

COMPORTAMIENTO A FRACTURA DE YESO CON ADICIÓN DE FIBRAS POLIMÉRICAS

F. Suárez^{1*}, L. Felipe-Sesé¹, F.A. Díaz², J.C. Gálvez³, M.G. Alberti³

¹ Departamento de Ingeniería Mecánica y Minera, EPS de Linares (Universidad de Jaén)
Campus Científico Tecnológico de Linares, Cinturón Sur, s/n 23700 Linares (España)

² Departamento de Ingeniería Mecánica y Minera, EPS de Jaén (Universidad de Jaén)
Campus Las Lagunillas s/n 23071, Jaén, España

³ Departamento de Ingeniería Civil: Construcción, ETS de Ingenieros de Caminos,
Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, c/ Profesor Aranguren,
s/n, 28040, Madrid, España

Persona de contacto: fsuarez@ujaen.es

RESUMEN

El yeso es un material de construcción ampliamente utilizado como revestimiento interior en edificios por su bajo coste, manejabilidad y propiedades de habitabilidad (aislamiento acústico y térmico, aspecto estético, etc.). La industria del yeso ha ido buscando nuevos usos, fruto de lo cual, entre otros, han surgido los paneles sándwich de yeso laminado o las placas de yeso reforzado con fibras de celulosa, que mejoran considerablemente sus propiedades mecánicas. Por otro lado, el uso de fibras poliméricas ha dado recientemente interesantes resultados en hormigón, proporcionando buenas propiedades dúctiles a las mezclas y dotándolas de una importante capacidad resistente frente a esfuerzos de tracción. En el presente estudio se analiza el comportamiento a fractura de mezclas de yeso con adiciones de distintos tipos de fibras poliméricas, en particular microfibras de polipropileno y macrofibras de poliolefina. Para ello se realizaron ensayos de flexión en tres puntos con probetas prismáticas entalladas. Además, el uso de un sistema de correlación digital de imágenes (DIC) permite medir la evolución de la apertura de la fisura (CMOD) y, lo que es más innovador e importante para evaluar su comportamiento, obtener mapas completos de deformaciones que ayuden a entender cómo contribuyen los distintos tipos de fibras a la disipación de energía durante la propagación del daño.

PALABRAS CLAVE: Yeso, Fibras Poliméricas, Microfibras de Polipropileno, Macrofibras de Poliolefina

ABSTRACT

Gypsum is a construction material which is widely used as interior lining in buildings due to its low cost, easy handling and habitability conditions (acoustic and thermal isolation, as well as aesthetical properties, for instance). Gypsum industry has searched for new applications of this material finding, among others, plasterboard or cellulose fibre reinforced plasterboard, which remarkably improve its mechanical properties. On another note, the use of polymeric fibres has recently given interesting results with concrete, providing mixes with good ductile properties and good strength against tensile stresses. This work analyses the fracture behaviour of fibre reinforced gypsum mixes using distinct types of polymeric fibres, i.e. polypropylene microfibers and polyolefin macrofibres. To accomplish this, prismatic notched specimens were tested under three-point bending. The use of a Digital Image Correlation system (DIC) allows measuring the evolution of the crack mouth opening displacement (CMOD) and, what is more innovative and important to assess their behaviour, obtaining full field strain maps that help to understand how different types of fibres contribute to dissipate energy during the propagation of damage.

KEYWORDS: Gypsum, Polymeric Fibres, Polypropylene Microfibers, Polyolefin Macrofibres

1. INTRODUCCIÓN

El yeso, debido a su bajo coste y buenas propiedades de habitabilidad, es utilizado habitualmente como material de revestimiento interior en edificios. En las últimas décadas la industria ha desarrollado nuevas soluciones,

como los paneles sándwich de yeso laminado o el empleo de celulosa como fibras de refuerzo.

Por otro lado, el empleo de fibras poliméricas como refuerzo de matrices cuasifrágiles dota a éstas de propiedades que de por sí no poseen, como una notable ductilidad, e incrementan notablemente la energía que el

material es capaz de absorber antes de su pérdida total de resistencia. Este último aspecto resulta particularmente interesante en casos de elementos sometidos a fenómenos sísmicos o de impacto y, en los últimos años, ha experimentado un gran desarrollo en el ámbito del hormigón [1-3]. La normativa actual de hormigón [4-5] contempla ya la adición de fibras en elementos estructurales sin emplear armadura tradicional, aunque dicha normativa parece adecuarse bien a fibras metálicas pero no tanto a fibras de otra naturaleza [6].

Existen estudios sobre la influencia de la adición de fibras en matrices de yeso que datan de los años ochenta, destacando en España el trabajo de García-Santos [7]. Actualmente, la adición de materiales en matrices de yeso es un aspecto de interés, pues ciertas adiciones pueden, por ejemplo, mejorar sus propiedades térmicas [8] o convertirlo en una alternativa interesante frente al uso de la madera en ciertas construcciones [9]. No obstante, la adición de fibras en materiales con baja resistencia frente a esfuerzos de tracción, como el hormigón o el yeso, suele comportar mejoras mecánicas que pueden extender su uso a ámbitos donde se requieran ciertas capacidades como material estructural. Cuando se estudian las propiedades mecánicas en este tipo de mezclas, los estudios suelen limitarse exclusivamente al análisis de las resistencias a flexión y a compresión, además de la variación del módulo elástico.

En este trabajo se presenta un estudio inicial sobre la influencia que la adición de fibras poliméricas en las propiedades mecánicas de mezclas de yeso, haciendo especial énfasis en el análisis de la energía de fractura. Para ello se han considerado dos tipos de fibras poliméricas: microfibras de polipropileno y microfibras de poliolefina. Se compara el comportamiento del yeso sin fibras con mezclas de yeso de cada una de los tipos de fibra mencionados en cantidades de 5 kg/m³. Se emplea el ensayo de flexión en tres puntos con probetas prismáticas entalladas para comparar su comportamiento a fractura y se emplea un sistema de Correlación Digital de Imágenes (DIC) para medir la evolución de la apertura de la fisura o *Crack Mouth Opening Displacement* (CMOD). El uso del DIC permite además obtener un mapa de deformaciones unitarias de campo completo que ayuda a entender el diferente comportamiento de unas y otras fibras durante el proceso de propagación de la fisura.

2. DISEÑO DE LA CAMPAÑA EXPERIMENTAL

Para comprobar el comportamiento de distintas fibras poliméricas en mezclas con matriz de yeso, se optó por realizar tres grupos de probetas:

- Mezcla 0: yeso sin fibras
- Mezcla A: yeso con fibras de poliolefina en una proporción de 5 kg/m³

- Mezcla B: yeso con fibras de polipropileno en una proporción de 5 kg/m³

La elección de estas mezclas permite comparar el comportamiento de dos fibras poliméricas disponibles en el mercado en proporciones similares y diferenciar el modo en que fibras macroscópicas (mezcla A) contribuyen al refuerzo de la matriz en condiciones de tracción frente al comportamiento de microfibras (mezcla B).

Con el objetivo de comparar el comportamiento de cada mezcla frente a fractura, se ensayan probetas prismáticas con entalla bajo condiciones de flexión en tres puntos. A continuación se detallan los materiales utilizados y la configuración del ensayo empleada.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Materiales

- Yeso

El yeso empleado es una escayola E-35 (A1) del fabricante Escayescos. Por tanto, es un yeso de alta calidad con grano muy fino y de una pureza mayor del 90% que está compuesto por sulfato cálcico semihidratado. Este yeso es el habitualmente empleado en los paneles sándwich de yeso laminado.

- Fibras de poliolefina

Estas fibras son de tamaño macroscópico, presentan una superficie rugosa que facilita su adherencia a la matriz en que se embeba y en este estudio se han empleado fibras de 48 mm de longitud. Estas fibras están fabricadas por Sika bajo la denominación Sikafiber T-48, son de color negro y su aspecto puede observarse en la Figura 1.

- Fibras de polipropileno

Son microfibras monofilamento de polipropileno que presentan una longitud de 12mm. Y un diámetro de 31µm. Están fabricadas por Sika bajo la denominación Sikafiber M-12, son de color blanco y su aspecto se muestra en la Figura 1.

3.2. Fabricación de las probetas

Se fabricaron probetas prismáticas de 160mm x 40mm x 40mm en series de tres unidades empleando moldes de acero inoxidable y desmoldante de película seca de silicona. Para la fabricación de las probetas de yeso se siguió el procedimiento indicado en la norma UNE-EN 13279-2 [10] y para las probetas de yeso con fibras una leve modificación del mismo que se describe a continuación:

1. Vertido del yeso en el agua y amasado manual con paleta durante 40 segundos.

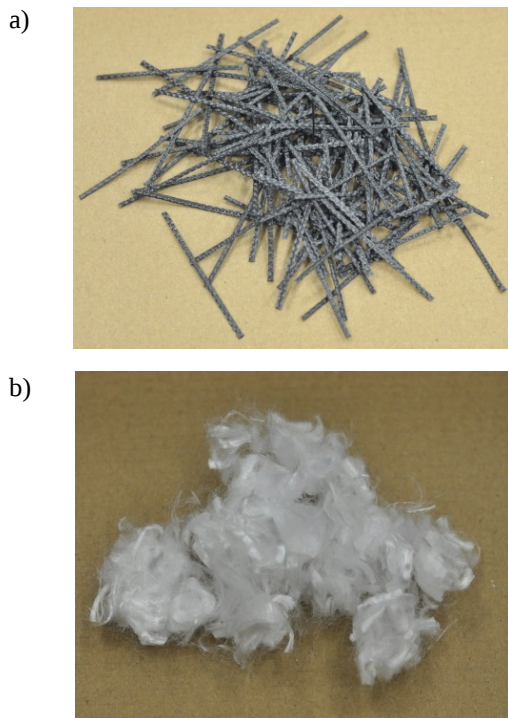


Figura 1. Fibras empleadas en este estudio. a) fibras de poliolefina, b) fibras de polipropileno.

2. Vertido de las fibras y amasado manual con paleta durante 20 segundos.
3. Amasado a baja velocidad en amasadora con movimiento de rotación y planetario durante 60 segundos.
4. Vertido en moldes previamente impregnados con desencofrante.
5. Aplicación de golpes sobre el molde para eliminar posibles burbujas retenidas en la mezcla y posterior enrasado.
6. Curado en cámara climática durante siete días a $23 \pm 2^\circ\text{C}$ y a una humedad relativa de $50 \pm 5\%$.
7. Desmoldado y curado en estufa durante dos días a 55°C .
8. Enfriamiento a temperatura ambiente y generación de entalla con sierra de cinta.
9. Marcado de la probeta con espray negro para la utilización del DIC.

3.3. Métodos de ensayo

- Máquina universal de ensayo

Los ensayos se realizaron con una máquina bicolonna de la casa Instron, perteneciente a la serie 5960, con una célula de carga de 30 kN, con una exactitud de medición de carga del $\pm 0.5\%$ de lectura hasta $1/500$ de la capacidad de la célula.

Para los ensayos se empleó el utillaje mostrado en la Figura 2, que consta de una viga horizontal de soporte y dos cilindros guiados que sirven de apoyos. Este

montaje permite materializar un ensayo de flexión en tres puntos con la disposición mostrada en la Figura 3.

- Sistema de correlación digital de imágenes (DIC)

Para la medición de las deformaciones en la probeta y de la evolución del CMOD a lo largo del ensayo, se empleó un sistema de correlación de imágenes, o DIC. Esta técnica se basa en la comparación de las imágenes adquiridas a lo largo del ensayo con la imagen inicial de referencia; dicha comparación permite obtener el campo de desplazamientos en toda la superficie fotografiada a lo largo del ensayo y, por tanto, operar el campo de deformaciones asociado. Para más información sobre esta técnica se sugiere consultar [11-12]. En la Figura 2, que muestra la configuración de uno de los ensayos, se identifica la cámara empleada para la toma de imágenes, que en este caso fue una Allied Stingray F-080C con una resolución de 1032×766 píxeles.



Figura 2. Configuración de un ensayo de flexión en tres puntos instrumentado para medición de deformaciones y desplazamientos con DIC.

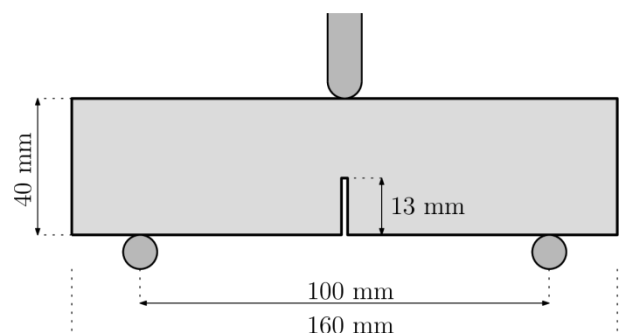


Figura 3. Geometría del ensayo de flexión en tres puntos con entalla.

4. ENSAYO DE FLEXIÓN EN TRES PUNTOS

Los ensayos de flexión en tres puntos se realizaron con la configuración mostrada en la Figura 3; por tanto, con una relación luz/canto de 2.5 y una entalla igual a $1/3$ del canto de la probeta.

Los ensayos se realizaron con control en desplazamiento del actuador empleando una velocidad de desplazamiento de 0.05 mm/min hasta la primera caída de carga, producida por el fallo de la matriz de yeso, y una velocidad de 0.25 mm/min en el resto del ensayo, donde el comportamiento está gobernado por las fibras de refuerzo. La duración total de cada ensayo fue de 27 minutos.

4.1. Resultados

- Curvas carga-desplazamiento y curvas carga-CMOD

Las Figuras 4 y 5 muestran las curvas carga-desplazamiento del actuador y carga-CMOD obtenidas con las probetas fabricadas con fibras de poliolefina (en azul) y para las fabricadas con fibras de polipropileno (en rojo), respectivamente. Para facilitar la comparación, en gris se muestran los resultados de las probetas de yeso sin fibras; estos resultados únicamente se muestran en los diagramas carga-desplazamiento, ya que en el caso de los diagramas carga-CMOD son inapreciables, pues la rotura se produce con un valor del CMOD extremadamente bajo.

En el caso de las fibras de polipropileno (Figura 5) se observa un comportamiento muy repetitivo en los dos diagramas y se obtiene un incremento claro de la energía de fractura, pues el área encerrada bajo las curvas carga-desplazamiento es mucho mayor que en el caso de los yesos sin adiciones. En el caso de las probetas fabricadas con fibras de poliolefina (Figura 4), el incremento de la energía de fractura es mucho mayor, incluso obteniéndose cargas máximas superiores (valores entre 400 y 600 N) a las del propio valor pico definido por la matriz de yeso (valores en torno a 400 N).

Por otro lado, la adición de fibras de poliolefina muestra una gran dispersión experimental, al contrario que en el caso de las fibras de polipropileno. Esto es probablemente debido a la naturaleza macro y micro de cada fibra. En el caso de las fibras de polipropileno, de carácter micro, la distribución de las mismas en la mezcla es mucho más uniforme, pues su pequeño diámetro hace que las fibras sean mucho más flexibles y se distribuyan de forma más homogénea en la matriz de yeso. Por el contrario, las fibras de poliolefina, de un diámetro equivalente de un orden de magnitud superior, tienen además mayor rigidez, lo que provoca que la distribución de las fibras pueda ser menos homogénea. La mayor dispersión de resultados en el caso de las probetas fabricadas con fibras de poliolefina, por tanto, puede explicarse por el hecho de que su distribución es mucho menos homogénea, de modo que el número de fibras que cosen el plano de rotura puede variar de manera importante entre una probeta y otra, afectando muy notablemente a los resultados de los ensayos.

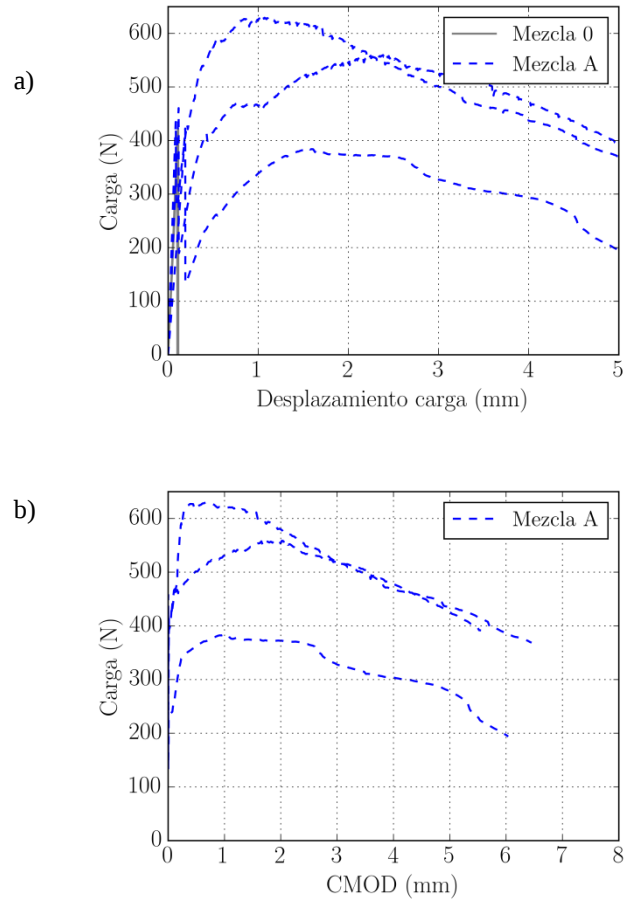


Figura 4. Curvas experimentales obtenidas con las probetas fabricadas con fibras de poliolefina.

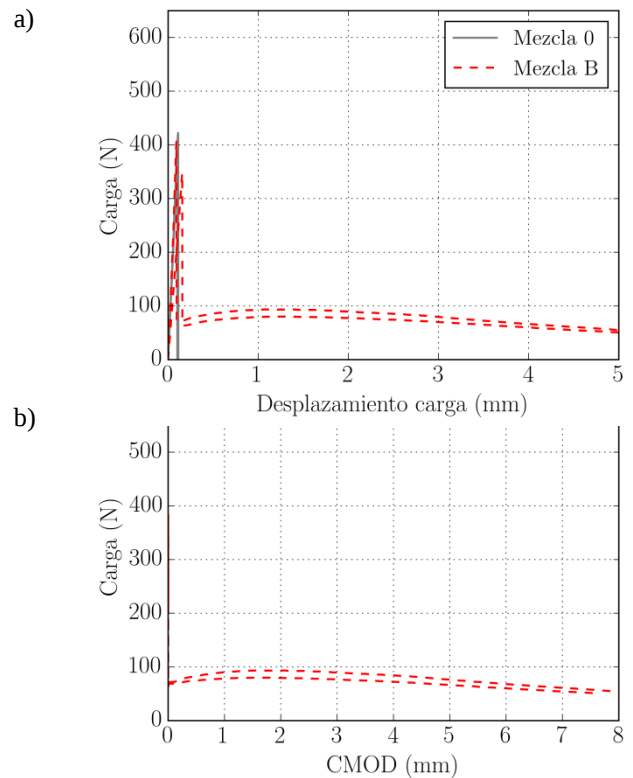


Figura 5. Curvas experimentales obtenidas con las probetas fabricadas con fibras de polipropileno.

Este efecto es particularmente notorio en estos ensayos, pues las dimensiones de las probetas son similares a las de las propias macro-fibras. Esto incrementa por un lado el efecto pared, pero implica una fuerte dependencia del número discreto de fibras presente en la superficie de fractura. Los resultados de fractura dependen de este número de fibras presentes en la superficie de fractura y en este caso pequeñas diferencias en el número de fibras pueden provocar importantes dispersiones. Este efecto quedaría notablemente reducido en probetas de mayor tamaño, por lo que es esperable que esta dispersión experimental se reduzca en probetas de mayores dimensiones. Para una mejor comprensión de los factores que afectan al posicionamiento de las fibras puede verse la referencia [3]. En todo caso, no existe todavía en la bibliografía ningún estudio que asemeje los modelos de orientación y distribución de las fibras, que han resultado muy útiles como herramienta predictiva para dar fiabilidad al material, a los procedimientos de fabricación y propiedades de los yesos como matriz.

Finalmente, cabe destacar un comportamiento reseñablemente distinto entre las mezclas A y B en relación con la apertura de fisura. Los diagramas mostrados en las Figuras 4 y 5 muestran la evolución de las curvas hasta un desplazamiento máximo del actuador de 5 mm, si se observa la apertura del CMOD, éste presenta valores notablemente menores en el caso de la mezcla A (6mm.) en relación con los de la mezcla B (8mm.); esto se explicará mejor con el análisis del campo de deformaciones ϵ_{xx} que se muestra a continuación.

- Campos de deformaciones ϵ_{xx}

La Figura 6 presenta los campos de deformaciones de una probeta representativa de la mezcla A (fibras de poliolefina) y otra de la mezcla B (fibras de polipropileno) para un mismo valor del desplazamiento del actuador.

En estas imágenes se observa una propagación muy distinta de la grieta en cada una de las mezclas. Por un lado, en la mezcla A la fisura muestra una penetración menor en la probeta respecto a la mezcla B; en la primera aún queda un ligamento sano en la zona cercana al actuador, mientras que en la segunda el material muestra daño hasta la región cercana al punto de aplicación de la carga.

Además, se observa que, en el caso de las fibras de poliolefina (mezcla A) la fisuración no se produce en una única fisura, sino que afecta a una cierta banda de la probeta, produciendo fisuras secundarias y distribuyendo el daño en una mayor parte de la matriz de yeso. En el caso de las probetas fabricadas con fibras de polipropileno (mezcla B), el daño se concentra en una única fisura, provocando una mayor apertura de la misma respecto a la de la fisura principal de las probetas en la mezcla A. Esto explica lo observado anteriormente

en las Figuras 4 y 5 en relación con la menor evolución del CMOD en las probetas de la mezcla A respecto a las de la mezcla B, ya que la aparición de fisuras secundarias retrasa la apertura de la fisura en la boca de la entalla.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha realizado una primera aproximación al estudio de la influencia de la adición de fibras poliméricas a matrices de yeso sobre sus propiedades mecánicas en fractura. Para ello se han ensayado probetas de yeso sin fibras, probetas con una dosificación de 5 kg/m³ de macrofibras de poliolefina y probetas con 5 kg/m³ de microfibras de polipropileno.

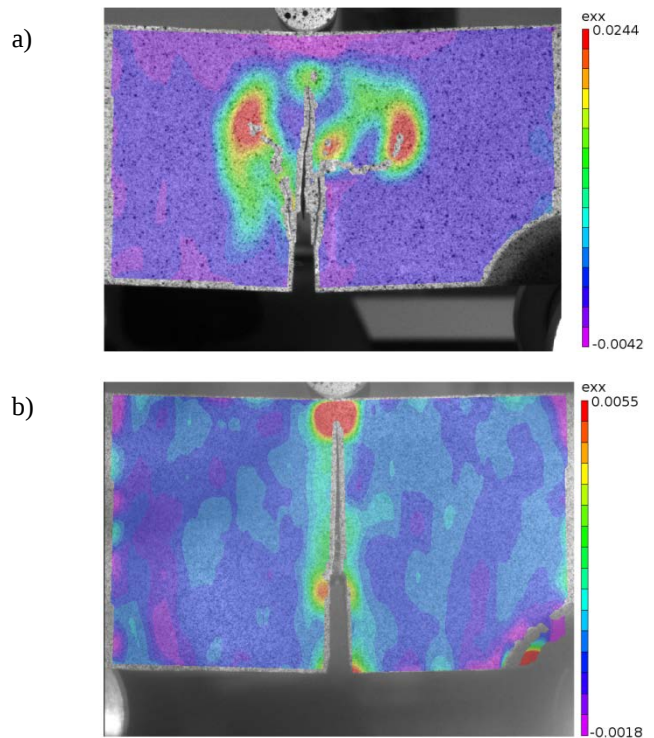


Figura 6 Campos de desplazamientos horizontales (ϵ_{xx}) obtenidos con DIC: a) Mezcla A (fibras de poliolefina), b) Mezcla B (probetas de polipropileno). Ambas imágenes corresponden a un desplazamiento del actuador de 2 mm.

Atendiendo a los resultados iniciales obtenidos, se pueden señalar las siguientes

- La técnica de correlación digital de imágenes (DIC) ha permitido obtener, de manera poco invasiva, la evolución del CMOD y la obtención del campo completo de desplazamientos sobre la superficie de las probetas, lo que permite computar el campo de deformaciones en dicha superficie.
- La adición de fibras poliméricas incrementa notablemente la energía de fractura del material, tanto en el caso de las fibras de poliolefina como en el de las de polipropileno.

- Las macrofibras de poliolefina mejoran en mayor medida las propiedades de fractura, dotando a la mezcla de una energía de fractura mayor que en el caso de las fibras de polipropileno.
- La recuperación de la carga posterior al fallo de la matriz de yeso es notablemente superior en el caso de las fibras de poliolefina respecto a las probetas fabricadas con fibras de polipropileno, incluso alcanzando valores superiores a la carga que provoca el fallo de la matriz.
- Los resultados obtenidos en probetas fabricadas con fibras de polipropileno presentan una dispersión experimental mucho mayor que en el caso de las probetas fabricadas con fibras de polipropileno. Probablemente este efecto sea debido al carácter macroscópico de unas fibras frente al microscópico de las otras.
- En el caso de las probetas fabricadas con microfibras de polipropileno el daño se produce en una única fisura principal, mientras que en el caso de las probetas fabricadas con fibras de poliolefina se distribuye en una fisura principal y varias secundarias; esto se traduce en un menor desarrollo de la apertura del CMOD.

Partiendo de estos resultados iniciales, cabe señalar los siguientes posibles análisis a realizar en futuros trabajos:

- Ampliar el estudio a la resistencia a compresión y a la variación del módulo elástico.
- Análisis de proporciones mayores de fibras.
- Análisis del efecto tamaño empleando probetas de mayores dimensiones.
- Estudio de la influencia de la longitud de las fibras sobre su eficacia como refuerzo mediante ensayos de pull-out.
- Estudio del posicionamiento de las macrofibras en comparación con los modelos existentes, con especial interés en el efecto pared con la variación de tamaños de moldes y procedimientos de fabricación de las probetas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a Sika haber facilitado las fibras con las que se ha realizado este estudio y su asesoramiento para su uso. Además, agradecen al Ministerio de Economía, Industria y Competitividad la concesión de la ayuda BIA2016-78742-C2-2-R.

REFERENCIAS

- [1] Zollo, R. F. Fiber-reinforced concrete: an overview after 30 years of development. *Cement and Concrete Composites*, 19(2), 107-122, 1997.
- [2] Alberti, M. G., Enfedaque, A., & Gálvez, J. C. Comparison between polyolefin fibre reinforced vibrated conventional concrete and self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 85, 182-194, 2015.
- [3] Alberti, M. G., Enfedaque, A., & Gálvez, J. C. A review on the assessment and prediction of the orientation and distribution of fibres for concrete. *Composites Part B: Engineering*, 151, 274-290, 2018.
- [4] Instrucción de Hormigón Estructural. EHE-08 Madrid, Ministerio de Fomento, Secretaría General Técnica, 2018.
- [5] International Federation for Structural Concrete (fib), The fib Model Code for Concrete Structures 2010. Lausanne, Switzerland: International Federation for Structural Concrete, 2010
- [6] Alberti, M. G., Enfedaque, A., Gálvez, J. C., & Agrawal, V. Reliability of polyolefin fibre reinforced concrete beyond laboratory sizes and construction procedures. , 2016.
- [7] García Santos, A. Comportamiento mecánico de yeso reforzado con polímeros sintéticos, Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, 1988.
- [8] Barbero-Barrera, M.M., Flores-Medina, N. and Pérez-Villar, V. Assessment of thermal performance of gypsum-based composites with revalorized graphite filler. *Construction and Building Materials* 142, 83-91, 2017.
- [9] Singh, M. and Garg, M. Gypsum-based fibre-reinforced composites: an alternative to timber. *Construction and Building Materials* 8.3, 155-160, 1994.
- [10] UNE-EN 13279-2. Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. Parte 2: Métodos de ensayo, AENOR, 2014.
- [11] Chu, T., Ranson, W., Sutton, M.A. Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics. *Exp. Mech.* 25, 232-244, 1985.
- [12] Sutton, M. A., Orteu, J.J., and Schreier, H. Image correlation for shape, motion and deformation measurements: basic concepts, theory and applications. *Springer Science & Business Media*, 2009.