes en la fabricación de paneles de GRC de formas libres para fachadas arquitectónicas, con una especial atención en los procesos digitales que pueden ampliar el marco de desarrollo de la fabricación de paneles no sólo de GRC, sino de hormigón u otros materiales compuestos. Por esta razón se presenta una serie de métodos y tecnologías

eficaces y fiables tanto en su precisión, como en los tiempos de ejecución y reducción de precios, exponiendo los avances tecnológicos y el posible desarrollo dentro de la investigación y la industria.

2. PANELES DE FACHADA DE GRC DE FORMA LIBRE

El proceso del hormigón reforzado con fibras de vidrio (GRC o GRFC) comienza con la fabricación del molde para posteriormente realizar una mezcla de cemento, agua y arena, a la cual se le agregan fibras de vidrio con un contenido de zirconia (ZrO_2) que ronda el 19% lo que permite ser resistente a la alcalinidad del cemento. La adición de dichas fibras (30mm aprox. de longitud) se hace mediante un proceso de pulverizado o de pre-mezclado.

Posteriormente se compacta el GRC recién pulverizado mediante rodillos, se inspecciona el espesor de la mezcla aplicada y una vez que ha alcanzado el valor de diseño y un periodo de curación adecuada, se puede retirar del molde. Para la protección superficial algunas empresas incorporan emulsiones inorgánicas (híbrido de silicona y acrilato) que durante el periodo de curación, libera un compuesto químico inorgánico el cual se instala en la superficie del panel formando una capa de revestimiento protectora (4).

Como regla general en la fabricación de paneles de fachada se utiliza el método de pulverizado. Dicha técnica, permite que el GRC sea mecánicamente más resistente que el pre-mezclado, ya que el contenido de fibra en el primero es de alrededor de 5% al 6%, y en el segundo ronda el 3% al 3,5%, además de que el GRC pulverizado contiene menos cantidad de agua que el pre-mezclado, fortaleciendo de esta manera la pieza. Por tanto tiene una gran resistencia tanto a tracción como a flexión, debido a las fibras de vidrio, las cuales de acuerdo a la orientación de la fibra se puede determinar la resistencia a las cargas (5).

El GRC presenta mayores prestaciones de resistencia que un hormigón normal, y aplicado mediante pulverización con un espesor promedio de 10 a 15 mm (6), hace de este sistema una excelente opción para los paneles de fachada de formas libres.

2.1. Tipología de paneles

Los paneles de GRC habitualmente se fabrican con espesores que rondan los 10 mm, los cuales pueden ser trasdosados o cubiertos por su cara interior de aislante térmico o acústico para mejorar sus prestaciones. Se presentan a continuación una selección de los paneles más utilizados en el mercado de la construcción.

Panel cáscara (Fig 1a): es el más sencillo ya que consiste en una sola lámina de 10 mm de espesor, reforzada en algunos casos por nervios del mismo material que funcionan como travesaños y garantizan la rigidez del sistema. Peso medio 40 kg/m² (7).

Panel sándwich (Fig 1b): está compuesto por dos láminas de GRC de 10 mm de espesor cada una. Se coloca aislamiento térmico en el núcleo y de acuerdo a las necesidades se puede realizar un refuerzo mediante nervios huecos. Peso medio 70 kg/m² (7).

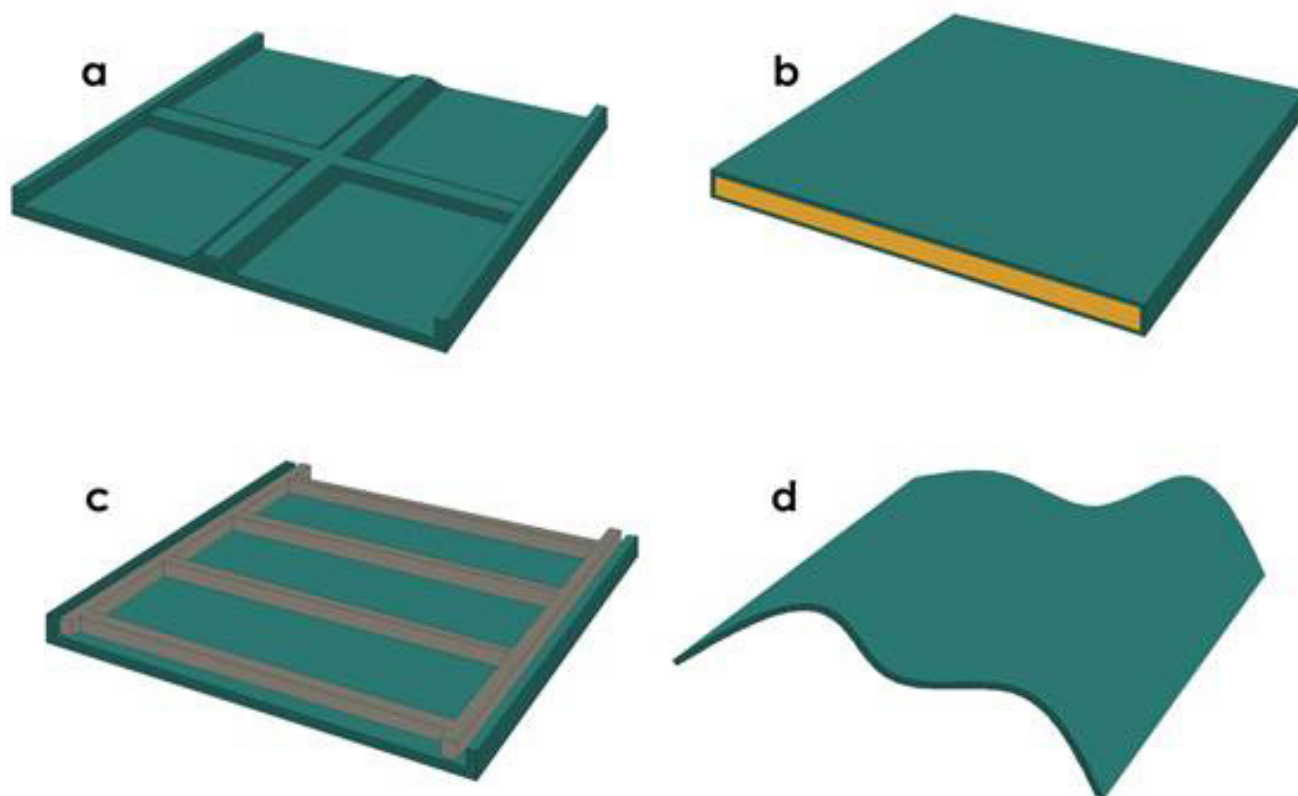


Figura 1. Tipología de paneles. a. Panel cáscara. b. Panel sándwich. c. Panel *stud-frame*. d. Panel de forma libre (fuente propia).

Panel *stud-frame* (Fig 1c): actualmente es el sistema más utilizado ya que se pueden construir paneles de grandes dimensiones. Mediante una estructura auxiliar de acero se conectan las láminas de GRC y puede colocarse también aislante térmico entre los montantes del bastidor. Peso medio 50 kg/m² (7).

Otros (Fig 1d): se refieren a elementos ornamentales, de decoración, mobiliario urbano, elementos de formas complejas, como es el caso de paneles de doble curvatura o forma libre.

2.2. Tipo de moldes

Para la fabricación de los paneles de GRC, los moldes tienen una gran importancia debido a que son estos los que le dan la forma (8). A continuación, se detallarán los más importantes de acuerdo a la clasificación de Van Helvoirt, 2003 (9).

Los moldes estáticos son aquellas estructuras temporales a las cuales se vierte el GRC en estado líquido, y en el momento en que se ha conseguido la suficiente resistencia, el panel es retirado. Este tipo de molde es muy común y se fabrica normalmente en poliestireno (EPS) mediante una cortadora CNC, pero tiene el inconveniente de producir una gran cantidad de residuos. (10).

En el caso de los moldes reutilizables, se comercializaron en la primera década del siglo XX, especialmente los metálicos, los cuales fueron aprovechados para el encofrado modular de construcciones de hormigón. Este sistema evolucionó como se puede ver en el sistema Dominó de Le Corbusier, los prefabricados para el Palacio de los Deportes de los Juegos Olímpicos de Roma 1960 diseñados por Pier Luigi Nervi (11).

Dichos moldes suelen ser de madera, acero o aluminio, no obstante, tienen que estar bajo constante mantenimiento, ya que con el uso continuo se deterioran, generando pequeñas deformaciones al sacar la lámina.

En el caso de los moldes estáticos y reutilizables hablamos de sistemas ortogonales o planos, ya que si se requiere de algún tipo de forma curvada se complica su fabricación, lo que conlleva el encarecimiento del molde y por lo tanto la repercusión en el precio del panel. Tradicionalmente los moldes para piezas curvadas se realizaban en madera, pero solo se puede conseguir el curvado en un sentido, limitando el proceso. En algunos casos se suelen utilizar moldes de arena, barro o goma, que permiten la fabricación de formas complejas, además no generan tantos residuos (12) y pueden ser reutilizados.

Finalmente, el molde flexible se creó con el objetivo de producir paneles de doble curvatura a partir de un dibujo digital en 3D, con una alta calidad de acabado, de manera rápida y eficaz. El sistema pretende la fabricación de elementos únicos, de forma libre y que se puedan realizar en un solo molde. Existen varios estudios sobre el molde flexible como el encofrado mediante textiles de Kok de la Universidad de Delft (13), el de la tesis de West (14) que hace un estudio muy amplio del tema. También están los moldes neumáticos para superficies de pequeño espesor (15), o los moldes adaptativos, como las propuestas de Pronk (16), el FlexiMold de Boers (17), la propuesta de Eigenraam (18), la de Schipper (19), o la de Raun con su "Adaptive Mould" (20). El más utilizado es el molde adaptativo, el cual consiste en una cama de pistones que se ajustan manual o digitalmente en altura para crear la forma deseada (21).

3. MÉTODOS DE FABRICACIÓN DIGITAL DE PANELES DE GRC DE FORMA LIBRE

El potencial de la Fabricación Digital ha evolucionado muy rápidamente con el desarrollo de los ordenadores y los programas informáticos. Por consiguiente, la información de diseño puede ahora ser inequívocamente la información de fabricación, es decir, que la correlación entre estos dos elementos ha potenciado la difusión de las formas libres, ya que mediante el dibujo en el ordenador se puede crear casi cualquier tipo de forma (22), (23).

Actualmente se están estudiando diferentes métodos para encontrar aquellos procesos digitales que sean más eficientes para la construcción. El programa de modelado tridimensional ha abierto un universo en cuanto a las formas complejas, ya que hasta la aparición de las tecnologías CAD/CAM fue difícil concebir, desarrollar, representar y mucho menos fabricar tales geometrías (24). En este contexto la producción de paneles de GRC de formas libres son posibles mediante procesos de fabricación de Control Numérico por Computadora (CNC). Para la fabricación de los moldes dividimos el presente trabajo en procesos sustractivos, de conformado, por molde flexible y aditivos.

3.1. Procesos sustractivos

Como su propio nombre indica, este tipo de procesos se refiere a la sustracción o separación de partículas de un material en bruto mediante la utilización de distintas técnicas (eléctrica, química o mecánicamente reductiva). Dentro de los procesos sustractivos para la fabricación de moldes de doble curvatura, se encuentran el chorro de agua, hilo caliente, fresadora de dos a seis ejes y el láser multi-axial.

El método por chorro de agua consiste en someter agua a alta presión, ya sea el líquido puro o mezclado con partículas abrasivas sólidas, que pasan a través de una boquilla, provocando la rápida erosión del material a su paso, creando cortes limpios y precisos (24). Uno de los ejemplos más atractivos es del stand de la Universidad de Darmstadt para la exposición *Hobbit 2008*, que fue realizado por la seriación de varias planchas de cartón corrugado, el cual fue segmentado por una cortadora de chorro de agua, con una presión de más de

1.000 m/s, lo que permitió que el material no sufriera ninguna deformación ni alteración (25).

El corte por hilo caliente es otro sistema de altas prestaciones, que a pesar de tener pocos ejemplos arquitectónicos, permite la ejecución de piezas de grandes dimensiones (26). Se pueden realizar elementos de doble curvatura, una vez que después del corte inicial con el hilo caliente, se gire la pieza de espuma, lo que hace de este sistema, una opción viable para la creación de moldes de forma libre. También existe la posibilidad de incorporar el corte por hilo caliente a un robot de brazo articulado, como en la propuesta del grupo de investigadores de la Universidad de Oporto (27), el cual lo utilizan para realizar moldes de formas complejas en hormigón. Un ejemplo arquitectónico del uso del hilo caliente es el la Fundación Louis Vuitton en París, diseñado por Frank Gehry, con bloques de EPS en combinación con moldes de goma para la creación de los paneles de GRC para la envolvente de dicho edificio (19).

Las fresadoras CNC pueden realizar formas complejas, pero esto depende más de la rotación y de los ángulos que el troquel pueda realizar. Las máquinas más avanzadas (de 4 a 7 ejes) son capaces de realizar operaciones más complejas, cuantos más ejes, mayor capacidad operativa (28), (29). La posibilidad de generar mecánicamente elementos de curvaturas especiales, el bajo coste de la materia prima del molde y la fácil manipulación del mismo, le confieren una buena opción para elaborar moldes de forma libre en frío. Con esta técnica se han construido moldes para los paneles de hormigón armado de la Torre Zollhof, los paneles de metacrilato de "La Burbuja" de BMW, o los paneles de GRC del Medienhaus K42 (19) (Fig. 2).

Los procesos sustractivos, son los métodos más utilizados en la fabricación de moldes de formas libres. También se suelen fabricar con estos métodos los contra moldes, los cuales se rellenan de goma, cera, barro, entre otros para servir como molde. Estas tecnologías tienen una gran relevancia dentro de la fabricación de moldes, gracias a la capacidad de crear formas complejas a partir de materiales típicos de la construcción (30) como madera, metales, espumas. Sin embargo, el gasto de material y la generación de residuos es un punto a tener en cuenta, que no parece sensato fabricar una sola



Figura 2. Moldes de EPS sobre los cuales se proyectó GRC con colorante negro. Proyecto Medienhaus K42, Friedrichshafen (2002) Matthäus Schmid



Figura 3. Máquina de MPF, fabricada por la Universidad Jilin, China.

pieza de un bloque de material si no aporta un valor añadido en hacerlo específicamente mediante dicho procedimiento sustractivo (23), (31).

3.2. Procesos de conformado

Los procesos por conformado utilizan la fuerza mecánica por tensión o presión sobre materiales en estado sólido o líquido, los cuales son modificados geoméricamente, causando la deformación plástica del material hasta conseguir la forma deseada (3).

Los moldes de metal han sido tradicionalmente conformados a mano o en moldes por estampación o presión. El uso de los procesos por CNC ha permitido la reducción de los tiempos de producción y los costes de elaboración. Por estas razones, muchos fabricantes con maquinaria de conformado están invirtiendo en la modernización de las técnicas como por ejemplo las empresas CIG y Formtexx (32). También hay varios centros de investigación, que están haciendo grandes avances sobre procesos CNC prometedores, como Multipoint Forming (MPF), Flexible Roll Bending (FRB), Incre-

mental Sheet Forming (ISF), y un proceso mixto denominado Multipoint Forming and Stretch Bending (MFSB) (3). La mayoría de estos procesos aún están en fase de desarrollo e investigación, pero ya hay algunos que se han comercializado como el MPF.

La producción en masa para realizar formas aerodinámicas con metal ya existe en la fabricación de automóviles, aviones o barcos, pero estos sistemas no son aplicables a la construcción de moldes para paneles de GRC de forma libre, debido a que los requerimientos de cada panel normalmente son únicos e irrepetibles. Por tanto, el precio de fabricación del molde no es rentable, dando como resultado edificios “blob” que raramente utilizan planchas de metal con doble curvatura (33).

El Multipoint Forming (MPF) es una tecnología similar al conformado tradicional de embutido con punzón, pero la diferencia es que se utilizan dos matrices de puntos contrapuestas (Fig. 3) que al acercarse presionan la chapa metálica para darle forma con una geometría particular, previamente establecida en el ordenador mediante programa



Figura 4. Proceso Incremental sheet forming, pieza diseñada por Dabid Bailey del Institute of Metal Forming, RWTH, Universidad Aachen, Alemania.

de fabricación CAM. El MPF permite cambios de manera rápida y tantos paneles distintos como se requiera sin tener un molde específico (34), (35). Esta tecnología no sólo sirve para metales, ya que existen investigaciones sobre plásticos y aerogeles (36) para conseguir la doble curvatura, en la que el sistema funciona simplemente como molde, pudiendo aplicar o no presión, como podemos observar en los moldes flexibles.

Incremental sheet forming (ISF) (Fig. 4) es un proceso en el cual la lámina se modifica a partir de tensiones progresivas localizadas debido a la utilización de un punzón metálico redondeado, el cual es controlado en todos sus movimientos por un ordenador (37). Los materiales que puede deformar pueden ser tanto metales como plásticos (38). La ventaja del ISF frente a otros procesos más convencionales es que no se requieren troqueles especiales para conseguir una gran cantidad de formas diferentes, ya que estas se consiguen mediante el movimiento del punzón esférico a través de un patrón de diseño personalizado controlado por una máquina CNC.

Dentro de la industria privada, la empresa Formtexx ha desarrollado un proceso del cual poco se sabe, ya que sus propietarios lo tienen bajo secreto industrial. Dicho proceso lo definen sus creadores, como análogo al uso de las impresoras de sobremesa, pero más grande, en lugar de papel es una plancha de metal y en lugar de un cabezal de impresión conectado a una conexión USB, es una máquina controlada por ordenador con una conformadora robotizada que realiza deformaciones de doble curvatura (32). La velocidad de fa-

bricación es constante lo que permite una nueva oportunidad para la construcción de elementos metálicos ligeros de forma libre, empleando técnicas de precisión similares a las utilizadas en la industria automotriz (3).

Por otro lado, la empresa CIG (Central Industry Group) ha desarrollado varios proyectos de arquitectura con formas libres, realizadas con planchas de metal, sobre todo mediante conformado en frío y con máquinas CNC de presión positiva, punzonadoras, estampadoras, rueda inglesa, pero con una base digital de fondo mediante la incorporación de programas CAM. Construyen sobre todo estructuras semi-monocasco como en el caso del Centro de Prensa del campo de críquet de los Lords (Future Systems), la Iglesia de Martin Luther King en Austria (Coop Himmelblau), el Pabellón Porche, Alemania (Henn Architects) o el Estudio de Dibujo de la Universidad de Bournemouth (Peter Cook y Gavin Robotham).

Existen procesos de conformado que han demostrado su fiabilidad para aplicarse en la fabricación de moldes para paneles de forma libre, no obstante, algunos de ellos aún están en fase de investigación. Si bien es cierto que la industria automotriz y la naviera tienen los medios para realizar dichos paneles, se estima probable que la incursión de esta tecnología a la construcción sea de manera gradual.

3.3. Moldes flexibles

Dentro de los moldes flexibles, los adaptativos son los que pueden tener una mayor incorporación en la industria de la

construcción, ya que, si los comparamos con los paneles mediante textiles o los moldes neumáticos, vemos que éstos dos últimos no están dentro del ámbito de este artículo ya que distan de conseguir el control digital del proceso y en el caso del neumático a menos que haya una cierta repetición, no resulta económicamente viable.

Los moldes flexibles tienen la ventaja de ser reutilizados múltiples veces y cada vez con formas distintas, además de reducir los costes de la pieza en general, ya que, al eliminar la necesidad de molde para cada pieza distinta, se economiza el proceso. Esto se debe a que si comparamos la fabricación mediante técnicas convencionales, vemos que el molde puede constituir un alto porcentaje (entre 40 y 80 %) respecto al precio final del panel como bien comentan Eigensatz (39), Buswell (40), y Kolarevic (41).

El molde flexible consiste generalmente en un encofrado ajustable mediante un material plástico que puede ser modificado y adquirir cualquier forma curvada mediante el uso de pistones, barras, cama de pivotes o elementos similares (16). Renzo Piano creó en 1969 unos de los primeros moldes flexibles modernos, pero no fue hasta varias décadas después cuando se recuperó esta idea para la producción de elementos de doble curvatura en hormigón o GRC, la cual pudiera ofrecer una alternativa más económica con respecto a los métodos actuales (42).

Según Gard (43), existen cuatro tipos de moldes adaptativos: por Cama de pivotes, Capa flexible apoyada, Capa flexible tensada y Capa flexible presurizada. Un número considerable de compañías y centros de investigación han desarrollado varias propuestas que combinan la tecnología digital con los moldes flexibles o adaptativos, tales como el “FlexiMold” de Boers (17), el “Flexible Mould” de Rietbergen y Vollers (44), el proyecto “Zero Waste Free-form Formwork” de Oesterle (31), el “Flexieble Mold” de Schipper (19), así como el uso de dicho molde con GRC y UHPC (45), el “Flexible mold” de Gard (43), el “Adaptive Mould” (20), el “Tailorcrete” (4), así como otras investigaciones paralelas que estudian la mejora de la técnica del sistema como la de Pronk (16) o alternativas para conseguir un mejor terminado en los bordes y contornos (1).

Uno de los proyectos más relevantes es el de Boers, denominado “FlexiMold” (Fig. 5), el cual está basado en el juego de

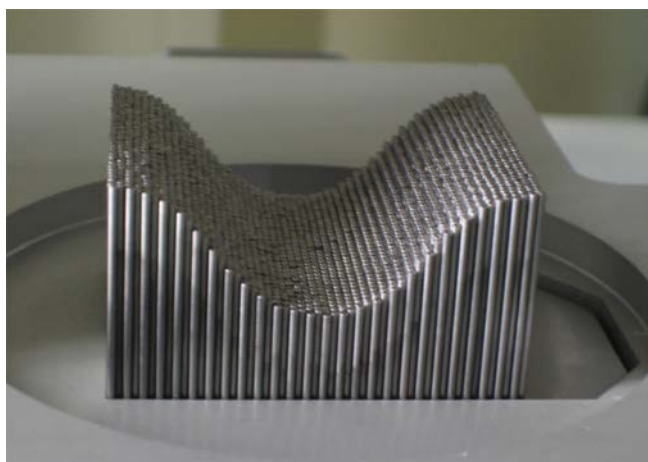


Figura 5. Proyecto de FlexiMold creado por Boers. 2006.

pin-art 3D y utiliza dichos pines o pivotes para crear formas de doble curvatura. El objetivo principal era el de desarrollar un molde reconfigurable para crear láminas metálicas de forma libre. La utilización de una gran densidad de puntas permite una gran resolución, lo que hace más preciso este tipo de molde. Este ha sido uno de los principales ejemplos de moldes flexibles sobre los cuales se han desarrollado posteriormente muchos otros (17).

El proyecto de Oesterle denominado “Zero Waste Free-Form Formwork” (Encofrado de forma libre sin residuos) (Fig. 6) utiliza cera como material para el molde. La forma se consigue mediante una capa flexible que descansa sobre las barras. Las características y ajustes de las barras se crean gracias a un modelo digitalizado. La capa flexible es una hoja de espuma de plástico de poro cerrado. Por encima de dicha capa se coloca 2 mm de silicona, la cual permite quitar fácilmente la cera y evita que queden rastros o huellas. Después de haber creado los moldes de cera gracias al molde flexible, se coloca el GRC y cuando se cura se retira el encofrado. Los moldes de cera pueden ser reciclados para la producción de nuevos moldes (31).

El “Flexible Mold” de Gard está basado en el “E-mould” de Van Rooy y Schinkel. Una lámina termoplástica se usa como capa flexible la cual para manipularla se pretensa. Dicha capa se calienta en un horno, deformándose por las propiedades intrínsecas del material al aplicarle calor. Las hojas deformadas se utilizan como encofrado para el vertido de hormigón (43).

Se han llevado a cabo varios diseños del molde flexible, y creemos que tiene un potencial por desarrollar. Aún quedan temas pendientes de resolver como el tiempo de curado entre piezas, el tiempo de modificación del molde, la digitalización completa del proceso, las terminaciones de los bordes del panel, la posibilidad de realizar aberturas o huecos, las esperas para los anclajes, etc.

3.4. Procesos aditivos

De manera opuesta a los procesos sustractivos, los aditivos se caracterizan por la adhesión de capas de material para la fabricación de una pieza sin la necesidad de moldes o preformas (tool-less, sin herramientas), lo que permite geometrías con un amplio grado de libertad. Una de las principales ven-



Figura 6. Panel de hormigón sobre molde de cera, la cual a su vez está sobre barras controlables.

tajas de dicha tecnología es la posibilidad de producir componentes únicos sin incrementar el precio de producción, ya que si tratásemos de realizarlo mediante los procesos de manufactura tradicional sería inviable económicamente (23). El principio del proceso aditivo es el mismo para todos los métodos (40), y se puede imprimir en una gran cantidad de materiales como metal, yeso, bioplásticos, poliuretano, epoxi, materiales cerámicos, cemento, entre otros (3).

Existen varias máquinas de grandes dimensiones de AM por Fundido de Filamento termoplástico como la 3D Big Delta, la BigRep, la Voxeljet400 o la BAAM (Big Area Additive Manufacturing). Esta última creada por el Oak Ridge National Laboratory y Cincinnati Incorporated, que nace como un prototipo de trabajo, la cual ha sido capaz de imprimir un coche Shelby Cobra en 24 horas a escala 1:1. La BAAM puede producir piezas de diversos materiales plásticos, reforzadas con fibra de carbono o fibra de vidrio, las cuales les proporciona ligereza y resistencia. Esta máquina ha demostrado que no sólo se puede mejorar la velocidad, sino la precisión de impresión (46), por lo que esta tecnología puede ser fácilmente trasladada a la industria de la construcción para fabricar paneles arquitectónicos, siendo competitivos por tiempo y precios.

Desde el Departamento de Construcción y Tecnología Arquitectónicas de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), se está realizando una investigación, la cual está en fase de desarrollo, para crear un nuevo proceso de fabricación de

paneles mediante una malla impresa en 3D a la que posteriormente se refuerza mediante una capa proyectada de GRC (Fig. 7 y 8). Se ha realizado la malla de forma libre con la impresora M3 de Moebyus con unas dimensiones de 1m x 1m x 1m en plástico ABS, permitiendo la producción de paneles sin moldes.

La calidad del material y los acabados mediante la impresión 3D están siendo comparables con otras tecnologías. Aunque en muchos casos no se logre alcanzar tales propiedades, pero dada la rapidez con la que se está avanzando en este campo, podemos suponer con cierta seguridad que en unos años la tecnología podrá tener soluciones para este tipo de mercado (19). Tal vez no se puedan construir casa enteras, pero si podemos hablar de crear piezas a medida con formas complejas, que sirvan como molde o contramolde para realizar los paneles de GRC.

Como se ha podido comprobar, el coste de los moldes es una parte importante del coste total de los paneles de GRC de geometrías complejas. Por esta razón se muestra a continuación una tabla (Tabla 1), modificada de (1), en la cual se comparan los distintos procesos revisados en el presente documento.

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En los párrafos anteriores hemos visto una exposición de los sistemas digitales existentes hoy en día para la fabricación

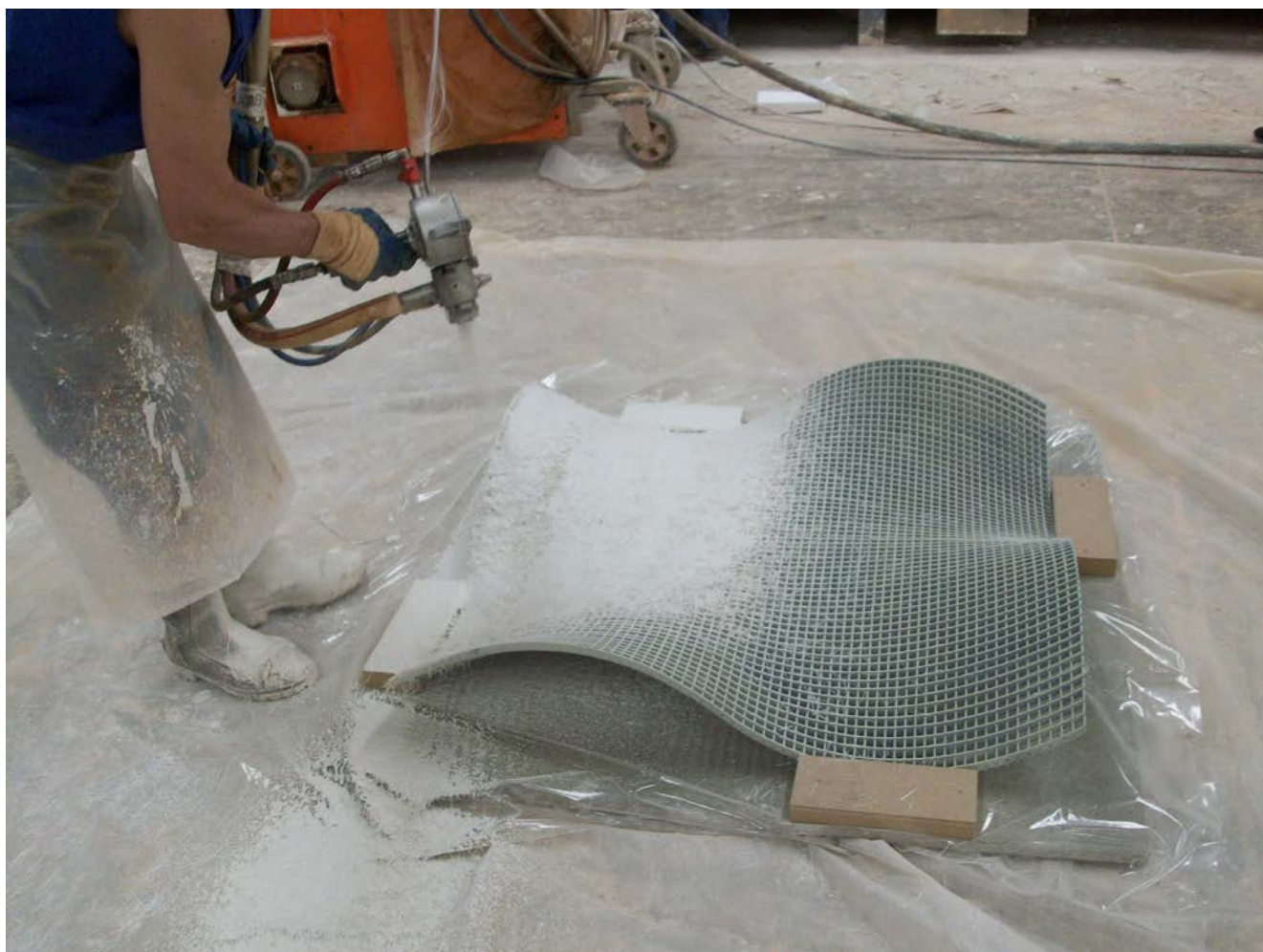


Figura 7. Proyección de GRC a malla impresa en 3D, escala 1:1. ETSAM-UPM.



Figura 8. Malla con capa de GRC, que demuestra que la mezcla no traspasa por completo las celdas.

Tabla 1. Sistemas de moldes existentes para la producción de paneles de GRC. Tabla modificada de (Henriksen et al., 2016).

	Uso de mano de obra	Precio de material y mano de obra	Tiempo de fabricación del molde	Facilidad técnica y de ejecución	Reutilización
Molde de madera	Medio	Mat. 25 €/m ² ; M.O. 40 €/hr	2-4 hrs/m ²	Buena	1-20 veces
Molde de acero	Alto	Mat. 50 €/m ² ; M.O. 40 €/hr	5-8 hrs/m ²	Buena	20-500 veces
Molde de goma	Alto	Mat. 80-200 €/m ² ; M.O. 40 €/hr	3-5 hrs	Buena	10-50 veces
Molde de espuma de poliestireno	Bajo	Mat. 30 €/m ³	1 hr	Buena	5-30 veces
Molde fresado máquina CNC (espuma, plástico)	Bajo	Mat. 300-400 €/m ²	5-10 hr	Buena	5-10 veces
Molde flexible por pistones	Bajo	Precio de la máquina	2 hr/m ²	Regular	100 veces
*Molde plástico impresión 3D	Bajo	Mat. 32 €/m ² ; M.O. 40 €/hr	96 hr/m ²	Regular	50-100 veces

* Aportación de los autores (47).

de paneles de GRC de forma libre para la envolvente arquitectónica. En la Tabla 1 se ha hecho una comparación entre los métodos más comunes y se resume que tanto la creación de moldes mediante camas flexibles o mediante impresión 3D podrían aportar un valor añadido a las técnicas tradicionales, ya que permiten la reutilización de los moldes, y su uso es especialmente recomendable para la arquitectura de formas complejas, donde la repetición de formas es bastante limitado.

El mayor objetivo de la aplicación de la tecnología digital a la fabricación de paneles de formas libre es la de minimizar el uso de mano de obra, favorecer la reutilización de los moldes, conseguir una buena calidad en el acabado superficial de las piezas, y por supuesto reducir los costes para hacer de dicha tecnología una opción viable. El precio depende tanto del tamaño del panel, la complejidad geométrica, y el grado de reutilización de los moldes que necesitan realizarse a medida para fabricar dichos elementos. Afortunadamente

existen una gran variedad de métodos que permiten llevar a cabo los moldes apropiados para la fabricación de los paneles de GRC.

Los procesos sustractivos en la fabricación de moldes de formas complejas son los más utilizados, pero el gasto de material y la generación de residuos constituye una opción poco recomendable para seguirlos apoyando. En el caso de la conformación de moldes metálicos, puede ser una buena solución ya que hay varias empresas que están digitalizando su maquinaria, pero los costes de producción suelen ser elevados, por lo que puede acabar siendo poco competitivo en el ámbito de moldes únicos, como es el caso de muchos de los elementos de la arquitectura con formas sinuosas.

En cuanto a los moldes flexibles sabemos que el potencial que tiene es sobre todo el de tener un solo molde para crear múltiples formas y adaptarse rápidamente, así como evitar el consumo innecesario de materiales. Sin embargo, actual-

mente tienen que mejorar muchas características para poder fabricar paneles con una calidad comparable a otros procesos tradicionales, además de la alta inversión inicial requerida, el tamaño limitado por la cama de trabajo y el no poder crear elementos prismáticos.

Finalmente, los procesos aditivos, especialmente la impresión 3D son un método que está en pleno desarrollo y tiene una serie de ventajas frente a la fabricación tradicional, como la creación de elementos singulares hechos a medida, además de producir cualquier tipo de formas, complejas o simples, sin que tenga que repetirse para hacer rentable su producción, como hemos visto en el prototipo de la ETSAM-UPM.

La experimentación con diversos materiales (madera, grafito, composites, etc), está arrojando muchas posibilidades de producción para elementos que tengan contacto con el exterior. Sin embargo, la tecnología aún no está suficientemente extendida en la industria en general, y mínimamente en la construcción.

La viabilidad de construir edificios de forma libre con paneles de GRC aún está lejos de ser óptima, pero la tecnología está avanzando rápidamente por lo que el camino a seguir tiende a la digitalización de los procesos, aunque a pesar de tanta tecnificación, la participación humana sigue siendo indispensable.

REFERENCIAS

- (1) Henriksen, T., Lo, S., & Knaack, U. (2016). A new method to advance complex geometry thin-walled glass fibre reinforced concrete elements. *Journal of Building Engineering*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobbe.2016.04.002>
- (2) Llatas, C. (2011). A model for quantifying construction waste in projects according to the European waste list. *Waste Management*, 31(6), 1261–1276. <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.01.023>
- (3) Castañeda, E., Lauret, B., Lirola, J. M., & Ovando, G. (2015). Free-form architectural envelopes: Digital processes opportunities of industrial production at a reasonable price. *Journal of Facade Design and Engineering*, 3(1), 1–13. <http://doi.org/10.3233/FDE-150031>
- (4) Gao, M. (2015). Application of light-weight GRC cladding panel in Nanjing Youth Olympic Conference Centre. *GRC 2015 Congress* (pp. 1–16). Dubai.
- (5) Rai, A., & Joshi, Y. P. (2014). Applications and Properties of Fibre Reinforced Concrete. *Journal of Engineering Research and Applications*, 4(5), 123–131.
- (6) Rodríguez Santiago, J., Jordan Reyes, M. (1986). Aplicaciones del GRC en España y Argelia. *Informes de la Construcción*, 38 (383), 65-72.
- (7) Instituto Eduardo Torroja (2006). DIT. Sistema DRACE para cerramiento de fachadas con paneles prefabricados de GRC. España.
- (8) Llerena, Á. B., Caballero, J. M., & Zaldo, V. (1981). Aplicaciones del cemento reforzado con fibra de vidrio (GRC). *Informes de la Construcción*, 33 (333-334-335-336), 73-81.
- (9) Helvoirt, J. (2003). Een 3D blob huid Afstudeerverslag 3370. Technische Universiteit Eindhoven.
- (10) Lloret, E., Shahab, A. R., Linus, M., Flatt, R. J., Gramazio, F., Kohler, M., & Langenberg, S. (2015). Complex concrete structures: Merging existing casting techniques with digital fabrication. *CAD Computer Aided Design*, 60, 40–49. <http://doi.org/10.1016/j.cad.2014.02.011>
- (11) Iori, T., & Poretti, S. (2005). Pier Luigi Nervi's Works for the 1960 Rome Olympics. In *Cuarto Congreso Nacional de Historia de la Construcción* (pp. 605–613). Cádiz.
- (12) Pronk, A., Rooy, I. Van, & Schinkel, P. (2009). Double-curved surfaces using a membrane mould. *Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS)* (pp. 618–628). Valencia.
- (13) Kok, M. (2013). Textile reinforced double curved concrete elements Manufacturing free-form architecture with a flexible mould. Delft University of Technology.
- (14) West, M., & Araya, R. (2009). Fabric Formwork for Concrete Structures and Architecture. *IV International Conference on Textile Composites and Inflatable Structures*. Stuttgart.
- (15) Van Hennik, P., & Houtman, R. (2008). Pneumatic Formwork for Irregular Curved Thin Shells. In E. Oñate & B. Kröplin (Eds.), *Textile Composites and Inflatable Structures II* (pp. 99–116). inbook, Dordrecht: Springer Netherlands. http://doi.org/10.1007/978-1-4020-6856-0_7
- (16) Pronk, A., Seffinga, A., el Ghazi, H., & Schuijers, N. (2015). Flexible mould by the use of spring steel mesh. *Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS)*. Amsterdam.
- (17) Boers, S. (2006). OptiMal Forming Solutions. *FlexiMold*, 1–2.
- (18) Eigenraam, P. (2013). Flexible mould for production of double-curved concrete elements. Delft University of Technology.
- (19) Schipper, R. (2015). Double-curved precast concrete elements. Research into technical viability of the flexible mould method. Delft University of Technology.
- (20) Raun, C., & Kirkegaard, P. (2015). Adaptive Mould - A Cost-Effective Mould System Linking Design and Manufacturing of Double-Curved Panels. *GRC 2015 Congress*, (pp. 1–7). Dubai.
- (21) Schipper, R., & Vambersky, J. (2010). A flexible mould for double curved pre-cast concrete elements. *BFT International*, 8, (1–4).
- (22) Van den Ende, B. (2011). *Standard Principles: Double Curved Facades (DISS)*. Delft University of Technology.
- (23) Hauschild, M., & Karzel, R. (2011). *Digital Processes: Planning, Designing, Production*. Birkhäuser.
- (24) Kolarevic, B. (2005). *Digital Praxis: From Digital to Material*. 3rd International Conference on Innovation in Architecture, Engineering and Construction (AEC) (p. 5).

- (25) Hew, K., Fisher, N., & Awbi, H. (2001). Towards an integrated set of design tools based on a common data format for building and services design. *Automation in Construction*, 10(4), 459–476. [http://doi.org/10.1016/S0926-5805\(00\)00082-0](http://doi.org/10.1016/S0926-5805(00)00082-0)
- (26) Alonso, L., Lauret, B., Castañeda, E., Dominguez, D., & Ovando, G. (2014). Free-Form Architectural Façade Panels: An Overview of Available Mass-Production Methods for Free-Form External Envelopes. *Construction and Building Research* (pp. 149–156). Springer Netherlands. http://doi.org/10.1007/978-94-007-7790-3_20
- (27) Martins, P., Campos, P., Nunes, S., & Sousa, J. (2015). Expanding the Material Possibilities of Lightweight Prefabrication in Concrete Through Robotic Hot-Wire Cutting. *eCAADe* 33. 2 (pp. 341–351). Viena.
- (28) Afify, H., & Elghaffar, Z. (2007). Advanced Digital Manufacturing Techniques (CAM) in Architecture. *Em'body'ing Virtual Architecture: The Third International Conference of the Arab Society for Computer Aided Architectural Design* (pp. 67–80). Alexandria, Egypt: The Arab Society for Computer Aided Architectural Design.
- (29) Adeyeye, O., Pasquire, C., Soar, R., Austin, S., & Pendlebury, M. (2006). Architectural freeform construction: potential use in repair for re-use, maintenance and manufacture of building components. *Conference of the Royal Institution of Chartered Surveyors. RICS, The Bartlett School, UCL and the contributors.*
- (30) Naboni, R., & Paoletti, I. (2015). *Advanced Customization in Architectural Design and Construction*. Springer International Publishing. <http://doi.org/10.1007/978-3-319-04423-1>
- (31) Oesterle, S., Vansteenkiste, A., & Mirjan, A. (2012). Zero Waste Free-Form Formwork. *Icfft 2012. Second International Conference on Flexible Formwork* (pp. 258–267). BRE CICM, University of Bath.
- (32) Gould, J. (2010). *Formtexx. Freeform facades with automotive precision*. London.
- (33) Lee, G., & Kim, S. (2012). Case Study of Mass Customization of Double-Curved Metal Façade Panels Using a New Hybrid Sheet Metal Processing Technique. *Journal of Construction Engineering and Management*, 138(11), 1322–1330. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000551](http://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000551)
- (34) Cai, Z. Y., & Li, M. Z. (2002). Multi-point forming of three-dimensional sheet metal and the control of the forming process. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 79(4), 289–296. [http://doi.org/10.1016/S0308-0161\(02\)00017-0](http://doi.org/10.1016/S0308-0161(02)00017-0)
- (35) Paunoiu, V., Cekan, P., Gavan, E., & Nicoara, D. (2008). Numerical simulations in reconfigurable multipoint forming. *International Journal of Material Forming*, 1, 181–184. <http://doi.org/10.1007/s12289-008-0021-4>
- (36) Alonso, L., Bedoya, C., Lauret, B., & Alonso, F. (2014). F2TE3: sistema de cerramiento transparente, ligero, de altas prestaciones energéticas que permite el diseño con formas libres. *Informes de la Construcción*, 65(532), 443–456. <http://doi.org/10.3989/ic.12.068>
- (37) Park, J., & Kim, Y. (2003). Fundamental studies on the incremental sheet metal forming technique. *Journal of Materials Processing Technology*, 140, 447–453. [http://doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00768-4](http://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00768-4)
- (38) Brell-Çokcan, S., & Braumann, J. (2016). *Robots in Architecture*. <http://www.robotsinarchitecture.org/>
- (39) Eigensatz, M., Kilian, M., Schiftner, A., Mitra, N., Pottmann, H., & Pauly, M. (2010). Paneling Architectural Freeform Surfaces. *ACM Trans. Graph. SIGGRAPH '10*. 29 (pp. 45:1-45:10). New York. <http://doi.org/10.1145/1833351.1778782>
- (40) Buswell, R., Thorpe, A., Soar, R., & Gibb, A. (2008). Design, data and process issues for mega-scale rapid manufacturing machines used for construction. *Automation in Construction*, 17(8), 923–929.
- (41) Kolarevic, B. (2003). *Architecture in the Digital Age. Design and Manufacturing*. Nueva York- Londres: Spon Press - Taylor & Francis Group.
- (42) Spuybroek, L. (2004). *Nox: Machining architecture*. Thames & Hudson.
- (43) Gard, F. (2013). *Flexible Mold*. Eindhoven University of Technology. <http://alexandria.tue.nl/extra2/afstversl/bwk/765926.zip>
- (44) Van Rietbergen, B. (2010). *FE-analysis of the 3-point bending experiment*. Eindhoven University of Technology.
- (45) Grünewald, S., Schipper, R., & Hordijk, D. (2016). Double-curved Panels produced in a flexible Mould with self-compacting Fibre Reinforced Concrete. *Ultra-High Performance Concrete and High Performance Construction Materials: Proceedings of HiPerMat 2016 4th International Symposium on Ultra High Performance Concrete and High Performance Construction Materials* 27(pp. 1–8). <http://hdl.handle.net/1854/LU-7147033>
- (46) Cincinnatti Incorporated. (2015). *BAAM*. <http://www.e-ci.com/baam/>
- (47) Castañeda V., E. (2017). *Industrialización de la envolvente opaca arquitectónica de forma libre: Nueva alternative de paneles de GRC sin molde (Tesis doctoral)*. ETSAM-UPM, Madrid.

* * *