

VIGAS ESBELTAS PRETENSADAS DE UHPFRC: UNA METODOLOGÍA EXPERIMENTAL PARA ESTRUCTURAS MÁS LIGERAS Y EFICIENTES

Mateu-Sánchez, Juan A.^a; Navarro-Gregori, Juan^a; Gandía-Romero, José M.^b; Llinares-Millán, Jaime.^c; Giménez-Carbó, Ester^a; Martí-Vargas, José R.^a

^a Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón (ICITECH), Universitat Politècnica de Valencia,
juamasa8@cam.upv.es

^b Instituto Interuniversitario de Investigación de Reconocimiento Molecular y Desarrollo Tecnológico, Universitat Politècnica de Valencia, joganro@csa.upv.es

^c Centro de Investigación de Tecnología de la Edificación, Universitat Politècnica de Valencia,
jllinares@csa.upv.es

Palabras clave: UHPFRC, pretensado, optimización estructural, comportamiento estructural, vigas esbeltas.

RESUMEN

Este trabajo presenta una metodología experimental para la fabricación y el pretensado de vigas esbeltas de hormigón reforzado con fibras de ultra-alto rendimiento (UHPFRC, Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete), con el objetivo de combinar las ventajas mecánicas de este material con la eficiencia del pretensado. El estudio busca mejorar el comportamiento estructural de los elementos y reducir su peso, promoviendo soluciones estructurales más ligeras y duraderas. La metodología se basa en protocolos de fabricación e instrumentación que aseguran una correcta transferencia de las fuerzas de pretensado. Para ello, se emplean moldes específicos y sistemas de anclaje diseñados para garantizar una adecuada colocación de los tendones y una distribución uniforme de tensiones a lo largo de la viga. Además, se presta especial atención al control de la fisuración, aprovechando la elevada resistencia a tracción y la capacidad de formación de múltiples microfisuras del UHPFRC. Los resultados obtenidos muestran mejoras en resistencia a flexión, patrón de fisuración y capacidad portante, evidenciando el potencial del UHPFRC pretensado para el desarrollo de elementos estructurales esbeltos y de alta durabilidad.

ABSTRACT

This work presents an experimental methodology for the fabrication and prestressing of slender beams made of ultra-high-performance fibre-reinforced concrete (UHPFRC). The objective is to combine the mechanical advantages of this material with the efficiency of prestressing techniques in order to improve structural behaviour while reducing weight, promoting lighter and more durable solutions. The proposed methodology is based on fabrication and instrumentation protocols that ensure a proper transfer of prestressing forces. To achieve this, specially designed moulds and anchorage systems are used to guarantee accurate tendon placement and a uniform stress distribution along the beam length. Particular attention is also given to crack control, taking advantage of the high tensile strength and multiple micro-cracking capacity characteristic of UHPFRC. The results obtained show improvements in flexural strength, cracking patterns and load-bearing capacity, highlighting the potential of prestressed UHPFRC for the development of slender structural elements with high durability.

1. INTRODUCCIÓN

El hormigón reforzado con fibras de ultra-alto rendimiento (UHPFRC, *Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete*) ha experimentado un notable desarrollo durante las últimas décadas debido a sus excelentes propiedades mecánicas y de durabilidad. Este material se caracteriza por presentar elevadas resistencias a compresión, generalmente superiores a 120 MPa, así como una respuesta mejorada a tracción gracias a la incorporación de fibras metálicas. La presencia de estas fibras favorece la formación de múltiples microfisuras y proporciona una capacidad resistente residual tras la fisuración, contribuyendo a mejorar la ductilidad y la tenacidad del material ^{1,2,3}.

Las prestaciones mecánicas del UHPFRC han impulsado su aplicación en elementos estructurales innovadores, especialmente en aquellos casos en los que la reducción del peso propio, la disminución de las necesidades de mantenimiento y el incremento de la vida útil constituyen aspectos prioritarios. En este contexto, el empleo de UHPFRC permite diseñar secciones de menor espesor y geometrías más optimizadas que las utilizadas tradicionalmente ⁴. Esta capacidad para desarrollar elementos más esbeltos resulta particularmente interesante en el ámbito de la prefabricación, donde la reducción del peso facilita las operaciones de fabricación, transporte y montaje.

Por otra parte, el pretensado constituye una estrategia ampliamente utilizada para mejorar el comportamiento de elementos sometidos a flexión. La introducción de esfuerzos de compresión previos permite contrarrestar parcialmente las tensiones de tracción inducidas por las cargas externas, retrasando la aparición de fisuras, limitando las deformaciones en servicio y aumentando la capacidad resistente de los elementos estructurales ^{5,6,7,8}. La combinación del pretensado con las propiedades específicas del UHPFRC ofrece, por tanto, un importante potencial para el desarrollo de soluciones estructurales ligeras y altamente eficientes.

Sin embargo, a pesar del creciente interés que suscita esta combinación de tecnologías, todavía existen diversos aspectos que requieren una mayor investigación experimental. Entre ellos destacan la influencia de la geometría de la sección transversal sobre el comportamiento estructural, la evolución de las pérdidas de pretensado a corto y medio plazo, así como la interacción entre las fibras metálicas y el sistema de pretensado durante el proceso de fisuración y el desarrollo de la resistencia residual ^{9,10,11}. Asimismo, la ausencia o reducción de armadura pasiva convencional en este tipo de elementos plantea nuevos desafíos relacionados con la fabricación, la transferencia del pretensado y la evaluación de los mecanismos resistentes desarrollados durante el ensayo. Por lo tanto, el desarrollo de metodologías experimentales específicas resulta fundamental para garantizar la

correcta fabricación e instrumentación de elementos pretensados de UHPFRC, así como para caracterizar adecuadamente su comportamiento estructural.

En este contexto, el presente trabajo tiene como objetivo desarrollar y validar una metodología experimental para la fabricación y evaluación estructural de vigas esbeltas pretensadas de UHPFRC orientadas al desarrollo de estructuras más ligeras y eficientes.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1. Vigas ensayadas

El programa experimental estuvo constituido por doce vigas esbeltas pretensadas de UHPFRC, distribuidas en dos series en función de la geometría de la sección transversal: una serie de referencia con sección rectangular (S0) y una serie con sección tipo I (S1), diseñada con el objetivo de optimizar el consumo de material manteniendo unas prestaciones estructurales adecuadas.

Dentro de cada serie se estudiaron dos variables principales: la dosificación del UHPFRC y la disposición del pretensado. Se consideraron tres dosificaciones diferentes, denominadas C1, C2 y C3, caracterizadas por distintos contenidos y tipologías de fibras metálicas. Asimismo, se analizaron dos configuraciones de pretensado: una disposición con cordones localizados únicamente en la zona inferior de la sección (T) y una configuración simétrica con cordones en las caras superior e inferior (D).

La Figura 1 muestra la geometría de las secciones transversales estudiadas, así como la disposición de los cordones de pretensado en cada una de ellas. La sección S0 corresponde a una tipología rectangular convencional, mientras que la sección S1 presenta una configuración tipo I orientada a reducir el volumen de material empleado.

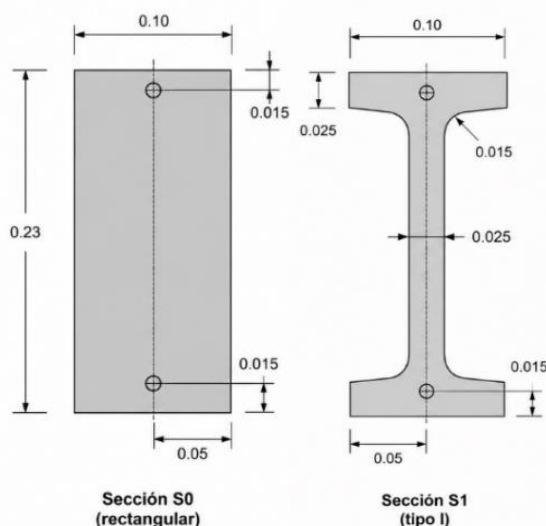


Figura 1. Geometría y disposición del pretensado en las secciones estudiadas.

La identificación de cada viga siguió la nomenclatura X_YZ, donde X indica la tipología de la sección transversal (S0 o S1), Y corresponde a la dosificación de UHPFRC empleada (C1, C2 o C3) y Z representa la configuración del pretensado (T o D). La Tabla 1 resume el programa experimental desarrollado.

Identificación	Sección	Contenido fibras (kg/m ³)	Pretensado
S0_C1T	Rectangular	130 + 60	Inferior
S0_C2T	Rectangular	160	Inferior
S0_C3T	Rectangular	130	Inferior
S0_C1D	Rectangular	130 + 60	Simétrico
S0_C2D	Rectangular	160	Simétrico
S0_C3D	Rectangular	130	Simétrico
S1_C1T	Tipo I	130 + 60	Inferior
S1_C2T	Tipo I	160	Inferior
S1_C3T	Tipo I	130	Inferior
S1_C1D	Tipo I	130 + 60	Simétrico
S1_C2D	Tipo I	160	Simétrico
S1_C3D	Tipo I	130	Simétrico

Tabla 1 - Programa experimental de las vigas pretensadas de UHPFRC.

2.2. Materiales

Para la fabricación del UHPFRC se emplearon cemento Portland CEM I 42.5R SR5, humo de sílice, dos tipos de árido fino silíceo, agua y un aditivo superplastificante. Las mezclas fueron diseñadas para obtener un material autocompactable y alcanzar resistencias a compresión superiores a 130 MPa a los 28 días.

Las composiciones de las tres dosificaciones consideradas se recogen en la Tabla 2. La principal diferencia entre ellas radica en el contenido y la tipología de las fibras metálicas incorporadas.

Materiales	Dosificación C1	Dosificación C2	Dosificación C3
	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)
Arena triturada tipo 1	500	380	380
Arena triturada tipo 2	580	700	700
Cemento CEM I 42.5R SR5	800	800	800
Humo de sílice	175	175	175
Fibras Dramix® OL 13/0.2	130	160	130
Fibras Dramix® 3D 80/30 BGP	60	—	—
Agua	170	170	170
Superplastificante	40	40	40

Tabla 2 - Dosificaciones de UHPFRC consideradas en el programa experimental.

En las tres dosificaciones se utilizaron fibras de acero rectas de 13 mm de longitud, mientras que la dosificación C1 incorporó adicionalmente fibras de acero con extremos

conformados de mayor longitud, con el objetivo de mejorar la respuesta residual del material. Las propiedades físicas y mecánicas de las fibras utilizadas se presentan en la Tabla 3.

Propiedades	OL 13/0.2	80/30 BGP
Material	Acero	Acero
Forma de la fibra	Recta	Con extremos conformados
Presentación	Sueltas	Agrupadas
Longitud (mm)	13	30
Diámetro (mm)	0,20	0,38
Relación de aspecto	65	80
Resistencia a tracción (MPa)	3050	3070
Módulo de elasticidad (GPa)	210	210

Tabla 3 - Propiedades mecánicas y físicas de las fibras de acero utilizadas.

Los cordones de pretensado empleados fueron del tipo Y 1860 S7, de 9,3 mm de diámetro nominal y una resistencia característica a tracción de 1860 MPa.

2.3. Fabricación y pretensado de las vigas

Con el fin de garantizar la repetibilidad del proceso de fabricación y la correcta transferencia de las fuerzas de pretensado, se desarrolló una metodología experimental específica para este estudio.

Las vigas fueron fabricadas sobre una bancada metálica de 1600 mm × 4340 mm, elevada 70 mm respecto al suelo del laboratorio mediante apoyos auxiliares. En el caso de las vigas de la serie S1, la geometría de la sección tipo I se obtuvo mediante moldes de poliestireno expandido (EPS) recubiertos con una capa plástica. Los laterales del encofrado se completaron mediante perfiles metálicos longitudinales separados 230 mm entre caras interiores.

La Figura 2 muestra la bancada de pretensado, el sistema de encofrado y los gatos hidráulicos empleados durante la fabricación de las vigas.

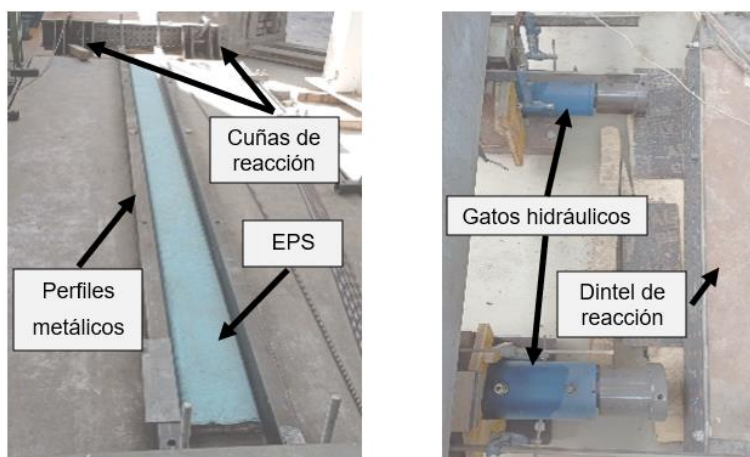


Figura 3. Bancada de pretensado, sistema de encofrado y gatos hidráulicos.

Durante el hormigonado, las vigas se fabricaron con la sección girada 90° respecto a su posición final de ensayo. Esta disposición facilitó la colocación de los moldes interiores, el control geométrico durante el vertido y las operaciones posteriores de desmoldeo y transferencia del pretensado.

El sistema de pretensado estaba formado por cuatro bloques de reacción y dos vigas metálicas perforadas situadas en los extremos del encofrado. Estas vigas incorporaban orificios equiespaciados cada 50 mm, permitiendo adaptar la posición de los cordones según la configuración de pretensado requerida. Además de definir la trayectoria de los tendones, estos elementos servían como superficie de apoyo para los dispositivos de anclaje.

Previamente al hormigonado, los cordones fueron instrumentados mediante galgas extensométricas para registrar la evolución de las tensiones durante las diferentes fases del proceso experimental. Asimismo, se instalaron sensores de cuerda vibrante en el interior del hormigón con el objetivo de monitorizar las deformaciones diferidas del material.

Una vez alcanzado el nivel de pretensado establecido, se procedió al vertido continuo del UHPFRC, garantizando una adecuada compactación y homogeneidad del material. La transferencia del pretensado al hormigón se realizó 48 horas después del hormigonado, una vez verificado que el material había desarrollado la resistencia suficiente para soportar las tensiones inducidas.

La Figura 3 muestra las principales etapas del proceso de fabricación, incluyendo el tesado de los cordones, el hormigonado y la transferencia del pretensado.



Figura 3. Principales etapas del proceso de fabricación y transferencia del pretensado.

2.4. Configuración del ensayo de flexión

El comportamiento estructural de las vigas se evaluó mediante ensayos de flexión en cuatro puntos. La distancia entre apoyos fue de 3500 mm, mientras que la separación entre los puntos de aplicación de la carga fue de 1000 mm, garantizando una respuesta dominada por flexión.

La Figura 4 muestra la configuración del ensayo y la instrumentación empleada para el registro de las variables de interés.

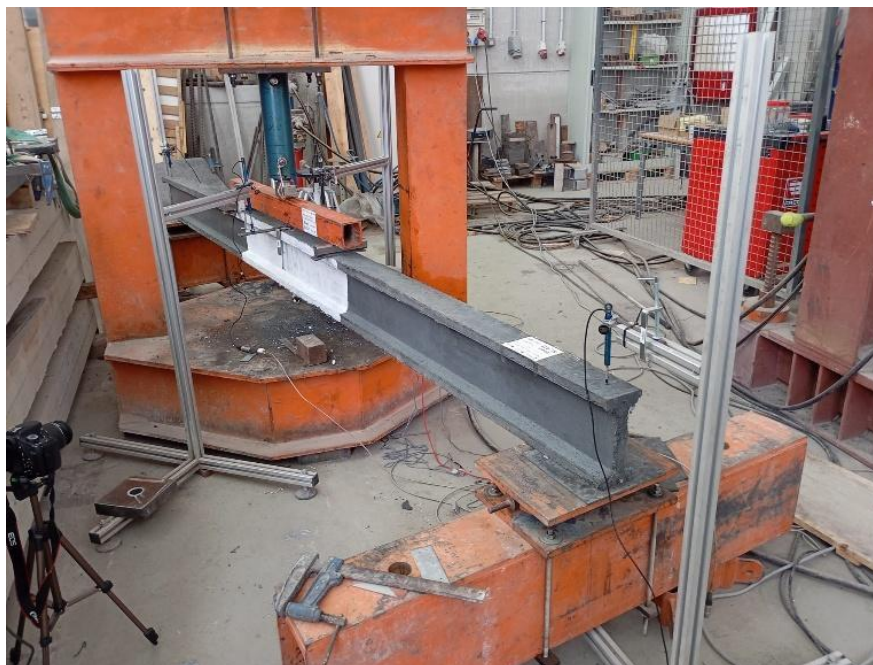


Figura 4. Configuración del ensayo de flexión e instrumentación empleada.

La carga fue aplicada mediante un gato hidráulico servo-controlado conectado a una máquina universal de ensayos. Para la medida de desplazamientos se emplearon transductores potenciométricos situados en la zona central y en los apoyos, permitiendo determinar la flecha efectiva de las vigas. Asimismo, se instalaron galgas extensométricas en las superficies superior e inferior de la sección central con el fin de registrar la evolución de las deformaciones durante el ensayo.

Adicionalmente, el desarrollo y evolución del patrón de fisuración fue monitorizado mediante fotografía digital de alta resolución, permitiendo documentar los mecanismos de daño y los modos de fallo observados.

3. RESULTADOS EXPERIMENTALES

3.1. Caracterización mecánica del UHPFRC

Con el fin de garantizar una adecuada transferencia del pretensado y caracterizar el comportamiento mecánico del material, se realizaron ensayos de compresión sobre probetas cúbicas y ensayos de flexión en cuatro puntos sobre probetas prismáticas sin entalla.

La Figura 6 muestra la evolución de la resistencia media a compresión de las distintas dosificaciones de UHPFRC a diferentes edades de curado. En todos los casos se alcanzaron resistencias suficientes para permitir la transferencia del pretensado a edades tempranas, superándose los 125 MPa a los 28 días y alcanzándose valores próximos o superiores a 140 MPa a los 90 días.

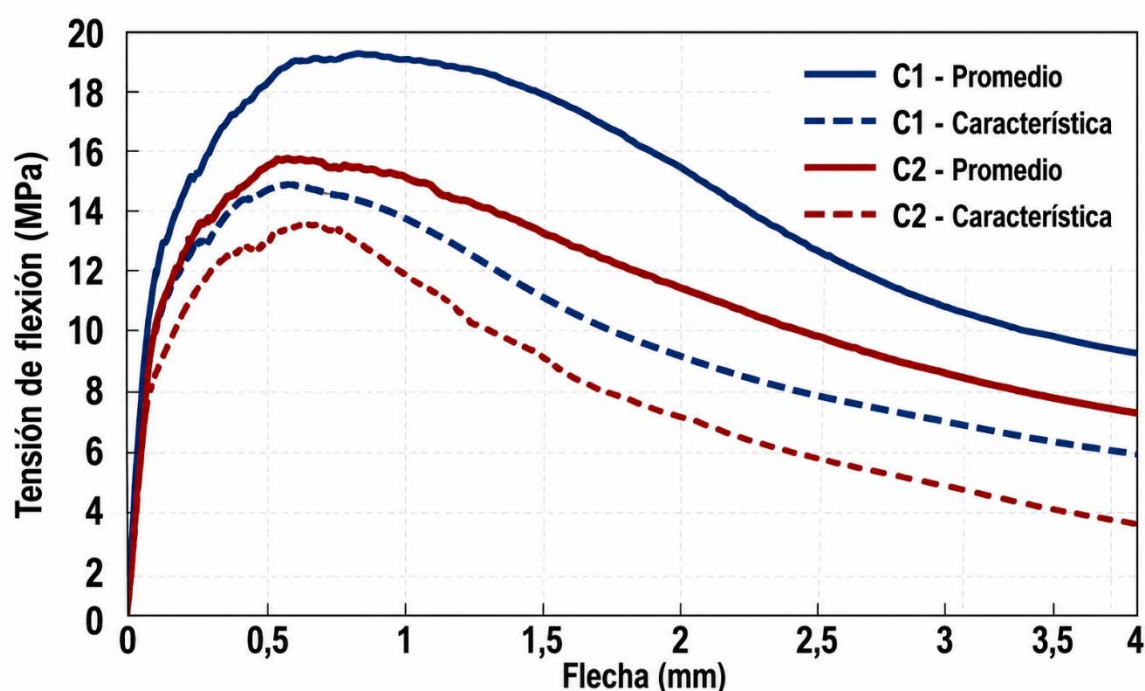


Figura 6 - Resistencia a compresión del UHPFRC de las vigas pretensadas.

La respuesta a tracción se evaluó mediante ensayos de flexión en cuatro puntos sobre probetas prismáticas sin entalla. Los resultados obtenidos evidenciaron un comportamiento pseudodúctil característico del UHPFRC, con una importante capacidad resistente residual tras la fisuración. Entre las dosificaciones estudiadas, la C1 presentó la respuesta postpico más favorable, atribuible a la incorporación combinada de fibras de distinta longitud.

3.2. Evolución de las pérdidas de pretensado

La evolución de las fuerzas de pretensado fue monitorizada desde la fase de tesado hasta el inicio de los ensayos de flexión. Para ello, se registró la fuerza de pretensado inmediatamente antes de la transferencia al hormigón (P_1) y la fuerza existente al comienzo del ensayo de flexión (P_2). La diferencia entre ambos valores permite cuantificar las pérdidas de pretensado acumuladas durante el periodo comprendido entre la transferencia y el ensayo. La Figura 7 presenta las pérdidas relativas de pretensado registradas en las distintas vigas estudiadas.

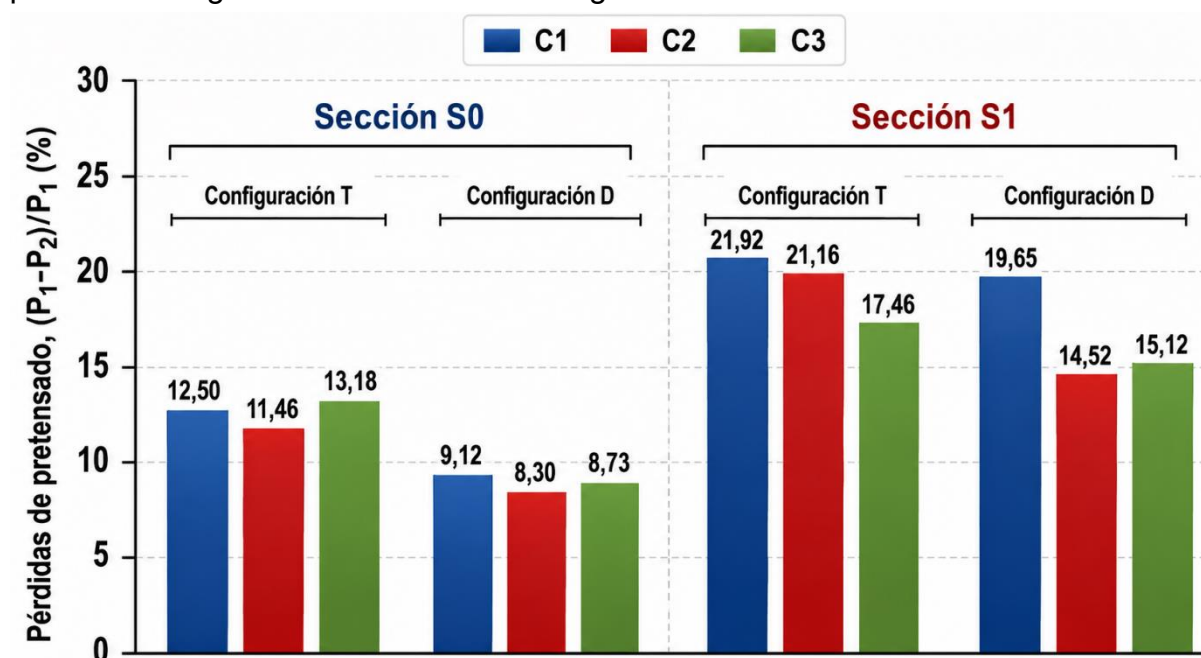


Figura 7 - Pérdidas relativas de pretensado en las vigas ensayadas.

Los resultados muestran que las pérdidas de pretensado estuvieron condicionadas principalmente por la geometría de la sección y la disposición de los tendones. Las vigas rectangulares de la serie S0 registraron pérdidas comprendidas entre el 8 % y el 13 %, mientras que las vigas tipo I de la serie S1 alcanzaron valores entre el 15 % y el 22 %.

Por el contrario, la influencia de la dosificación de UHPFRC resultó menos significativa, observándose diferencias reducidas entre las distintas mezclas dentro de una misma configuración estructural. Estos resultados ponen de manifiesto la importancia de la geometría de la sección en los mecanismos de transferencia y evolución de las fuerzas de pretensado.

3.3. Ensayos de flexión

La Tabla 4 resume los principales resultados obtenidos en los ensayos de flexión realizados sobre las doce vigas pretensadas de UHPFRC. Para cada espécimen se indica la carga última alcanzada durante el ensayo (P_u), la flecha correspondiente a dicha carga (δ_u) y la flecha máxima registrada antes del fallo o finalización del ensayo (δ_{max}).

Viga	P_u (kN)	δ_u (mm)	δ_{max} (mm)
S0_C1T	55.26	33.55	50.85
S0_C2T	52.84	29.08	39.51
S0_C3T	44.78	24.42	89.25
S0_C1D	50.32	28.34	39.04
S0_C2D	43.90	21.74	40.67
S0_C3D	46.17	36.25	74.31
S1_C1T	38.71	26.93	65.60
S1_C2T	37.50	30.04	51.20
S1_C3T	38.93	26.91	82.19
S1_C1D	40.02	34.11	81.78
S1_C2D	37.74	26.69	48.72
S1_C3D	38.92	33.35	61.10

Tabla 4 – Resultados de los ensayos de las vigas de UHPFRC.

La Figura 8 muestra las curvas carga-flecha obtenidas experimentalmente para las dos tipologías de sección consideradas y para las diferentes configuraciones de pretensado.

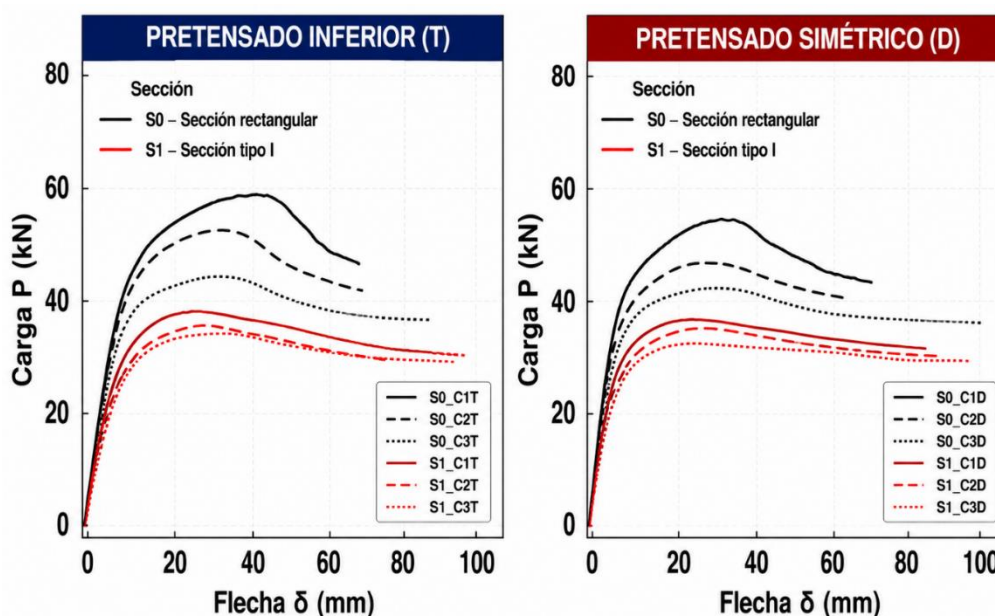


Figura 8 - Curvas carga-flecha obtenidas en los ensayos de flexión.

En todos los casos se observó una respuesta característica compuesta por una fase inicial aproximadamente lineal correspondiente al comportamiento no fisurado de la sección, seguida de una reducción progresiva de rigidez asociada a la aparición de

fisuras. Tras alcanzar la carga máxima, las vigas desarrollaron una rama residual estable en la que la resistencia fue mantenida por la acción combinada del pretensado y del mecanismo de puenteo proporcionado por las fibras de acero.

Las vigas rectangulares de la serie S0 alcanzaron cargas últimas comprendidas entre 43,9 y 55,3 kN, mientras que las vigas tipo I de la serie S1 registraron valores entre 37,5 y 40,0 kN. No obstante, estas diferencias deben analizarse considerando la reducción de material asociada a la sección tipo I. Aunque las cargas máximas obtenidas en la serie S1 fueron inferiores, debe considerarse que esta tipología presenta una reducción significativa del volumen de material respecto a la sección rectangular de referencia.

La influencia de la disposición del pretensado sobre la carga máxima resultó moderada en ambas series, observándose diferencias relativamente reducidas entre las configuraciones con pretensado inferior y pretensado simétrico. De forma similar, las variaciones asociadas a la dosificación de UHPFRC fueron menos acusadas que las derivadas de la geometría de la sección.

Todas las vigas mostraron una respuesta claramente dúctil, manteniendo una capacidad resistente apreciable tras alcanzar la carga máxima. En varios especímenes se registraron flechas superiores a 70 mm antes del fallo definitivo, lo que pone de manifiesto la contribución de las fibras de acero al control de la fisuración y al desarrollo de mecanismos resistentes posteriores a la localización de las fisuras.

Por otra parte, no se observaron fallos asociados al cortante ni fenómenos de aplastamiento del hormigón en la zona comprimida, a pesar de la ausencia de armadura transversal convencional. El fallo estuvo gobernado en todos los casos por mecanismos de flexión, caracterizados por la formación y apertura progresiva de una fisura dominante. La Figura 9 muestra el estado final de algunas vigas representativas tras los ensayos de flexión.

S0_C3T



S1_C3T



Figura 9 – Modos de fallo vigas S0 y S1 para la dosificación C3 .

4. Conclusiones

En este trabajo se ha desarrollado una metodología experimental para la fabricación, pretensado y evaluación estructural de vigas esbeltas de UHPFRC sin armadura pasiva convencional. A partir de los resultados obtenidos, pueden extraerse las siguientes conclusiones:

1. La metodología propuesta permitió fabricar y ensayar con éxito vigas pretensadas de UHPFRC en condiciones controladas de laboratorio, garantizando una adecuada transferencia del pretensado y un seguimiento fiable de la evolución de tensiones y deformaciones durante las distintas fases del proceso.
2. Las pérdidas de pretensado estuvieron condicionadas principalmente por la geometría de la sección transversal y la configuración de los tendones. Las vigas rectangulares registraron pérdidas inferiores a las observadas en las vigas tipo I, mientras que la influencia de la dosificación de UHPFRC resultó comparativamente reducida.
3. Todas las vigas ensayadas mostraron una respuesta característica compuesta por una fase inicial no fisurada, seguida de una reducción progresiva de rigidez asociada a la fisuración y una rama residual posterior al pico de carga. Este comportamiento confirma la capacidad del UHPFRC pretensado para mantener niveles significativos de resistencia y ductilidad tras la formación de fisuras localizadas.
4. Las vigas con sección rectangular alcanzaron las mayores cargas últimas en términos absolutos. Sin embargo, las vigas con sección tipo I presentaron una respuesta estructural comparable empleando una menor cantidad de material, lo que pone de manifiesto su potencial para el desarrollo de elementos estructurales más ligeros y eficientes.
5. No se observaron fallos asociados al cortante ni fenómenos de aplastamiento del hormigón en la zona comprimida, a pesar de la ausencia de armadura transversal convencional. Los mecanismos de fallo observados estuvieron gobernados por flexión, evidenciando el elevado potencial del UHPFRC pretensado para aplicaciones en elementos esbeltos.
6. Los resultados obtenidos confirman la viabilidad del empleo de vigas pretensadas de UHPFRC como alternativa para el desarrollo de soluciones estructurales ligeras, duraderas y de elevada capacidad resistente. Como líneas futuras de investigación, se plantea profundizar en la optimización geométrica de las secciones, el nivel de pretensado aplicado y el estudio del comportamiento a largo plazo de este tipo de elementos.

6. Referencias

1. Graybeal, B.A.; Brühwiler, E.; Kim, B.-S.; Toutlemonde, F.; Voo, Y.L.; Zaghi, A. International Perspective on UHPC in Bridge Engineering. *J. Bridge Eng.* 2020, 25, 04020094. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0001630](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001630).
2. Azmee, N.M.; Shafiq, N. Ultra-High Performance Concrete: From Fundamental to Applications. *Case Stud. Constr. Mater.* 2018, 9, e00197. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2018.e00197>.
3. Mishra, O.; Singh, S.P. An Overview of Microstructural and Material Properties of Ultra-High-Performance Concrete. *J. Sustain. Cem.-Based Mater.* 2019, 8, 97–143. <https://doi.org/10.1080/21650373.2018.1564398>.
4. Bajaber, M.A.; Hakeem, I.Y. UHPC Evolution, Development, and Utilization in Construction: A Review. *J. Mater. Res. Technol.* 2021, 10, 1058–1074. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.12.051>.
5. López, J.A.; Serna, P.; Camacho, E.; Coll, H.; Navarro-Gregori, J. First Ultra-High-Performance Fibre-Reinforced Concrete Footbridge in Spain: Design and Construction. *Struct. Eng. Int.* 2014, 24, 101–104. <https://doi.org/10.2749/101686614X13830788505793>.
6. Sim, C.; Tadros, M.; Gee, D.; Asaad, M. Flexural Design of Precast, Prestressed Ultra-High-Performance Concrete Members. *PCI J.* 2020, 65, 35–61. <https://doi.org/10.15554/pcij65.6-02>.
7. Tian, X.; Fang, Z.; Shao, Y. Flexural Behavior and Design of Prestressed Ultra-High Performance Concrete (UHPC) Beams: Failure Mode and Ductility. *J. Struct. Eng.* 2025, 151, 04025127. <https://doi.org/10.1061/JSENDH.STENG-13830>.
8. Du, L.; Wu, D.; Wang, J.; Wang, S.; Zhao, B.; Tang, X. Experimental Study on Flexural Behavior of Retard-Bonded Prestressed UHPC Beams with Different Reinforcement Ratios. *Buildings* 2025, 15, 887. <https://doi.org/10.3390/buildings15060887>.
9. Graybeal, B.A.; Helou, R.G. Structural Design with Ultra-High Performance Concrete; FHWA-HRT-23-077; Federal Highway Administration: McLean, VA, USA, 2023.
10. Mohebbi, A.; Graybeal, B. Prestress Loss Model for Ultra-High Performance Concrete. *Eng. Struct.* 2022, 252, 113645. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113645>.
11. Deng, Z.; Li, Q.; Tuladhar, R.; Shi, F. Flexural Performance of Prestressed UHPC Beams with Different Prestressing Degrees and Levels. *Comput. Concr.* 2024, 34, 379–391. <https://doi.org/10.12989/cac.2024.34.4.379>.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo financiero recibido a través del proyecto PreULight (CIAICO/2022/045), respaldado por la Conselleria de Innovación, Universidades, Ciencia y Sociedad Digital de la Generalitat Valenciana (España), y del proyecto PID2023-149364OB-I00/AEI/10.13039/501100011033, financiado por la Agencia Estatal de Investigación (AEI, España). Asimismo, expresan su sincero agradecimiento al técnico de laboratorio Francisco J. Martorell por su valiosa colaboración durante el desarrollo de la campaña experimental.