



# MODELO PARA ENVÍO DE TRABAJO COMPLETO XXII CILA

## ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE REFUERZO DE DISTINTOS TIPOS DE FIBRAS EN MATRICES ASFÁLTICAS BASADO EN CORRELACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES (DIC)

Evaristo Rafael Moreno López<sup>1</sup>, Fernando Suárez Guerra<sup>2</sup>,  
Jorge Luis García Rodríguez<sup>3</sup>, Ricardo Fabián Planos Martínez<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España, er.moreno@alumnos.upm.es

<sup>2</sup> Universidad de Jaén, Jaén, España, fsuarez@ujaen.es

<sup>3</sup> Universidad de Jaén, Jaén, España, jlgr0005@red.ujaen.es

<sup>4</sup> Universidad de Jaén, Jaén, España, rplanos@ujaen.es

### Resumen

Alguna de las principales causas del deterioro de los materiales asfálticos puestos en servicio en infraestructuras viarias, son debidas a la acción del tráfico, las fluctuaciones de temperatura o la radiación solar, siendo posiblemente la combinación de todas ellas las que dan lugar al proceso que denominamos “envejecimiento” de las mezclas bituminosas.

Para mejorar y alargar la vida útil de las mezclas, la adición de fibras en su fabricación y puesta en obra, fabricadas tanto en base a tecnología en frío como en caliente, han sido ciertamente objeto de estudios, fundamentalmente desde el punto de vista de su comportamiento a fatiga.

Este estudio que presentamos pretende analizar el problema desde una perspectiva distinta, el empleo de diferentes tipos de fibras (fibras de vidrio, polipropileno, sisal o esparto) en una matriz asfáltica para su refuerzo. Para ello, se realizan ensayos de *pull-out* monitorizados mediante un sistema de correlación digital de imágenes (DIC), que permitirá medir desplazamiento de puntos concretos de la matriz y las fibras durante la aplicación de una carga a tracción. Con ello, se evalúa la eficacia de la adherencia entre los materiales y se comprueba qué fibra presenta un mejor comportamiento con la matriz asfáltica.

**Palabras Clave:** asfalto, fibras, pull-out, refuerzo.

### 1 Introducción

El betún asfáltico se usa en pavimentos con agregados pétreos por sus cualidades como ligante. En el caso de los pavimentos flexibles, estos se encuentran sujetos a cargas cíclicas causadas por el tráfico, cambios de temperatura y otros motivos, que dan lugar a deformaciones permanentes y a la aparición de grietas [1]. Las grietas son uno de los defectos de los pavimentos que dan lugar a la rotura temprana de los mismos.

Las técnicas en frío, mezclas preparadas a temperatura ambiente con emulsión bituminosa, no requieren en contraposición a las mezclas en caliente, el calentamiento de áridos ni de ligante, pudiéndose conformar *in situ* o en central, para su extendido, resultando ser una opción amigable con el medioambiente y a unos ratio de coste/beneficio muy interesantes. Sin embargo, estas mezclas presentan inferiores propiedades mecánicas respecto a las mezclas en caliente [2]. Dicho sea esto sin entrar en otras consideraciones, como tipo de vía, paquete de firme existente o tráfico usuario, que daría lugar a más extensas discusiones. De entre las técnicas en frío, los microaglomerados en frío con emulsión son una herramienta muy empleada en conservación superficial de rodaduras bituminosas.

La incorporación de fibras en mezclas en caliente y en técnicas en frío han sido implementadas a fin de mejorar las características resistentes y la aparición de grietas en la superficie de los pavimentos [3] y en general el rendimiento de las mezclas, siendo esto objeto de estudio desde hace décadas [4]. El uso de fibra de vidrio en la fórmula de trabajo de microaglomerados en frío con emulsión es una práctica muy común en estas técnicas en España.

Como se ha comentado, se pretende una mejora de las características técnicas que aportan este tipo de aplicaciones, fundamentalmente con el fin de mejorar en lo posible el sellado de grietas presentes en la superficie de rodadura a tratar y hacer más duradera la aplicación en el tiempo.

Existen numerosas publicaciones científicas que, desde diferentes puntos de vista, analizan las mejoras en la mezcla por causa de la adición de fibras en la misma [1], así como la dinámica de la aparición de la fractura en la mezcla asfáltica [5] tanto fría como caliente, semicaliente o templada [6], y la predicción de los fallos de adhesividad entre los áridos y el mastic bituminoso de las mezclas [7]. Asimismo, existen numerosos estudios acerca de la aportación de diferentes tipos de fibra a incorporar en las mezclas, de origen tanto natural como artificial [8][4]. Podemos encontrar referencias a incorporación de fibras de bambú, coco, polietileno, fibra de vidrio entre otras [9]. Siendo el objeto de estos estudios determinar la mejora que aportan las fibras desde el punto de vista técnico, económico o medioambiental en orden al empleo de fibras naturales con menor huella de carbono.

En el presente estudio se pretende determinar el comportamiento de tres tipos de fibra, relacionado con la adhesividad que presentan con la matriz bituminosa en la que están embebidos.

La incorporación de fibras, particularmente en el caso de los microaglomerados en frío con emulsión, se suele realizar habitualmente en longitudes medias de 5 cm. Pretender que un gramaje de fibra aplicada (tm) en el extendido de microaglomerados de este tipo “cosa” los bordes de una grieta, impidiendo su reflexión en superficie, ha de ser objeto de un estudio específico más allá de los ya referenciados, y es el que presentamos en este trabajo en sus resultados iniciales.

Partiendo de la premisa de que la fibra ha de unir los bordes de la grieta producida o reflejada en superficie de rodadura, se ha considerado que ha de anclarse en unas longitudes mínimas a ambos lados de la misma para minimizar su movimiento y evitar la separación de los bordes y su transmisión longitudinal. Este anclado ha de depender de la adherencia entre la fibra y el mastic en que se haya envuelta y a la vez ha de tener relación con la profundidad de su anclado en los bordes. El éxito del refuerzo debe estar relacionado, intuitivamente, con este dato y en relación con el gramaje en el extendido por metro cuadrado de microaglomerado empleado en la aplicación.

## **2 Materiales y métodos**

Para la fabricación de las probetas a ensayar, se utilizaron áridos traquíticos, de procedencia Alcolea de Córdoba (España), de granulometría 0/6 que cumplen con las normas EN 13043:2002 y la EN 13043:2002/AC 2004 que se corresponden a los áridos para mezclas bituminosas y tratamientos superficiales de carreteras, aeropuertos y otras zonas pavimentadas.

El esparto, (*Stipa tenacissima*, nombre científico) o la estopa como también se conoce, es una fibra muy flexible y resistente proveniente de la planta esparto autóctona del sur de España y el norte de África. Aunque hasta la actualidad no se ha empleado este eco-material como aportación en pavimentos, tradicionalmente se utiliza en la construcción para hacer anclajes resistentes,

reforzar y sujetar uniones o rellenos con escayola.



Figura 1. Imágenes de esparto.

Con densidades entre 1,3 y 1,5 g/m<sup>3</sup> y tensiones de rotura de entre 300 y 700 MPa, las fibras de vidrio como las empleadas, con resistencias de tracción del orden de los 1.620MPa, (UNE EN 15422, UNE-EN ISO 2078:1996/A1:2016) según el fabricante, han significado un paso de avance interesante en la construcción, sus propiedades (incombustible, imputrescible, no absorbente, estable químicamente, resistente ante ataques de insectos roedores y hongos, de fácil colocación y de poco peso) posibilitan la comercialización y empleo del material en numerosas actividades.



Figura 2. Fibras de polipropileno.

El polipropileno es un material termoplástico de uso universal. Resulta ser muy ligero y soldable además de tener propiedades muy equilibradas tales como poca absorción en agua, gran pureza, ideal resistencia química y buen aislante eléctrico. Estas fibras están compuestas por un co-polímero de polipropileno 100% virgen. Es un elemento formado por monofilamentos retorcidos de 54 mm de longitud donde 1kg tiene más de 200.000 filamentos con una Resistencia de rotura a tracción de entre 560 y 650MPa. Según ficha de producto del fabricante.



Figura 3. Fibras de vidrio.

El material bituminoso empleado ha sido un betún asfáltico de penetración 70/100, con un punto de reblandecimiento entre 43 y 51°C, y una emulsión bituminosa del tipo C60B4 MIC con un 61% de contenido de ligante, como indican las fichas de características de los productos suministrados por los fabricantes.

## 2.1 Fabricación de probetas

Las probetas para los ensayos se han conformado en unos recipientes de acero inoxidable con las dimensiones de la figura. 3,5 cm diámetro superior, 2,5 cm diámetro inferior y 4 cm de profundidad.



Figura 4. Molde empleado para realizar las probetas.

Las fibras, a excepción de la de propileno, suministrada en 54 mm de longitud por el fabricante, fueron cortadas en longitudes suficientes para el desarrollo de la prueba. Se pesaron, a fin de tener un gramaje similar a comparar en el desarrollo de la prueba.



Figura 5. Longitudes de las diferentes fibras ensayadas.

Los áridos, 0/6 se secaron en estufa a 90°C para trabajar con ellos exentos de humedad. El betún asfáltico se calentó en estufa a 130°C, para poder trabajarlo y verterlo en los recipientes, colocando una cantidad de cada tipo de fibra a ensayar, de la forma más centrada posible en el eje del recipiente, llenándose estos a la altura de 3 y 4 cm. Fabricándose con betún asfáltico puro, tres probetas de cada tipo de fibra y de cada longitud de embebimiento 3 y 4 cm. El fin de estas se preveía como de control, para observar el comportamiento de la fibra en un 100% de ligante.



Figura 6. Probetas de betún 100% terminadas para su ensayo.

Para las probetas con microaglomerado en frío, se procedió previamente, a la obtención de una fórmula de trabajo, que nos diera un resultado óptimo para los áridos empleados, según el procedimiento descrito en la monografía “Microaglomerados en Frío” de ATEB, con un resultado de un 12% de emulsión C60B4 MIC y un 10% de agua de preenvuelta, colocando los distintos tipos de fibra a emplear de forma centrada en el vaso de muestra, rellenándose este a los tres y cuatro centímetros, compactando ligeramente con los dedos a fin de eliminar huecos y dar una consistencia a la probeta.

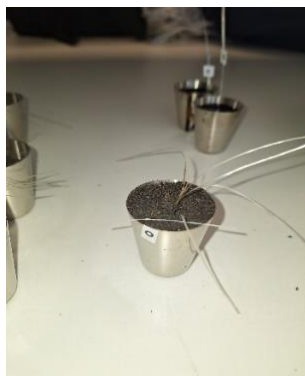


Figura 7. Probetas con mezcla bituminosa terminada.

De esta forma, se fabricaron tres probetas para cada profundidad de embebimiento a tres y cuatro centímetros, con fibra de vidrio, polietileno y esparto.

## 2.2 Ensayo de *pull-out*

El ensayo de *pull-out* permite evaluar la capacidad mecánica de la interfaz fibra-matriz. Existen estudios empleados en los últimos años con probetas poliméricas embebidas en matriz de mortero de cemento y hormigón [10] y en probetas de yeso [11].

El ensayo consiste en extraer una fibra embebida en la matriz empleando una fuerza de tracción, obteniendo así un diagrama carga-deslizamiento (*load-slip*) que caracteriza la capacidad resistente de la interfaz fibra-matriz y observar cómo evoluciona la carga soportada a medida que se produce la extracción de la fibra. La Figura 8 muestra un esquema habitual de este ensayo, en el que se disponen cuatro puntos de referencia, cuyo desplazamiento se monitoriza con el fin de calcular en última instancia el deslizamiento de la fibra dentro de la matriz. El deslizamiento entre fibra y matriz, en principio no puede obtenerse directamente con la medida de los desplazamientos de los dos puntos inferiores, pues existe una cierta longitud inicial de fibra entre esos dos puntos que experimenta, además del deslizamiento, una deformación que depende de la fuerza aplicada en cada instante. Para poder restar el desplazamiento relativo debido a la deformación de la fibra y obtener así el debido exclusivamente al deslizamiento entre la fibra y la matriz, se emplean los dos puntos intermedios, que permiten obtener la deformación de la fibra.

De este modo, denominando  $slip^i$  al deslizamiento fibra-matriz producido en un instante  $i$  del ensayo e identificando con el subíndice  $0$  a los valores de las longitudes medidas en el instante inicial del ensayo, éste puede calcularse de la siguiente manera:

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

Donde  $l_1$  y  $l_2$  son las longitudes de cada punto de la fibra,  $\delta$  es la deformación de la fibra y  $slip$  ya ha sido definido anteriormente.

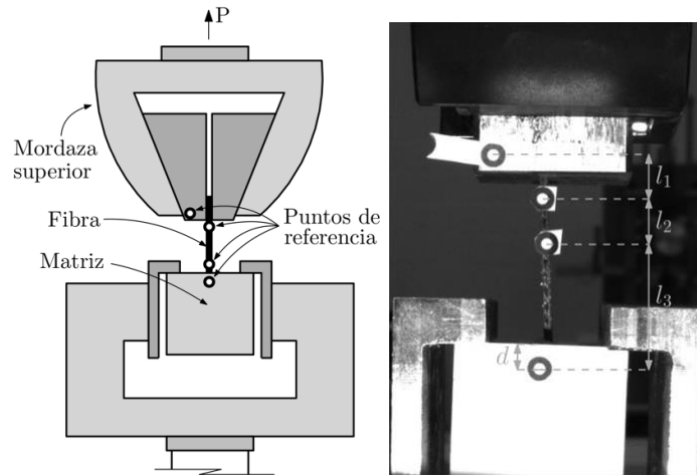


Figura 8. Esquema del ensayo de pull-out (izda.) y denominación de distancias empleadas para determinar el deslizamiento fibra-matriz a lo largo del ensayo (dcha.).

En el caso de los ensayos que se muestran en este trabajo, debido a que la longitud de las fibras empleadas únicamente permitió emplear uno de los dos puntos de referencia situados en la fibra, tal y como muestra la Figura 9, se consideró que la deformación de las fibras era despreciable. Esta consideración se vio confirmada tras los ensayos, pues las cargas alcanzadas y el módulo elástico del material de las fibras, efectivamente, permiten despreciar la deformación producida en todos los instantes del ensayo.

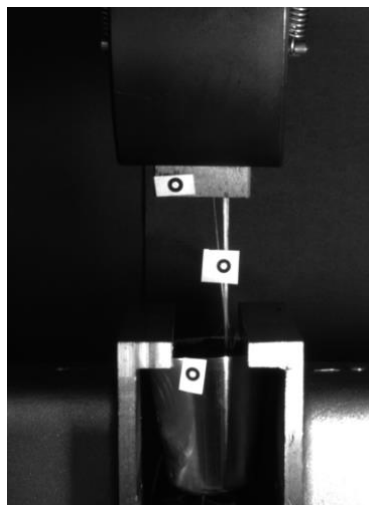


Figura 9. Imagen de uno de los ensayos realizados, donde se observan los tres puntos de referencia empleados (izda.) e imagen del procesado de imágenes mediante la técnica DIC (dcha.).

### 2.2.1 Equipos empleados

Los ensayos se realizaron con una máquina universal de ensayos de doble columna Instron 5967, empleando una célula de carga de 30 kN. Para realizar los ensayos se emplearon los útiles de ensayo que se pueden observar en la Figura 8; estas piezas permiten alojar una probeta con una fibra que asoma por la abertura superior, permitiendo la acción de extracción empleando la mordaza superior.

Para obtener las coordenadas de los tres puntos de referencia empleados en este trabajo, se empleó la correlación digital de imágenes (*digital image correlation, DIC*). La correlación digital de imágenes, o DIC, es una técnica óptica que permite medir los desplazamientos de los puntos de una imagen a lo largo de una secuencia de imágenes. Para ello, se capturan varias imágenes durante un ensayo y, tomando la imagen inicial como referencia y empleando un software específico, puede obtenerse el desplazamiento de los puntos que conforman la imagen a lo largo del ensayo (ver Figura 10).

Esta técnica permite obtener el campo de desplazamientos completo de los puntos de la probeta ensayada, que pueden analizarse en dos dimensiones si se emplea una cámara y en tres dimensiones con la utilización de dos cámaras; puede consultarse más información sobre esta técnica en [12]. En estos casos, la técnica DIC permite obtener un campo de desplazamientos completo y, con él, calcular el campo de deformaciones completo de la probeta estudiada.

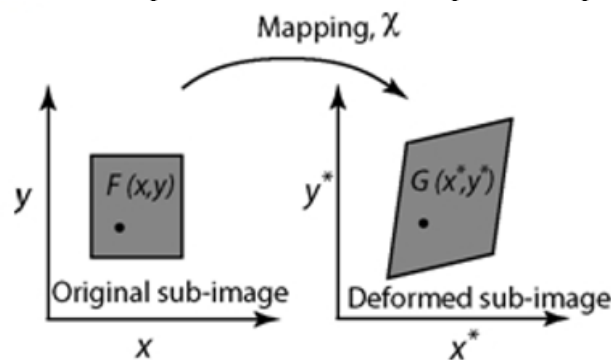


Figura 10. Esquema de la obtención del campo de deslizamiento empleando la correlación digital de imágenes (DIC), que establece un mapeo entre los puntos de la imagen de referencia y la imagen en un instante del ensayo.

En este estudio, no obstante, se ha empleado la técnica DIC haciendo un seguimiento de únicamente los tres puntos de referencia mencionados anteriormente (ver Figura 8). Para la toma de imágenes, se empleó una cámara IDS UI-1480SE de alta definición, con un sensor de cinco megapíxeles y una resolución de 2560 x 1920 píxeles. Las imágenes se obtuvieron con una frecuencia de una imagen por segundo durante el ensayo y fueron postprocesadas con el software ImageJ [13] para la obtención del desplazamiento de los puntos de referencia a lo largo del ensayo y, posteriormente, el deslizamiento entre fibra y matriz (*slip*). El lector puede consultar más información sobre la aplicación de esta técnica en [11] y [14].

## 3 Resultados y discusión

Los resultados obtenidos de los ensayos de *pull-out* realizados se muestran a continuación en diferentes figuras. Para diferenciar cada una de las probetas ensayadas se ha empleado la nomenclatura que se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Nomenclatura empleada en las probetas.

Tipo	Descripción	Nomenclatura
Fibra	Esparto	ES
	Polipropileno	P
	Fibra de vidrio	FV
Profundidad embebimiento	30 mm	30
	40 mm	40
Material	Betún 100%	PB
	Mezcla bituminosa	PM

Por ejemplo, el resultado denominado ES\_30\_PB hace referencia a la probeta de betún 100% con una fibra de esparto embebida a 30 mm de profundidad.

En la Figuras 11 y 12 se muestran las cargas medias máximas soportadas por cada una de las fibras en las distintas probetas ensayadas, correspondiendo los resultados de la Figura 11 a las probetas de betún 100% y las de la Figura 12 a las de las probetas con mezcla bituminosa. Se observa que la carga máxima resistida por las diferentes fibras no supera en ningún caso los 2,1 N de fuerza.

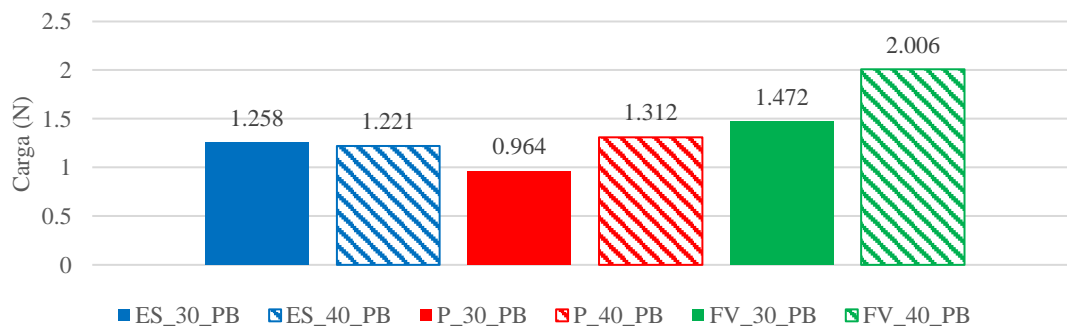


Figura 11. Diagrama de barras de la media de cargas máximas soportadas por las diferentes fibras en las probetas con betún (PB).

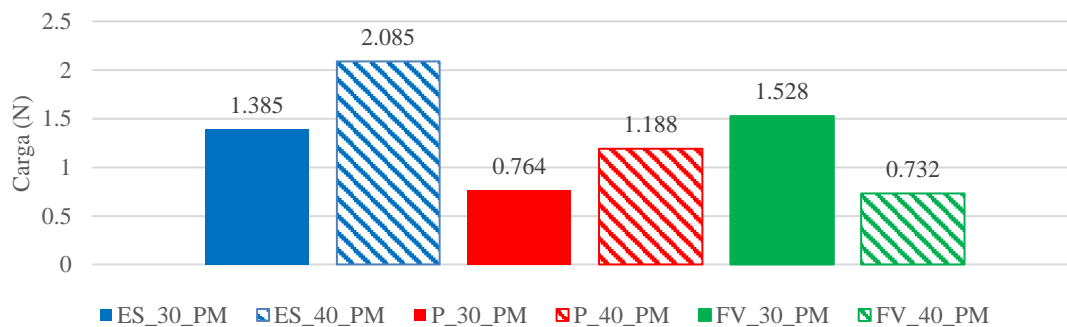


Figura 12. Diagrama de barras de la media de cargas máximas soportadas por las diferentes fibras en las probetas con mezcla bituminosa (PM).

Tal y como se muestra en las Figuras 11 y 12, la carga máxima es mayor en las probetas embebidas 40 mm respecto a las de 30 mm, demostrando, como era previsible, que el comportamiento mecánico está directamente relacionado con la longitud de fibra embebida. En todos los casos es reseñable el bajo comportamiento mecánico, alcanzando cargas muy bajas con todas las combinaciones de fibras, matrices y longitudes de embebimiento empleadas.

Como se puede observar en la Figura 12 el valor de carga de la probeta FV\_40\_PM es menor que el de la probeta FV\_30\_PM, caso que no ocurre en el resto de las probetas de esparto y



polietileno, esto es debido a que la fibra de vidrio en la probeta de mezcla bituminosa no llegó a impregnarse de betún durante su fabricación, careciendo así de adherencia con la matriz, por lo que no puede considerarse válido el resultado obtenido de cara a su comparación con el resto de los ensayos.

Tras los ensayos se observa un comportamiento muy distinto entre las probetas con matriz de betún 100% (PB) y las de mezcla bituminosa (PM). En el caso de los primeros, todas las fibras mostraron una muy buena adherencia con la matriz, pues en ningún caso se produjo deslizamiento real entre ambos materiales. Tal y como se observa en la Figura F4 (izda.), la tracción provoca una deformación plástica de la matriz de betún en lugar de una extracción de la fibra. En el caso de las probetas con mezcla bituminosa sí se produjo un deslizamiento de las fibras dentro de la matriz (ver Figura 13 (dcha)).



Figura 13. Aspecto de una probeta con matriz de betún 100% al final del ensayo (izda.) y aspecto de una probeta con matriz de mezcla bituminosa al final del ensayo (dcha.).

En las Figuras 14 y 15 se muestran las gráficas de los datos recogidos mediante la técnica de correlación digital de imágenes (DIC). En ellas, se puede observar cómo tanto para las probetas de betún como en las probetas de mezcla bituminosa, una vez alcanzado un cierto valor bajo de carga (N), la fibra se extrae del interior de la probeta bajo cargas muy bajas e incluso mostrando un descenso en el valor de carga a lo largo del ensayo.

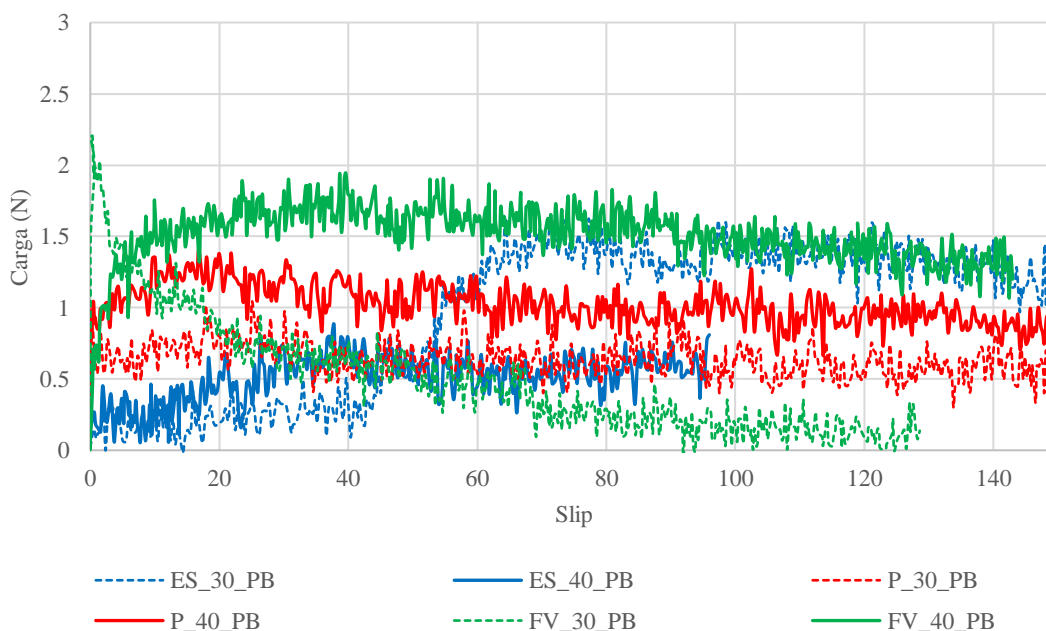


Figura 14. Gráfica carga-*slip* de las probetas de betún (PB).

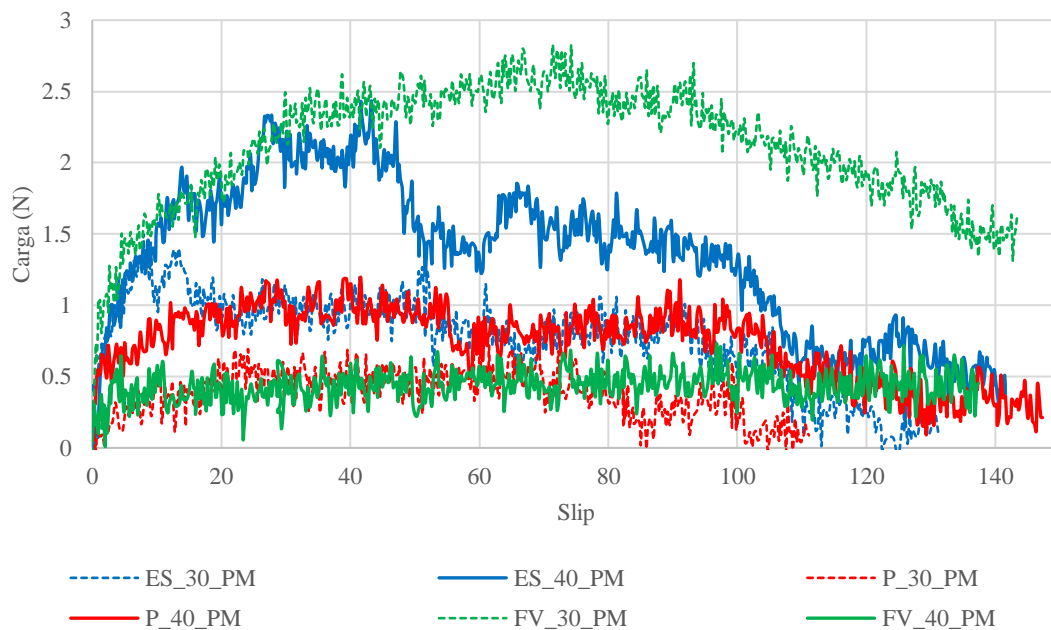


Figura 15. Gráfica carga-*slip* de las probetas con mezcla bituminosa (PM).

Los resultados obtenidos con las probetas de betún 100% (PB) no proporcionan información sobre las propiedades mecánicas de la intercara fibra-matriz, pues, como se observa en la Figura 13 (izda.), la tracción no provoca una extracción de la fibra, sino una deformación de la matriz. Por otro lado, de los datos obtenidos con las probetas de mezcla bituminosa (PM), se puede observar que las fibras no presentan una buena adherencia con la matriz, ya que se extraen con valores de carga muy bajos. Asimismo, cabe mencionar que no puede hacerse una comparación directa entre los resultados obtenidos, pues la carga aplicada está relacionada con la tensión de adherencia a través del área de contacto en la intercara fibra-matriz, que no es la misma para cada fibra. No obstante, aunque esta comparación no pueda realizarse de forma directa, los resultados obtenidos sí permiten comprobar que no hay ninguna fibra que proporcione unos resultados claramente superiores al resto.

#### 4 Conclusiones y trabajo futuro

En este estudio se ha empleado el ensayo de *pull-out* empleando la técnica de correlación digital de imágenes con probetas de betún y mezcla bituminosa, utilizando fibras de esparto, polietileno y fibra de vidrio, embebidas a diferentes profundidades. De los obtenidos se puede extraer las siguientes conclusiones:

- Una mayor profundidad de embebimiento de las fibras proporciona mejores propiedades mecánicas en la unión fibra-matriz, tal y como se observa comparando los resultados de las probetas con fibras embebidas 30 mm y 40 mm.
- En todos los ensayos realizados, las cargas máximas resultan muy bajas, no llegando a superar en ningún caso los 2,1 N de fuerza.
- Aunque las cargas obtenidas con fibras de vidrio son algo mejores, no parecen proporcionar resultados claramente superiores respecto al resto de fibras.
- Las fibras de las probetas con betún 100%, muestran una gran adherencia debido a las elevadas propiedades de adhesividad del betún. En cambio, las fibras de las probetas con mezcla bituminosa en el que el porcentaje de betún es alrededor del 5% presentan una baja adherencia, llevando a cargas bajas en el ensayo de *pull-out*.

Partiendo de los resultados obtenidos en este trabajo, pueden señalarse las posibles líneas de trabajo futuro:

- Realizar ensayos de flexión para comprobar en bloques de mayores dimensiones la efectividad de las fibras a esfuerzos de tracción en mezclas bituminosas.
- Investigar el uso de fibras de esparto sustituyendo a las fibras de vidrio en las mezclas bituminosas, disminuyendo el valor económico de la mezcla.

## 5 Referencias

- [1] Shanbara, H. K., Ruddock, F., & Atherton, W. (2018). A viscoplastic model for permanent deformation prediction of reinforced cold mix asphalt. *Construction and Building Materials*, 186, 287-302. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.07.127
- [2] Dulaimi, A., Al Nageim, H., Ruddock, F., & Seton, L. (2016). New developments with cold asphalt concrete binder course mixtures containing binary blended cementitious filler (BBCF). *Construction and Building Materials*, 124, 414-423. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.07.114
- [3] Joon Lee, S., Rust, J. P., Hamouda, H., Richard Kim, Y., & Borden, R. H. (2005). Fatigue cracking resistance of fiber-reinforced asphalt concrete. *Textile Research Journal*, 75(2), 123-128. doi:10.1177/004051750507500206
- [4] “*Fiber-modified asphalt concrete characteristics, applications and behavior*” (1996).
- [5] Kollmann, J., Liu, P., Lu, G., Wang, D., Oeser, M., & Leischner, S. (2019). Investigation of the microstructural fracture behaviour of asphalt mixtures using the finite element method. *Construction and Building Materials*, 227, 117078. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.117078
- [6] Ramesh, A., Venkat Ramayya, V., Sandeep Reddy, G., & Vinayaka Ram, V. (2022). Investigations on fracture response of warm mix asphalt mixtures with nano glass fibres and partially replaced RAP material. *Construction and Building Materials*, 317, 126121. doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.126121
- [7] Hu, J., & Qian, Z. (2018). The prediction of adhesive failure between aggregates and asphalt mastic based on aggregate features. *Construction and Building Materials*, 183, 22-31. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.06.145
- [8] Shukla, S., Shukla, S., Mittal, A., & Singh, T. (2022). A review on use of coir fibre in road construction. *Materials Today: Proceedings*, 65, 1839-1845. doi:10.1016/j.matpr.2022.05.017
- [9] Ahmed, K. U., Geremew, A., & Jemal, A. (2022). The comparative study on the performance of bamboo fiber and sugarcane bagasse fiber as modifiers in asphalt concrete production. *Heliyon*, 8(7), e09842. doi:10.1016/j.heliyon.2022.e09842
- [10] Alberti, M. G., Enfedaque, A., Gálvez, J. C., & Ferreras, A. (2016). Pull-out behaviour and interface critical parameters of polyolefin fibres embedded in mortar and self-compacting concrete matrixes. *Construction and Building Materials*, 112, 607-622.
- [11] 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.
- [12] Sutton, M. A., Orteu, J. J., & Schreier, H. (2009). *Image correlation for shape, motion and deformation measurements: basic concepts, theory and applications*. Springer Science & Business Media.
- [13] Schneider, C. A., Rasband, W. S., & Eliceiri, K. W. (2012). NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. *Nature methods*, 9(7), 671-675.
- [14] García Rodríguez, J. L. (2022) Estudio de la capacidad de refuerzo de fibras de PET en yesos y morteros de cemento. Trabajo Fin de Máster, Universidad de Jaén, Escuela Politécnica Superior de Linares.
- [15] Bekele, A., Balieu, R., Jelagin, D., Ryden, N., & Gudmarsson, A. (2021). Micro-mechanical modelling of low temperature-induced micro-damage initiation in asphalt concrete based on cohesive zone model. *Construction and Building Materials*, 286, 122971. doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.122971