

Introducción a una construcción modular de vigas híbridas compuestas por segmentos poliméricos de plástico impresos en 3D y hormigón

Jorge Sanchis Guerola^a, José Luis Bonet Senach^b, José Ramón Albiol Ibáñez^c,
Miguel Sánchez López^d, Pedro F. Miguel Sosa^e, Alberto García Cárcel^f

^a Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Estudiante PhD. Universitat Politècnica de València. jorsa16j@cam.upv.es

^b Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Catedrático de Universidad. Universitat Politècnica de València. jlbonet@cst.upv.es

^c Dr. Ingeniero de Materiales. Profesor Permanente Laborable. Universitat Politècnica de València. joalib1@csa.upv.es

^d Dr. Doctor en Informática. Prof. Titular de Universidad. Universitat Politècnica de València. misan@disca.upv.es

^e Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Catedrático de Universidad. Universitat Politècnica de València. pmiguel@cst.upv.es

^f Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Estudiante PhD. Universitat Politècnica de València. algar25a@cam.upv.es

RESUMEN

Este estudio explora el desarrollo de vigas estructurales híbridas mediante la combinación de impresión 3D de polímeros y materiales tradicionales como hormigón y acero. Este sistema innovador se dirige a aplicaciones de rehabilitación y construcción en zonas de difícil acceso, donde las piezas impresas, ligeras y fáciles de transportar, actúan como encofrado perdido, soportan el peso del hormigón fresco y las cargas de construcción, eliminando la necesidad de apuntalamientos. La integración de esta tecnología permite construir estructuras más eficientes y duraderas, reduce costos y tiempos de ejecución, y optimiza el uso de materias primas.

ABSTRACT

This study explores the development of hybrid structural beams by combining 3D printing of polymers and traditional materials such as concrete and steel. This innovative system targets rehabilitation and construction applications in hard-to-reach areas, where the lightweight, easily transportable printed parts act as permanent formwork, supporting the weight of fresh concrete and construction loads, eliminating the need for shoring. The integration of this technology enables the construction of more efficient and durable structures, reduces costs and execution times, and optimizes the use of raw materials.

PALABRAS CLAVE: Impresión 3D, plástico, hormigón, viga híbrida, sección compuesta.

KEYWORDS: 3D printing, plastic, concrete, hybrid beam, composite section.

1. Introducción

La fabricación aditiva, comúnmente conocida como impresión 3D, ha revolucionado el ámbito de la construcción al permitir la creación de estructuras complejas y personalizables [1], utilizando materiales como los polímeros en forma de pellets que se agregan capa por capa. Este avance tecnológico permite

una producción rápida, económica y con un control exhaustivo del material y las formas, abriendo nuevas posibilidades en la ingeniería estructural [2]. En combinación con las tecnologías tradicionales, como el hormigón armado o el hormigón pretensado, surge esta solución híbrida, en donde se fabrican vigas y

elementos estructurales que combina elementos impresos en 3D fabricados con polímeros, los cuales se rellenan con materiales tradicionales como es el hormigón y el acero, que aprovechan las propiedades individuales de cada material y generan una sinergia estructural.

En esta comunicación se presenta un sistema híbrido, que combina la impresión 3D de segmentos de polímeros con el uso de hormigón y acero (Figuras 1 y 2), con el objetivo de ser empleado en aplicaciones de rehabilitación y construcción en zonas de difícil acceso. En estos entornos, donde el acceso de la maquinaria pesada resulta inviable, los segmentos impresos en 3D se convierten en una solución ideal, dado que son ligeros, fáciles de transportar y pueden ensamblarse in situ. Además, estas piezas actúan como encofrados perdidos, soportando su peso propio, el peso del hormigón fresco durante el proceso de hormigonado, así como una sobrecarga de construcción. Esto elimina la necesidad de encofrados y apuntalamientos tradicionales. Esta característica reduce el tiempo de construcción, la mano de obra y los costos, factores críticos en la construcción tradicional.

Los segmentos poliméricos pueden mejorar la durabilidad de la viga al recubrir gran parte de su sección transversal. Esta tecnología ofrece la capacidad de diseñar secciones óptimas en función de las cargas esperadas, maximizando el rendimiento material y minimizando el peso. En conjunto, el uso de la impresión 3D en la construcción de elementos híbridos representa una innovación disruptiva que responde a los desafíos actuales de la construcción, con ventajas claras en términos de sostenibilidad, resistencia y eficiencia estructural.

2. Descripción de la viga híbrida

1.1 Geometría de la viga híbrida

La geometría del perfil impreso en 3D consiste en una sección transversal en forma de doble T, diseñada específicamente para la impresión 3D con tecnología de deposición de filamento fundido (FDM). La sección transversal está abierta en su parte superior, lo que permite después de ensamblar la viga, verter el hormigón (Figura 3).

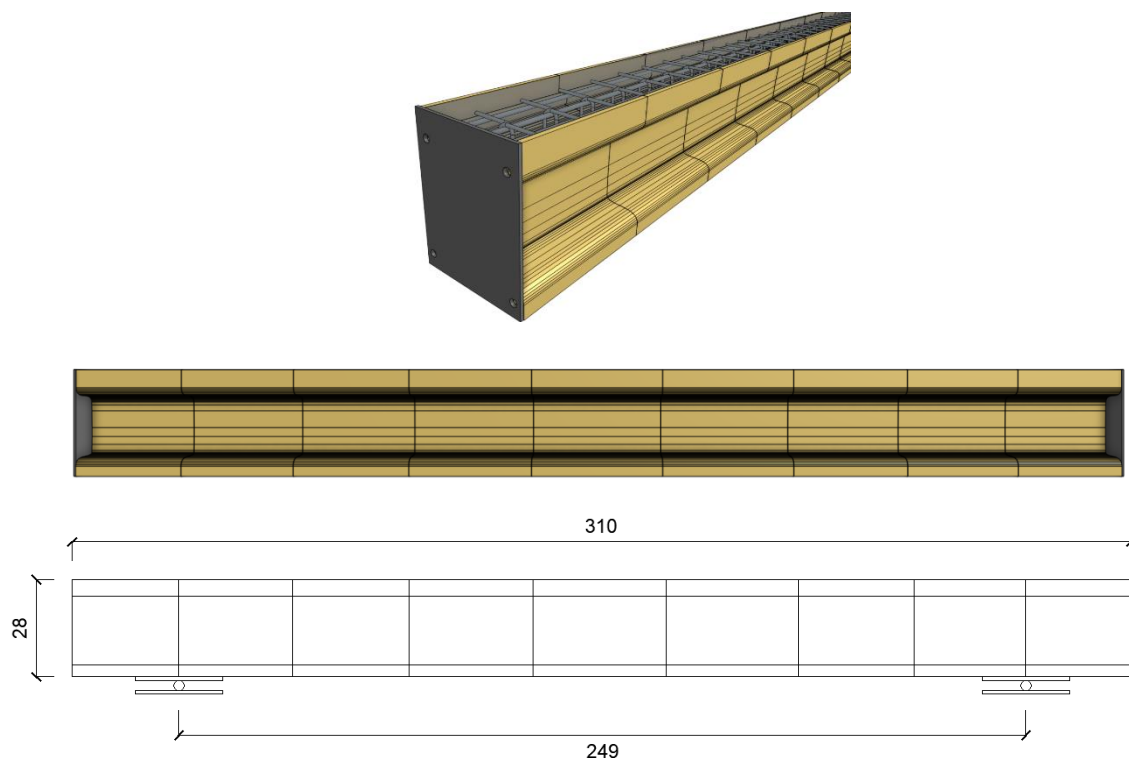


Figura 1. Vista en perspectiva y alzado viga híbrida. Dimensiones en centímetros.

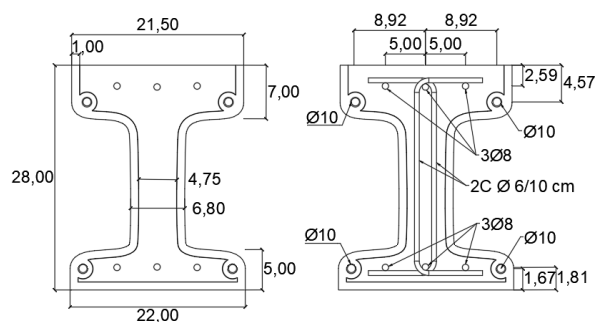


Figura 2. Sección transversal en centro luz de la viga con cotas en centímetros y vista en perspectiva.

La elección de una doble T responde tanto a criterios estructurales como a los requerimientos de impresión 3D, optimizando el rendimiento de la impresora al permitir la deposición continua y sin interrupciones mediante una doble capa de filamento para generar el contorno de la pieza. Esta disposición reduce tiempos de impresión, evita paradas de la máquina y mejora la integridad estructural del perfil impreso.

1.2 Propiedades mecánicas del hormigón, del acero y del plástico

Hormigón

La mezcla de hormigón se ha diseñado para obtener un hormigón autocompactante SSC con una resistencia nominal de 40 MPa. La tabla 1 muestra las proporciones de la dosificación empleada. La tabla 2 muestra los resultados de caracterización del hormigón de las cuatro probetas cilíndricas de 300 mm. de altura y de 150 mm. de diámetro, tomadas para el control de calidad de este material. La resistencia a compresión (f_c) y el módulo de elasticidad (E_c) se obtuvieron de acuerdo con la normativa UNE-EN 12390. Los ensayos se realizaron a los 28 días después de verter el hormigón insitu.

La resistencia a compresión del hormigón autocompactante SCC utilizado en este prototipo de viga osciló entre 40,24 MPa y 43,35 MPa, y el valor aproximado del asentamiento fue de 700mm, según UNE-EN 12350-8:2020.

Tabla 1. Dosificación hormigón (kg/m³).

Tipo de hormigón	CEM I 42,5 SR	Agua	Árido de sílice (0 – 4 mm)	Árido de sílice (0 – 12 mm)	Finos calizos	Aditivo superplastificante 20HE de Sika
H-40	400	250	417	695	528	0,2

Tabla 2 Propiedades mecánicas del hormigón.

Tipo de hormigón	f_c (MPa)	E_c (MPa)
J-11	40,24	29.390
J-12	41,88	-
J-21	42,87	29.811
J-22	43,35	-

Acero

En la figura 4 aparecen las curvas tensión – deformación de caracterización de armaduras de acero según UNE-EN ISO 6892-1:2019. Esta figura muestra el límite elástico de la armadura (f_y), la deformación de la armadura en el límite elástico (ϵ_y), la deformación en la que comienza

la rama de endurecimiento (ϵ_{sh}), la resistencia máxima a tracción máxima de la armadura ($f_{s,max}$), la deformación asociada a la resistencia máxima a la tracción ($\epsilon_{s,max}$) y el módulo de elasticidad (E_s). Estos valores son la media de tres ensayos de caracterización de cada diámetro de barra.

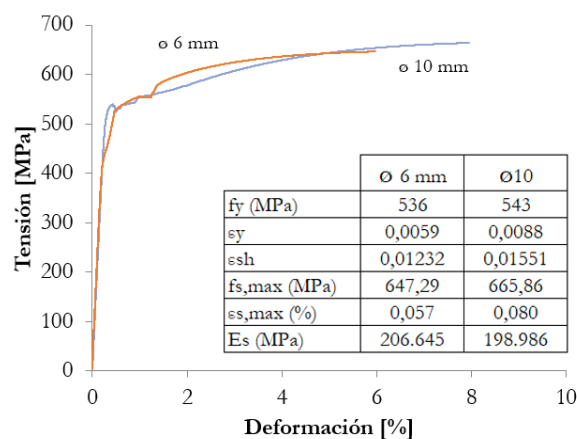


Figura 3. Curvas de tensión-deformación del acero.

Plástico

El PLA (ácido poliláctico) es un material termoplástico derivado de recursos renovables como el maíz y la caña de azúcar, lo que lo hace más sostenible. Es ampliamente utilizado en impresión 3D por su bajo punto de fusión (180-220 °C), lo cual facilita su manejo sin necesidad de camas calefactadas y reduce deformaciones durante el enfriamiento. Este material ofrece una buena rigidez y precisión dimensional, aunque su resistencia a impactos y altas temperaturas es limitada. Debido a su acabado de alta calidad, el PLA es ideal para prototipos, modelos arquitectónicos y aplicaciones de bajo esfuerzo mecánico, siendo particularmente útil en el desarrollo de encofrados impresos en 3D y en estructuras auxiliares.

Comúnmente en la impresión 3D se ha empleado el PLA en formato filamento, pero la investigación ha demostrado utilizar pellets que son más fáciles de producir que los filamentos [3].

En la tabla 3 aparecen las propiedades físicas del material (γ) según la norma ASTM D792 y las propiedades mecánicas como la resistencia a la tracción (σ_p) y su módulo (E_p) según la norma ASTM D638 y la elongación en rotura (ϵ) según ASTM D882.

Tabla 3 Propiedades físicas y mecánicas del PLA.

Propiedades físicas y mecánicas	Unidad	Valor
Peso específico (γ)	g/cm ³	1,24
Resistencia a la tracción (σ_p)	MPa	50
Módulo de tracción (E_p)	MPa	2.315
Elongación a la rotura (ϵ)	%	3,31

1.1 Procedimiento de construcción de la viga híbrida

Impresión 3D de los segmentos de plástico

El proceso de fabricación comienza con la impresión de los segmentos de plástico

utilizando una impresora 3D de gran formato que emplea pellets de PLA como material base.

La impresión 3D empieza con el diseño de las piezas en un software de modelado 3D, en este caso se ha empleado el software OnShape. Este modelo se crea en formato digital y se guarda en un archivo estándar, generalmente en formato STL (Standard Tessellation Language). Este archivo contiene información sobre la geometría tridimensional de la pieza, describiendo su superficie mediante una malla de triángulos o formato STEP, (Standard for the Exchange of Product Model Data) que puede intercambiarse la totalidad de la información que define los productos entre sistemas heterogéneos de diseño asistido por ordenador.

Una vez diseñado el modelo, se importa al laminador escogido, como es el caso del Prusa Slicer, que es un software especializado para convertir el modelo 3D en instrucciones específicas para la impresora. Este proceso se conoce como *rebanado* o *slicing*. Prusa Slicer divide el modelo en capas horizontales delgadas y genera un archivo G-code. Este archivo contiene las instrucciones necesarias para que la impresora 3D configurada y calibrada previamente construya la pieza capa por capa.

En el mundo de la impresión 3D de plásticos, existen multitud de parámetros de impresión, que influyen directamente en la calidad y el tiempo de fabricación, los más relevantes en la impresión de segmentos de secciones de vigas han sido:

- **Altura de capa:** Define el grosor de cada capa. Alturas menores mejoran la calidad de la superficie, pero aumentan el tiempo de impresión. Tras varias pruebas de calibración y conociendo las capacidades mecánicas de la impresora 3D, se ha establecido el óptimo en 2mm de altura de capa.
- **Temperatura de extrusor y cama caliente:** Establece la temperatura óptima para fundir el filamento (PLA: 180-220°C) y para mantener la adherencia a la cama de

impresión. En la impresora empleada, existe una torre de temperaturas con cuatro calentadores en el extrusor cuyas temperaturas van de 180 -240°C.

- Velocidad de impresión: La velocidad de impresión se ajusta en función del caudal de pellets fundidos que se extruyen, a mayor caudal generalmente mayor tiempo se requiere para fundir los pellets y por tanto la velocidad de impresión se reduce.
- Densidad y patrón de relleno: Determina la cantidad de material dentro de la pieza (relleno parcial o sólido) y el diseño interno para balancear resistencia y material utilizado. En el caso de los segmentos de viga, se ha eliminado el relleno, imprimiendo solamente el contorno de la pieza.

Otro aspecto que se ha tenido en cuenta para la impresión de los segmentos es la orientación. Numerosos estudios investigan que tanto los patrones de rellenos como la orientación de la estructura afectan significativamente a la resistencia a tracción de las piezas [4]. Para la fabricación de las piezas del prototipo se ha escogido la orientación de impresión, perpendicular a los esfuerzos de tracción que soportara la viga durante su vida útil. Esta elección se ha tomado por un lado debido a la facilidad de impresión evitando soportes auxiliares y optimizando el proceso y por otro lado, por el sistema de junta entre segmentos impresos escogida que se explica en el apartado siguiente.

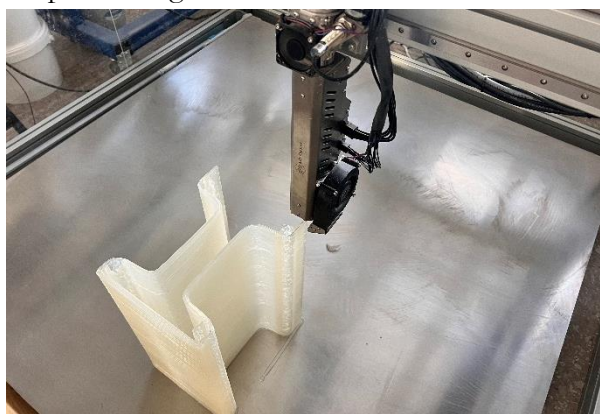


Figura 4. Impresión segmentos.

Estos segmentos poseen una geometría específica diseñada para actuar como encofrado perdido y soportar tanto su peso propio como el del hormigón fresco durante la construcción. Una vez completada la impresión, los segmentos se inspeccionan para asegurar su precisión dimensional e integridad estructural.

Ensamblaje de los segmentos de plástico y colocación de la armadura en la viga híbrida.

La unión de los segmentos impresos en 3D se realiza en seco enfrentándose cara a cara conectando todas las piezas mediante un pretensado con acero B500SD de diámetro 10mm. Los extremos de las barras han sido mecanizados con una rosca de métrica M8, para poder pretensar las barras por apriete con una llave fija de 13mm. Este pretensado consigue comprimir y unir todas las piezas en forma de junta seca postesada.

Los segmentos impresos se ensamblan siguiendo el diseño estructural previsto (Figura 6.1). A continuación, se coloca la armadura pasiva en el interior de los segmentos impresos (Figura 6.2).

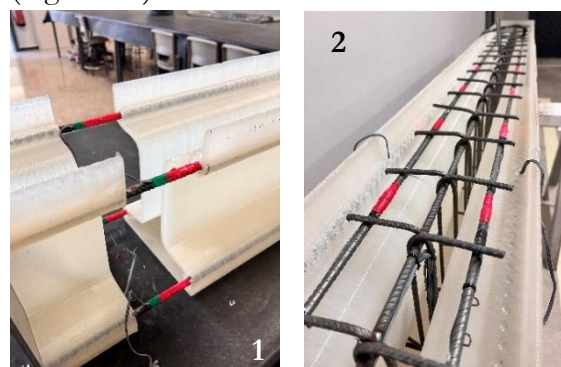


Figura 5. Ensamblado y colocación de la armadura pasiva.

Una vez ensamblados todos los segmentos impresos con la armadura pasiva en su interior, se colocan sendas placas de acero en los extremos de la viga, de 6mm de grosor, que servirán como tape para el hormigón y como transmisor de esfuerzos de tesado al resto de la viga (Figura 7).



Figura 6. Placa acero 6mm en extremo de viga.

Tesado de la armadura activa

Una vez enfrentados los segmentos, se procede a tesar las armaduras para asegurar que la viga impresa en 3D sea capaz de soportar el hormigón fresco mientras se hormigona en su posición definitiva, para el presente caso, la viga se encuentra biapoyada.

Mediante un análisis teórico se ha estimado la tensión de pretensado que deben alcanzar las armaduras corrugadas postesadas. Así, con el objeto que los segmentos permanecieran suficientemente comprimidos, tanto durante el tesado de la armadura como durante el vertido de hormigón, se decidió que la tensión en la junta entre segmentos para cualquier estado de carga no fuera inferior a 0.5 MPa (en compresión). A partir de esta condición se obtuvo que la tensión de pretensado en las armaduras postesas superiores debía ser de 40,51 MPa y en las inferiores de 98,57 MPa.

Fabricación y vertido del hormigón

Previamente al hormigonado, se coloca la viga biapoyada como si se tratase de su posición definitiva en una estructura, con una luz de 2.49 m. Además, se colocan unas espadas con unos separadores y unas pletinas de acero por tal de impedir que la sección impresa se abra mientras se vierte el hormigón. Una vez dispuestos éstos en la posición establecida, se vierte el hormigón por la parte superior de la viga (Figura 8). Durante esta etapa, los segmentos impresos cumplen una doble función: servir como encofrado perdido y soportar las cargas del hormigón fresco.



Figura 7. Vertido del hormigón en el interior de la viga.

Finalmente, cuando endurece el hormigón los segmentos impresos en 3D permanecen como parte de la estructura híbrida, y su función no solo es estructural durante la construcción de la viga híbrida, sino que también será funcional, al proteger a la armadura frente a agentes externos mejorando la durabilidad del conjunto del sistema (Figura 9).



Figura 8. Viga hormigonada.

1.2 Configuración del ensayo y procedimiento de ensayo

El ensayo se realiza a los 28 días desde el hormigonado de la viga. Se evalúa el comportamiento de una viga híbrida biapoyada con una luz de 2,49 metros. La carga vertical se aplicó mediante un actuador hidráulico bajo control por desplazamientos de 0.02 mm/s y de carga de 0.05 kN/s. La fuerza aplicada se incrementó progresivamente hasta alcanzar la carga máxima.

1.3 Instrumentación

La instrumentación empleada a lo largo de la viga contiene tres tipos de dispositivos

diferentes: galgas extensiométricas, captadores de desplazamiento y células de carga.

- **Galgas extensiométricas:** Se colocan en las armaduras, tanto activa como pasiva, en la cara lateral de la viga, en la superficie de plástico impreso en 3D, y en la parte superior de la viga, en el hormigón.
- **Captadores de desplazamiento lineal (LVDT s):** Distribuidos a lo largo de la luz de la viga.
- **Células de carga:** se colocan una en cada apoyo y una tercera en el actuador hidráulico.

La posición de las galgas extensiométricas descrita se muestran en las Figuras 10 y 11. La nomenclatura empleada ha sido la siguiente:

- **(AA)(S/I)-(1):** (A)rmadura (A)ctiva Superior/Inferior N°(1)
- **(AP)(S/I) -(1):** (A)rmadura (P)asiva Superior/Inferior N° (1)
- **(H)(S/I) -(1):** Superficie de (H)ormigón Superior/Inferior N° (1)
- **(P)(S/I) -(1):** Superficie de (P)lástico Superior/Inferior N° (1)

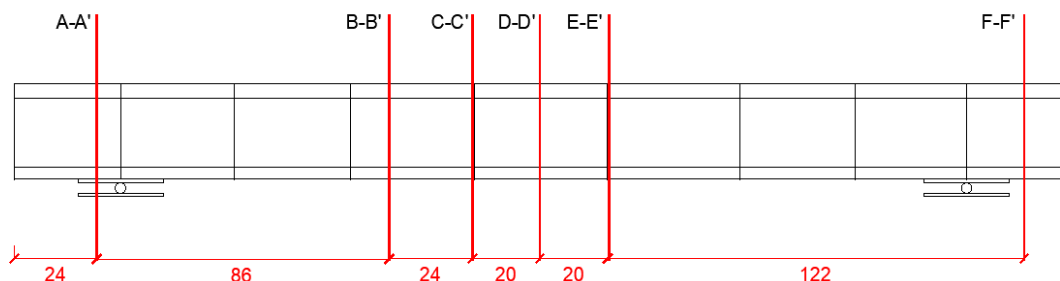


Figura9. Secciones en donde se han situado las galgas extensiométricas. Cotas en centímetros.

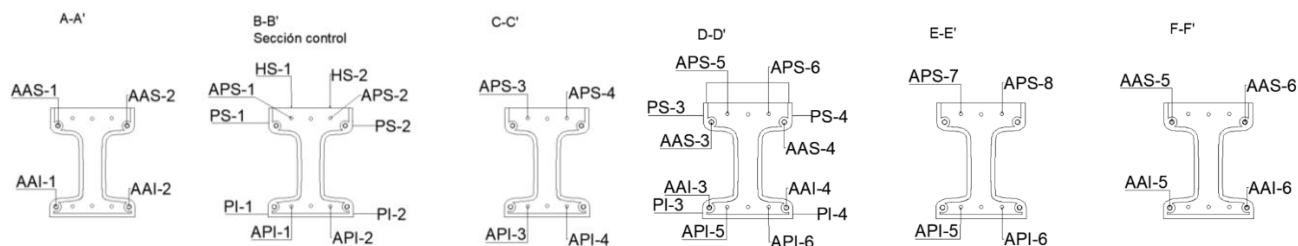


Figura 10. Secciones instrumentación viga.

Observaciones y resultados

Resultados de la monitorización durante el vertido de hormigón en la viga

Durante el tesado y el vertido del hormigón en la viga híbrida se monitorizó la variación de la deformación en la armadura activa debido al tesado y al peso propio del hormigón en estado fresco.

En la Figura 12, se presenta un ejemplo de los datos registrados por una de las galgas, la

AAI. En un primer tramo de la gráfica, se observa un tramo constante de deformación que se corresponde con la deformación de tesado de la armadura. El vertido del hormigón se realiza en dos tongadas. Cuando se vierte la primera tongada, las armaduras experimentan un aumento en la deformación hasta estabilizar su valor. Al verter la segunda tongada, se produce un ligero incremento en la deformación de la armadura.

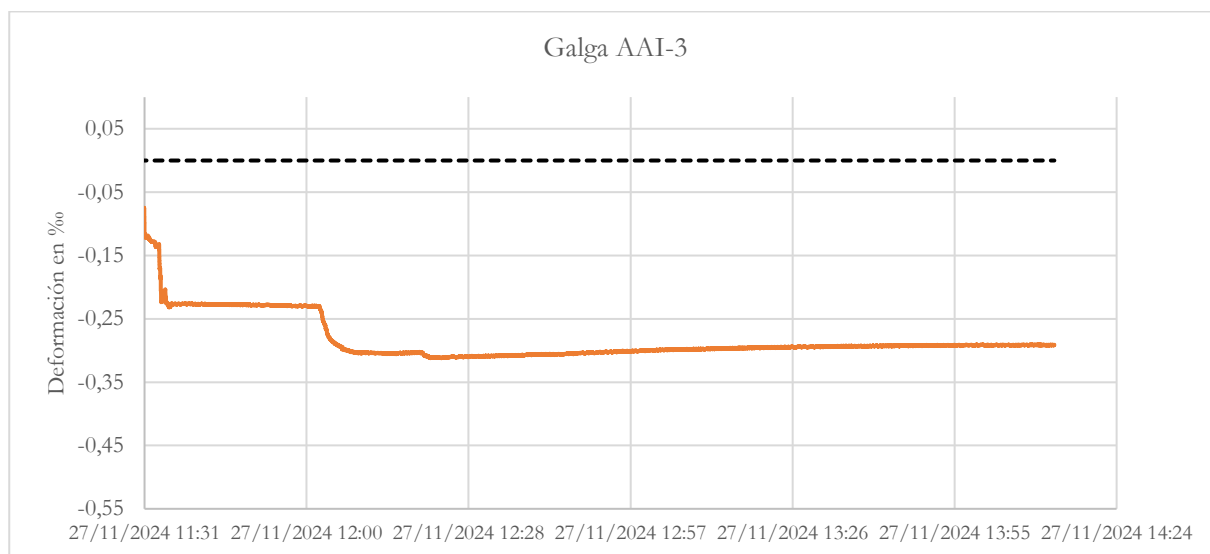


Figura 11. Ejemplo de deformación de la armadura activa AAI-3 durante el vertido del hormigón

Resultados frente a la carga sobre la viga

En el presente apartado se detallan los resultados obtenidos del ensayo a flexión de tres puntos realizado sobre una viga biapoyada con una luz de 2,49 metros.

En la Figura 13 se muestra el diagrama carga-flecha en la sección de centro-luz. Y, en las Figuras 14 y 15, se muestra una imagen de la situación de la viga para la carga máxima y su deformada, respectivamente.

La gráfica resultante de la Figura 13 muestra un incremento gradual de la carga hasta alcanzar un valor máximo de 66 kN. Esta carga máxima es la que se ha considerado como la capacidad última de la viga sometida a flexión. Se ha observado un comportamiento dúctil y un modo de rotura de

flexión por excesivas compresiones en la parte superior de la sección de centro-luz de la viga híbrida. Además, se ha observado una buena adherencia plástico-hormigón ya que los segmentos impresos no se despeguen del resto de la sección. La junta entre segmentos impresos se ha abierto en centro luz una vez ha plastificado la armadura a activa. En consecuencia, se ha demostrado que los segmentos impresos tienen una doble función: estructural, durante la construcción de la viga, y funcional, desde el punto de vista de la durabilidad, al proteger a la viga de la agresión de agentes externos con el recubrimiento que ofrece el perfil impreso.

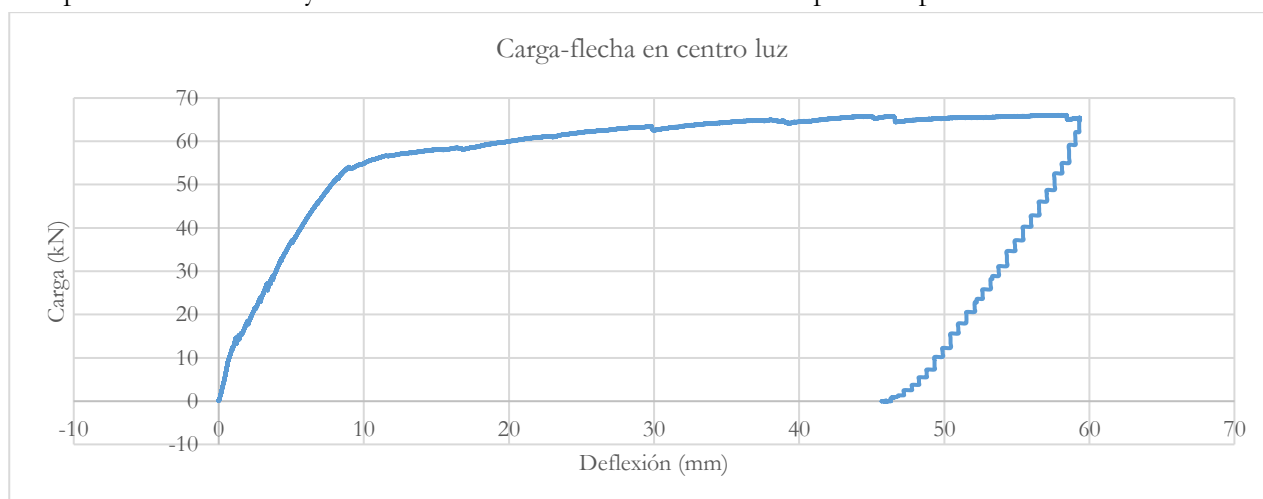


Figura 12. Carga-flecha en centro luz.



Figura 13. Imagen de la viga deformada para la carga máxima

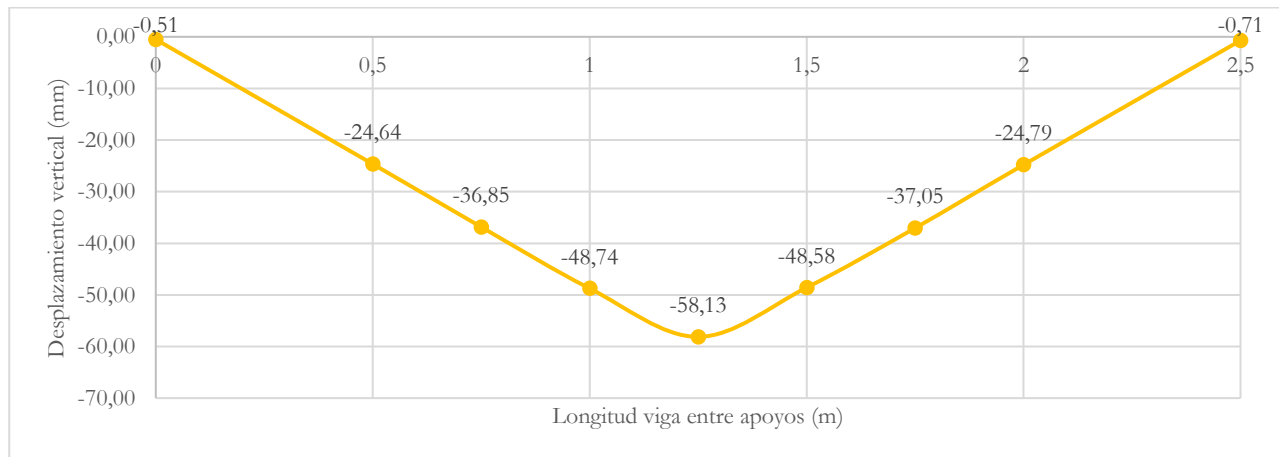


Figura 14. Flecha centro luz a carga máxima de 66 kN

Conclusiones

En conclusión, la integración de la impresión 3D en la construcción de vigas híbridas, combinando polímeros como el PLA con hormigón y acero, ofrece una solución innovadora para la construcción y rehabilitación de estructuras, especialmente en zonas de difícil acceso. Este enfoque aprovecha las ventajas de cada material, optimizando la resistencia y la durabilidad de las estructuras, mientras reduce los costos, el tiempo de construcción y la necesidad de encofrados tradicionales.

La impresión 3D permite la creación de segmentos de polímero personalizados que actúan como encofrados perdidos, soportando tanto su peso como el del hormigón fresco durante el proceso de construcción. Además, la fabricación de estos segmentos mediante tecnología FDM (deposición de filamento fundido) asegura una mayor eficiencia y control en el proceso, lo que, junto con el diseño de las

piezas en forma de doble T, optimiza tanto el rendimiento estructural como el proceso de impresión.

La combinación de armaduras activas y pasivas en la viga permite que la estructura sea capaz de soportar tanto el peso del hormigón en estado fresco como las cargas adicionales durante la fase de construcción.

La combinación de tecnologías avanzadas de fabricación, como la impresión 3D de polímeros y los materiales tradicionales de construcción, abre nuevas posibilidades para enfrentar los desafíos del sector, ofreciendo soluciones más sostenibles, rápidas y eficientes. El ensayo realizado muestra la viabilidad de esta solución constructiva representando un paso hacia una construcción modular y sostenible.

Agradecimientos

Esta publicación es parte del proyecto de I+D+i TED2021-129358B-I00, financiado por

MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y por la “Unión Europea NextGenerationEU/PRTR”. Los autores agradecen a la Universitat Politècnica de València y a la Conselleria de Educación, Universidades y Ocupación de la Generalitat Valenciana por los contratos de personal investigador predoctoral PAID-01-23 y CIACIF/2023/521 de Jorge Sanchis Guerola, respectivamente.

Referencias bibliográficas

- [1] N. Shahrubudin, T. C. Lee, y R. Ramlan, «An overview on 3D printing technology: Technological, materials, and applications», en *Procedia Manufacturing*, Elsevier B.V., 2019, pp. 1286-1296. doi: 10.1016/j.promfg.2019.06.089.
- [2] I. Hager, A. Golonka, y R. Putanowicz, «3D Printing of Buildings and Building Components as the Future of Sustainable Construction?», en *Procedia Engineering*, Elsevier Ltd, 2016, pp. 292-299. doi: 10.1016/j.proeng.2016.07.357.
- [3] S. Singamneni, M. P. Behera, D. Truong, M. J. Le Guen, E. Macrae, y K. Pickering, «Direct extrusion 3D printing for a softer PLA-based bio-polymer composite in pellet form», *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 15, pp. 936-949, nov. 2021, doi: 10.1016/j.jmrt.2021.08.044.
- [4] J. Singh, K. Kumar Goyal, y R. Kumar, «Effect of filling percentage and raster style on tensile behavior of FDM produced PLA parts at different build orientation», en *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd, ene. 2022, pp. 433-439. doi: 10.1016/j.matpr.2022.03.444.