

COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MORTEROS DE CEMENTO REFORZADOS CON FIBRAS DE POLIPROPILENO RECICLADO: ANÁLISIS MEDIANTE FLEXIÓN Y COMPRESIÓN

J.L. García^{1*}, F. Suárez²

¹Departamento de Ingeniería Mecánica y Minera, Universidad de Jaén, EPS de Jaén – Campus Las Lagunillas, s/n, 23071, Jaén, España

²Departamento de Ingeniería Mecánica y Minera, Universidad de Jaén, EPS de Linares – Campus Científico Tecnológico de Linares, Cinturón Sur, s/n, 23700 Linares (Jaén), España

* Persona de contacto: jlrodrig@ujaen.es

RESUMEN

Este estudio constituye la extensión de un trabajo previo basado en ensayos de *pull-out* para evaluar diferentes fibras poliméricas obtenidas a partir de procesos de reciclaje como refuerzo de matrices de yeso y mortero de cemento. El objetivo del presente trabajo es analizar la capacidad de refuerzo que poseen las fibras de polipropileno (PP) - seleccionadas por su mejor desempeño en la fase previa del estudio - empleadas como adición en mezclas de mortero de cemento. Se realizan ensayos de flexión en tres puntos sobre probetas entalladas y ensayos de compresión. El ensayo de flexión en tres puntos permite comparar la capacidad resistente del mortero de cemento reforzado con fibras y la del mortero de referencia frente a un fallo relacionado con la resistencia a tracción. Por su parte el ensayo de compresión permite analizar si las fibras de PP afectan a la resistencia a compresión del mortero de cemento.

PALABRAS CLAVE: Mortero de cemento, Fibras poliméricas, Flexión en tres puntos.

ABSTRACT

This study builds upon prior research involving pull-out tests that evaluated various recycled polymeric fibers as reinforcement for gypsum and cement mortar matrices. The primary objective of the present work is to analyze the reinforcing capacity of polypropylene (PP) fibers - selected for their superior performance in the preceding phase of the study - when incorporated into cement mortar mixtures. To this end, three-point bending tests on notched specimens and compression tests were conducted. The three-point bending test enables a comparison of the load-bearing capacity between the fiber-reinforced cement mortar and a control mixture under tension-induced failure. Additionally, the compression test assesses the impact of the PP fibers on the overall compressive strength of the cement mortar.

KEYWORDS: Cement mortar; Polymeric fibers; Three-point bending.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la investigación sobre el refuerzo del mortero de cemento o del hormigón mediante fibras es un tema de estudio en numerosas publicaciones, con el que se pretende mejorar la resistencia del hormigón frente a esfuerzos de tracción.

El mayor número de estudios realizados se centran en el refuerzo de su estructura empleando fibras metálicas [1] o fibras de vidrio [2], otros estudios optan por utilizar fibras naturales [3,4,5] y, finalmente, hay estudios que emplean fibras poliméricas [6] como refuerzo del mortero de cemento o del hormigón, siendo ejemplos de estos, la poliolefina [7,8], el PET [9] o el polipropileno [10]. No obstante, no hay muchos estudios que utilicen fibras poliméricas procedentes de desechos plásticos como material de refuerzo.

En el presente estudio se analizará el comportamiento a resistencia a tracción y compresión del mortero de cemento reforzado con fibras de polipropileno (PP), procedentes de una planta de reciclado de plásticos que

recogen residuos plásticos provenientes de la agricultura y la industria.

Con ello, se pretende mejorar la resistencia a tracción del mortero de cemento conservando una buena capacidad a compresión y, a la vez, emplear desechos plásticos como fibras de refuerzo en la estructura del mortero de cemento consiguiendo reutilizar un desecho como materia prima y favoreciendo su eliminación como contaminante en el medio ambiente.

2. TRABAJO EXPERIMENTAL

2.1. Fabricación de probetas

En los ensayos realizados en el presente estudio se han fabricado tres tipos de probetas de mortero de cemento, dos con diferentes porcentajes de fibras de PP y una sin adición de fibras. De cada uno de los tres tipos de probetas ensayadas, se han fabricado tres probetas, de modo que el número total de probetas ensayadas han sido nueve para cada tipo de ensayo (flexión y compresión).

La Tabla 1 muestra la nomenclatura empleada para cada una de las probetas ensayadas diferenciadas por el porcentaje de fibras en peso total del mortero de cemento.

Tabla 1. Nomenclatura empleada en los diferentes tipos de ensayos.

Contenido en fibras PP (% en peso)	Nomenclatura
0	C_SF
0,4	C_D1
0,6	C_D2

Las fibras empleadas se han obtenido de una planta especializada en reciclaje y procesado de residuos plásticos procedentes de la agricultura y la industria. Las fibras se han cortado con una longitud de 60 mm. La elección de estas fibras es resultado de estudios anteriores realizados [11,12] en los que se llegó a la conclusión de que este tipo de fibra es la más adecuada para su estudio, debido a una mejor adherencia fibra-matriz y una mayor resistencia frente a esfuerzos de tracción.

Las probetas para el ensayo de flexión en tres puntos son de forma prismática con unas dimensiones de 150 x 150 x 580 mm, fabricadas según la norma UNE-EN 196-1 [13]. Para la realización del ensayo se les practicó una entalla en el punto medio de 25 mm de alto y 5 mm de ancho.

En el ensayo de compresión se ha utilizado una de las dos partes en que se ha dividido la probeta al finalizar el ensayo de flexión. La probeta de compresión se ha obtenido de la misma zona en cada una de las probetas de flexión, evitando así posibles diferencias en los resultados provocados por la utilización de distintas secciones en la obtención de las probetas. Las probetas son de forma prismática con unas dimensiones de 60 x 60 x 150 mm.

2.2. Ensayo de flexión en tres puntos

El ensayo de flexión en tres puntos permite determinar la capacidad del mortero de cemento reforzado con fibras frente a esfuerzos de tracción. El ensayo se ha realizado siguiendo la norma UNE-EN 14651:2007+A1 [14].

El empleo de este ensayo permite conocer si las fibras de PP introducen alguna mejora en las propiedades de resistencia del mortero de cemento a esfuerzos de tracción, realizando una comparación de resultados entre cada una de los porcentajes de adición de fibras empleadas y el mortero de cemento sin fibras. Esto permite identificar si las fibras de PP impiden la propagación de grietas y fisuras en el mortero de cemento, una vez éste ha llegado a su máxima resistencia a tracción.

En el ensayo se ha utilizado una máquina de ensayos Shimadzu AG-X PLUS de 350 kN, aplicando la fuerza con una velocidad de 1 mm/min hasta llegar a un

desplazamiento máximo de 12 mm, empleando para ello el software "TRAPEZIUM X".

2.3. Ensayo de compresión

El ensayo se ha realizado según la norma UNE-EN 196-1 [13]. Mediante el ensayo de compresión se pretende analizar si la adición de fibras de PP afecta de alguna manera, positiva o negativamente, a la resistencia a esfuerzos de compresión del mortero de cemento.

El ensayo de compresión se ha realizado en la misma máquina de ensayos que el ensayo a flexión, pero aplicando la fuerza de compresión con una velocidad de 0,5 mm/min.

3. MATERIALES

- *Fibras de polipropileno*

El polipropileno es uno de los plásticos más utilizados en la industria, ya que se emplea para fabricar textiles, envases, dispositivos médicos o componentes automovilísticos. Las fibras de polipropileno empleadas como adición en el mortero de cemento se han obtenido de la empresa Peñaplast S.L. Esta empresa se dedica a la recepción, transporte y gestión de residuos no peligrosos.

- *Cemento*

En la elaboración del mortero de cemento se ha utilizado un cemento del tipo CEM II/B-L 32,5N. Este es un cemento de la marca Cecesa (Cementos y ceniza S.A.) fabricado en la provincia de Jaén. El cemento está formado por Clinker portland y adiciones de caliza, con una resistencia nominal a los 28 días de 32,5 MPa.

- *Plastificante*

El plastificante empleado es de la marca Sika, concretamente el modelo Viscocrete 20 HE. Este plastificante permite reducir la cantidad de agua de amasado en la fabricación de mortero de cemento u hormigón.

- *Arena*

La arena se ha adquirido de la empresa Sibelco Minerales Cerámicos perteneciente a Sibelco Hispania, en la localidad de Dúrcal (Granada). Presenta un peso específico de 2,9 g/cm³ y color blanco. Se suele emplear en la producción de mortero de cemento y hormigón o como agregado de construcción.

4. RESULTADOS

Las gráficas que se muestran a continuación se presentan con diferentes colores y trazos para una mejor interpretación. Las líneas con trazos continuos, discontinuos y trazos con puntos representan cada una de las tres probetas ensayadas con cada porcentaje en peso de fibras que se ha incorporado al mortero de cemento. De igual forma, cada uno de los porcentajes estudiados están representadas por un color determinado, siendo el

color azul para el porcentaje D1 (0,4 %), el rojo para D2 (0,6 %) y el color negro para las probetas de mortero de cemento sin adición de fibras.

4.1. Ensayo de Flexión en tres puntos

Las Figuras 1, 2 y 3 muestran los resultados obtenidos del ensayo de flexión en tres puntos de cada uno de los porcentajes de fibras estudiadas, y en la Figura 4 se muestra un resultado representativo de cada porcentaje de fibras ensayado para facilitar la comparación de los resultados obtenidos con cada mezcla. En la Tabla 2 se muestran los resultados numéricos más relevantes de las figuras representadas.

En la Figura 1 se pueden ver los resultados obtenidos en las probetas con un 0,4 % en peso de adición de fibras de PP. Se observa que el cemento comienza a fisurarse en torno a 17 kN, pero rápidamente vuelve a recuperar la carga hasta alcanzar entre 28 y 34 kN de carga máxima a tracción, para a continuación ir decreciendo su capacidad de carga de forma gradual, sin sufrir ningún decremento brusco.

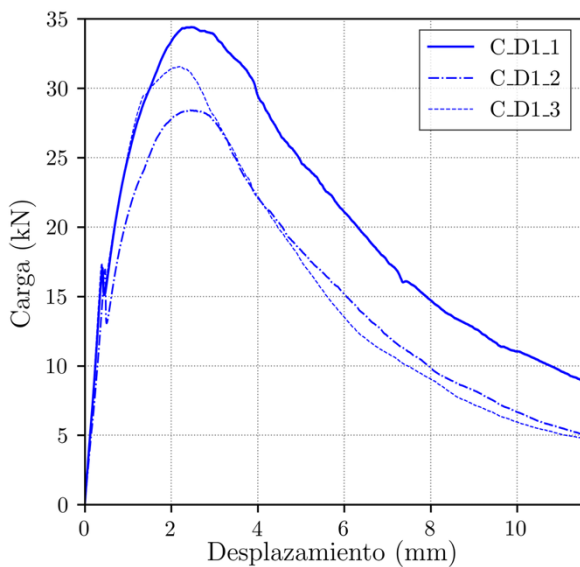


Figura 1. Gráfica carga-desplazamiento de probetas D1 en ensayo de flexión.

De igual forma, la Figura 2 muestra los resultados obtenidos en los ensayos para las probetas con un 0,6% en peso de fibras. Se aprecia como la fuerza de rotura del mortero de cemento sigue siendo alrededor de 18 kN y, aunque sigue teniendo capacidad de volver a soportar cargas superiores de tracción (entre 18 y 33 kN), éstas son menores en comparación con las cargas soportadas por las probetas D1. De igual manera, una vez alcanzada la fuerza máxima, la carga decrece de forma gradual sin presentar caídas bruscas.

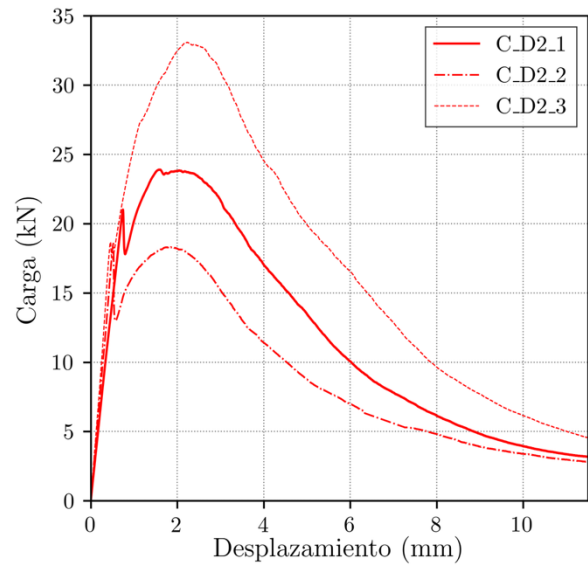


Figura 2. Gráfica carga-desplazamiento de probetas D2 en ensayo de flexión.

La Figura 3 muestra los resultados de las probetas de mortero de cemento sin adición de fibras de PP. En ella se puede ver cómo, una vez alcanzado un valor de carga de entorno a 18 kN, las probetas se fisuran y pierden su capacidad resistente llegando incluso a partirse por la mitad al finalizar el ensayo, hecho que no sucedió con ninguna de las probetas de mortero de cemento con adición de fibras.

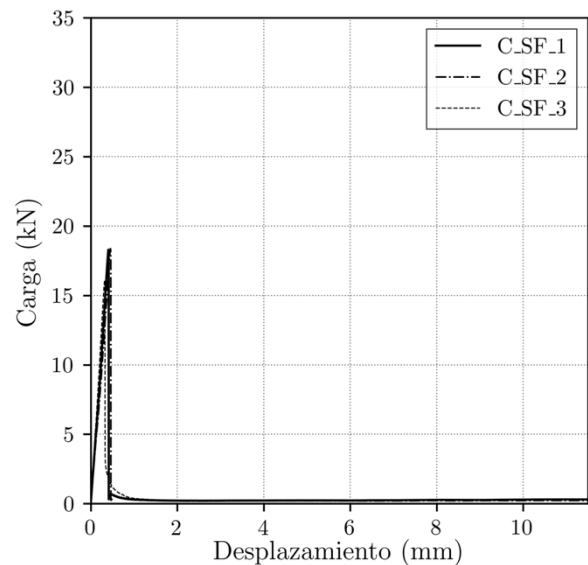


Figura 3. Gráfica carga-desplazamiento de probetas sin adición de fibras en ensayo de flexión.

En las diferentes figuras mostradas se puede ver como las probetas con adición de fibras son capaces de soportar una capacidad de carga residual, en muchos casos, superior al 50% de la carga máxima del mortero de cemento. Esto sugiere que las fibras de PP son capaces de “coser” la estructura interior de la probeta e impedir la propagación de fisuras y grietas en el interior de la probeta. Este fenómeno se conoce como “strain-”

hardening”, ya que no solo impide la rotura inmediata de la probeta, sino que permite soportar cargas de tracción mayores.

En la Figura 4 se muestra una representación de un ensayo de cada tipo de probeta ensayada para una mejor comparación entre ellas. En esta figura se puede observar cómo con la adición de 0,6% en peso se obtiene un valor de capacidad máxima de carga menor en comparación con la adición de 0,4%. Esto puede ser debido a una mayor dificultad de mezclado en estado fluido. En el proceso de mezclado, se observó que la mezcla con adición de 0,6% de fibras resultaba menos trabajable, dificultando una buena distribución de fibras en la mezcla. Por otro lado, la presencia de fibras en la mezcla no sólo permite incrementar su resistencia a tracción, sino que también supone la presencia de mayores discontinuidades en el interior de la probeta, lo que facilita la presencia de concentraciones de tensiones y, en consecuencia, puede producir fisuración bajo tensiones menores que en la mezcla con 0,4% de adición de fibras.

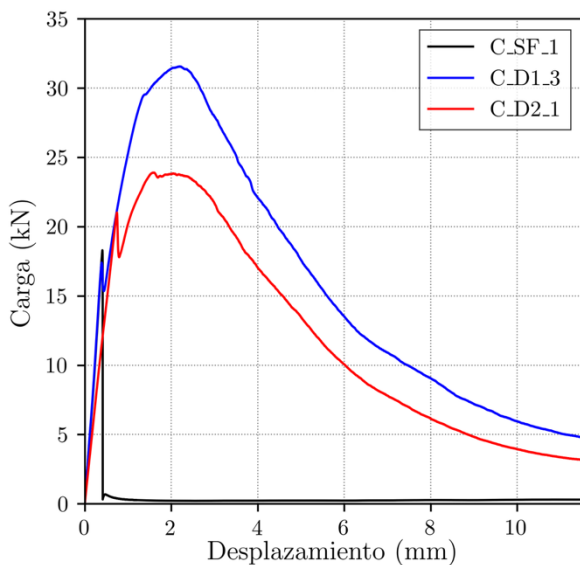


Figura 4. Gráfica carga-desplazamiento de cada porcentaje de fibras empleado en ensayo de flexión.

En la Tabla 2 se muestran los resultados numéricos más relevantes de las figuras mostradas anteriormente. En la primera columna aparecen cada una de las probetas ensayadas, en la segunda se muestra la fuerza máxima alcanzada por cada probeta, la tercera columna hace referencia a la fuerza última soportada por cada probeta antes de finalizar el ensayo (cuando el desplazamiento es igual a 12 mm) y la cuarta columna muestra el valor de la carga cuando la probeta comienza a romperse debido a la fisuración del mortero de cemento.

Tabla 2. Resultados de los ensayos de flexión en tres puntos.

	F _{máx} (kN)	F _{últ} (kN)	F _{lim} cemento (kN)
C_D1_1	34,41	8,45	17,05
C_D1_2	28,41	4,81	16,95
C_D1_3	31,56	4,51	17,40
C_D2_1	23,90	2,95	21,02
C_D2_2	18,56	2,74	18,56
C_D2_3	33,09	4,28	18,68
C_SF_1	18,30	0,29	18,30
C_SF_2	18,37	0,24	18,37
C_SF_3	16,09	0,27	16,09

4.2. Ensayo de Compresión

En las Figuras 5, 6 y 7 se muestran los resultados obtenidos del ensayo de compresión representado mediante gráficas carga-desplazamiento de las tres probetas ensayadas con cada uno de los porcentajes de adición de fibras estudiados. En la Figura 8 se muestra un resultado representativo de cada porcentaje de fibra para facilitar la comparación de cada tipo de probeta estudiada. En la Tabla 3 se presentan los resultados numéricos más destacados de las figuras representadas.

En la Figura 5 se puede ver los resultados obtenidos en las probetas con una adición de fibras de 0,4% en peso. Se observa cómo una vez llegado al punto de carga máximo alrededor de 116 kN comienza a perder capacidad de carga de forma progresiva, sin llegar a producirse descensos bruscos de carga.

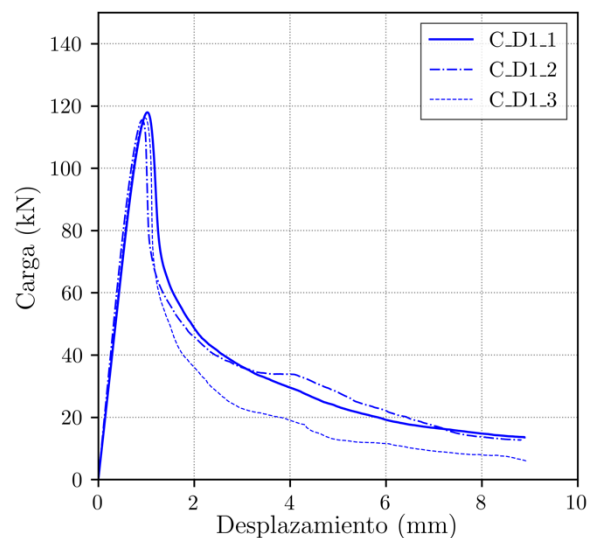


Figura 5. Gráfica carga-desplazamiento de probetas D1 en ensayo de compresión.

La Figura 6 muestra los resultados de las probetas con un 0,6% de adición de fibras. El resultado de este tipo de probetas es similar al del porcentaje anteriormente descrito, una vez alcanzada su máxima capacidad de carga, en torno a 120 kN, desciende de forma progresiva sin pérdidas de carga bruscas.

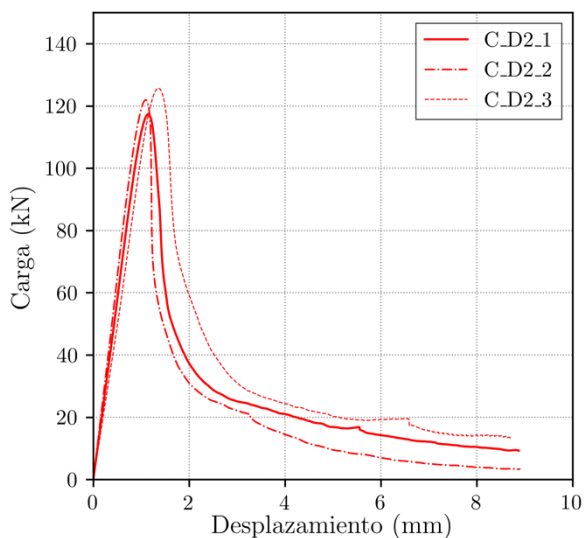


Figura 6. Gráfica carga-desplazamiento de probetas D2 en ensayo de compresión.

La Figura 7 representa los resultados de las probetas sin adición de fibras. Se puede observar cómo una vez alcanzada la carga máxima, alrededor de 140 kN, se produce un descenso brusco de carga finalizando con la rotura de la probeta.

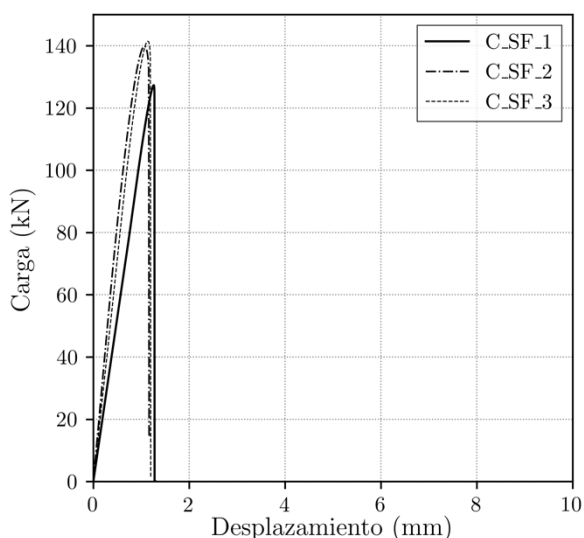


Figura 7. Gráfica carga-desplazamiento de probetas sin adición de fibras en ensayo de compresión.

En la Figura 8 se muestra un ensayo representativo de cada porcentaje de adición de fibras estudiado. En esta figura se puede comprobar como la adición de fibras en las probetas de mortero de cemento provoca un descenso aproximado de la carga máxima soportada de unos 20 kN. Sin embargo, también se observa que, una vez llegado a dicho punto, las probetas con fibras conservan cierta capacidad portante sin llegar al colapso total. Este comportamiento contrasta con el de las probetas sin fibras, que, una vez superada su carga máxima, experimentan una caída brusca en su resistencia que lleva a su rotura.

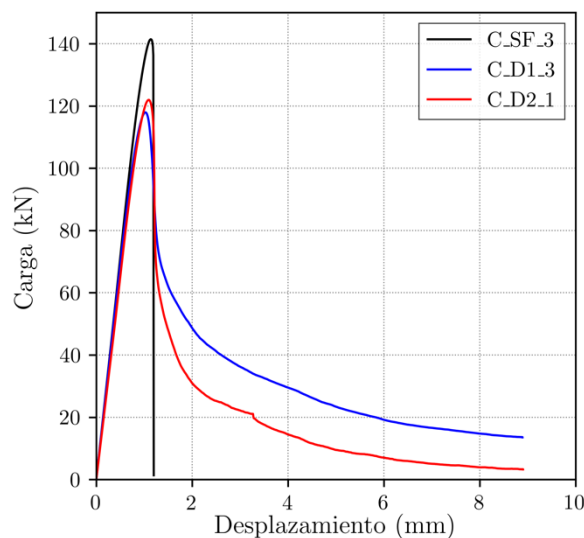


Figura 8. Gráfica carga-desplazamiento de cada porcentaje de fibras empleado en ensayo de compresión.

En la Tabla 3 se muestran los resultados numéricos más relevantes de los ensayos estudiados, como la carga máxima soportada y el desplazamiento que provoca dicha carga. Se puede observar cómo, para todos los porcentajes de adición de fibras ensayados, el desplazamiento para el que la probeta llega al punto de carga máxima se encuentra en torno a los 1-1,7 mm.

Tabla 3. Resultados de los ensayos de compresión.

	$F_{\text{máx}}$ (kN)	Desplazamiento $F_{\text{máx}}$ (mm)
C_D1_1	117,95	1,13
C_D1_2	115,50	1,10
C_D1_3	116,16	1,06
C_D2_1	117,39	1,27
C_D2_2	121,96	1,19
C_D2_3	125,69	1,65
C_SF_1	127,31	1,62
C_SF_2	139,87	1,08
C_SF_3	141,43	1,04

5. CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos en cada uno de los ensayos realizados en el presente estudio se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Las fibras de polipropileno (PP) mejoran la capacidad de resistencia a tracción del mortero de cemento, llegando incluso a soportar una carga del 50 % mayor respecto de la carga de rotura del mortero de cemento cuando se ensayan a flexión.
- Un mayor porcentaje de fibras no implica una mayor capacidad de resistencia, puesto que la unión fibra-matriz puede verse afectada por dificultades en el mezclado de componentes del mortero de cemento.

- Las probetas con adición de fibras de PP presentan una menor resistencia a compresión respecto a las probetas sin adición de fibras, aunque esta diferencia sea pequeña.
- Las fibras de PP impiden la fractura del mortero de cemento una vez llegado a su máxima capacidad de carga a compresión, dificultando la propagación de grietas y fisuras, y retrasando el colapso total de la probeta.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es parte de la ayuda PID2023-149321OA-C33 (NUMFIB), financiada por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades de España, por la Agencia Estatal de Investigación (10.13039/501100011033) y por el FSE+. Los autores desean agradecer a Peñaplast S.L. el suministro de fibras de polipropileno empleadas en la fabricación de las probetas.

REFERENCIAS

- [1] A. Picazo, M.G. Alberti, J.C. Gálvez, A. Enfedaque. *Shear slip post-cracking behaviour of polyolefin and steel fibre reinforced concrete*. Construction and Building Materials, 290 (2021) 123187.
- [2] A. Shamin, Sheikh Phd, PEng, FCAE, Zahra Kharal Phd. *Full-scale and half-scale fibreglass-confined concrete columns for seismic resilience*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Bridge Engineering, 177, Issue 3 (2024) 208-216.
- [3] J.S. Alcaraz, I.M. Belda, E.J. Sanchis, J.M.G. Borrell. *Mechanical properties of plaster reinforced with yute fabrics*. Composites Part B: Engineering, 178 (2019) 107390.
- [4] N. Sakthieswaran, M. Sophia. *Prosopis juliflora fibre reinforced green building plaster materials—An eco-friendly weed control technique by effective utilization*. Environmental Technology & Innovation, 20 (2020) 101158
- [5] F. Iucolano, D. Caputo, F. Leboffe, B. Liguori. *Mechanical behavior of plaster reinforced with abaca fibers*. Construction and Building Materials, 99 (2015) 184-191.
- [6] F. Suárez, L. Felipe-Sesé, F.A. Díaz, J.C. Gálvez, M.G. Alberti. *On the fracture behaviour of fibre-reinforced gypsum using micro and macro polymer fibres*. Construction and Building Materials, 244 (2020) 118347.
- [7] M.G. Alberti, A. Enfedaque, J.C. Gálvez. *Fracture mechanics of polyolefin fibre reinforced concrete: Study of the influence of the concrete properties, casting procedures, the fibre length and specimen size*. Engineering Fracture Mechanics, 154 (2016) 225-244.
- [8] A. Picazo, J.C. Gálvez, M.G. Alberti, A. Enfedaque. *Assessment of the shear behaviour of polyolefin fibre reinforced concrete and verification by means of digital image correlation*. Construction and Building Materials, 181 (2018) 565-578.
- [9] Addulkader Ismail Al-Hadithji, Ahmed Tareq Noaman, Waseem Khairi Mosleh. *Mechanical properties and impact behavior of PET fiber reinforced self-compacting concrete (SCC)*. Composite Structures, 224 (2019) 111021.
- [10] Beatrice Malchiodi, Riccardo Pelaccia, Paolo Pozzi, Cristina Siligardi. *Three sustainable polypropylene Surface treatments for the compatibility optimization of PP fibers and cement matrix in fiber-reinforced concrete*. Ceramics International, 49 Issue 14 Part B (2023) 24611-24619.
- [11] J.L. García, F. Suárez. Estudio de la interfase fibra-matriz entre fibras PET y matrices de yeso y mortero de cemento. Revista de Mecánica de la Fractura, Vol. 5 (2023).
- [12] J.L. García, F. Suárez. Estudio de la adherencia fibra-matriz entre la matriz de yeso y fibras poliméricas procedentes de procesos de reciclado. Revista de Mecánica de la Fractura (2025).
- [13] UNE-EN 196-1. Métodos de ensayos de cementos. Parte 1: Determinación de resistencias.
- [14] UNE-EN 14651:2007+A1. Método de ensayo para hormigón con fibras metálicas. Determinación de la resistencia a la tracción por flexión (límite de proporcionalidad (LOP), resistencia residual).