

ESTUDIO DE LA INTERFAZ FIBRA-MATRIZ ENTRE FIBRAS PET Y MATRICES DE YESO Y MORTERO DE CEMENTO

J.L. García, F. Suárez^{1*}

¹Departamento 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: fsuarez@ujaen.es

RESUMEN

Durante la última década ha habido numerosos estudios sobre el refuerzo de matrices de yeso o de mortero de cemento mediante fibras de diferentes materiales, pero no hay muchos estudios sobre el refuerzo de matrices con fibras poliméricas, que pueden incrementar la ductilidad de la mezcla proporcionando una mayor resistencia a tracción y flexión. En materiales reforzados con fibras se suelen distinguir tres orígenes de rotura: por fallo de la matriz, por fallo de la fibra o por fallo de la interfaz fibra-matriz. Este estudio analiza la interfaz entre polímeros y matrices de yeso y mortero de cemento, empleando fibras poliméricas procedentes de envases PET utilizados en la industria alimentaria, con el fin de reutilizar desechos que se producen en grandes cantidades y disminuir su vertido al medioambiente. Se estudia la viabilidad de emplear estas fibras para reforzar mecánicamente las matrices de yeso y mortero de cemento frente a esfuerzos de tracción. Se ensayarán probetas de yeso y de mortero de cemento con fibras de PET embebidas a diferentes profundidades y con diferentes geometrías, mediante ensayos de *pull-out* monitorizados mediante un sistema de correlación digital de imágenes. Se busca evaluar la eficacia de la adherencia entre estos materiales.

PALABRAS CLAVE: Yeso, Mortero de cemento, Fibras poliméricas, Ensayo Pull-out, Correlación digital de imágenes (DIC).

ABSTRACT

During the last decades there have been many studies on the use of fibres for reinforcing gypsum or cement mortar matrices, these studies use fibres of different materials, but few of them use polymer fibres. The polymer fibres can increase the ductility of the mix providing an improved strength against tensile and bending forces. Three failure mechanisms are usually identified in fibre-reinforced materials: i) matrix failure, ii) fibre failure and iii) fibre-matrix interface failure. This study analyzes the adhesion of the interface between polymers and matrices of gypsum and cement mortar, using polymer fibres obtained with plastic packaging, usually employed in food industry, with the aim of reusing waste that is produced in large quantities and reducing its disposal in the environment. This seeks to verify the feasibility of using these fibres as reinforcement to mechanically strengthen gypsum and cement mortar matrices under tensile forces. Gypsum and cement mortar specimens will be tested with PET fibres embedded at different depths and with different geometries, through *pull-out* tests monitored with a digital image correlation. This study aims to find out the effectiveness of polymer adhesion in gypsum and cement mortar matrices.

KEYWORDS: Gypsum, Cement mortar, Polymer fibres, Pull-out test, Digital image correlation (DIC).

1. INTRODUCCIÓN

El mortero de cemento se emplea en todo tipo de construcciones, debido a su versatilidad, gran resistencia y durabilidad. Por otro lado, el yeso es también un material muy utilizado en construcción, empleándose en mampostería, acabados interiores, juntas, guarnecidos, paneles prefabricados, etc. Es un material con buenas propiedades aislantes, es ignífugo y proporciona un excelente acabado en interiores.

En las últimas décadas, el mortero de cemento y el yeso han experimentado un gran avance en sus propiedades mecánicas y físicas, extendiendo su uso e incrementando la calidad de los elementos fabricados con ellos. Este trabajo se encuadra en el objetivo de mejorar las propiedades de ambos, realizando una investigación sobre la mejora del mortero de cemento y yeso adicionando fibras poliméricas en su composición.

La adición de fibras como refuerzo de la matriz de yeso o mortero de cemento se lleva investigando bastante tiempo, incluso existen estudios analizando el refuerzo del hormigón con fibras poliméricas [1,2] pero los autores no tienen conocimiento de que se haya realizado un estudio enfocado en emplear fibras procedentes de desechos plásticos, como envases, recipientes, etc., en matrices de yeso o mortero de cemento. Además, empleando desechos plásticos como fibras de refuerzo se logra reutilizar unos desechos perjudiciales para el medio ambiente, con lo que también se reduce el vertido al entorno de residuos de muy lenta descomposición.

En este trabajo se presenta un estudio de la adherencia que muestra la interfaz fibra-matriz entre fibras poliméricas y matrices de yeso y mortero de cemento. Para ello, se ha empleado un tipo de fibra polimérica: tereftalato de polietileno (PET), siendo un tipo muy frecuente en envases de bebidas.

Las fibras serán embebidas en matrices de yeso y mortero de cemento. Se realizará la comparación de la fuerza de tracción necesaria para la extracción de la fibra con la longitud de fibra deslizada del interior de la probeta. Se desarrollará un ensayo *pull-out* de forma simultánea con un sistema de correlación digital de imágenes (DIC), para determinar la longitud de la fibra extraída al realizar el esfuerzo de tracción.

2. DISEÑO DEL MÉTODO EXPERIMENTAL

Los ensayos se desarrollarán con un tipo de fibra, PET, y dos tipos de matrices, yeso y mortero de cemento, además se introducirán en las matrices en tres profundidades distintas de 10, 20 y 30 mm. En la Tabla 1 se muestra la nomenclatura con la que se denominarán cada una de las probetas, según la geometría y profundidad en la matriz.

Tabla 1. Nomenclatura fibras y probetas

Tipo	Nomenclatura	Descripción
Material	A	PET
Textura	0	Liso
	1	Ondulado
	2	Zig-zag
	3	Perforado
Profundidad	10	Embebido 10 mm
	20	Embebido 20 mm
	30	Embebido 30 mm

Con el fin de favorecer una economía circular de materiales plásticos, se ha elegido este material polimérico por ser de los más abundantes en el uso de envases de líquidos, y con ello, el que más habitualmente se encuentran en los vertederos. Se han analizado diferentes tipos de geometría para averiguar si influye en la adherencia de la fibra con la matriz y saber cuál es más efectiva en tal fin.

También, se han empleado tres profundidades de embebimiento en la matriz para investigar la adherencia que se puede conseguir con cada una de ellas.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Materiales

- Yeso

El yeso que se ha empleado en los ensayos es la escayola E35 (A1), perteneciente a la empresa Escayescos. Está compuesta por sulfato cálcico semihidratado, y se emplea principalmente para la elaboración de elementos prefabricados para techos o como decoración para interiores.

- Mortero de cemento

El mortero de cemento se ha obtenido de la mezcla de cemento, arena y agua. El cemento empleado es un cemento Portland mixto de la empresa Cementos Andalucía con un contenido entre el 21-35% en masa de caliza molida, puzolanas natural y ceniza volante silíceas, de clase resistente 32,5 y resistencia inicial normal. La designación del cemento es CEM II/B-M (L-P-V) 32,5N. La arena empleada es una arena normalizada CEN-NORMSAND DIN EN 196-1.

- Fibras de PET

Las fibras de PET son de tereftalato de polietileno, empleado principalmente en la fabricación de botellas de bebidas, destaca por su resistencia, ligereza e impermeabilidad. Las fibras tienen una longitud de 100 mm y una anchura de 3 mm. Además, las fibras se ensayarán con cuatro tipos de geometría diferentes: lisas, onduladas, zig-zag y perforadas. En la Figura 1 se muestra los diferentes tipos de fibras empleadas.

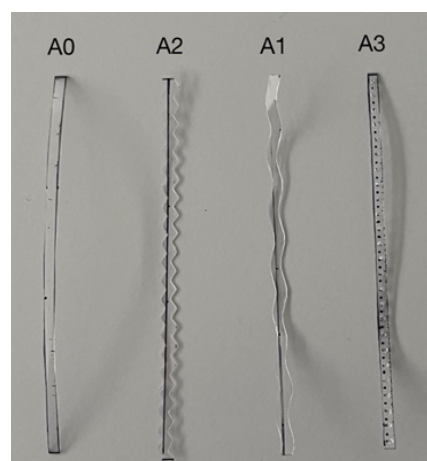


Figura 1. Fibras empleadas en los ensayos.

3.2. Fabricación de las probetas

- Probetas de yeso

Se han fabricado probetas prismáticas de 320 x 320 mm, empleando un molde metálico. En ellas se ha introducido perpendicularmente cada una de las diferentes fibras especificadas en la Tabla 1 por su textura y profundidad embebida. Las probetas se han realizado según el procedimiento descrito en la norma UNE-EN 13279-2 [3].

- Probetas de mortero de cemento

Las probetas tienen las mismas dimensiones que las probetas de yeso de 320 x 320 mm, con la diferencia de que estas probetas se han realizado en un molde de metacrilato. Las probetas de mortero de cemento solamente se han ensayado con fibras de PET lisas y onduladas. Las probetas se han realizado siguiendo los pasos descritos en la norma UNE-EN 196-1 [4].

3.3. Métodos de ensayo

Los ensayos se realizaron según se muestra en la Figura 2, a continuación se describen los dos tipos de ensayos realizados.

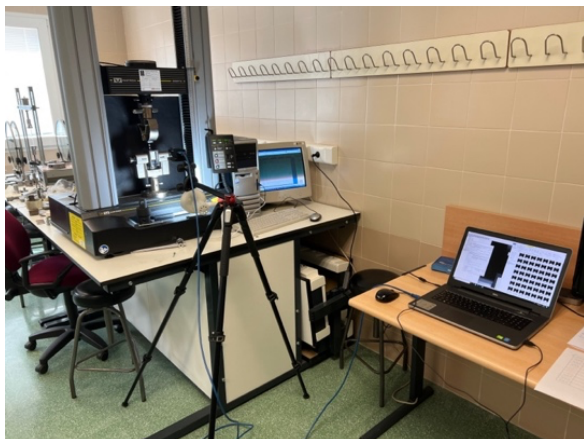


Figura 2. Ensayo de pull-out monitorizado con DIC.

- Ensayo pull-out

El ensayo de pull-out permite caracterizar la interfase existente entre la matriz de yeso o mortero de cemento y la fibra, es decir, posibilita la evolución de la calidad de la unión real entre los dos materiales. En el ensayo se realiza un esfuerzo de tracción sobre la fibra embebida en la matriz para examinar la capacidad de carga de la adherencia entre la matriz y la fibra, obteniendo un diagrama de deslizamiento y carga, con el que se observa su evolución durante el ensayo.

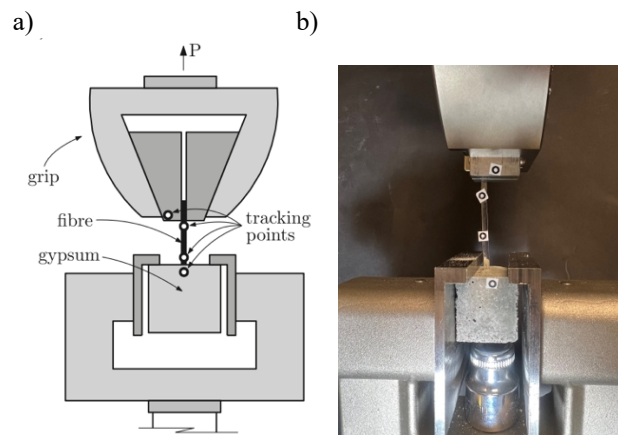


Figura 3. Configuración del ensayo pull-out a) diagrama del ensayo y b) imagen del ensayo.

En ensayo se realizó con una máquina de ensayos Instron 5967 con una velocidad de carga de 1,2 mm/min durante 12 minutos, controlado mediante el software “Bluehill 3”. De forma sincronizada se empleó el software “Flycapture 2” que realizó una captura de imagen por segundo, para calcular el desplazamiento o deformación de la fibra mediante los cuatro puntos de seguimiento que podemos apreciar en la Figura 3.

- Sistema de correlación digital de imágenes (DIC)

El sistema DIC permite medir deformaciones y desplazamientos mediante la captura de imágenes digitales desde un estado inicial, que se tomará como referencia, hasta un estado final. Mediante el empleo de algoritmos de correlación, se encuentra una faceta de la imagen de referencia en cada una de las imágenes siguientes, obteniendo un vector de desplazamiento en cada conjunto de facetas.

Se empleará la técnica DIC para averiguar el desplazamiento entre dos puntos y obtener el desplazamiento que ha habido entre la fibra y la probeta o la deformación que ha sufrido la fibra. De tal forma, que se obtendrá un conjunto de valores de desplazamiento en puntos discretos de la imagen. Para el procesado de estos datos, se calcula un valor al que denominaremos “slip”.

Este dato nos indicará la distancia que la fibra desliza de la matriz, es decir, la longitud de fibra que es extraída al realizar el esfuerzo de tracción. Este valor será medido en píxeles ya que es la medida obtenida de realizar las capturas de imagen.

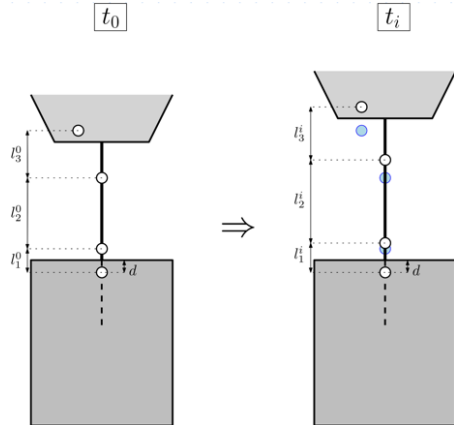


Figura 4. Esquema de las longitudes empleadas en el cálculo del valor slip.

Observando los parámetros de la Figura 4, el *slip* es igual a la variación de longitud Δl_1^i , menos el alargamiento producido en esa longitud l_1^0 debido al alargamiento elástico, que puede obtenerse a partir de la variación de longitud de l_2^0 , tal y como se muestra en la ecuación (1).

$$\text{slip}^i = \Delta l_1^i - \frac{\Delta l_2^i}{l_2^0} \cdot l_1^0 \quad (1)$$

Con este valor se comparará el comportamiento de la interfaz entre la matriz y la fibra para los diferentes casos analizados.

5. RESULTADOS

5.1. Resultados ensayos con probetas de yeso

En los ensayos con matriz de yeso, se han realizado tres ensayos por cada longitud de embebimiento, por tanto, se han hecho un total de 36 ensayos, 4 fibras diferentes con 3 profundidades distintas y 3 probetas de cada tipo. A continuación, se muestran las gráficas obtenidas de los datos recogidos por el ensayo de *pull-out* y el ensayo DIC. Para facilitar su visualización, se muestran en diferentes tipos de línea y colores según se observa en la leyenda de la respectiva gráfica.

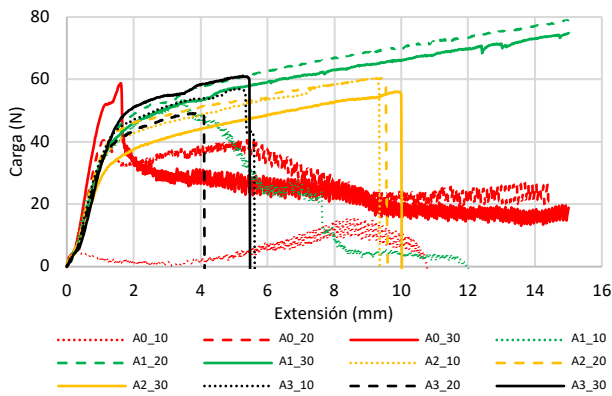


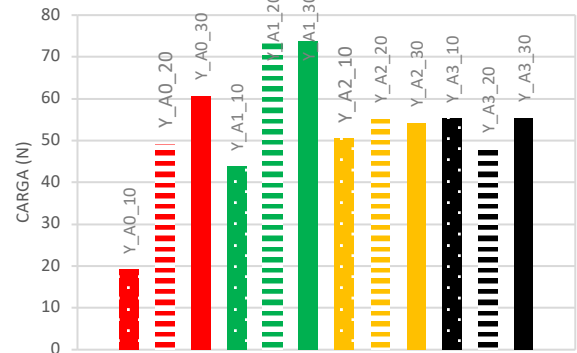
Figura 5. Gráfica carga - extensión de las probetas de yeso.

En la Figura 5 se muestra un resultado representativo de cada uno de los tres ensayos realizados de cada fibra. Para facilitar su visualización, se muestran en diferentes tipos de línea y colores según se observa en la leyenda de la respectiva gráfica.

En la Figura 5 se puede apreciar como las fibras de zig-zag rompen aproximadamente a los 10 mm de extensión. Esto es debido a que se produce una deficiente distribución de tensiones a lo largo de la fibra, produciéndose una concentración de tensión en los ángulos rectos que producen la forma de zig-zag de las fibras, dando lugar su rotura.

Algo parecido ocurre con las fibras perforadas, ya que las perforaciones provocan una concentración de tensiones alrededor de las mismas y favorecen la aparición de grietas a su alrededor y, con ello, a su rotura. Asimismo, hay que mencionar que debido a la forma de las fibras de zig-zag y las perforadas, ambas han obtenido una gran adherencia fibra-matriz, como puede observarse en la Figura 6 b) donde los valores de *slip* son de los valores más bajos.

a)



b)

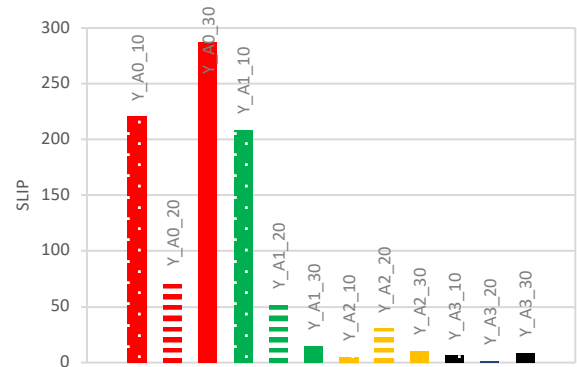


Figura 6. Gráfica de barras de valores medios de a) carga máxima (N) y b) slip máximo de las probetas de yeso.

Las fibras lisas de PET han mostrado un comportamiento claramente determinado por la adherencia fibra-matriz, dado que las fibras deslizan respecto de la matriz del yeso, mostrando una resistencia alta como puede verse en la Figura 6 a).

Las fibras onduladas de PET son las que mejor comportamiento frente a los esfuerzos de tracción muestran, puesto que presentan los mayores valores de carga soportados con alrededor de 73 N, además de tener un *slip* bajo, como muestra la Figura 6 b), por lo que tiene una buena adherencia con la matriz. Además, este tipo de fibra tiene una mejor distribución de los esfuerzos tensionales debido a su forma redondeada, que evita la concentración de tensiones y su rotura, al tiempo que hace que la fibra se estire soportando una mayor carga a tracción.

5.2. Probetas de mortero de cemento

Observando los resultados obtenidos en los ensayos de yeso con los diferentes tipos de fibras, se ha decidido excluir los ensayos con fibras de zig-zag y perforadas debido al problema que presentan con la concentración de tensiones en su superficie y que produce la rotura de las fibras. Por tanto, para el mortero de cemento se han ensayado las fibras lisas y onduladas de PET.

Las fibras muestran un mejor comportamiento y adherencia con la matriz de mortero de cemento en comparación con los resultados obtenidos con la matriz de yeso, que podemos observar en la Figura 7. Las fibras lisas de PET presentan una mayor capacidad de carga y una mejor adherencia a la matriz de mortero de cemento, mejorando los valores de *slip* obtenidos, como se puede observar en la Figura 8.

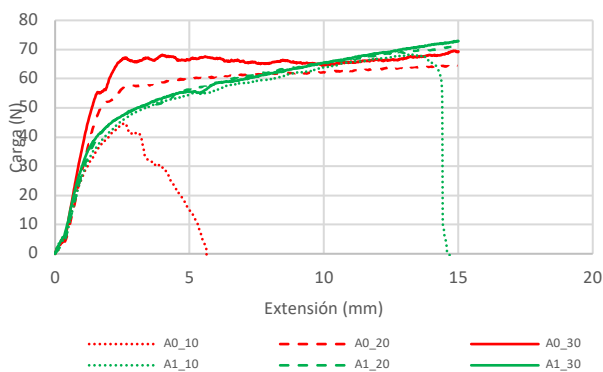


Figura 7. Gráfica carga - extensión de las probetas de mortero de cemento.

Las fibras onduladas de PET muestran unos valores de carga máxima similares a los obtenidos con el yeso, pero consiguen una mejor adherencia con la matriz de mortero de cemento al presentar un valor menor de *slip*, como se muestra en la Figura 8. Este tipo de fibra vuelve a presentar un buen comportamiento debido a su forma ondulada, que permite una mejor distribución de tensiones, además, su forma facilita la adherencia en el interior de la matriz de mortero de cemento.

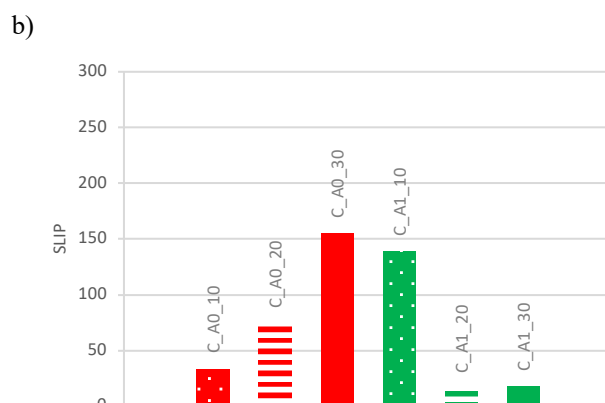
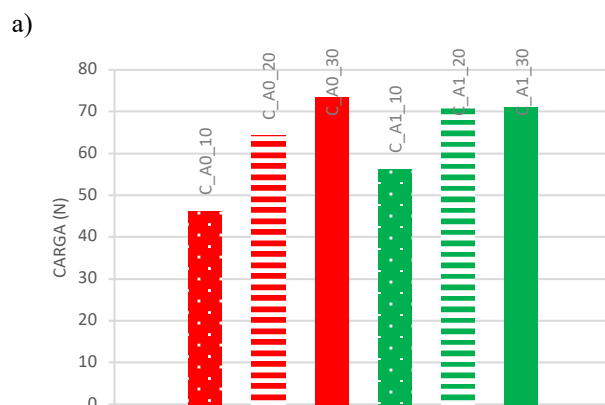


Figura 8. Gráfica de barras de valores medios de a) Carga máxima (N) y b) *slip* máximo de las probetas de mortero de cemento.

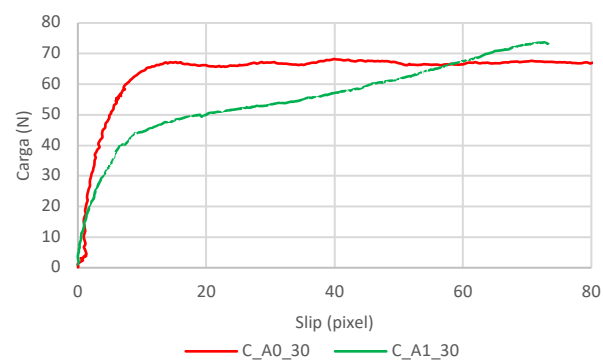


Figura 9. Gráfica carga - *slip* de fibra lisa frente a fibra ondulada de las probetas de mortero de cemento.

En la Figura 9 se puede comparar el comportamiento entre las fibras lisas y las fibras onduladas en el interior de la matriz de mortero de cemento. Se puede comprobar, mediante el valor de *slip*, cómo la fibra lisa de PET, una vez llegada a la carga máxima, se desliza respecto a la matriz sin apenas aumentar la carga soportada. En cambio, en el caso de la fibra ondulada de PET, se aprecia cómo, una vez alcanzada una carga de en torno a 45 N, la fibra desliza respecto de la matriz, mostrando un incremento de carga a medida que progresa el ensayo. Como resultado, se determina que la fibra ondulada posee mejor comportamiento con respecto a la fibra lisa.

6. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha realizado un primer estudio de la viabilidad de emplear materiales poliméricos como el PET como material de refuerzo en matrices de yeso o mortero de cemento para mejorar sus propiedades mecánicas. Para ello, se han ensayado probetas de yeso y mortero de cemento con fibras embebidas a diferentes profundidades, además de experimentar con diferentes texturas en las fibras. De este estudio se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Las fibras cortadas en forma de zig-zag y perforadas presentan una gran adherencia con la matriz de yeso, pero la concentración de tensiones en su superficie provoca la rotura de la fibra, no permitiendo aprovechar la buena adherencia entre fibra y matriz.
- Las fibras con mejor resultado, tanto en relación a la carga máxima como en relación al desplazamiento de las mismas respecto a la matriz (*slip*), son las fibras onduladas. Estas fibras permiten un agarre mecánico con la matriz, al igual que las fibras de zig-zag y las fibras perforadas pero, a diferencia de éstas, poseen una forma suave que evita la concentración de tensiones y, por tanto, permite alcanzar mayores cargas máximas.
- Las fibras presentan mejores resultados con la matriz de mortero de cemento respecto a la matriz de yeso.

Como ampliación a este trabajo, se proponen los siguientes puntos como trabajo futuro:

- Investigar el empleo de fibras onduladas de PET como refuerzo de la matriz de yeso y mortero de cemento, fabricando probetas con adición de fibras como se ha realizado en trabajos anteriores [5,6].
- Realizar ensayos de flexión con fibras onduladas de PET, para evaluar la mejora de comportamiento de las fibras empleando ensayos estandarizados [7].
- Comprobar la efectividad del refuerzo mediante fibras de PET en hormigón.
- Estudiar la posibilidad de reproducir numéricamente el comportamiento a fractura de estos materiales reforzados con este tipo de fibras poliméricas.

REFERENCIAS

- [1] Alberti, M. G., Enfedaque, A., & Gálvez, J. C. (2016). 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, 225-244.
- [2] Suárez, F., Felipe-Sesé, L., Díaz, F. A., Gálvez, J. C., & Alberti, M. G. (2020). On the fracture behaviour of fibre-reinforced gypsum using micro and macro polymer fibres. *Construction and Building Materials*, 244, 118347.
- [3] UNE-EN 13279-2. Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. Parte 2: Métodos de ensayo, AENOR, 2006.
- [4] UNE-EN 196-1. Métodos de ensayo de cementos. Parte 1: Determinación de resistencias, AENOR, 2018.
- [5] Castilla Gonzalo, F.J. (2021). Estudio del uso de microfibras de neumático fuero de uso como refuerzo de yeso en condiciones de rotura en modo II. *Trabajo Fin de Máster. Escuela Politécnica Superior de Linares*.
- [6] Delgado-Jiménez, S. (2020). Evaluación de propiedades de fractura en modo II en mezclas de yeso con fibras. *Trabajo Fin de Grado. Escuela Politécnica Superior de Linares*.
- [7] RILEM, D. R. (1985). Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend tests on notched beams. *Materials and structures*, 18(106), 285-290.