

Estudio de la influencia de la adición de fibras en la rotura en modo II de matrices cuasifrágiles

Fernando Suárez Guerra¹, Luis A. Felipe Sesé¹, Francisco J. Castilla Gonzalo¹, Francisco A. Díaz Garrido²

¹ Departamento de Ingeniería Mecánica y Minera, Campus Científico-Tecnológico de Linares, fsuarez@ujaen.es, lfelipe@ujaen.es.

² Departamento de Ingeniería Mecánica y Minera, Campus de las Lagunillas (Jaén), fdiaz@ujaen.es.

La rotura de materiales cuasifrágiles, tales como el hormigón o el yeso, ha sido objeto de estudio desde hace décadas. Estos estudios han ampliado el conocimiento de los mecanismos de rotura así como de los parámetros que gobiernan este fenómeno y han permitido proponer modelos numéricos que lo reproducen mediante herramientas tales como el método de los elementos finitos. Por otro lado, de los tres posibles modos de rotura que se diferencian a la hora de analizar problemas de Mecánica de la Fractura, el modo I es sin duda el mejor conocido, reproducido experimentalmente y empleado como base para los modelos numéricos. No obstante, existen situaciones en las que la rotura es el resultado de un estado de tensiones que moviliza un mecanismo en el que participan los modos I y II simultáneamente. A este respecto, la rotura en modo II ha sido estudiada con menos profundidad, en parte porque las roturas en modo I son más habituales, pero también porque su reproducción experimental y, por tanto, su estudio, resulta más complejo. En este estudio se presentan resultados experimentales de ensayos que movilizan la rotura en modo II en probetas de yeso adicionadas con fibras de refuerzo. En concreto se emplean el ensayo de cortante definido por la norma japonesa JSCE y el ensayo de push-off, que en los últimos años está permitiendo estudiar este modo de rotura en el hormigón adicionado con fibras. El campo de desplazamientos se obtiene empleando la técnica de correlación digital de imágenes (DIC), lo cual ayuda a entender cómo las fibras modifican los mecanismos de rotura de la matriz cuando ésta se produce en condiciones de modo II.

1. Introducción

1.1. El refuerzo de matrices cuasifrágiles mediante adición de fibras

El uso de fibras como adición de refuerzo en materiales de construcción ha experimentado un gran impulso en los últimos años. El caso del hormigón es, probablemente, el caso más significativo, pues la utilización de fibras ha comenzado contemplarse recientemente tanto en códigos nacionales —Italia y España [1-2]— como internacionales —fib Model Code 2010 [3]—, regulando su uso y aplicación a nivel de proyecto, lo que ha potenciado enormemente su utilización. Los beneficios de añadir fibras en matrices cuasifrágiles son bien conocidos y, en el campo de los materiales de construcción, esta tecnología ha permitido desarrollar el hormigón reforzado con fibras (HRF), que se usa en ciertas aplicaciones, tales como los recubrimientos interiores de túneles empleados durante el proceso de excavación, elementos prefabricados sometidos a condiciones de carga temporales durante su almacenamiento y transporte y suelos con alta durabilidad frente a efectos de retracción del hormigón.

En los últimos años han aparecido en el mercado nuevas fibras poliméricas para el refuerzo del hormigón. Estas fibras han demostrado proporcionar capacidad estructural sin adolecer de importantes inconvenientes de las fibras de acero, tales como la corrosión, que puede afectar de forma importante al aspecto estético de la estructura (que en ciertos casos puede ser de enorme importancia) o problemas derivados de la capacidad del acero para transmitir electricidad (que puede resultar problemático en ciertos elementos prefabricados, como las traviesas prefabricadas

de hormigón pretensado para ferrocarril). En los últimos años, ciertas macrofibras poliméricas han demostrado proporcionar muy buenas capacidades resistentes en hormigón convencional vibrado [4], hormigón autocompactante [5-6] y mezclado con fibras de acero [7]. Estas fibras están comenzando a ser utilizadas en aplicaciones reales como refuerzo estructural [8-10]. Los principales mecanismos que garantizan su correcto comportamiento están bien identificados, siendo la longitud de las fibras y las propiedades mecánicas del polímero con el que están fabricadas las más relevantes [11-12].

1.2. El yeso reforzado con fibras

El yeso es el material de construcción más ampliamente utilizado como revestimiento interior en edificios debido, entre otros motivos, a su bajo coste, fácil manipulación, amplia tradición en su puesta en obra, diferentes niveles de acabado (buena vista, maestreado, estucado, etc...) y a las buenas condiciones de habitabilidad que proporciona. Asimismo, la industria del yeso ha evolucionado, encontrando nuevas aplicaciones y productos, como los paneles reforzados con fibra de celulosa o los paneles de yeso laminado (PYL). Esto ha permitido ampliar el uso de este material en el sector de la construcción. No obstante, no se han observado recientemente grandes desarrollos e innovaciones en los productos y aplicaciones prácticas del yeso en el mercado.

Existen estudios sobre las propiedades mecánicas del yeso reforzado con fibras (YRF) como los de García-Santos [13], que analizan las propiedades mecánicas de las mezclas empleando diversos tipos de fibras poliméricas. Estos estudios, además de ser antiguos (más de 30 años), no incluyen información de las propiedades de fractura. Recientemente, se observa interés en emplear ciertas fibras naturales, como el lino o el cáñamo, que mejoran las propiedades mecánicas, acústicas y térmicas del yeso a la vez que suponen una solución respetuosa con el medioambiente [14-15].

En general, cuando se estudian las propiedades mecánicas del YRF, los ensayos mecánicos suelen estar limitados a determinar la resistencia a compresión, el módulo de elasticidad y la resistencia a flexión. No obstante, la energía de fractura absorbida por el material antes de perder completamente su capacidad resistente es de gran importancia en algunos casos, como en situaciones bajo acciones sísmicas, ciertos movimientos estructurales (asientos diferenciales, retracciones térmicas, etc...) o protecciones estructurales frente al impacto. En estas situaciones, conocer y modificar la energía que un material puede absorber antes de su rotura catastrófica, es de esencial importancia de cara a diseñar estrategias encaminadas a la seguridad estructural, a disminuir las pérdidas económicas materiales en eventos de este tipo e incluso a mitigar la alarma social que produce la aparición de fisuras o grietas en particiones y cerramientos de edificios. En este sentido, es precisamente la energía de fractura una de las propiedades que se ven notablemente mejoradas con la adición de fibras en las mezclas de yeso [16].

1.3. Modos de rotura I y II

La fractura en materiales cuasifrágiles ha sido objeto de estudio durante las últimas décadas, lo que ha permitido conocer con gran detalle los mecanismos involucrados. En este sentido, se distinguen tres modos de rotura, que se muestran en la Figura 1.

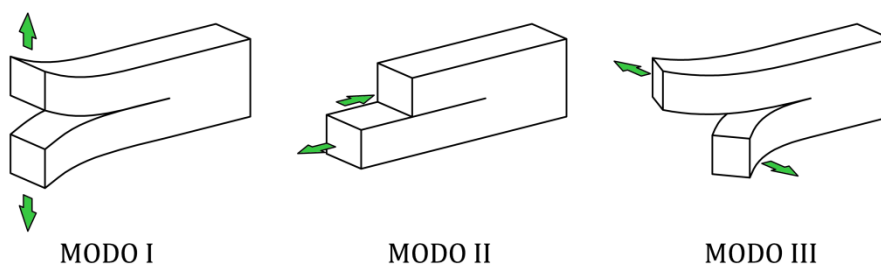


Figura 1: Modos de rotura

Existen en la literatura un gran número de estudios centrados en la rotura en modo I, probablemente por ser la más habitual en este tipo de materiales. Fruto de estos estudios, se han desarrollado una gran variedad de modelos numéricos que permiten reproducir la rotura en estos materiales, destacando los modelos de fisura cohesiva [17-18], que se caracterizan por una notable sencillez en su formulación y una respuesta numérica que permite reproducir con bastante precisión estos fenómenos.

También se han desarrollado modelos de rotura para materiales reforzados con fibras. En este sentido, el modo I de fractura (debido a esfuerzos de tracción o flexotracción) se ha reproducido con éxito en hormigón reforzado con diferentes tipos de fibras, tales como las de vidrio, acero y poliolefina [19,20]. En estos casos, la teoría clásica de la fisura cohesiva, propuesta por Hillerborg et al. [21] ha demostrado ser muy adecuada si la curva de ablandamiento se modifica para su adecuación al comportamiento del hormigón reforzado con fibras. Las curvas de ablandamiento (*strain softening*) habituales cuando se estudia la fractura del hormigón son lineales, bilineales o

exponenciales, pero cuando se desea reproducir el comportamiento del hormigón reforzado con fibras, adoptar una función trilineal permite reproducir su comportamiento de una manera razonablemente aproximada.

En cualquier caso, la mayor parte del trabajo numérico desarrollado basa su formulación en los mecanismos de rotura en modo I, encontrándose un número mucho menor de modelos que contemplen la rotura en modo II o en combinación de modos I y II. Esto es debido, como se ha dicho, en parte porque el modo I es el que más fácilmente se moviliza en este tipo de materiales, pero también porque el análisis de la rotura en modo I es más sencillo. El análisis de la rotura en modo II plantea dificultades por dos motivos, por un lado, movilizar el modo II en este tipo de materiales a menudo no resulta fácil y, por otro lado, una vez se moviliza una rotura en la que participa el modo II, resulta complicado asegurar que ésta se produzca puramente debido a un modo II, sin intervención de modos adicionales.

El objetivo del estudio que aquí se presenta es profundizar en los mecanismos de rotura movilizados cuando se somete a una probeta de un material cuasifrágil reforzado con fibras a un estado de cortante puro. Para ello se emplean probetas de yeso reforzadas con microfibras de polipropileno y se realizan ensayos de *push-off* y ensayos de cizalladura según la normativa japonesa JSCE [22]. El primero de los ensayos mencionados ha sido seleccionado por estar siendo empleado con éxito en recientes ensayos que estudian la cizalladura en hormigón reforzado con fibras [23-25] y el segundo por tener un procedimiento estandarizado para estudiar estos mecanismos de rotura.

2. Diseño del estudio

Como se ha mencionado, no existen muchos ensayos estandarizados que permitan estudiar la rotura en modo II con materiales cuasifrágiles. En este sentido, cabe destacar las pruebas interlaboratorios realizada por la RILEM en 2001 [26], que estudiaba el arrancamiento de conectores metálicos embebidos en hormigón, provocando una rotura en, teóricamente, modo II puro. De aquel estudio se pueden extraer conclusiones y guías para la realización de este ensayo, no obstante, los resultados mostraban mucha sensibilidad a aspectos dimensionales y de ligeras variaciones de las condiciones de contorno.

En este estudio se ha analizado la rotura en modo II empleando dos ensayos experimentales, uno denominado *push-off*, que está últimamente empleándose con éxito para analizar la rotura por cizalladura en hormigón reforzado con fibras de poliolefina, y otro, al que se denominará en lo que sigue ensayo JSCE, que tiene la ventaja de estar normalizado por la Sociedad Japonesa de Ingenieros Civiles.

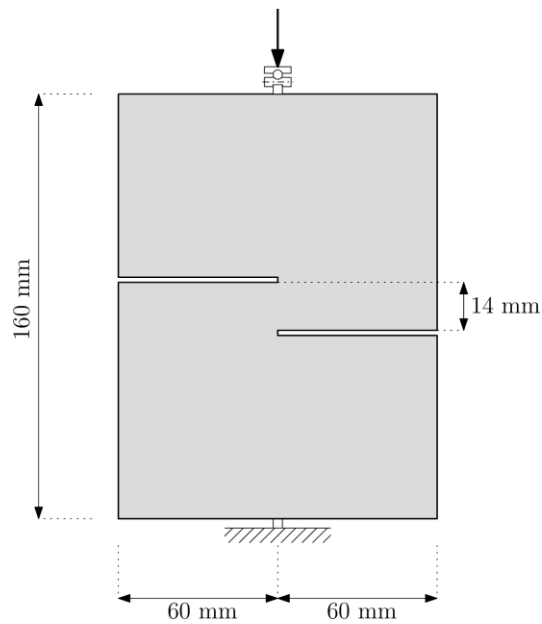
A continuación se describen brevemente los ensayos y se justifica el estudio experimental que se describe más adelante.

2.1. Ensayo *push-off*

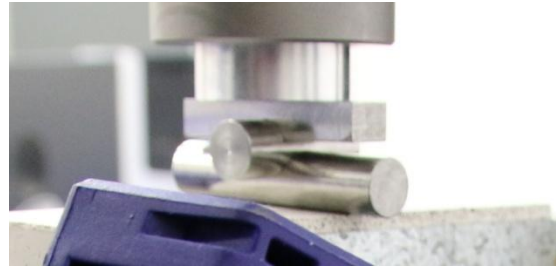
La Figura 2(a) muestra un esquema de este ensayo. Se somete a una probeta en forma de Z a una compresión uniaxial, tal y como se muestra en la figura. El ligamento vertical que une la mitad superior con la inferior es un rectángulo vertical sometido a fuertes tensiones de cizalladura. Este ensayo, tal y como demuestran las experiencias de Picazo et al. [25], es muy sensible a posibles desalineamientos de la carga o ligeros cabeceos de la probeta bajo la carga impuesta, es por ello que resulta fundamental un preciso montaje del ensayo, con una precisa alineación de la carga y el ligamento cuya rotura por cizalladura se desea provocar. Asimismo, el apoyo superior que experimenta la carga vertical debe garantizar una libertad de giro que evite una introducción de momentos que induzcan una mayor compresión en unas caras de la probeta que en otras. A este efecto, se ha materializado el punto superior con una unión con doble cilindro, tal y como se muestra en la Figura 2(b).

2.2. Ensayo JSCE

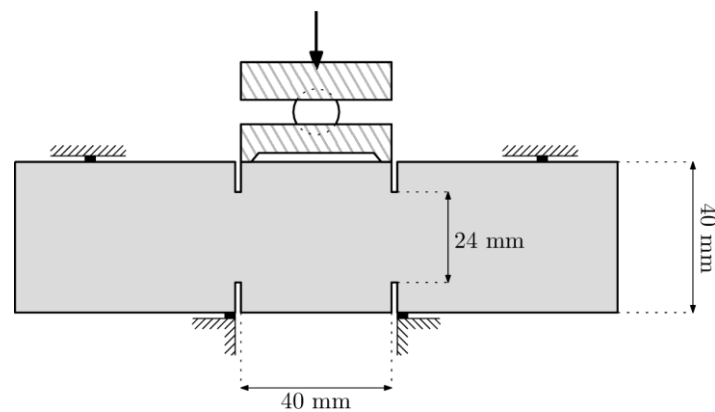
La Figura 3 muestra esquemáticamente la configuración de este ensayo. Se emplea una probeta prismática doblemente entallada en dos secciones y se apoya en dos puntos en su cara inferior y dos puntos en su cara superior, aplicando una carga perpendicular a la probeta en dos puntos centrales sobre su cara superior, tal y como muestra la figura. De esta manera se somete a la probeta a fuertes esfuerzos de cizalladura en las secciones entalladas. Los apoyos inferiores y los superiores exteriores impiden la rotación de la probeta, garantizando un esfuerzo de cortante sin colaboración de momentos flectores no deseados.



(a) Esquema y dimensiones del ensayo



(b) Detalle del apoyo superior.

Figura 2: Ensayo de *push-off*.**Figura 3:** Esquema del ensayo de cizalladura descrito en la norma japonesa [22].

3. Trabajo experimental

3.1. Materiales y mezclas

3.1.1. Yeso

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

3.1.2. Fibras

El refuerzo consiste en microfibras monofilamento de polipropileno que presentan una longitud de 12 mm. y un diámetro de 31 μm . Están fabricadas por Sika bajo la denominación Sikafiber M-12, son de color blanco y su aspecto se muestra en la Figura 4.



Figura 4: Fibras de polipropileno empleadas como refuerzo y detalle de los extremos de las fibras.

3.1.3. Mezclas

Se ensayaron dos tipos de mezclas para ambos tipos de ensayos: yeso sin refuerzo y yeso con un refuerzo de fibras en una proporción de 10 kg/m^3 . En la Tabla 1 se muestra la composición de cada mezcla, especificando la proporción agua/yeso (a/y) y el porcentaje de fibras adicionado.

Tabla 1: Composición de las mezclas ensayadas.

Mezcla	a/y	% fibras (kg/m^3)
0	0.63	0
A10	0.63	10

Todas las mezclas se realizaron siguiendo el procedimiento indicado en la norma UNE-EN 13279-2 [27], aunque para la mezcla A10 se empleó una leve modificación del mismo que ya se ha empleado en estudios anteriores [16, 28], en el que se añaden las fibras en los últimos 20 segundos del amasado manual inicial.

3.2. Probetas

Ensayos *push-off*

Para el ensayo de *push-off* se emplean probetas con forma de Z con un espesor de 4 cm. La geometría de estas probetas se muestra en la Figura 2(a). Con esta geometría se define un ligamento expuesto a la sollicitación de cortante que consiste en un rectángulo de 14 mm x 40 mm. Esta geometría quedó definida tras unas pruebas iniciales en las que, empleando un ligamento mayor se observaba un ensayo fallido, ya que en lugar de producirse una rotura en dicho ligamento, se producía una penetración de los apoyos superior e inferior en el material, induciendo una rotura como la mostrada en la Figura 5.

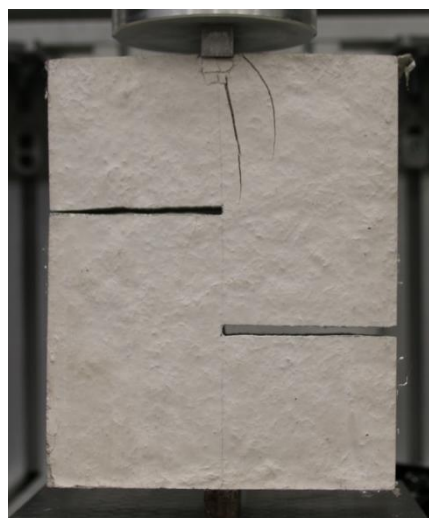


Figura 5: Rotura en apoyo superior debido a un ligamento sano excesivamente grande.

Ensayo japonés

Para realizar el ensayo japonés se emplearon probetas prismáticas de 160 mm x 40 mm x 40 mm con cuatro entallas de 8 mm, tal y como muestra el esquema de la Figura 3. Esta configuración define dos ligamentos sanos de 24 mm x 40 mm, uno a cada lado del bloque central en que queda dividida la probeta.

3.3. Correlación digital de imágenes

Para observar la evolución de las deformaciones lineales y angulares en las regiones donde se produce la rotura en cada ensayo se empleó un sistema de correlación de imágenes, o DIC. Mediante la comparación de las imágenes adquiridas durante el ensayo con la imagen inicial de referencia, esta técnica proporciona el campo de desplazamientos en toda la superficie analizada, que permite operar el campo de deformaciones asociado [29]. La superficie de las probetas debe estar marcada para que el software de análisis de imágenes sea capaz de identificar los puntos de la imagen de la probeta deformada con los de la imagen de referencia. En este estudio las probetas se marcaron aplicando un espray negro sobre las superficies a analizar, obteniendo un patrón aleatorio fácilmente identificable por el programa de análisis.

Las capturas se realizaron con una cámara Allied Stingray F-080C, con una resolución de 1032 x 766 píxeles y las imágenes se procesaron empleando el software Ncorr [30].

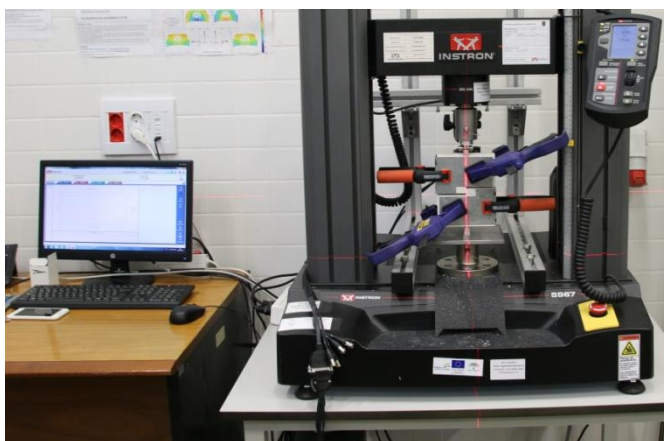
3.4. Montajes experimentales

Tanto el ensayo japonés como el de *push-off* se realizaron con una máquina universal de ensayo bicolumna de la casa Instron, perteneciente a la serie 5960, con una célula de carga de 30 kN, con una exactitud de medición de carga del $\pm 0.5\%$ de lectura hasta 1/500 de la capacidad de la célula.

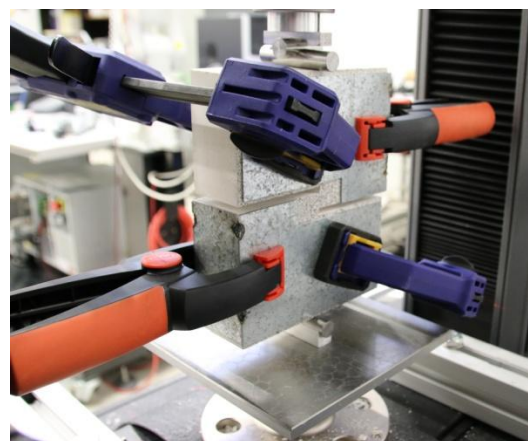
Ensayos *push-off*

La Figura 6 muestra el montaje experimental de este ensayo. La probeta se reforzó con unas chapas metálicas fijadas con gatos mecánicos, tal y como muestra la Figura 6(b) para evitar efectos espurios provocados por daños locales no relacionados con la rotura por cortante que se desea analizar. En otros estudios realizados sobre probetas de hormigón reforzado con fibras plásticas, estos problemas se solventaban pegando láminas de fibra de carbono sobre la probeta [24, 25], pero en este caso, el refuerzo mostrado en la figura ha demostrado ser suficiente, con el beneficio añadido de facilitar el montaje del ensayo para cada una de las probetas. Además, como ya se ha observado en recientes estudios que emplean este ensayo para analizar la rotura por cortante [25], el ligamento vertical cuya rotura se desea provocar debe estar perfectamente alineado con los puntos superior e inferior de aplicación de la carga; para garantizar esta alineación se empleó un nivel láser autonivelante, tal y como se puede observar en la Figura 6(a).

La aplicación de la carga se realizó mediante un desplazamiento del bastidor superior de 5 mm. a una velocidad de 0.1 mm/min y la frecuencia de la adquisición de imágenes para su posterior procesado con DIC fue de una cada 5 segundos.



(a) Aspecto general del montaje.



(b) Detalle del refuerzo exterior.

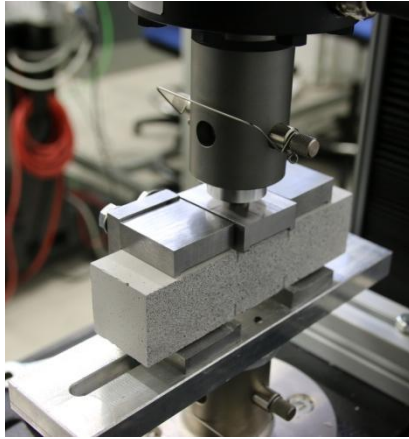
Figura 6: Montaje experimental del ensayo de *push-off*.

Ensayo japonés

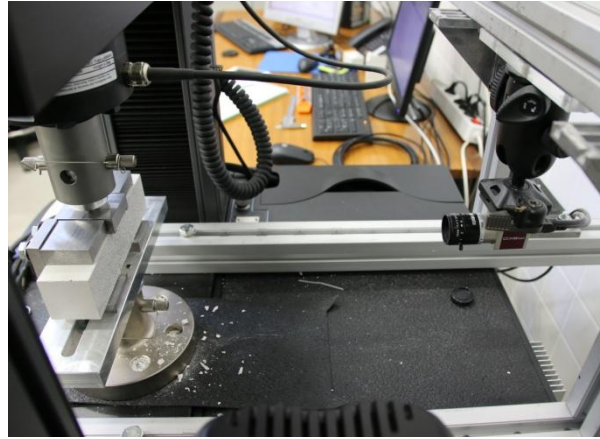
Para realizar este ensayo fue necesario diseñar y fabricar unas piezas de acero que permitiese ejecutar el ensayo tal y como se describe en el esquema de la Figura 3; el montaje de este ensayo puede observarse en la Figura 7.

Para garantizar una aplicación perfectamente centrada de la carga, así como evitar posibles problemas de esfuerzos torsores inducidos por una falta de paralelismo entre los ejes de apoyo de las piezas inferiores y los de las piezas superiores, la conexión entre el bastidor superior de la máquina universal y la pieza central del dispositivo se materializó con un apoyo de bola que, además, estaba posicionado de una manera particularmente cuidadosa para garantizar que la carga se distribuyera uniformemente a lo largo de las líneas de apoyo.

La aplicación de la carga se realizó imponiendo un desplazamiento del bastidor superior de 0.25 mm/min hasta completar un desplazamiento total de 3 mm. y la toma de imágenes para su procesamiento con DIC se realizó con una frecuencia de una imagen cada 5 segundos.



(a) Aspecto general del montaje.



(b) Colocación de la cámara para uso de DIC.

Figura 7: Montaje experimental del ensayo japonés.

4. Resultados

4.1. Ensayo de push-off

4.1.1 Curvas carga-desplazamiento

La Figura 8 muestra las curvas carga-desplazamiento obtenidas para los dos conjuntos de probetas analizadas. En color rojo se muestran los resultados de las probetas sin refuerzo de fibras (serie 0) y en color azul las reforzadas con una proporción de 10 kg/m³ de fibras de polipropileno (serie A10); las líneas de diferentes trazos empleadas identifican cada una de las tres probetas de cada grupo.

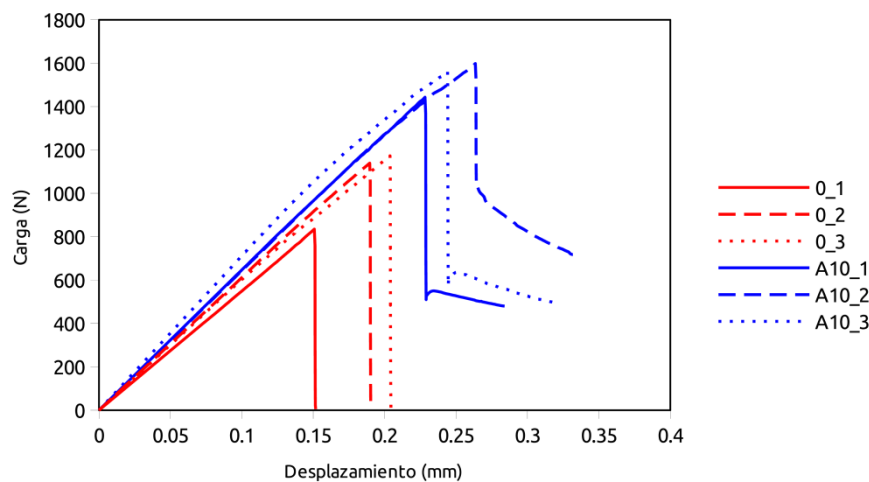


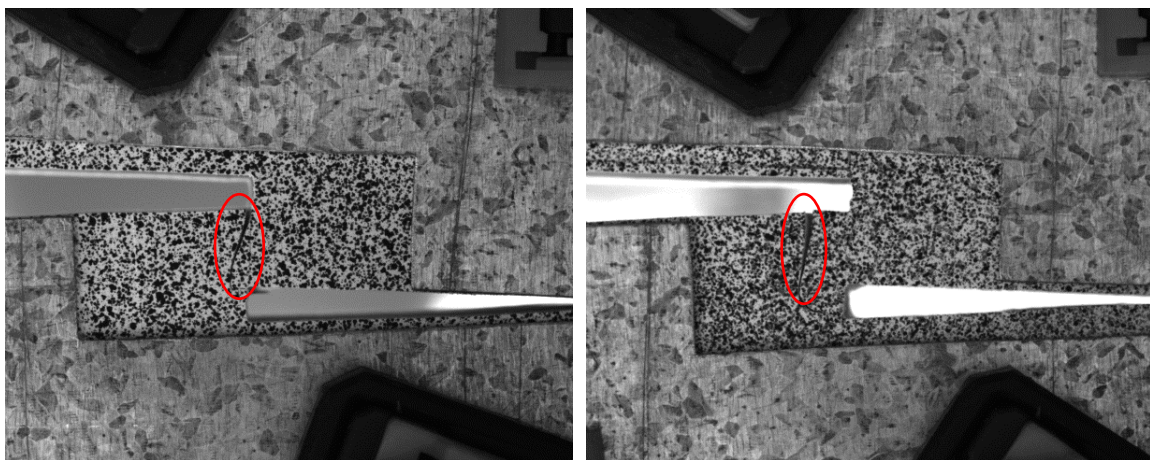
Figura 8: Curvas carga-desplazamiento de los ensayos de *push-off*.

Atendiendo exclusivamente a estas curvas, más allá de la dispersión experimental, por otro lado habitual en este tipo de materiales, se observa que la adición de fibras tiene tres efectos sobre el comportamiento del material en este ensayo:

- Leve incremento del módulo elástico del material, reflejado en una mayor relación carga-desplazamiento en el tramo elástico inicial.

- Incremento de la carga pico; el refuerzo parece inducir un cierto confinamiento del material, permitiendo soportar una mayor carga límite y retrasando el momento de la rotura.
- Capacidad resistente tras la carga pico. Mientras que en las probetas sin refuerzo, la capacidad resistente es nula una vez alcanzada la carga pico, en las probetas reforzadas se observa una cierta capacidad resistente tras alcanzar la carga máxima.

En el caso de las probetas de yeso no reforzado se observa una notable dispersión entre la probeta 1 y las otras dos. Cabe reseñar esta diferencia, pues en el caso de la probeta 1, la rotura se produjo en el ligamento sometido al esfuerzo cortante (Figura 9(a)), mientras que en el caso de las otras dos probetas, la rotura se produjo por un fallo en modo I a una cierta distancia del ligamento cuya rotura se deseaba provocar (Figura 9(b)). Esto parece indicar que en el caso de la probeta 1 la rotura se produce por efecto del cortante puro (modo II) inducido en el ligamento de unión de las dos mitades de la misma, mientras que en el caso de las probetas 2 y 3 parece que la rotura realmente se produce como consecuencia de un mecanismo de rotura en modo I. En el caso de las probetas de la serie A10, reforzadas con fibras de polipropileno, las tres roturas presentaron un aspecto similar al que se muestra en la Figura 9(b), es decir, en estas probetas la rotura se produce realmente como consecuencia de un modo I en las cercanías del ligamento cuya rotura por cortante se deseaba provocar.



(a) Probeta 1 de la serie 0.

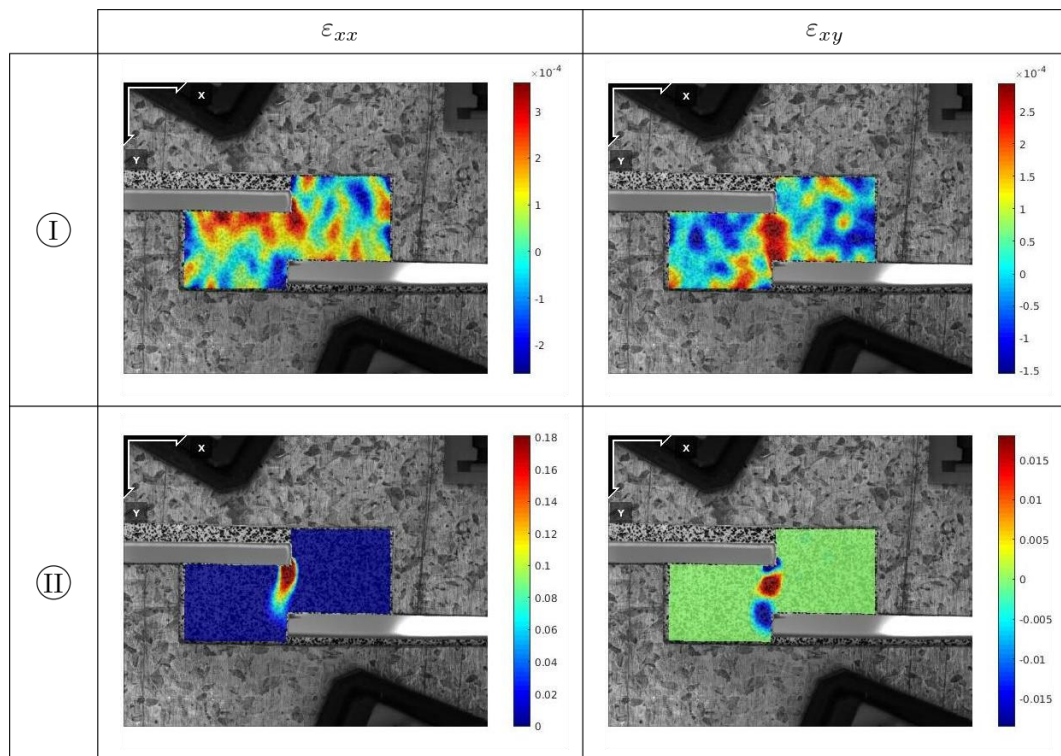
(b) Probeta 2 de la serie 0.

Figura 9: Aspecto de dos probetas de *push-off* de la serie 0 al final del ensayo. En rojo se señalan las fisuras.

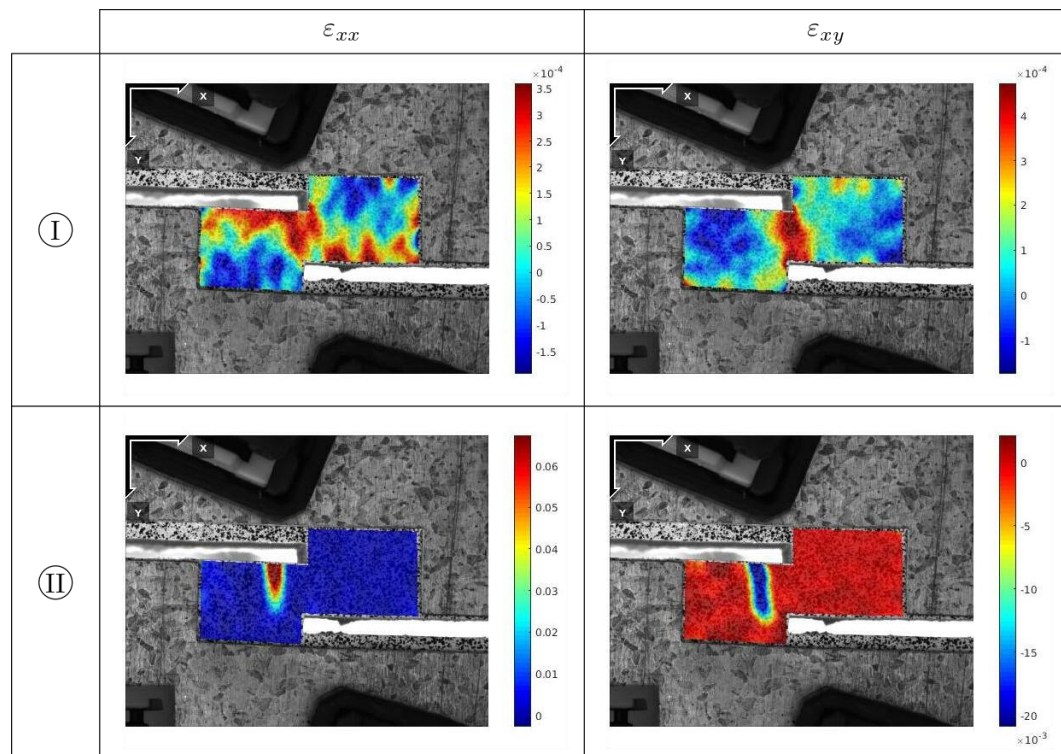
4.1.2 Análisis de los campos de deformaciones mediante DIC

La Figura 10 muestra los campos de deformaciones obtenidos mediante correlación digital de imágenes para una probeta de cada serie. Para cada probeta se muestran los campos de deformaciones ε_{xx} y ε_{xy} , pues permiten identificar fácilmente la concentración de deformaciones angulares y la de deformaciones horizontales, asociada a la apertura en modo I de las grietas provocadas por la rotura. En ambas probetas se muestran la pareja de campos de deformaciones en la imagen obtenida inmediatamente antes de la rotura (I) y la obtenida inmediatamente después (II).

Es interesante observar que en ambos casos, Figuras 10(a) y 10(b), inmediatamente antes de producirse la rotura, hay una concentración de deformaciones angulares a lo largo del ligamento de unión entre ambas mitades de la probeta y una concentración de deformaciones horizontales en los bordes horizontales de las entallas. En el caso de la probeta 1 de la serie 0 (Figura 10(a)) el mecanismo de cortante parece ser el que finalmente se desarrolla, mientras que en el caso de la probeta 1 de la serie A10 (Figura 10(b)) la rotura termina desarrollándose en modo I en el borde horizontal de la entalla superior. Estos resultados parecen indicar que hay dos mecanismos de rotura que compiten entre sí y que, en el caso de la probeta 1 de la serie de yeso sin refuerzo mostrada se produce una rotura en modo II mientras que en el caso de las probetas de la serie reforzada con fibras es el modo I el que desencadena la rotura. Esto puede indicar que el refuerzo incrementa la resistencia del material frente a rotura por cizalladura, reforzándola frente a esta sollicitación de manera más efectiva que frente a rotura en modo I.



(a) Probeta 1 de la serie 0.



(b) Probeta 1 de la serie A10.

Figura 10: Campos de deformaciones horizontales (ε_{xx}) y angulares (ε_{xy}) justo antes y justo después de iniciarse la rotura en dos probetas representativas del ensayo de *push-off*.

4.2. Ensayo japonés

4.2.1 Curvas carga-desplazamiento

La Figura 11 muestra las curvas carga-desplazamiento obtenidas para los dos conjuntos de probetas analizados. El código de colores y trazos empleado es el mismo que el descrito para los ensayos de *push-off*.

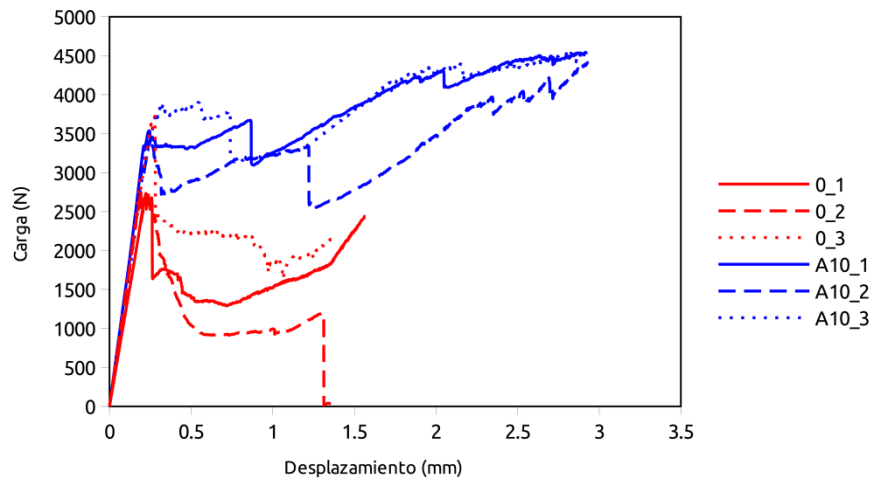


Figura 11: Curvas carga-desplazamiento de los ensayos realizados según la norma japonesa [22].

Al igual que en el caso de los ensayos de *push-off*, se observa un leve incremento de la carga pico en las probetas reforzadas con fibras, así como un comportamiento resistente tras la carga pico más destacado en éstas respecto a las probetas de yeso sin refuerzo de fibras.

No obstante, la interpretación de las curvas es más complicada que en el caso de los ensayos de *push-off*. Si observamos los diagramas correspondientes a las probetas de la serie 0, a diferencia de los ensayos de *push-off*, las probetas no pierden por completo su capacidad resistente tras la carga pico. Esto es debido a que en este ensayo hay dos planos de rotura, uno a cada lado de la zona central cargada, y en el caso del yeso no reforzado, una vez se desarrolla la rotura en uno de ellos, el otro no llega a romper, provocando un cierto acodamiento que impide una pérdida de carga repentina e, incluso, permite una recuperación de carga posterior.

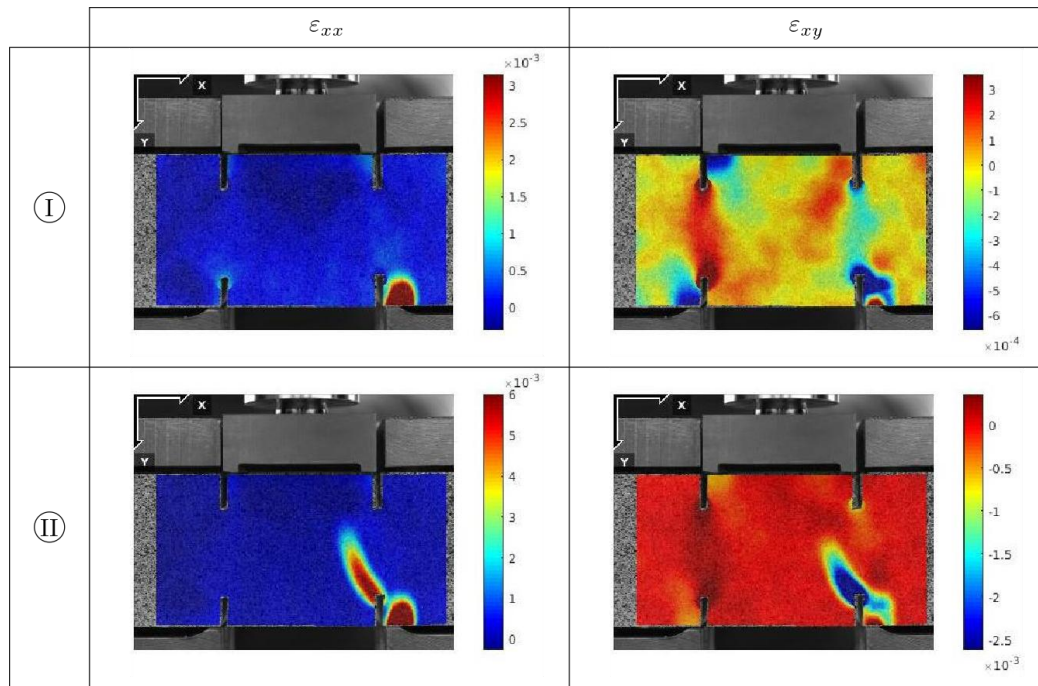
En el caso de los diagramas correspondientes a las probetas reforzadas con fibras (curvas de color azul), se observan pérdidas de carga puntuales tras la carga pico inicial. Mientras la rotura del primer plano de rotura se produce en el último tramo de la curva previo a la carga pico, la pérdida de carga puntual post-pico identifican la rotura en el segundo plano de rotura. A diferencia de las probetas no reforzadas con fibras, en éstas el refuerzo permite recuperar capacidad resistente tras la fisuración del primer plano de rotura e incrementar la carga hasta provocar la rotura del segundo plano de rotura. Esto se observará con más claridad en los campos de deformaciones obtenidos con DIC que se muestran a continuación.

4.2.2 Análisis de los campos de deformaciones mediante DIC

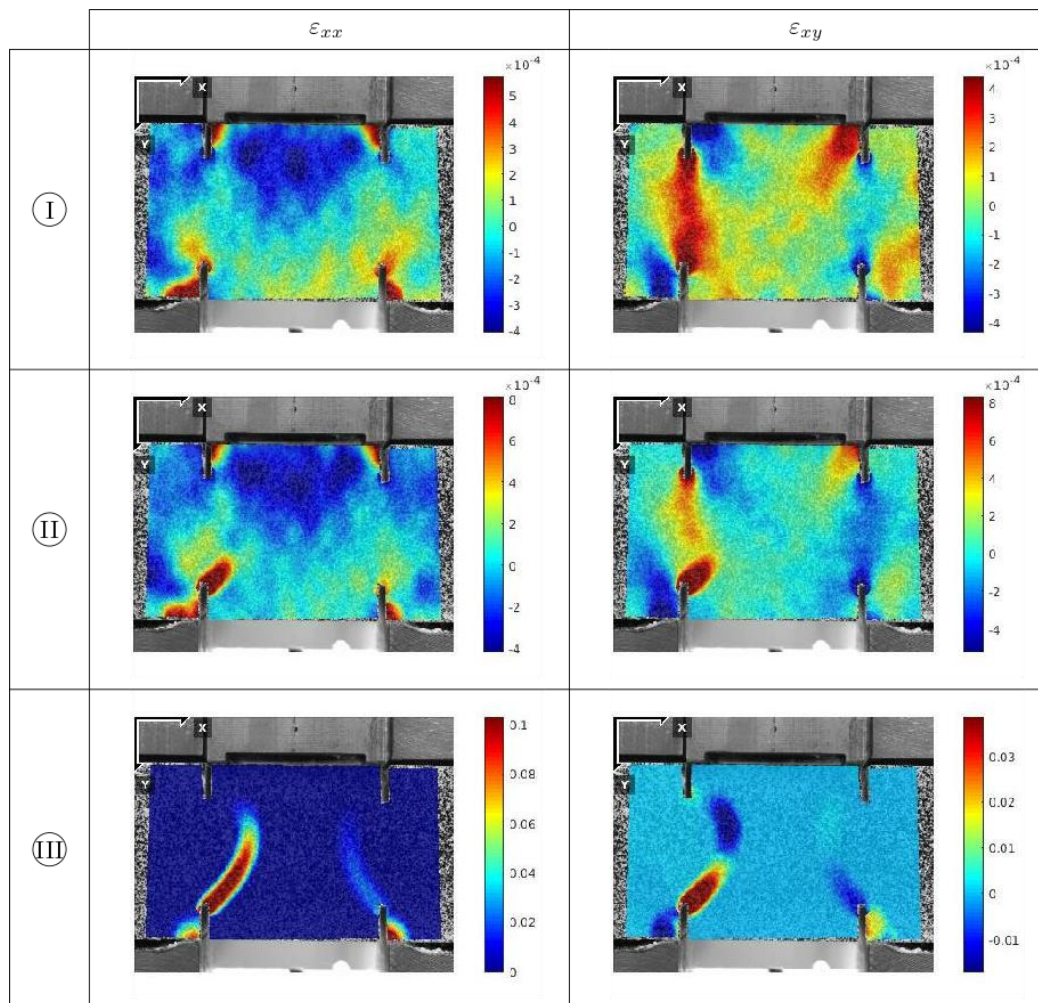
En la Figura 12 se pueden observar los campos de deformaciones ε_{xx} y ε_{xy} en ciertos instantes del ensayo. En el caso de la probeta de la serie 0 sólo se produce una fisura en uno de los planos solicitados a cortante pues la ausencia de refuerzo no permite la recuperación de capacidad resistente en la zona dañada y, por tanto, el desarrollo de daño en el otro plano. En el caso de la probeta de la serie A10 sí se produce la rotura en ambos planos solicitados, aunque no de manera simultánea.

En el caso de la probeta de la serie 0 (Figura 12(a)), se analizan el instante inmediatamente previo a la aparición de la fisura (I) y el inmediatamente posterior (II), mientras que en el caso de la probeta de la serie A10, además se analiza el instante inmediatamente posterior a la aparición de la segunda fisura (III).

Es interesante observar cómo en ambas probetas se acumula la tensión tangencial a lo largo de los planos definidos por las entallas y con valores similares (obsérvense cuidadosamente los códigos de colores para apreciar esto). En el caso de la probeta sin fibras, una vez abierta la fisura, el resto del proceso de rotura está condicionado por la apertura de esa grieta, sin dar lugar a una segunda fisuración. En el caso de la probeta reforzada con fibras, una vez se produce la primera fisura, el refuerzo permite recuperar capacidad resistente en esa zona y la formación de una segunda fisura en el otro plano definido por las entallas.



(a) Probeta 1 de la serie 0.



(b) Probeta 1 de la serie A10.

Figura 12: Campos de deformaciones horizontales (ε_{xx}) y angulares (ε_{xy}) justo antes y justo después de iniciarse la rotura en dos probetas representativas del ensayo japonés.

5. Conclusiones

En este trabajo se han ensayado dos mezclas de yeso, una sin refuerzo de fibras y otra reforzada con microfibras de polipropileno en una proporción de 10 kg/m³. Se han empleado dos ensayos mecánicos para evaluar la resistencia a cortante monitorizando las probetas para su análisis mediante correlación digital de imágenes. Los resultados obtenidos permiten extraer algunas conclusiones que facilitan el empleo de estos ensayos y técnicas experimentales para posteriores estudios, que pueden resumirse en los siguientes puntos:

- El empleo de la correlación digital de imágenes permite observar la concentración de deformaciones previa a la rotura y su evolución posterior. Esto permite identificar otros mecanismos de rotura que pueden entrar en competición con el de cortante, que se desea estudiar, como se ha observado en los ensayos de *push-off*.
- En relación al ensayo de *push-off*:
 - El refuerzo con fibras no sólo induce un incremento en la carga pico, sino que proporciona una capacidad resistente tras la fisuración que no tiene el material sin refuerzo, lo cual tiene consecuencias de interés sobre la energía de fractura del material en modo II.
 - Demuestra ser muy adecuado para estudiar el modo II sin interferencia de otros efectos, pues la rotura se produce únicamente en un ligamento de unión sometido a cortante puro.
 - La alineación del ligamento sometido a cortante con los puntos de aplicación de la carga debe ser muy cuidadosa, pero el uso de un nivel láser demuestra ser suficiente para lograr ensayos válidos.
 - En el caso del yeso y del yeso reforzado con fibras de polipropileno, estudiados aquí, parece recomendable estudiar la posibilidad de reforzar ciertas zonas de la probeta para evitar la rotura en modo I que, en el caso de cinco de las seis probetas ensayadas, es la que realmente provoca la rotura de la pieza.
- El relación al ensayo de cortante definido por la norma japonesa:
 - Se observa un incremento en la carga pico, así como en el valor posterior de la carga a lo largo del resto del ensayo, en las probetas reforzadas con fibras (serie A10) en relación con las de yeso sin refuerzo (serie 0).
 - Este ensayo plantea dificultades en su ejecución, pues la alineación de las piezas de apoyo de la probeta ha de ser extremadamente cuidadosa para lograr un ensayo válido.
 - La evaluación de la rotura en modo II para el caso estudiado no resulta sencilla, pues al existir dos planos de rotura, una vez desarrollada la primera fisura, la interpretación del ensayo es dificultosa. Tras la primera fisuración se produce un efecto de acodamiento en la zona central de la probeta debido al desequilibrio producido por la presencia de un ligamento dañado en un extremo y un ligamento sano en el otro.

6. Agradecimientos

Los autores 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.

7. Referencias

- [1] CNR-DT 204. “Guide for the design and construction of fiber-reinforced concrete structures”. Rome (Italy): National Research Council, (2006)
- [2] EHE-08. “Instrucción de hormigón estructural”. Ministerio de Fomento, Madrid, España, (2008)
- [3] Paul Beverly. “fib model code for concrete structures 2010”. Ernst & Sohn, (2013)
- [4] 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)
- [5] M.G. Alberti, A. Enfedaque, and J.C. Gálvez. “On the mechanical properties and fracture behavior of polyolefin fiber-reinforced self-compacting concrete”. *Construction and Building Materials*, **55**:274 – 288, (2014)

- [6] A. Enfedaque, M.G. Alberti, J.A. Paredes, and J.C. Gálvez. “Interface properties of polyolefin fibres embedded in self-compacting concrete with a bond improver admixture”. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, **90**:287 – 293, (2017)
- [7] Alberti M.G., Enfedaque A., Gálvez J.C., Cánovas M.F., Osorio I.R. “Polyolefin fiber-reinforced concrete enhanced with steel-hooked fibers in low proportions”. *Materials & Design*, **60**:57–65, (2014)
- [8] 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)
- [9] Enfedaque A., Alberti M., Gálvez J., Rivera M., Simón-Talero J. “Can Polyolefin Fibre Reinforced Concrete Improve the Sustainability of a Flyover Bridge?” *Sustainability*, **10**(12):4583, (2018)
- [10] Alberti, M. G., Enfedaque, A., Gálvez, J. C., & Pinillos, L. “Structural cast-in-place application of polyolefin fiber-reinforced concrete in a water pipeline supporting elements”. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, **8**(4), (2017)
- [11] Alberti, M. G., Enfedaque, A., & Gálvez, J. C. “On the prediction of the orientation factor and fibre distribution of steel and macro-synthetic fibres for fibre-reinforced concrete”. *Cement and Concrete Composites*, **77**, 29–48, (2017)
- [12] Alberti, M. G., Enfedaque, A., Gálvez, J. C., & Ferreras, A. “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, (2016)
- [13] García Santos A. “Comportamiento mecánico de yeso reforzado con polímeros sintéticos”. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid; (1988)
- [14] Dalmay, P., Smith, A., Chotard, T., Sahay-Turner, P., Gloaguen, V., & Krausz, P. “Properties of cellulosic fibre reinforced plaster: influence of hemp or flax fibres on the properties of set gypsum”. *Journal of Materials Science*, **45**(3), 793-803, (2010)
- [15] Iucolano, F., Boccarusso, L., & Langella, A. “Hemp as eco-friendly substitute of glass fibres for gypsum reinforcement: Impact and flexural behaviour”. *Composites Part B: Engineering*, **175**, 107073, (2019)
- [16] Suárez, F., Felipe-Sesé, L., Díaz, F.A., Gálvez, J.C., Alberti, M.G. “On the fracture behaviour of fibre-reinforced gypsum using micro and macro polymer fibres”. *Construction and Building Materials*. 2020, **244**, 118347, (2020)
- [17] Bazant ZP, Planas J. *Fracture and Size Effect in Concrete and Other Quasibrittle Materials*. London: CRC press, (1997).
- [18] Jirásek M. “Damage and smeared crack models”. En: Hofstetter G., Meschke G. (eds) *Numerical Modeling of Concrete Cracking*. CISM International Centre for Mechanical Sciences, **532**: 1-49. Springer, Vienna (2011)
- [19] M.G. Alberti, A. Enfedaque, J.C. Gálvez, and E. Reyes. “Numerical modelling of the fracture of polyolefin fibre reinforced concrete by using a cohesive fracture approach”. *Composites Part B: Engineering*, **111**:200– 210, (2017)
- [20] Enfedaque, A., Alberti, M. G. and Gálvez, J. C. “Application of trilinear softening functions based on a cohesive crack approach to the simulation of the fracture behaviour of fibre reinforced cementitious materials”. En: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. **246**). Institute of Physics Publishing, (2017)
- [21] A. Hillerborg, M. Modéer, and P.-E. Petersson. “Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements”. *Cement and Concrete Research*, **6**(6):773 – 781, (1976)
- [22] JSCE, JSCE-g 553e1999: Test Method for Shear Strength of Steel Fiber Reinforced Concrete, Japan Society of Civil Engineers (JSCE), Tokyo, Japan, (2005)
- [23] Picazo, Á., Alberti, M. G., Enfedaque, A., & Gálvez, J. C. “Assessment of the shear strength of steel fibre-reinforced concrete”. En: *High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet - Proceedings of the 2017 fib Symposium*, 405–412. Springer International Publishing, (2017)
- [24] Picazo Á., Gálvez J.C., Alberti M.G., Enfedaque A. “Assessment of the shear behaviour of polyolefin fibre reinforced concrete and verification by means of digital image correlation”, *Construction and Building Materials*, **181**; 565-578 (2018)

- [25] Picazo Iranzo, Álvaro. “Estudio experimental y numérico del comportamiento a cortante de hormigones reforzados con fibras de poliolefina y acero”. Tesis doctoral, E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos (UPM), (2020)
- [26] Elfgren, L., Eligehausen, R., & Rots, J. G. “Anchor bolts in concrete structures: summary of round robin tests and analysis arranged by RILEM TC 90-FMA ‘Fracture Mechanics of Concrete-Applications’”. *Materials and Structures*, **34**(8), 451-457, (2001)
- [27] UNE-EN 13279-2. “Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. Parte 2: Métodos de ensayo”, AENOR, (2014)
- [28] Suárez, F., Felipe-Sesé, L., Díaz, F. A., Gálvez, J. C., & Alberti, M. G. “Comportamiento a fractura de yeso con adición de fibras poliméricas”. En *Anales de Mecánica de la Fractura* (GEF 2019), **36**:114-119 GEF 2019, (2019).
- [29] Sutton MA, Orteu JJ, Schreier H. *Image correlation for shape, motion and deformation measurements: basic concepts, theory and applications*. Springer Science & Business Media; (2009)
- [30] Blaber, J., Adair, B., & Antoniou, A. “Ncorr: Open-Source 2D Digital Image Correlation Matlab Software”. *Experimental Mechanics*, **55**(6), 1105–1122, (2015)