

ENCOFRADOS DE NUEVA GENERACIÓN MEDIANTE FABRICACIÓN ADITIVA DE GRAN FORMATO / NEXT GENERATION FORMWORK THROUGH LARGE-FORMAT ADDITIVE MANUFACTURING

Juan Carlos Piquero Camblor¹, Alejandro García Reguera², Miguel Ángel Viñuela Marey³, Luis Ignacio Suárez Ríos⁴, Manuel Antonio García García⁵

¹ Idonial Centro Tecnológico, Gijón, España, juancarlos.piquero@idonial.com

² Idonial Centro Tecnológico, Gijón, España, Alejandro.Reguera@idonial.com

³ Idonial Centro Tecnológico, Gijón, España, Miguelangel.Vinuela @idonial.com

⁴ Idonial Centro Tecnológico, Gijón, España, Luisignacio.Suarez@idonial.com

⁵ Idonial Centro Tecnológico, Gijón, España, mantonio.garcia@idonial.com

Resumen

Los encofrados tradicionales presentan limitaciones técnicas y económicas significativas en series cortas de elementos de hormigón con geometrías complejas, debido al alto coste de utillajes específicos, largos plazos de fabricación y escasa flexibilidad ante cambios de diseño, además de la dificultad para disponer de mano de obra especializada. La fabricación aditiva de gran formato (BAAM, Big Area Additive Manufacturing) emplea la extrusión capa a capa de termoplásticos con altas tasas de deposición, permitiendo producir moldes de dimensiones métricas con gran libertad geométrica y reducción sustancial del tiempo de desarrollo. En este contexto, IDONIAL lleva a cabo estudios y desarrollos relativos a encofrados poliméricos impresos en 3D, incluidos materiales reciclados, evaluando precisión dimensional, resistencia a presiones del hormigón fresco, comportamiento en vertido y desmoldeo, así como tiempos y costes. Los resultados piloto confirman la viabilidad de BAAM como solución eficiente para series cortas complejas.

Palabras clave: Fabricación aditiva, BAAM, impresión 3D, encofrados, moldes, prefabricados.

1 Introducción

El sector de la construcción se enfrenta actualmente a importantes desafíos relacionados con la mejora de la productividad, la necesidad de incrementar la industrialización de los procesos, la escasez de mano de obra cualificada y la creciente demanda de soluciones más sostenibles y digitalizadas [1,2]. En este contexto, la transformación digital y la incorporación de tecnologías avanzadas de fabricación se han convertido en elementos clave para aumentar la competitividad y eficiencia de la industria.

La producción de elementos prefabricados de hormigón con geometrías complejas constituye uno de los ámbitos donde estos retos resultan especialmente evidentes. Los sistemas tradicionales de fabricación de moldes y encofrados, basados habitualmente en madera, acero o materiales compuestos, implican elevados costes de utillaje, largos tiempos de fabricación y una limitada flexibilidad ante modificaciones de diseño. Estas limitaciones adquieren una especial relevancia en la fabricación de series cortas o elementos altamente personalizados, donde los costes asociados al molde pueden representar una parte significativa del coste total del producto.

En este escenario, la fabricación aditiva se presenta como una tecnología habilitadora para la industrialización y digitalización de los procesos constructivos, permitiendo fabricar componentes directamente a partir de modelos digitales y ofreciendo una elevada libertad geométrica sin necesidad de utillajes específicos [3]. Entre las diferentes tecnologías disponibles, la fabricación aditiva de gran formato o Big Area Additive Manufacturing (BAAM) destaca por su capacidad para producir piezas de dimensiones métricas mediante la extrusión de materiales termoplásticos con altas tasas de deposición, incluyendo materiales reciclados y formulaciones reforzadas.

La aplicación de BAAM a la fabricación de moldes y encofrados para elementos prefabricados de hormigón constituye una alternativa prometedora a los sistemas convencionales, especialmente en aquellos casos donde se requieren geometrías complejas, series cortas o elevados niveles de personalización. En este marco, IDONIAL CENTRO TECNOLÓGICO, constituye un centro de referencia en el ámbito de la fabricación aditiva con más de 20 años de experiencia en el sector, donde desarrolla actividades de investigación y transferencia tecnológica orientadas a la validación de encofrados poliméricos fabricados mediante BAAM para aplicaciones constructivas. El presente trabajo recoge diferentes desarrollos y casos de estudio realizados, evaluando aspectos relacionados con la precisión geométrica, el comportamiento durante el vertido y desmoldeo, la reutilización de los moldes y los costes asociados a su fabricación.

2 Estado del arte

2.1. Fabricación aditiva en construcción

La fabricación aditiva ha evolucionado desde sus aplicaciones iniciales en prototipado rápido hacia usos productivos en sectores industriales donde la personalización, la reducción de utillajes y la libertad geométrica constituyen factores diferenciales. En el ámbito de la construcción, esta tecnología se ha consolidado en los últimos años como una de las herramientas asociadas a la digitalización del sector, permitiendo fabricar componentes directamente a partir de modelos digitales y reduciendo la dependencia de procesos manuales intensivos. Su aplicación resulta especialmente relevante en un contexto en el que la construcción busca aumentar su productividad, reducir residuos, mejorar la trazabilidad de los procesos y responder a una demanda creciente de soluciones constructivas personalizadas.

La impresión 3D en construcción incluye un conjunto amplio de tecnologías, materiales y estrategias productivas. Entre las más desarrolladas se encuentran la extrusión de materiales cementicios, la impresión con morteros, los procesos robotizados de deposición, los sistemas de fabricación mediante arena aglomerada, la impresión de materiales poliméricos y las tecnologías híbridas que combinan fabricación aditiva con mecanizado o ensamblaje posterior. Revisiones recientes destacan que el interés por la fabricación aditiva en construcción ha aumentado de forma significativa, aunque su implantación industrial sigue condicionada por retos técnicos, normativos y económicos [4].

Los primeros desarrollos relevantes se centraron en la impresión directa de materiales cementicios. Tecnologías como *Contour Crafting* plantearon ya a comienzos de los años 2000 la posibilidad de automatizar la construcción mediante la deposición capa a capa de morteros u hormigones especiales [5]. Desde entonces, la impresión 3D de hormigón ha avanzado notablemente, con aplicaciones en muros, cerramientos, mobiliario urbano, elementos

arquitectónicos y prototipos de vivienda. No obstante, la impresión directa de hormigón presenta todavía limitaciones importantes relacionadas con el control reológico del material, la adherencia entre capas, la incorporación de armaduras, la durabilidad, la anisotropía mecánica y la certificación estructural.

Estas limitaciones son especialmente relevantes en aplicaciones estructurales. A diferencia del hormigón convencional vertido en molde, el hormigón impreso se genera mediante capas sucesivas, lo que introduce planos preferentes de unión y posibles discontinuidades. Además, la integración de armaduras sigue siendo uno de los retos principales, especialmente cuando se requieren prestaciones frente a flexión, tracción o cargas laterales. En consecuencia, aunque la impresión directa de hormigón representa una vía de gran interés para determinadas aplicaciones, su adopción generalizada en elementos estructurales exige todavía una validación normativa y técnica más amplia.

En paralelo, la fabricación aditiva aplicada a construcción está evolucionando hacia enfoques complementarios. Uno de los más prometedores consiste en no imprimir directamente el elemento constructivo final, sino fabricar mediante impresión 3D los moldes, encofrados o utillajes necesarios para producir componentes de hormigón mediante procesos convencionales. Esta estrategia permite combinar la libertad geométrica de la fabricación aditiva con las prestaciones conocidas del hormigón moldeado. De este modo, se mantienen procesos consolidados de dosificación, vertido, compactación, curado y control de calidad, reduciendo al mismo tiempo las restricciones geométricas asociadas a los encofrados tradicionales.

Desde el punto de vista ambiental, la fabricación aditiva también se asocia a oportunidades relevantes, como la reducción de residuos de fabricación, la producción bajo demanda, el aligeramiento de componentes y la posibilidad de emplear materiales reciclados o reciclables [6]. Sin embargo, su sostenibilidad debe analizarse desde una perspectiva de ciclo de vida, considerando el consumo energético del proceso, el origen de los materiales, la vida útil del componente y las posibilidades de reutilización o reciclado. En este sentido, los moldes y encofrados impresos en 3D resultan especialmente interesantes cuando permiten sustituir moldes desechables, reducir residuos de madera o espuma y aumentar el número de reutilizaciones.

2.2. Tecnología BAAM (BIG AREA ADDITIVE MANUFACTURING)

La tecnología *Big Area Additive Manufacturing* (BAAM) surge como respuesta a una de las principales limitaciones de los sistemas convencionales de fabricación aditiva por extrusión: la dificultad para producir piezas de gran formato en tiempos compatibles con los requisitos industriales. El BAAM utiliza habitualmente materia prima en formato granza o *pellet*, plastificada mediante extrusores de alto caudal. Esta configuración permite aumentar significativamente la tasa de deposición y fabricar piezas de dimensiones métricas.

En términos productivos, BAAM reduce de forma sustancial los tiempos de fabricación respecto a tecnologías basadas en filamento, lo que resulta especialmente relevante en aplicaciones como moldes, utillajes, modelos maestros, piezas auxiliares y componentes arquitectónicos., teniendo en cuenta que en el ámbito de la construcción los componentes que se ejecutan son de gran tamaño. Además, el uso de granza reduce el coste de materia prima y amplía el rango de materiales disponibles. Estudios recientes sobre simulación del proceso BAAM destacan que, a medida que aumenta el tamaño de las piezas, cobran especial importancia los

fenómenos térmicos, las tensiones residuales y las deformaciones inducidas durante la fabricación [7].

Desde el punto de vista de los materiales, BAAM permite procesar termoplásticos técnicos y compuestos poliméricos como ABS, PLA, PETG, PC y formulaciones reforzadas con fibra corta de carbono, fibra de vidrio, cargas minerales o fibras naturales. Estos refuerzos mejoran la rigidez, la estabilidad dimensional y el comportamiento mecánico, aunque también introducen retos asociados a la orientación de fibras, la abrasión del sistema de extrusión, la anisotropía mecánica y el control de la contracción.

En aplicaciones de gran formato, la estabilidad dimensional constituye un aspecto crítico. El volumen de material depositado, los gradientes térmicos y la contracción del polímero pueden generar desviaciones respecto a la geometría nominal. Por ello, el diseño de piezas fabricadas mediante BAAM debe considerar la estrategia de deposición, la orientación de fabricación, el espesor de pared, el patrón de relleno, el uso de refuerzos y la posible necesidad de postprocesado. En moldes y encofrados, estas variables son especialmente relevantes, ya que la precisión del molde condiciona directamente la geometría final del elemento de hormigón.

Los materiales compuestos reforzados con fibra corta son una de las líneas de mayor interés para BAAM. Trabajos recientes han analizado la influencia de la longitud y distribución de la fibra de carbono en matrices poliméricas para fabricación aditiva de gran formato [8]. Asimismo, se han caracterizado materiales como PETG reforzado con fibra de carbono, evaluando sus propiedades termomecánicas y su adecuación a procesos industriales de gran formato [9].

Para aplicaciones en construcción, BAAM permite fabricar piezas de gran tamaño con geometrías complejas, integrar funcionalidades en el propio diseño y emplear materiales reciclados o formulaciones con menor impacto ambiental. Además, puede combinarse con operaciones de mecanizado CNC, generando rápidamente el volumen principal de la pieza y ajustando posteriormente tolerancias y acabado superficial en zonas críticas. Esta combinación impresión-mecanizado resulta especialmente adecuada para moldes de hormigón, donde pueden requerirse superficies vistas, repetibilidad dimensional y precisión geométrica.

En este contexto, BAAM no debe considerarse únicamente como una tecnología para fabricar piezas finales, sino como una herramienta para desarrollar utillajes avanzados que faciliten la producción de componentes constructivos mediante procesos tradicionales. Esta visión resulta especialmente interesante para el sector del prefabricado, donde los moldes tienen un peso técnico y económico relevante y donde las series cortas, las geometrías complejas y los diseños personalizados son cada vez más frecuentes.

2.3. Encofrados y moldes impresos en 3D para hormigón

Los encofrados y moldes son elementos esenciales en la fabricación de componentes de hormigón, ya que definen la geometría, el acabado superficial, la precisión dimensional, la productividad del proceso y el coste final de la pieza. Tradicionalmente se fabrican en madera, acero, aluminio, espuma mecanizada, resinas o materiales compuestos, seleccionándose el material en función del número de piezas, la complejidad geométrica, las tolerancias requeridas y la vida útil esperada.

En series largas, los moldes metálicos o de materiales compuestos pueden amortizarse adecuadamente. Sin embargo, en series cortas, prototipos funcionales, elementos singulares o geometrías complejas, los sistemas convencionales presentan limitaciones importantes. La fabricación manual de moldes complejos requiere mano de obra especializada, plazos elevados y costes significativos. Además, cualquier modificación de diseño puede obligar a rehacer parcial o totalmente el utillaje.

La impresión 3D de moldes y encofrados aparece como una alternativa capaz de reducir estas limitaciones. Jipa y Dillenburger identifican los encofrados impresos en 3D como una línea específica dentro de la fabricación digital en construcción, destacando su potencial para habilitar nuevas geometrías, reducir residuos y combinar procesos digitales con el uso convencional del hormigón [10]. Este enfoque permite fabricar moldes directamente desde el modelo digital, reduciendo operaciones manuales y facilitando la iteración de diseño.

Una ventaja fundamental de los moldes impresos en 3D es que permiten desacoplar parcialmente la complejidad geométrica del coste de fabricación. En procesos tradicionales, superficies curvas, relieves, cavidades o geometrías orgánicas implican normalmente mayor tiempo y coste. En fabricación aditiva, la complejidad no penaliza el proceso de la misma manera, lo que abre la posibilidad de producir elementos de hormigón más optimizados, personalizados o adaptados a requisitos arquitectónicos específicos.

Existen diferentes estrategias para fabricar encofrados impresos. Una primera opción consiste en la fabricación directa del molde completo mediante tecnologías de fabricación aditiva, especialmente cuando la geometría y el volumen de trabajo disponible lo permiten. No obstante, también es posible fabricar el encofrado mediante piezas de menor tamaño que posteriormente se ensamblan entre sí, generando moldes de mayores dimensiones a partir de módulos impresos, de forma similar a un sistema constructivo tipo “lego”. Esta aproximación modular permite superar las limitaciones dimensionales de los equipos, facilitar el transporte, simplificar el montaje y desmontaje, y sustituir únicamente aquellas partes del molde que puedan dañarse durante el uso.

Asimismo, la modularidad facilita la adaptación de un mismo molde a diferentes configuraciones geométricas mediante el intercambio de determinados módulos, reduciendo costes y aumentando la flexibilidad del sistema. Esta estrategia resulta especialmente interesante en aplicaciones de prefabricación donde pequeñas modificaciones de diseño pueden generar familias completas de productos a partir de una base común de componentes impresos.

Además de la fabricación directa mediante una única tecnología, existe la posibilidad de combinar diferentes procesos de fabricación aditiva dentro de un mismo encofrado. Por ejemplo, las zonas de gran volumen y menor exigencia dimensional pueden fabricarse mediante BAAM, mientras que detalles localizados, insertos, elementos de unión o superficies que requieran una mayor precisión geométrica pueden producirse mediante tecnologías de menor escala, como FDM/FFF. De igual modo, estas soluciones pueden complementarse con bastidores metálicos, refuerzos estructurales, recubrimientos superficiales, mecanizado CNC o elementos desmontables. Este enfoque híbrido resulta especialmente adecuado para aplicaciones industriales, ya que permite utilizar cada tecnología allí donde aporta un mayor valor añadido desde el punto de vista técnico y económico.

En el caso de BAAM, la fabricación de moldes para hormigón ha sido demostrada en trabajos desarrollados por Oak Ridge National Laboratory. Roschli et al. documentaron la fabricación de

moldes para prefabricados mediante fabricación aditiva de gran formato, comparando el proceso con moldes tradicionales de madera [11]. Este trabajo mostró que los moldes fabricados mediante BAAM podían producirse y mecanizarse en plazos menores y alcanzar un número de reutilizaciones superior, demostrando la viabilidad del enfoque en una aplicación real de prefabricación.

Desde el punto de vista funcional, el diseño de un molde impreso para hormigón debe considerar aspectos como la resistencia frente a las presiones generadas por el hormigón fresco, la estabilidad dimensional, la calidad superficial, la estanqueidad, la facilidad de desmoldeo y la reutilización. Estos factores dependen tanto del material seleccionado como de la estrategia de impresión, el espesor de pared, el sistema de ensamblaje, el posible postprocesado y las condiciones reales de uso. No obstante, su análisis debe abordarse de forma específica para cada aplicación, ya que los requisitos no son los mismos en un molde de un solo uso que en un encofrado reutilizable destinado a múltiples ciclos de hormigonado.

La reutilización es un factor decisivo para la viabilidad económica y ambiental. Un molde BAAM puede no ser competitivo frente a una solución simple de madera si se utiliza una sola vez, pero puede resultar ventajoso cuando permite fabricar geometrías complejas, reducir mano de obra, acortar plazos o aumentar el número de ciclos de uso. Estudios recientes sobre costes, energía y emisiones en moldes fabricados aditivamente para prefabricados indican que estos sistemas pueden ofrecer ventajas cuando se consideran escenarios de reutilización y reducción de procesos manuales [12].

Desde el punto de vista ambiental, los encofrados impresos en 3D presentan oportunidades asociadas a la reducción de residuos de madera o espuma, la fabricación bajo demanda, la optimización del material empleado y el reciclado del molde al final de su vida útil. Investigaciones recientes han abordado la posibilidad de reciclar encofrados poliméricos de gran formato utilizados para el vertido de hormigón prefabricado, analizando la viabilidad técnica de reincorporar el material a nuevos procesos de fabricación [13].

En conjunto, los moldes y encofrados impresos en 3D representan una vía de adopción especialmente realista para la fabricación aditiva en construcción. A diferencia de la impresión directa de hormigón, no requieren modificar sustancialmente el material estructural final ni los procedimientos habituales de fabricación. En cambio, actúan sobre una etapa crítica del proceso: el utillaje. Esta aproximación permite introducir digitalización, automatización y libertad geométrica en la fabricación de elementos prefabricados, manteniendo las garantías técnicas asociadas al hormigón convencional y ampliando las posibilidades de diseño mediante soluciones monolíticas, modulares o híbridas fabricadas mediante tecnologías de fabricación aditiva.

3 Soluciones avanzadas de encofrados impresos: Casos de éxito.

3.1. Moldes para estructuras Estocolmo de integración de árboles

Una de las soluciones en las que la fabricación de moldes impresos ha sido un éxito se centró en el desarrollo de moldes para estructuras Estocolmo de integración de árboles. El denominado método Estocolmo constituye una solución utilizada para favorecer el desarrollo de árboles en entornos urbanos mediante sistemas estructurados que permiten el crecimiento radicular sin comprometer la integridad de pavimentos e infraestructuras subterráneas.

En este marco se planteó la fabricación de una serie corta de módulos prefabricados de hormigón armado destinados a formar parte de este sistema. Las piezas requeridas presentaban unas dimensiones aproximadas de $1.400 \times 600 \times 200$ mm y una configuración tipo peine, con geometrías curvas y elementos longitudinales que debían ensamblarse entre sí para conformar una estructura final cerrada por cuatro lados.

Esta geometría, unida al tamaño de las piezas y al reducido número de unidades a fabricar, dificultaba la utilización de moldes convencionales. En este contexto, el coste, el plazo de desarrollo y la escasa flexibilidad de un utillaje específico resultaban difícilmente justificables para una producción de serie corta.

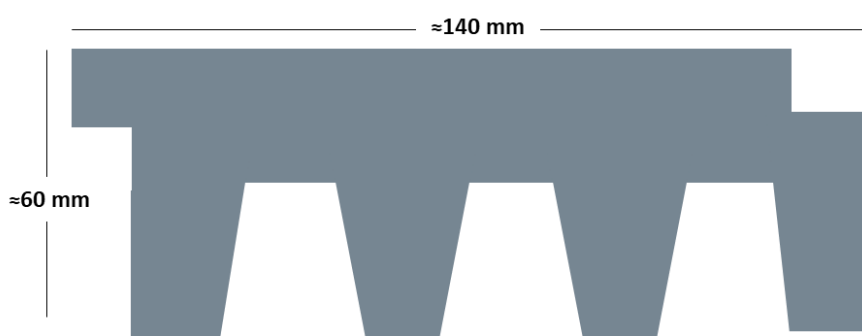


Figura 1. Esquema de una de las partes modulares de un sistema Estocolmo.

Solución desarrollada

Para dar respuesta a esta necesidad se desarrolló un molde mediante tecnología BAAM (Big Area Additive Manufacturing), empleando un material basado en PLA reforzado con un 20 % de fibra de celulosa. La fabricación se realizó utilizando un cabezal de extrusión de gran formato desarrollado por IDONIAL e integrado sobre un brazo robótico industrial con un alcance aproximado de 2.000 mm, lo que permite fabricar estructuras de dimensiones métricas con elevadas tasas de deposición y tiempos de producción reducidos.

Uno de los aspectos clave del desarrollo fue el diseño de un molde con una estructura reforzada, capaz de soportar las cargas y esfuerzos generados por el hormigón fresco durante las fases de vertido y curado sin comprometer la estabilidad dimensional del conjunto. Para ello, se optimizó la geometría del molde incorporando elementos de rigidización que garantizaran su comportamiento durante el proceso de fabricación de las piezas prefabricadas.

Adicionalmente, el diseño tuvo en cuenta los requisitos propios de la fabricación de elementos de hormigón armado. La configuración del molde permitía la colocación y posicionamiento de las armaduras antes del vertido, facilitando su integración dentro del proceso productivo habitual. De este modo, una vez preparado el molde y colocadas las armaduras, podía realizarse el vertido del hormigón manteniendo una metodología de fabricación similar a la empleada en procesos convencionales de prefabricación.

Gracias a la elevada productividad del sistema BAAM, el molde completo pudo fabricarse en aproximadamente 3 horas, reduciendo significativamente los tiempos de desarrollo frente a soluciones tradicionales. La solución desarrollada permitió reproducir con precisión la geometría

tipo peine requerida y fabricar los módulos prefabricados de hormigón que, una vez ensamblados entre sí, conforman la estructura Estocolmo completa de cuatro lados. Los resultados obtenidos demostraron la viabilidad de la fabricación aditiva de gran formato para el desarrollo rápido de moldes destinados a series cortas de elementos constructivos de geometría compleja.



Figura 2. Sistema de fabricación BAAM montado sobre robot fabricando el molde



Figura 3. Molde con armadura en su interior (izda). Pieza final tras curado del hormigón (dcha)

3.2. Moldes para soportes prefabricados de placas solares

Otro de los casos abordados se centró en el desarrollo de un molde destinado a la fabricación de una estructura prefabricada de hormigón para soporte de paneles fotovoltaicos. En este caso, la principal dificultad venía determinada por la complejidad del propio molde, necesario para obtener una pieza con múltiples superficies inclinadas, cambios de sección y detalles funcionales.

Estas características dificultaban notablemente el empleo de soluciones convencionales, ya que el molde debía permitir no solo reproducir correctamente la geometría del soporte, sino también garantizar un buen acabado superficial y una adecuada precisión en las zonas de unión. Además, el proceso debía facilitar el vertido del hormigón y el posterior desencofrado de una pieza con geometría compleja.

El molde completo presentaba unas dimensiones aproximadas de $1.500 \times 300 \times 900$ mm, por lo que era necesario plantear una solución capaz de materializar un utillaje de gran tamaño, con buena precisión geométrica y ensamblaje fiable entre sus diferentes partes.

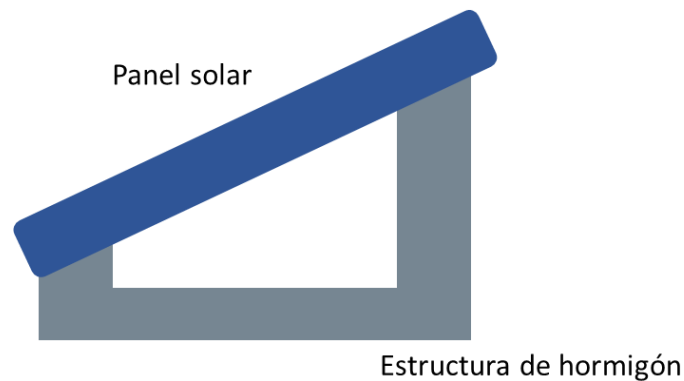


Figura 4. Esquema de la estructura de hormigón necesaria.

Solución desarrollada

La solución desarrollada combinó el diseño específico del molde con la estrategia de fabricación aditiva, de modo que el utillaje no se concibió únicamente como una reproducción de la geometría final, sino como un sistema adaptado tanto a la necesidad constructiva como a las capacidades del proceso de impresión 3D. Para ello, se trabajó en un diseño adaptativo orientado a resolver la complejidad geométrica de la pieza, facilitar el proceso de fabricación y permitir el posterior montaje, vertido y desencofrado.

El molde fue diseñado desde el inicio como una estructura modular, dividida en seis piezas fabricadas de forma independiente y posteriormente ensambladas entre sí para conformar el molde completo. Esta división permitió resolver superficies interiores con distintas pendientes, ángulos y cambios de geometría mediante módulos más sencillos de fabricar y manipular. Además, el diseño modular facilitó el ajuste entre piezas, el transporte, el montaje y el desmontaje progresivo del molde tras el curado del hormigón.

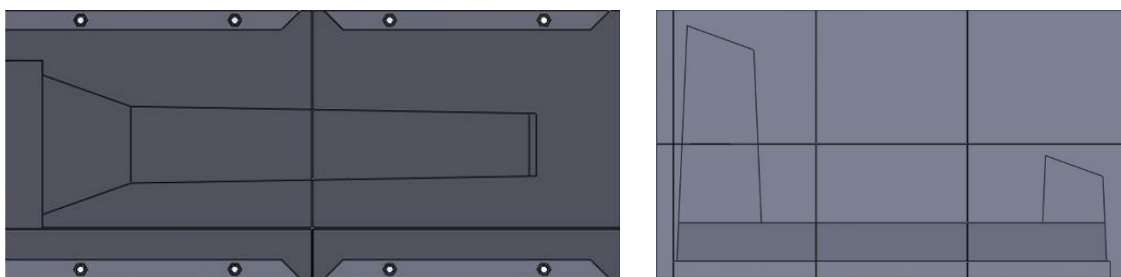


Figura 5. Diseño del molde: Interior del molde (izda). Diseño en alzada (dcha).

Para la fabricación se optó por tecnología FDM/FFF empleando ASA como material de impresión. La selección de esta tecnología, frente a alternativas de gran formato como BAAM, respondió a la necesidad de obtener una mayor precisión geométrica, un mejor ajuste entre las diferentes partes del molde y un acabado adecuado en las superficies de contacto con el hormigón. El ASA se seleccionó por su baja absorción de humedad y su adecuación para aplicaciones relacionadas con la fabricación de moldes para hormigón.

Cada una de las unidades del molde se fabricó en menos de un día, alcanzándose un tiempo total de fabricación del conjunto de aproximadamente cuatro días. Una vez impresas, las seis piezas se ensamblaban a modo de sistema tipo “lego”, conformando la estructura final del molde y permitiendo realizar el vertido del hormigón. Tras el curado, los módulos podían desmontarse secuencialmente para facilitar el desencofrado.



Figura 6. Molde conformado por el ensamblado de las diferentes partes. Vacío (izda) y relleno (dcha) de hormigón.

Durante los primeros ensayos se identificaron ciertas dificultades asociadas al desmoldeo, derivadas de la complejidad geométrica del componente y de la presencia de superficies interiores con diferentes inclinaciones. Estas limitaciones fueron resueltas mediante la aplicación de agentes desencofrantes adecuados y pequeñas optimizaciones en el diseño del molde.



Figura 7. Desmontaje del molde y pieza final obtenida.

La solución final permitió obtener un molde reutilizable durante un elevado número de ciclos de fabricación, demostrando el potencial de la fabricación aditiva modular para desarrollar utillajes complejos, precisos y adaptados a elementos prefabricados de hormigón de alto valor añadido.

7 Conclusiones

La fabricación aditiva constituye una alternativa viable para el desarrollo de moldes y encofrados destinados a elementos prefabricados de hormigón, especialmente en aplicaciones con geometrías complejas, personalización elevada y series cortas. Los casos desarrollados muestran que estas tecnologías permiten reducir tiempos de fabricación del utillaje y mantener la compatibilidad con procesos convencionales de vertido, armado, curado y desencofrado.

Los resultados evidencian que la selección de la tecnología debe adaptarse a los requisitos de cada aplicación. BAAM resulta especialmente adecuada para moldes de gran formato y fabricación rápida, mientras que FDM/FFF permite alcanzar mayor precisión geométrica y mejor acabado en moldes de menor escala o modulares.

Asimismo, se confirma la importancia del diseño adaptativo, incorporando refuerzos, sistemas de ensamblaje y estrategias modulares. Esta aproximación permite fabricar moldes de grandes dimensiones mediante la unión de componentes impresos, facilitando el montaje, transporte, reutilización y desencofrado.

En conjunto, los desarrollos realizados confirman el potencial de la fabricación aditiva como herramienta para la digitalización e industrialización del sector de prefabricados de hormigón, aportando soluciones flexibles, eficientes y adaptadas a nuevas demandas constructivas.

8 Agradecimientos

Los autores agradecen la colaboración de Alvargonzález Contratas, S.A. y Prefabricados Juan Rocés, S.A., cuya participación ha sido fundamental para la definición de requisitos, el desarrollo de los casos de estudio y la validación de las soluciones en entornos reales de aplicación. Asimismo, se agradece al equipo técnico de IDONIAL Centro Tecnológico su contribución en las actividades de diseño, fabricación y validación experimental desarrolladas durante el proyecto.

9 Bibliografía

- [1] Sawhney, A., Riley, M., Irizarry, J. (2020). *Construction 4.0: An Innovation Platform for the Built Environment*. Routledge, London, United Kingdom.
- [2] Pan, Y., Zhang, L., Skitmore, M., & Ballesteros-Pérez, P. (2022). Construction 4.0 and the digital transformation of the construction industry: A review. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 29(10), 4571-4598.
- [3] Paolini, A., Kollmannsberger, S., Rank, E. (2019). *Additive Manufacturing in Construction: A Review on Processes, Applications, and Digital Planning Methods*. *Additive Manufacturing*, 30, 100894.
- [4] Baigarina, A., Shehab, E., & Ali, M. H. (2023). Construction 3D printing: A critical review and future research directions. *Progress in Additive Manufacturing*, 8, 1393–1421.
- [5] Khoshnevis, B. (2004). Automated construction by contour crafting—related robotics and information technologies. *Automation in Construction*, 13(1), 5–19.

- [6] Mastronardo, E., et al. (2025). Advances in sustainable additive manufacturing: A systematic review for construction industry to mitigate greenhouse gas emissions. *Frontiers in Built Environment*, 11, 1535626.
- [7] Bock, C., Ellis, B. D., & Rais-Rohani, M. (2024). Process-informed simulation of Big-Area Additive Manufacturing (BAAM) of polymers. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 238(24), 10501–10518.
- [8] Burgos Pintos, P., Moreno Sánchez, D., Delgado, F. J., Sanz de León, A., & Molina, S. I. (2023). Influence of the carbon fiber length distribution in polymer matrix composites for large format additive manufacturing via fused granular fabrication. *Polymers*, 16(1), 60.
- [9] Martin, K. A., Riveros, G. A., Thornell, T. L., McClelland, Z. B., Freeman, E. L., & Stinson, J. T. (2024). Thermomechanical material characterization of polyethylene terephthalate glycol with 30% carbon fiber for large-format additive manufacturing. *Polymers*, 16(13), 1913.
- [10] Jipa, A., & Dillenburger, B. (2022). 3D Printed Formwork for Concrete: State-of-the-Art, Opportunities, Challenges, and Applications. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 9(2), 84–107.
- [11] Roschli, A., Post, B., Chesser, P., Sallas, M., Love, L., & Gaul, K. (2020). Precast concrete molds fabricated with big area additive manufacturing. *Solid Freeform Fabrication Symposium Proceedings*.
- [12] Borg Costanzi, C., Tam, K., Dillenburger, B., & Block, P. (2022). 3D printing of stay-in-place formwork for concrete structures: Opportunities and challenges. *Automation in Construction*, 140, 104365.
- [13] Lloret-Fritschi, E., Wangler, T., Gebhard, L., Mata-Falcón, J., & Flatt, R. J. (2020). From smart dynamic casting to a growing family of digital fabrication methods for cement-based materials. *Cement and Concrete Research*, 134, 106071.