

# Comportamiento a flexión de probetas de yeso reforzadas con fibras poliméricas procedentes de procesos de reciclado

Francisco José Castilla Gonzalo<sup>1</sup>, Fernando Suárez Guerra<sup>1</sup>, L. Antonio Felipe Sesé<sup>1</sup>, F.A. Díaz Garrido<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería Mecánica y Minera. Campus Científico Tecnológico de Linares. Universidad de Jaén, España, [fjcg0021@red.ujaen.es](mailto:fjcg0021@red.ujaen.es), [fsuarez@ujaen.es](mailto:fsuarez@ujaen.es), [lfelipe@ujaen.es](mailto:lfelipe@ujaen.es)

<sup>2</sup> Departamento de Ingeniería Mecánica y Minera. Campus Las Lagunillas. Universidad de Jaén, España, [fdiaz@ujaen.es](mailto:fdiaz@ujaen.es)

---

*El yeso es un material de construcción ampliamente utilizado como revestimiento interior, cuya industria ha desarrollado durante las últimas décadas nuevas soluciones como los paneles sándwich de yeso laminado o las placas de yeso reforzado con fibras de celulosa. Por otro lado, la adición de fibras poliméricas como refuerzo de matrices cuasifrágiles ha experimentado en los últimos años un gran impulso en el campo del hormigón estructural. En esta contribución se estudia la posibilidad de reforzar elementos de yeso con fibras poliméricas procedentes de procesos de reciclado, con el fin de comprobar si esta solución puede mejorar las propiedades mecánicas del yeso y contribuir a reducir el problema de los residuos plásticos, que supone una gran amenaza para el medioambiente. Las propiedades mecánicas se estudiaron mediante ensayos de flexión en tres puntos con probetas prismáticas y ensayos de compresión con probetas cúbicas. Además, se empleó un sistema de correlación digital de imágenes (DIC) que permite medir la evolución de la apertura de la fisura (CMOD) y, lo que es probablemente más importante, para evaluar su comportamiento, obteniendo mapas de deformaciones de campo completo que ayuden a entender cómo contribuyen los distintos tipos de fibras a la disipación de energía durante la propagación del daño.*

---

## 1. Introducción

El yeso es uno de los materiales de construcción más antiguos que se conocen, ha sido utilizado en las culturas mesopotámicas y en el antiguo Egipto como material de construcción en las pirámides, difundióse su uso posteriormente con las culturas islámicas. A pesar de su antigüedad, este material sigue utilizándose en la actualidad debido a sus cualidades, destacando entre ellas su abundancia en la naturaleza, el bajo coste de fabricación, su manejabilidad y sus propiedades de habitabilidad (acústicas, higrotérmicas, etc.)

Por otro lado, en los últimos años el empleo de fibras poliméricas como refuerzo en matrices cuasifrágiles ha tenido un gran impulso. La unión entre ambas provoca importantes mejoras en el material como una notable mejora de la ductilidad y un incremento de la energía que es capaz de absorber antes de la fractura del material. En el campo del hormigón se registran los mayores avances, destacando entre ellos la realización de canalizaciones de hormigón sin armadura de acero, únicamente reforzados con fibras [1], la fabricación de túneles reforzados con fibras de poliolefina [2], el empleo de fibras de acero como refuerzo en los revestimientos de túneles, eliminando las barras de acero convencionales [3-4]. La normativa actual de hormigón contempla ya la adición de fibras en elementos estructurales sin emplear armadura tradicional [5-6].

En relación a las fibras poliméricas, cabe destacar que la producción total de plástico en 2016 alcanzó los 335 millones de toneladas [7]. El PET es uno de los plásticos más utilizados en la industria del embalaje debido a su ligereza y facilidad de manejo y almacenamiento. El uso de este material como materia prima para producir botellas o recipientes es muy común, de hecho los fabricantes de bebidas producen más de 500 mil millones de botellas de plástico de un solo uso cada año. Una gran cantidad de PET consumido se convierte en desperdicio y

requiere vastas áreas de tierra para su almacenamiento. Se estima que en 2020 se superarán los 500 millones de toneladas anuales, lo que supondría un 900% más que los niveles de 1980.

China se presenta como el principal productor de plásticos con un 29% del total en 2016, seguido de Europa (19%) y América del Norte (18%). Dentro de Europa, más de dos tercios de la demanda de plásticos se concentra en cinco países: Alemania (24,5%), Italia (14,2%), Francia (9,6%), España (7,7%) y Reino Unido (7,5%) [7-8].

Por otro lado, existen estudios sobre la influencia de la adición de fibras poliméricas en matrices de yeso que datan de los años ochenta, destacando en España el trabajo de García Santos [9]. Actualmente, la adición de fibras en matrices de yeso es un aspecto de interés, pues ciertas adiciones pueden, por ejemplo, mejorar sus propiedades térmicas [10] o convertirlo en una alternativa interesante a la madera en ciertas construcciones [11]. No obstante, la adición de fibras en materiales con baja resistencia frente a esfuerzos de tracción, como el hormigón o el yeso, suele implicar mejoras mecánicas que pueden extender su uso a ámbitos donde se requieren ciertas capacidades resistentes. 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 de la adición de fibras obtenidas de procesos de reciclado de PET en las propiedades mecánicas de mezclas de yeso, haciendo especial énfasis en el análisis de la energía de fractura. Se compara el comportamiento del yeso sin fibras con mezclas de yeso con escamas de PET empleando diferentes proporciones de éstas y diferentes procedencias. Se emplea el ensayo de flexión en tres puntos con probetas prismáticas 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. 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. Campaña Experimental

En este apartado, se describirán las características de los materiales empleados, mezclas fabricadas, fibras utilizadas y el método de fabricación seguido, así como lo procedimientos llevados a cabo en los ensayos.

### 2.1. Materiales

A continuación se presentan los materiales empleados para fabricar las probetas de las diferentes mezclas ensayadas. En lo referente a las escamas poliméricas empleadas como adición, se han empleado tres tipos de ellas, unas procedentes de una empresa de reciclado, empresa A, y las otras dos procedentes de otra, empresa B.

#### 2.1.1. Yeso

El yeso empleado es una escayola E-35 (A1) del fabricante Escayescos. Es un yeso de alta calidad con grano muy fino y de una pureza mayor del 90% en sulfato cálcico semihidratado.

#### 2.1.2. Fibras PET procedentes de empresa A

Escamas de PET, transparente-celeste procedentes de botellas de post consumo. Presentan una densidad de 300-350 kg/m<sup>3</sup> y son partículas finas de espesor inferior a 1mm, como se muestra en la Figura 1.

#### 2.1.3. Fibras PET procedentes de empresa B

Escamas de PET, transparente-celeste, como se puede apreciar en la Figura 1, y con color como se aprecia en la Figura 3. Ambas procedentes de botellas de post consumo y post industrial, con tamaño entre 2 y 8 mm y densidad de 300-350 kg/m<sup>3</sup>.

### 2.2. Mezclas

Para comprobar el comportamiento de distintas fibras de PET en mezclas con matriz de yeso, se optó por realizar tres grupos de probetas además de una mezcla de yeso sin adición:

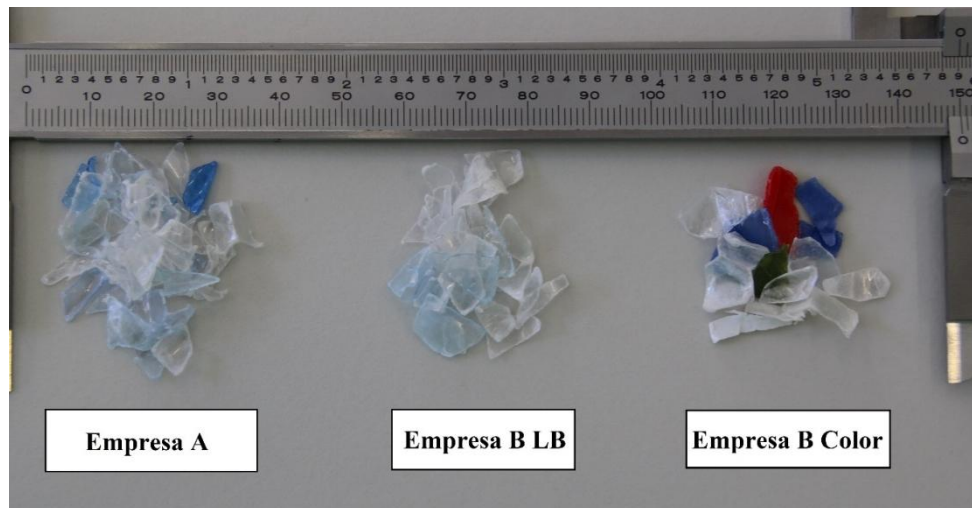
-Mezcla 0: yeso sin fibras

-Mezcla A.1: yeso con fibras de PET procedente de empresa A en proporción de 20 kg/m<sup>3</sup>

-Mezcla A.2: yeso con fibras de PET procedente de empresa A en proporción de 40 kg/m<sup>3</sup>

-Mezcla A.3: yeso con fibras de PET procedentes de empresa A en proporción de 80 kg/m<sup>3</sup>

-Mezcla B.1: yeso con fibras de PET Light Blue procedente de empresa B en proporción de 20 kg/m<sup>3</sup>



**Figura 1:** Fibras poliméricas utilizadas.

- Mezcla B.2: yeso con fibras de PET Light Blue procedentes de empresa B en proporción de 40 kg/m<sup>3</sup>
- Mezcla B.3: yeso con fibras de PET Light Blue procedentes de empresa B en proporción de 80 kg/m<sup>3</sup>
- Mezcla C.1: yeso con fibras de PET Color procedente de empresa B en proporción de 20 kg/m<sup>3</sup>
- Mezcla C.2: yeso con fibras de PET Color procedentes de empresa B en proporción de 40 kg/m<sup>3</sup>
- Mezcla C.3: yeso con fibras de PET Color procedentes de empresa B en proporción de 80 kg/m<sup>3</sup>

La elección de estas mezclas permite comparar el comportamiento de dos fibras PET disponibles en el mercado en proporciones similares y entender el comportamiento de estas fibras en matrices de yeso. Además, permite analizar también si la presencia de color en estas fibras influye en los resultados. La Tabla 1 resume las mezclas mencionadas.

**Tabla 1:** Mezclas empleadas.

	Relación yeso/agua	Empresa	Cantidad de fibras (kg/m <sup>3</sup> )
Mezcla 0	0.63	-	-
Mezcla A.1	0.63	A	20
Mezcla A.2	0.63	A	40
Mezcla A.3	0.63	A	80
Mezcla B.1	0.63	B	20
Mezcla B.2	0.63	B	40
Mezcla B.3	0.63	B	80
Mezcla C.1	0.63	B	20
Mezcla C.2	0.63	B	40
Mezcla C.3	0.63	B	80

### 2.3. Proceso de 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 [12] y para las probetas de yeso con fibras una leve modificación de la misma que se describe a continuación:

1. Vertido del yeso en el agua y amasado manual con paleta durante 30 segundos.
2. Vertido de las fibras y amasado manual con paleta durante 30 segundos.
3. Amasado a baja velocidad en amasadora con movimiento de rotación planetario durante 60 segundos.
4. Vertido en moldes previamente impregnados con desmoldante.
5. Aplicación de golpes sobre el molde para eliminar posibles burbujas retenidas en la mezcla y posterior enrasado.

6. Desmoldado respetando el tiempo de fraguado de la mezcla y posterior introducción de las probetas en una cámara climática durante siete días a  $23\pm 2^\circ\text{C}$  y a una humedad relativa de  $50\pm 5\%$  para su curado.

7. Desmoldado y curado en estufa durante dos días a  $50^\circ\text{C}$ .

8. Enfriamiento a temperatura ambiente.

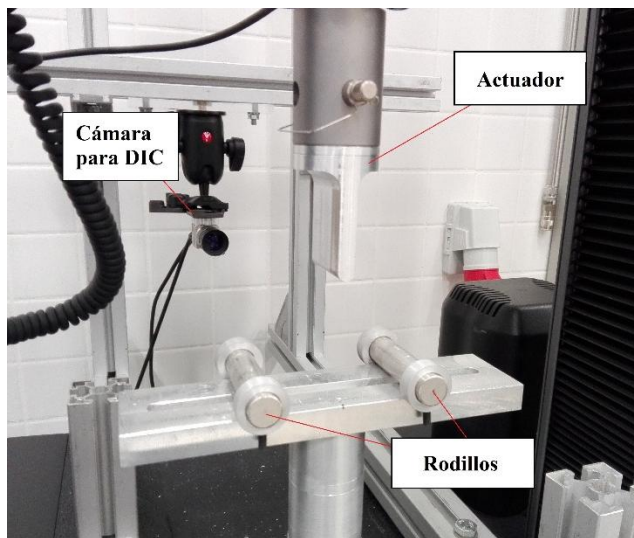
9. Marcado de la probeta con espray negro para la utilización del DIC.

#### 2.4. Métodos de ensayo

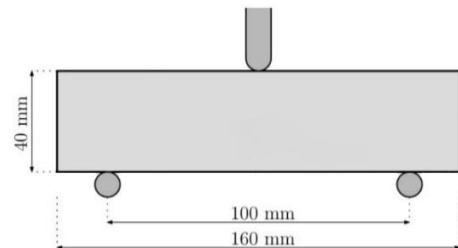
Para la realización de los ensayos se cuenta con una máquina de ensayos bicolumna de la marca Instron, perteneciente a la serie 5960. Entre sus características principales destacan:

- Una exactitud de medición de carga del  $\pm 0,5\%$  de lectura hasta  $1/500$  de capacidad de la célula de carga.
- Una capacidad de carga de 30 kN.
- Una velocidad mínima y máxima de aplicación de la carga de 0,001 a 1000 mm/min.
- Gestión de 4 entradas y salidas digitales así como 4 entradas y 6 salidas analógicas.

Para los ensayos de flexión en tres puntos se emplearon los útiles mostrados en la Figura 2, apreciándose una viga horizontal como soporte y dos cilindros guiados de 10mm de diámetro que sirven de apoyo para la probeta. De manera esquematizada, la disposición del ensayo quedaría como se observa en la Figura 2.



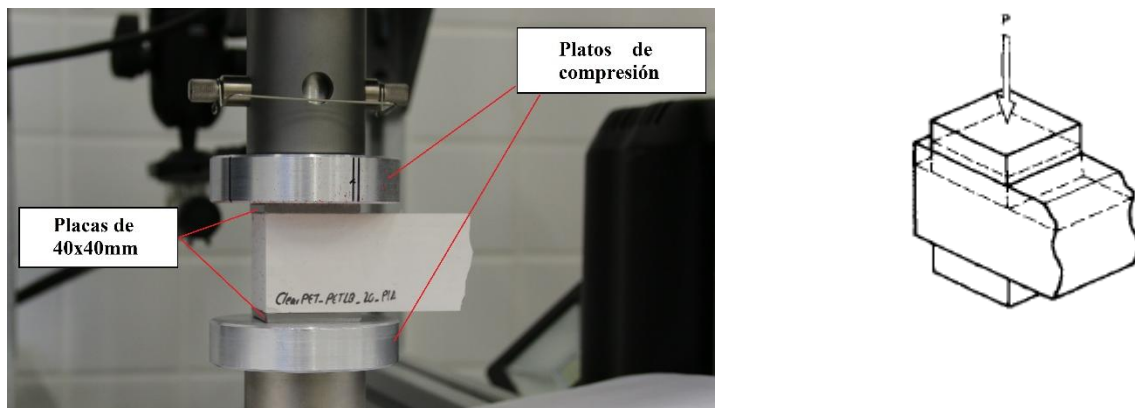
(a) Disposición experimental del ensayo de flexión en tres puntos.



(b) Esquema y dimensiones del ensayo de flexión en tres puntos.

**Figura 2:** Disposición ensayo flexión en tres puntos.

Para los ensayos de compresión se emplearon los útiles mostrados en la Figura 3 y su esquema, observándose dos platos cilíndricos donde uno actúa como soporte y el otro aplica la carga. Además para que el ensayo se efectúe en una superficie de  $40\times 40\text{mm}$ , tal y como indica la norma, se colocan dos placas de acero de dichas dimensiones entre los cilindros y la probeta.



(a) Disposición experimental del ensayo de compresión

(b) Esquema del ensayo de compresión.

**Figura 3:** Disposición del ensayo de compresión

Los ensayos de flexión en tres puntos se realizaron con control en desplazamiento del actuador empleando una velocidad de desplazamiento de 0,38 mm/min y captura de imágenes cada 5 segundos. La cámara utilizada para la toma de imágenes fue una Allied Stingray F-080C con una resolución de 1032×766. El procesado de las imágenes obtenidas durante los ensayos se realizó mediante el software Vic-2D, de Correlated Solutions.

Los ensayos de flexión en tres puntos vienen apoyados por la utilización de un sistema de correlación digital de imágenes (DIC), empleado para la medición de las deformaciones en la probeta y de la evolución de la fractura lo largo del ensayo. 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 [13-14].

En los ensayos de compresión la velocidad de aplicación de la carga fue de 1 mm/min y no se tomaron imágenes para su posterior procesado, ya que, durante la realización de los ensayos se fractura la probeta de manera que el patrón dibujado con el espray se desprende, impidiendo su procesado con DIC.

### 3. Resultados

#### 3.1. Ensayo flexión en tres puntos

Los datos obtenidos en el ensayo de las probetas a flexión se recogen en la Tabla 2, donde los valores mostrados corresponden a la media obtenida en cada serie de tres probetas de cada mezcla.

Dado que es un material con fibras, su comportamiento a rotura se extiende hasta un desplazamiento del actuador muy grande, por lo que es habitual comparar valores tomando como referencia un cierto valor de la aplicación de la carga o de la apertura de fisura (CMOD), con dichos valores se calcula la energía de deformación como el área que encierra la curva carga-desplazamiento [15-16].

Con el aumento de la cantidad de fibras introducida en la mezcla, se aprecia un descenso de la carga máxima que soporta la probeta y, por consiguiente, de su tensión de rotura, ya que la sección es la misma para todas las probetas. Esto puede deberse a que la unión entre la matriz de yeso y la fibra no sea lo suficientemente fuerte, y facilite la propagación de la fisura en las zonas de unión entre ambas. De esta forma la fibra provoca una discontinuidad en el yeso que puede actuar como un concentrador de tensiones y, por tanto, facilitar el inicio de la fisuración con cargas inferiores a las de un yeso sin fibras.

Se puede observar cómo, a pesar de la disminución de estas dos características, la energía de deformación de las probetas se incrementa respecto a la de un yeso sin fibras, esto se debe a que las fibras dificultan la propagación de la fisura, de modo que éstas prolongan el comportamiento mecánico más allá del instante de su formación. El mayor valor de incremento se encuentra en la cantidad de 80 kg/m<sup>3</sup>, mientras que con cantidades de 20 kg/m<sup>3</sup> o 40 kg/m<sup>3</sup> el valor de la energía de deformación es similar.

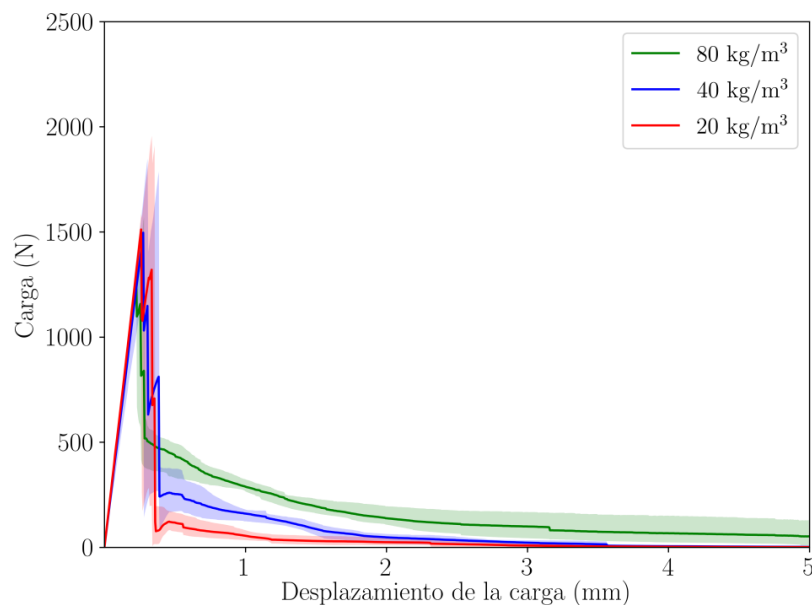
Para la mezcla B se observa cómo la energía de deformación cae al aumentar la cantidad de fibras, esto puede deberse a la naturaleza de las macrofibras influye en estos valores, ya que, a pesar de que la cantidad de fibras aumente siempre, es dependiente de la cantidad de fibras en la sección de rotura.

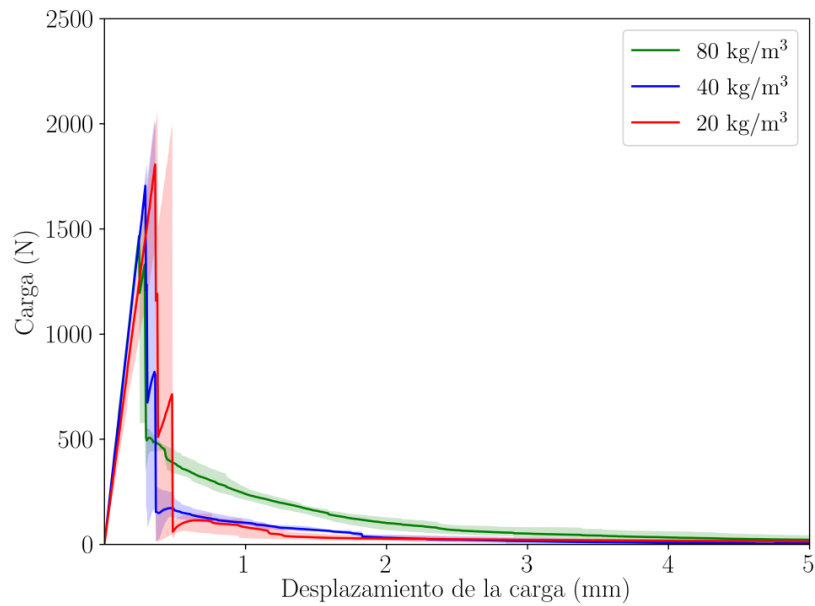
**Tabla 2:** Valores medios obtenidos de los ensayos.

	Fuerza Máxima (N)	Tensión de rotura (MPa)	Energía de deformación a 5,5mm (N·mm)
Mezcla 0	2295,28	5,38	20,50
Mezcla A.1	1830,40	4,29	413,56
Mezcla A.2	1750,43	4,10	569,92
Mezcla A.3	1455,83	3,41	825,06
Mezcla B.1	2024,51	4,74	529,92
Mezcla B.2	1867,06	4,38	491,19
Mezcla B.3	1643,60	3,85	740,72
Mezcla C.1	2097,63	4,92	472,91
Mezcla C.2	1595,94	3,74	648,68
Mezcla C.3	1689,96	3,96	908,73

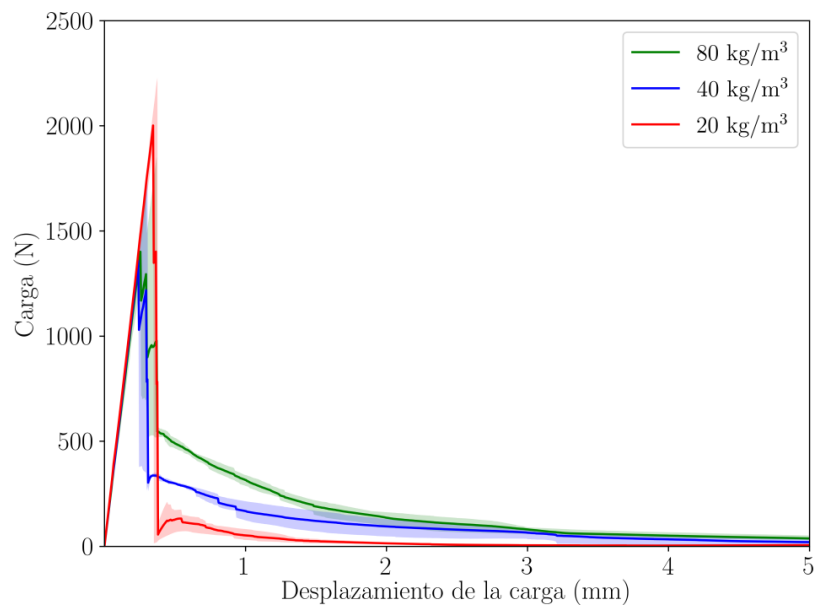
Este incremento en la energía de deformación en función de la cantidad de fibras se produce en valores de desplazamiento del actuador de hasta 3,5-4 mm. La mayor diferencia se encuentra en el comportamiento tras la fractura de la matriz de yeso. Las mezclas con 20 kg/m<sup>3</sup> de adición presentan una caída de carga con una posterior recuperación hasta valores de 100-150 N y un final descenso de carga. Con una adición de 40 kg/m<sup>3</sup>, la caída de carga asociada a la fractura de la matriz de yeso no se produce de manera completa aunque la recuperación producida por las fibras se encuentra en torno a unos 200 N, similar a las de 20 kg/m<sup>3</sup>. Para las mezclas con adición de 80 kg/m<sup>3</sup> se observa que tras la fractura de la matriz, las fibras actúan de manera que esta caída se detenga al llegar a unos 600 N, como se puede observar en las Figuras 4 a 6. En estas figuras se muestran los resultados de cada contenido en fibras en colores distintos (rojo, azul y verde) y para cada uno de ellos un área sombreada que representa la envolvente experimental y una línea continua que representa la media.

De este modo, en las gráficas obtenidas de carga-desplazamiento del actuador se observa cómo la energía de deformación obtenida viene limitada por la longitud de las fibras. El tamaño de fibra de entre 2-8 mm provoca, como se observa en las Figura 4, 5 y 6, que la carga en los ensayos a partir de unos 3,5 mm aproximadamente de desplazamiento del actuador vaya a valor muy cercanos a 0. Esto ocurre indiferentemente de la empresa, color y cantidad de fibras puesto que, la longitud se mueve entre esos valores para todas las fibras.

**Figura 4:** Diagramas carga-desplazamiento del ensayo de flexión en tres puntos para probetas de la mezcla A.



**Figura 5:** Diagramas carga-desplazamiento del ensayo de flexión en tres puntos para probetas de la mezcla B.



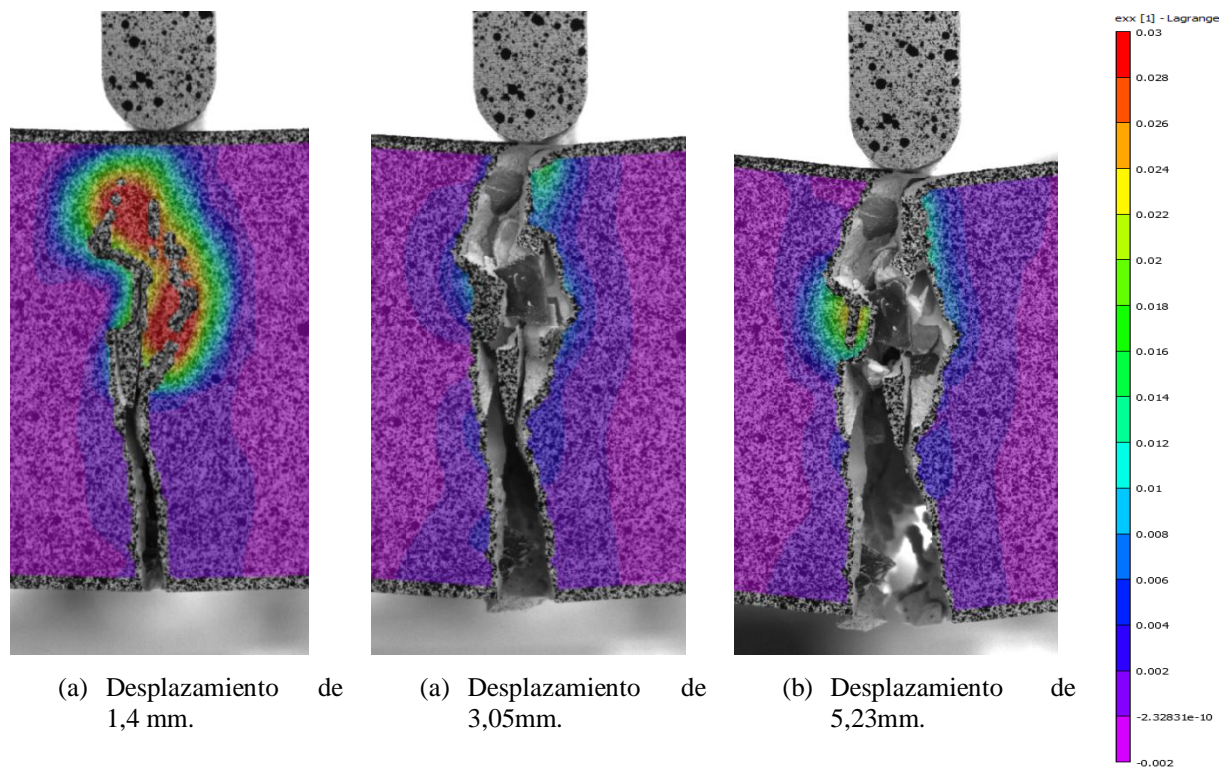
**Figura 6:** Diagramas carga-desplazamiento del ensayo de flexión en tres puntos para probetas de la mezcla C.

Para apoyar lo comentado se presentan la Figura 7 donde se muestran los campos de deformaciones de una probeta representativa de la mezcla C3 para diferentes valores de desplazamiento del actuador.

Se aprecia cómo, al igual que en las Figuras 4,5 y 6, para valores pequeños de desplazamiento del actuador la influencia de las fibras es mayor, para valores de entre 3 y 4 mm la actuación de estas es mucho menos relevante y, para desplazamientos cercanos al fin del ensayo, la influencia de estas es muy limitada. Otros estudios muestran que el empleo de macrofibras poliméricas largas (de 48mm de longitud) permiten un anclaje más adecuado de éstas en la matriz de yeso y extienden el mecanismo de fisuración a un ancho mayor de la probeta [16], de modo que en este caso es la longitud de las fibras la que limita su comportamiento, no las propiedades mecánicas del material ni su adhesión a la matriz de yeso.

A la hora de comparar el comportamiento de las diferentes fibras utilizadas, no se observan diferencias notables más allá de las pequeñas diferencias provocadas por la inhomogeneidad de las macrofibras, es decir, no es

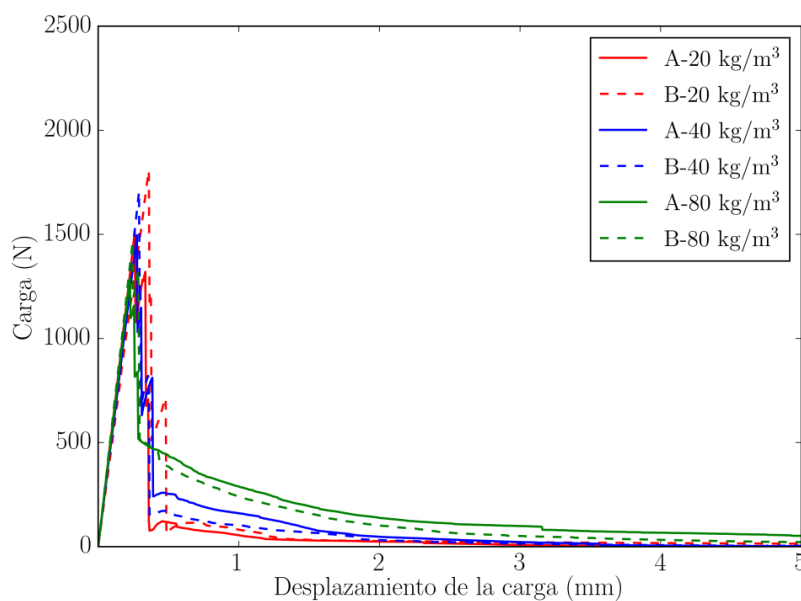
posible controlar el número de fibras dispuesto en la sección de rotura del material aunque la cantidad introducida en la mezcla sea la misma para cada probeta.



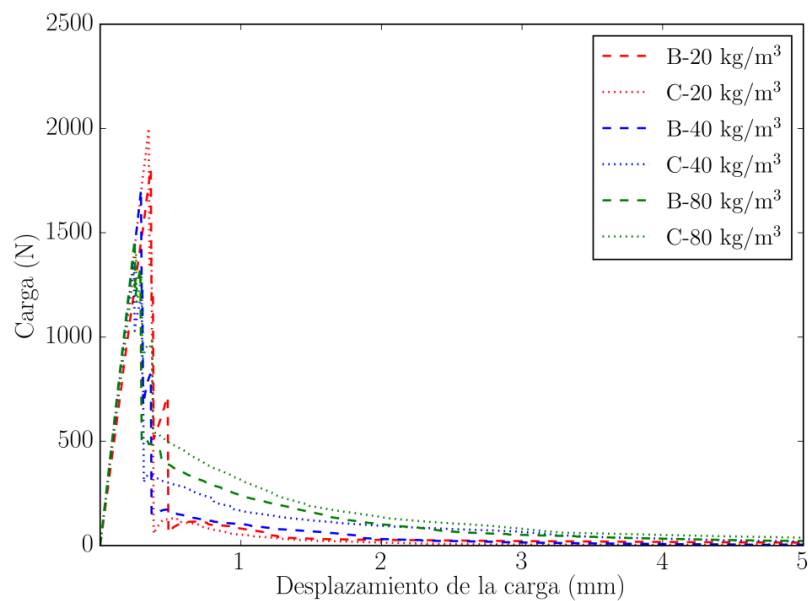
**Figura 7:** Campo de desplazamiento horizontales ( $\epsilon_{xx}$ ).

La Figura 8 muestra una comparativa del comportamiento de las mezclas fabricadas con las fibras A y B, es decir, con fibras de PET obtenidas en diferentes plantas de reciclado. Los comportamientos para cada cantidad de fibras adicionada son muy similares, a pesar de la diferente procedencia de las fibras.

Finalmente, la Figura 9 muestra la misma comparativa para mezclas fabricadas con fibras B y C, es decir, con fibras de PET procedentes de la misma planta de reciclado, pero diferente color. Se observa cómo las diferencias de unas probetas y otras son poco relevantes. Estos resultados, permiten afirmar que los resultados son similares para todas las probetas fabricadas con la misma proporción de fibras, independientemente de su procedencia y de su color.



**Figura 8:** Comparación de las mezclas A y B.



**Figura 9:** Comparación de las mezclas B y C.

### 3.2. Ensayos a compresión

La Tabla 3 muestra las propiedades mecánicas obtenidas en los ensayos de compresión realizados sobre probetas de 40 mm x 40 mm. Al igual que en las figuras anteriores, en color rojo se muestran los resultados de las mezclas con adición de fibras de 20 kg/m<sup>3</sup>, en color azul aquellas con adición de 40 kg/m<sup>3</sup> y en verde aquellas con adición de 80 kg/m<sup>3</sup>. Con trama rayada se muestran los resultados de la mezcla B y con trama punteada los de la mezcla C. Estos resultados, además, se muestran gráficamente en la Figura 10.

En estos resultados se observa cómo, al igual que se observaba en los ensayos a flexión, la carga máxima disminuye con el incremento de la cantidad de fibras adicionada y, con ello, la tensión máxima de rotura. Aun así, los valores de carga son muy cercanos a los de un yeso sin fibras, por lo que la inclusión de estas no influye de manera determinante. En el módulo de Young se observa un incremento en su valor con respecto a la mezcla sin adición, de modo que la rigidez de las probetas aumenta con la adición de dichas fibras.

**Tabla 3:** Valores medios ensayo a compresión.

	Fuerza Máxima (N)	E (Mpa)	$\sigma_{\max}$ (Mpa)
Mezcla 0	18906,86	915,74	11,82
Mezcla A.1	19098,77	958,72	11,94
Mezcla A.2	18516,96	982,56	11,57
Mezcla A.3	18540,83	973,79	11,59
Mezcla B.1	20546,83	983,58	12,84
Mezcla B.2	19149,42	1030,47	11,97
Mezcla B.3	18313,92	974,93	11,45
Mezcla C.1	18828,98	1016,80	11,77
Mezcla C.2	18408,92	997,39	11,51
Mezcla C.3	18174,97	978,18	11,36

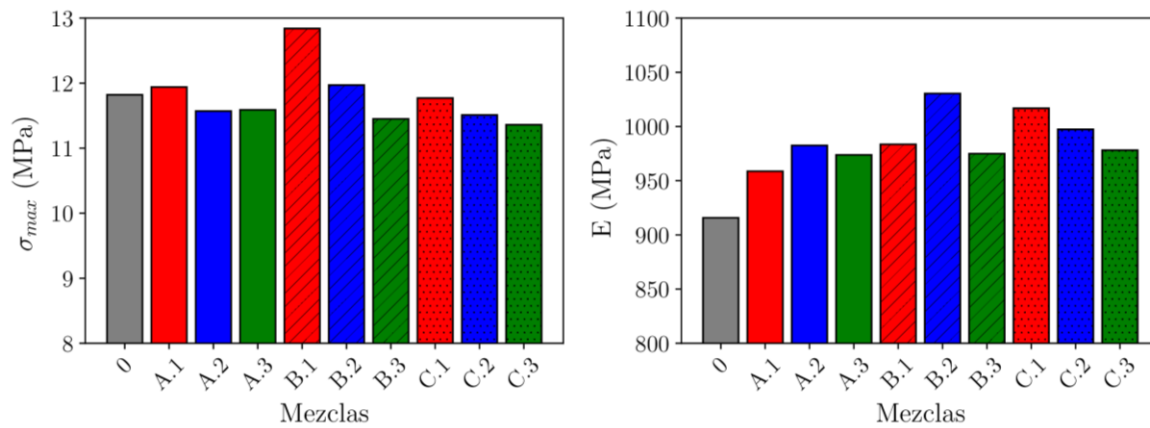


Figura 10: Valores medios en MPa de  $\sigma_{max}$  y del módulo elástico (E) para cada una de las mezclas.

## 4. Conclusiones

En este trabajo se ha realizado una primera aproximación al estudio de la influencia de la adición de fibras de PET a matrices de yeso, centrado en sus propiedades a flexión.

Atendiendo a los resultados obtenidos, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- La procedencia de las fibras, empresas A y B, no influye en el comportamiento de las mezclas, siendo éste muy similar. Tampoco la presencia de color en algunos tipos de fibras demuestra tener influencia en el comportamiento mecánico de las mezclas.
- Se reduce la carga máxima a flexión y la tensión de rotura a medida que la proporción de fibras aumenta, obteniendo los valores máximos cuando no hay adición.
- La carga máxima a compresión tiene valores muy cercanos a los de un yeso sin adición, mientras que el módulo de Young aumenta.
- El proceso de fabricación de las probetas no se ve afectado por la adición de fibras, ya que la trabajabilidad de la mezcla no se reduce significativamente.
- La adición de fibras provoca un incremento considerable en la energía disipada por la probeta durante su rotura, aumentando los parámetros de seguridad frente a situaciones de impacto o sismo, ya que el material es capaz de absorber más energía antes de perder completamente la capacidad resistente.
- La longitud de las fibras limita el incremento de la energía de deformación, observándose que para un desplazamiento del actuador de unos 3-4 mm la carga es prácticamente nula.

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

- Fabricar fibras con mayor longitud para observar cómo influirían la energía de deformación e incluso compararlas con otras macrofibras ya existentes.
- Estudio de la influencia de la longitud de las fibras sobre su eficacia como refuerzo mediante ensayos de pull-out.

## 5. Agradecimientos

Los autores desean agradecer a las empresas ClearPET, Nivaplast y Reciclados La Red por haber facilitado las fibras con las que se ha realizado este estudio de forma desinteresada, aunque sólo se muestren resultados de dos de ellas. También desean agradecer la ayuda proporcionada mediante la acción 1 del Plan de Apoyo a la Transferencia del Conocimiento, el Emprendimiento y la Empleabilidad de la Universidad de Jaén, que ha permitido realizar los ensayos experimentales descritos.

## 6. Referencias

- [1] M.G. Alberti, A. Enfedaque, and J.C. Gálvez. "Comparison between polyolefin fibre reinforced vibrated conventional concrete and self-compacting concrete". *Construction and Building Materials*, **85**:182 – 194, (2015)

- [2] Alberti M.G., Gálvez J.C., Enfedaque A., Carmona A., Valverde C., Pardo G. "Use of Steel and Polyolefin Fibres in the La Canda Tunnels: Applying MIVES for Assessing Sustainability Evaluation". *Sustainability*, **10**(12):4765, (2018)
- [3] N. Buratti, B. Ferracuti, M. Savoia, "Concrete crack reduction in tunnel linings by steel fibre-reinforced concretes". *Construction and Building Materials*, **44**:249-259, (2013)
- [4] T. Kasper, C. Edvardsen, G. Wittneben, D. Neumann, "Lining design for the district heating tunnel in Copenhagen with steel fibre reinforced concrete segments". *Tunnelling and Underground Space Technology*, **23**(5): 574-587, (2008)
- [5] EHE-08. "Instrucción de hormigón estructural". Ministerio de Fomento, Madrid, España, (2008)
- [6] International Federation for Structural Concrete (fib), "The fib Model Code for Concrete Structures 2010". Lausanne, Switzerland: International Federation for Structural Concrete, (2010)
- [7] Greenpeace. Datos sobre la producción de plásticos. Recuperado el 2 de Septiembre de 2020 de: <https://es.greenpeace.org/es/trabajamos-en/consumismo/plasticos/datos-sobre-la-produccion-de-plasticos/>
- [8] Iman M.Nikbina, Saman Rahimi R, Hamed Allahyari, Farhad Fallah. "Feasibility study of waste Poly Ethylene Terephthalate (PET) particles as aggregate replacement for acid erosion of sustainable structural normal and lightweight concrete". *Journal of Cleaner Production*, **126**: 1018-117(2016)
- [9] García Santos A. "Comportamiento mecánico de yeso reforzado con polímeros sintéticos". Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid; (1988)
- [10] Barbero-Barrera, M.M., Flores-Medina, N., Pérez-Villar, V. "Assessment of thermal performance of gypsum-based composites with revalorized graphite filler". *Construction and Building Materials* **142**, 83-91, (2017)
- [11] Singh, M. and Garg, M. "Gypsum-based fibre-reinforced composites: an alternative to timber". *Construction and Building Materials* **8**(3), 155-160, (1994)
- [12] UNE-EN 13279-2. "Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. Parte 2: Métodos de ensayo", AENOR, (2014)
- [13] Chu, T., Ranson, W., Sutton, M.A. "Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics". *Experimental Mechanics*, **25**, 232-244, (1985)
- [14] Sutton MA, Orteu JJ, Schreier H. *Image correlation for shape, motion and deformation measurements: basic concepts, theory and applications*. Springer Science & Business Media; (2009)
- [15] Picazo, Á., Alberti, M. G., Gálvez, J. C., Enfedaque, A., & Vega, A. C. "The Size Effect on Flexural Fracture of Polyolefin Fibre-Reinforced Concrete". *Applied Sciences*, **9**(9), 1762, (2019)
- [16] Suárez, F., Felipe-Sesé, L., Díaz, F. A., Gálvez, J. C., Alberti, M. G. "Comportamiento a fractura de yeso con adición de fibras poliméricas". *Anales de Mecánica de la Fractura* **36**, 114-119, 2019.