

ESTUDIO DE LA ADHERENCIA FIBRA-MATRIZ ENTRE LA MATRIZ DE YESO Y FIBRAS POLIMÉRICAS PROCEDENTES DE PROCESOS DE RECICLADO

J.L. García¹, F. Suárez^{2*}

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

² Departamento 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

Hay numerosos estudios sobre el refuerzo de matrices de yeso con gran variedad de materiales, incluyendo materiales poliméricos, pero no muchos estudios sobre el refuerzo de matrices con fibras poliméricas empleando residuos plásticos procedentes de plantas de reciclado, que puedan ayudar a la mezcla aportando una mayor resistencia a flexión y tracción. El presente estudio analiza la interfaz entre polímeros y matriz de yeso, empleando para ello distintos polímeros procedentes de plantas de reciclado. El objetivo del estudio es analizar la utilización de productos poliméricos de desecho, reutilizándolos y reduciendo su consiguiente vertido al medio ambiente. Se analiza la viabilidad del empleo de fibras como material de refuerzo para mejorar las características mecánicas del yeso y se estudian diferentes materiales poliméricos para identificar el más adecuado para ello, incluyendo tereftalato de polietileno (PET), polietileno de alta densidad (HDPE), polietileno de media densidad (MDPE) y polipropileno (PP). Se realizan ensayos de pull-out monitorizados mediante un sistema de correlación digital de imágenes. Se analiza la eficiencia de adherencia entre estos materiales, contemplando diferentes longitudes de embebimiento para identificar longitudes óptimas de fibras para el refuerzo de la matriz.

PALABRAS CLAVE: Yeso, Fibras poliméricas, Ensayo de pull-out.

ABSTRACT

There are many studies on the reinforcement of gypsum matrices with a wide variety of materials, including polymeric materials, but not many studies on the reinforcement of matrices with polymeric fibers using plastic waste from recycling plants, which can enhance the mix by providing greater flexural and tensile strength. This study analyzes the interface between polymers and gypsum matrix, using different polymers from recycling plants. The objective of the study is to analyze the use of polymer waste products, reusing them and reducing their dumping and consequent impact on the environment. The feasibility of using fibers as a reinforcement material to improve the mechanical characteristics of the gypsum is analyzed and different polymeric materials are studied to identify the most suitable of them, including polyethylene terephthalate (PET), high density polyethylene (HDPE), medium density polyethylene (MDPE) and polypropylene (PP). Pull-out tests monitored by a digital image correlation system are performed. The adhesion efficiency between these materials is analyzed, considering different embedding lengths to identify optimal fiber lengths for the reinforcement of the matrix.

KEYWORDS: Gypsum, Polymer fibres, Pull-out test.

1. INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia el yeso ha sido uno de los materiales de construcción más empleados, debido a sus múltiples aplicaciones como, por ejemplo: juntas, paneles prefabricados, acabados interiores, mampostería, etc. Además de poseer unas buenas características al ser ignífugo, tener buenas propiedades aislantes, tanto térmicas como acústicas, y proporcionar excelentes acabados interiores.

Actualmente, el yeso ha experimentado un crecimiento en su uso y ha conllevado un aumento de la calidad de los elementos fabricados con este material. El presente trabajo se encuadra en mejorar las propiedades del yeso, analizando el efecto de la adición de fibras poliméricas procedentes de residuos plásticos a su composición.

En la actualidad hay numerosos estudios empleando diferentes tipos de fibras como refuerzo en la matriz de yeso para mejorar sus propiedades mecánicas [1][2][3],

e incluso utilizando fibras poliméricas [4][5], pero los autores del presente estudio no tienen conocimiento de estudios que empleen fibras poliméricas procedentes de residuos plásticos, como envases, recipientes, bolsas, tuberías, cuerdas, etc., en matrices de yeso.

En este trabajo se estudia la adherencia entre la interfaz fibra-matriz, empleando fibras poliméricas procedentes de plantas de reciclaje de plásticos y matrices de yeso. Al mismo tiempo, este trabajo pretende contribuir a la economía circular y encontrar un uso alternativo a los desechos plásticos que son uno de los principales causantes de la contaminación del planeta.

Se fabricarán probetas de yeso con fibras embebidas perpendicularmente, para ensayarlas mediante el ensayo de pull-out sincronizado con un sistema de correlación de imágenes. De este modo se correlacionará la fuerza necesaria para extraer la fibra del interior de la matriz de yeso con la longitud extraída.

2. TRABAJO EXPERIMENTAL

2.1. Fabricación de probetas

En los ensayos de pull-out se han empleado tres tipos de fibras poliméricas diferentes, PET, MDPE y PP, introduciéndolas en la matriz en dos profundidades distintas de 20 y 30 mm. Además, en dos de ellas se han utilizado dos tipos de geometría. Las fibras tienen una longitud de 100 mm y 3 mm de ancho y la matriz de las probetas se ha fabricado de yeso.

La Tabla 1 muestra la nomenclatura utilizada para denominar cada una de las probetas ensayadas, diferenciando tipo de fibra, profundidad de embebido y geometría.

Tabla 1. Nomenclatura empleada en los ensayos de pull-out con probetas de yeso y fibras poliméricas recicladas.

Tipo	Descripción	Nomenclatura
Matriz	Yeso	Y
Fibras	PET	PET
	MDPE	MDPE
	PP	PP
Geometría	Lisas	0
	Onduladas	1
Profundidad	20 mm	20
	30 mm	30

Las fibras de MDPE y PP empleadas provienen de una planta de reciclaje de plásticos, mientras que las fibras de PET son de un tipo de envase de líquidos. La geometría y profundidad de embebimiento en la matriz que se han estudiado son resultado de un análisis anterior, en el que se llegó a la conclusión que éstas eran las mejores condiciones en las que las fibras pueden

tener una mayor adherencia fibra-matriz, y por tanto, tener una mayor resistencia a extraerse del interior de la probeta.

Las probetas elaboradas son prismáticas con unas dimensiones de 32 x 32 x 40 mm, fabricadas según la norma UNE-EN 13279-2 [6], en las que se han introducido perpendicularmente las diferentes fibras poliméricas a las profundidades especificadas en la tabla 1, dando como resultado las probetas que se muestran en la Figura 1.

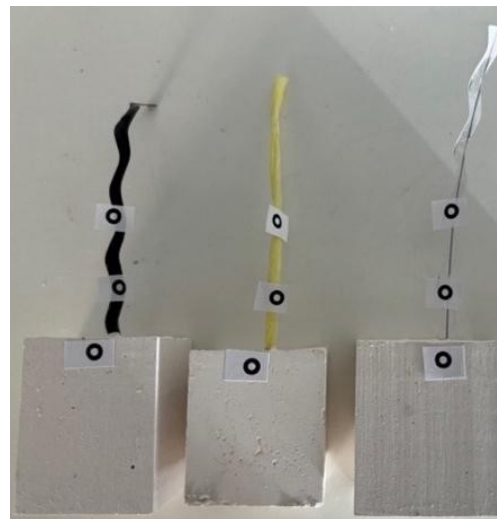


Figura 1. Probetas utilizadas en los ensayos de pull-out.

2.2. Ensayo de pull-out

El ensayo de pull-out consiste en realizar un esfuerzo a tracción sobre una fibra embebida en el interior de una matriz a una profundidad determinada, para caracterizar la interfase existente entre fibra-matriz. Dando como resultado un diagrama fuerza-desplazamiento con el que se estudia su evolución durante el ensayo.

El ensayo se ha realizado con una máquina de ensayos Instron 5967, aplicando la fuerza de tracción a una velocidad de 1,2 mm/min hasta llegar a un desplazamiento máximo de 15 mm, empleando para ello el software “Bluehill 3”. La Figura 2 muestra un esquema del montaje del ensayo, así como una imagen obtenida durante uno de ellos, en la que se aprecian los puntos de referencia empleados para calcular la longitud de fibra extraída de la matriz durante el ensayo.

2.3. Correlación digital de imágenes (DIC)

Simultáneamente al ensayo de pull-out, se ha realizado una medición empleando la correlación digital de imágenes (DIC), como muestra la figura 3, que mediante la captura de imágenes nos permite calcular desplazamientos y deformaciones. Estas capturas de imagen se realizan con una frecuencia de una imagen por segundo, pudiendo así monitorizar el

desplazamiento de la fibra en la matriz de yeso mediante los puntos de referencia que se pueden observar en la Figura 1. Además, para realizar la captura de imágenes se ha empleado el software “Flycapture 2”.

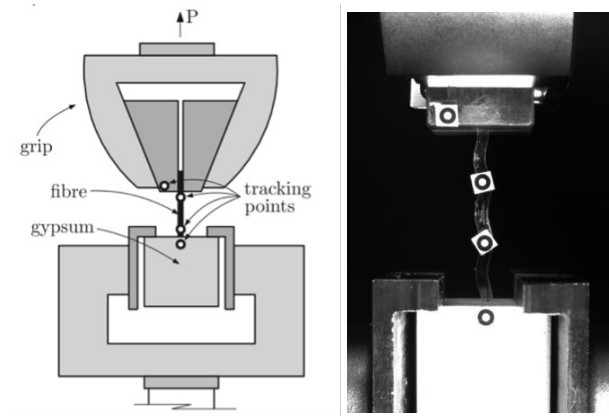


Figura 2. Ensayo de pull-out monitorizado con DIC.

La Figura 3 muestra el montaje del ensayo, en el que un ordenador controla la máquina universal y otro recoge las imágenes obtenidas con la cámara para su posterior postprocesado con DIC.

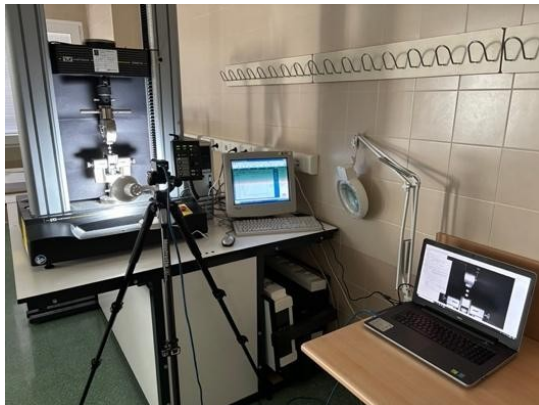


Figura 3. Ensayo de pull-out monitorizado con DIC.

También, se ha utilizado el software “ImageJ” para obtener el desplazamiento entre dos puntos y obtener el deslizamiento producido entre la fibra y la matriz de yeso. Para el procesado de los datos, se ha calculado un valor al que se ha denominado *slip*.

El *slip* nos indicará la longitud de la fibra que es extraída de la matriz de yeso al realizar el esfuerzo de tracción sobre ella. El valor del *slip* se medirá en píxeles, ya que se obtiene a partir de imágenes digitales. Observando la Figura 4, se puede determinar que 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 expresión (1).

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

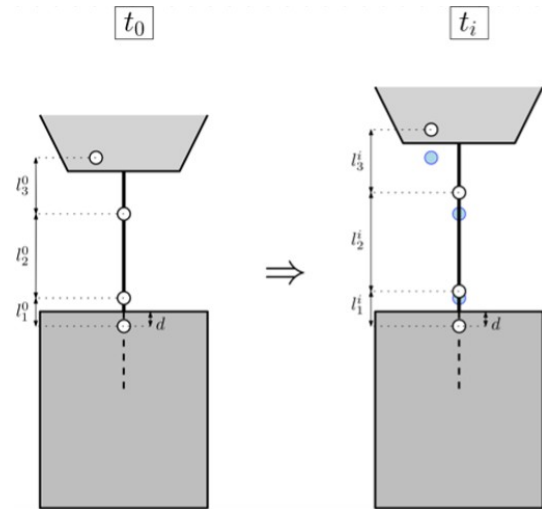


Figura 4. Esquema de parámetros empleados en el cálculo del *slip*.

3. MATERIALES

- Tereftalato de polietileno (PET)

Posee propiedades como ligereza, impermeabilidad y alta resistencia. Se destina principalmente a la fabricación de envases de bebidas.

- Polietileno de media densidad (MDPE)

Se caracteriza por ser resistente a los ácidos y su resistencia a impactos. Se utiliza para la fabricación de bolsas de transporte, accesorios de gas y tuberías.

- Polipropileno (PP)

Es un polímero termoplástico que presenta buena resistencia a tracción, flexión y fatiga, además de ser ligero y resistente a sustancias químicas. Se emplea en la fabricación de piezas de automóviles, envases para alimentos y elaboración de cuerdas y bolsas reutilizables.

La Figura 5 muestra las fibras empleadas, siendo las dos fibras transparentes, de PET, las dos de color negro, de MDPE y la amarilla, de PP.

- Yeso

El yeso empleado está compuesto por sulfato cálcico semihidratado, siendo una escayola E35 (A1) suministrada por la empresa Escayescos, que suele ser empleada en la fabricación de prefabricados de yeso.

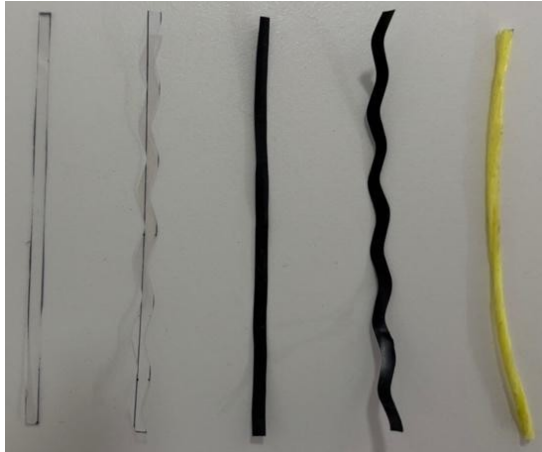


Figura 5. Fibras empleadas en los ensayos de pull-out.

4. RESULTADOS

Las gráficas que se muestran a continuación se presentan con diferentes colores y trazos para su mejor interpretación. Las líneas o barras con trazos discontinuos muestran las probetas con fibras lisas y los trazos continuos pertenecen a las probetas con fibras onduladas. De igual forma, cada uno de los diferentes plásticos empleados tienen asignado un color, siendo el azul empleado para las fibras de PET, el verde para las fibras de HDPE, el rojo para las fibras de MDPE y el negro y gris para las fibras de PP. También se diferencia entre las fibras embebidas a 20 ó 30 mm, representando los resultados correspondientes a las embebidas 20 mm con un color más claro y los de las embebidas a 30 mm con un color más oscuro dentro de la gama de colores establecida para cada tipo de fibra.

En la Figura 6 se representan las curvas fuerza-desplazamiento, en la Figura 7 se muestran los valores medios de la carga máxima soportada por las fibras y en la Figura 8 los valores medios de *slip*. Además, estos valores se muestran de forma numérica en la Tabla 1.

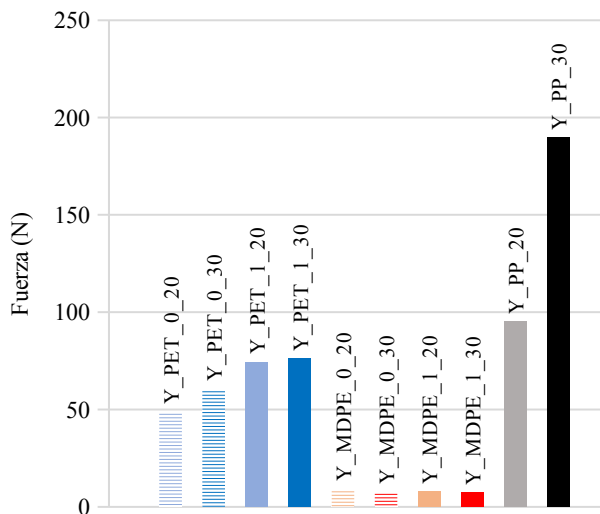


Figura 6. Gráfica fuerza-desplazamiento del ensayo de pull-out con probetas de yeso.

Observando los resultados obtenidos se puede apreciar cómo las fibras de MDPE no muestran apenas variación en sus resultados, ni entre las dos profundidades ensayadas, 20 y 30 mm, ni entre las dos geometrías empleadas, lisas y onduladas. Esto puede observarse en las Figuras 6 y 7, y de forma numérica en la Tabla 2. Además, en la Figura 8 se puede observar que en estos casos el valor de *slip* es muy reducido, indicador de una buena adherencia fibra-matriz, pero, al ser los valores de fuerza muy bajos, puede deducirse que la fibra se deforma de manera plástica bajo una carga inferior a la requerida para su extracción. Esto hace que la fibra ofrezca una baja resistencia y sea descartada como fibra de refuerzo.

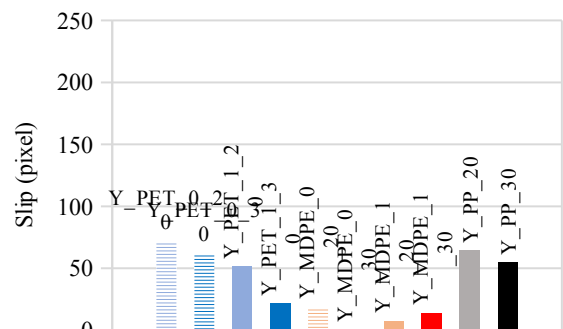


Figura 7. Resultados de fuerza máxima en ensayos de pull-out con probetas de yeso.

Las fibras de PET muestran un mejor rendimiento cuanto mayor es la profundidad de embebimiento, y también un mejor resultado con la geometría ondulada, llegando a soportar fuerzas alrededor de los 70 N. Este mejor resultado de la fibra ondulada frente a la fibra lisa se debe a una mejor distribución de esfuerzos a lo largo de la longitud ondulada de la fibra, realizando una mejor distribución de tensiones y ofreciendo una mejor resistencia a esfuerzos mayores.

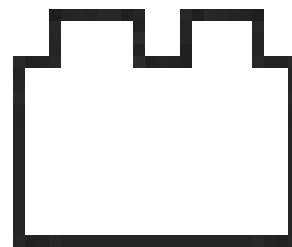


Figura 8. Resultados de *slip* en los ensayos de pull-out con probetas de yeso.

Las fibras de PP son las que notablemente han aportado mejores resultados como se muestra en las Figuras 6 y 7. En la Tabla 2 se puede apreciar como las fibras de PP han llegado a soportar hasta 190 N de fuerza, alcanzando en la mayoría de los ensayos valores

superiores a 100 N. Además, en la Figura 6 se puede observar cómo, una vez alcanzado su valor máximo de fuerza, la curva fuerza-desplazamiento no desciende de forma brusca, sino que es capaz de mantener una resistencia notable que disminuye paulatinamente, muestra de que la fibra no experimenta una rotura, sino que su adherencia se deteriora progresivamente.

Tabla 2. Resultados de los ensayos de pull-out con probetas de yeso.

Probetas	Media carga máxima (N)	Media slip (px)
Y_PET_0_20	49,15	72,11
Y_PET_0_30	60,75	62,51
Y_PET_1_20	74,36	51,48
Y_PET_1_30	76,24	21,87
Y_MDPE_0_20	9,37	18,94
Y_MDPE_0_30	8,01	0,57
Y_MDPE_1_20	8,09	7,61
Y_MDPE_1_30	7,36	14,00
Y_PP_20	95,05	64,52
Y_PP_30	189,64	54,75

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha realizado un estudio para comprobar la viabilidad de emplear fibras procedentes de residuos plásticos como refuerzo en matrices de yeso. Se han realizado ensayos de pull-out con fibras embebidas a diferentes profundidades y con dos tipos de geometría. Del estudio realizado se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- Las fibras de HDPE y MDPE presentan unos valores de carga muy reducidos.
- Las fibras onduladas tienen una mejor distribución de tensiones a lo largo de su curvatura, además de proporcionar un mejor agarre mecánico con la matriz de yeso.
- Las fibras con mejor resultados han sido las fibras de PP, presentando una buena adherencia fibra-matriz, además de conseguir unos elevados valores de carga soportada, resistiendo valores superiores a los 150 N.

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+.

REFERENCIAS

- [1] F. Iucolano, D. Caputo, F. Leboffe, B. Liguori. *Mechanical behavior of plaster reinforced with abaca fibers*. Construction and Building Materials, 99 (2015) 184-191.
- [2] 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
- [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] 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.
- [5] 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.
- [6] UNE-EN 13279-2. Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. Parte 2: Métodos de ensayo, AENOR, 2006.
- [7] 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)