

HAC2018 | V Congreso Iberoamericano de Hormigón Autocompactante y Hormigones Especiales

Valencia, 5 y 6 de Marzo de 2018

Comportamiento mecánico de compuestos de matriz cementicia y tejidos de fibras vegetales

Luis Mercedes ⁽¹⁾, Lluís Gil ⁽²⁾ y Ernest Bernat ⁽²⁾

⁽¹⁾ Departamento de Resistencia de Materiales, Universitat Politècnica de Catalunya, Terrassa, España

⁽²⁾ LITEM Laboratorio para la Innovación Tecnológica de Estructuras y Materiales, España.

DOI: <http://dx.doi.org/10.4995/HAC2018.2018.5501>

RESUMEN

Los compuestos de matriz cementicia reforzados con fibras (fibre reinforced cementitious matrix: FRCM) han demostrado ser un material de refuerzo con un prometedor futuro, debido a su facilidad de aplicación, resistencia al fuego y su capacidad de disipar energía a través de un patrón de multifisuras. El auge que viene desarrollando el estudio de fibras vegetales como refuerzo dentro de los materiales compuestos debido a su bajo costo, baja densidad, reciclabilidad y biodegradabilidad, hace que estas fibras se presenten como una opción de refuerzo a considerar dentro los materiales compuestos. En este estudio se han elaborado especímenes FRCM de diferentes fibras vegetales (lino, cáñamo, sisal y algodón), utilizando un tratamiento a base de poliéster para evitar la degradación de las fibras y mejorar su eficacia dentro de los compuestos cementicios. Estos especímenes fueron sometidos a ensayos de tracción directa, donde los resultados mostraron una excelente interacción entre los tejidos y la matriz utilizada, pues el poliéster además mejorar las propiedades mecánicas de los hilos, aumenta la adherencia con la matriz, y con ello mejora las prestaciones mecánicas del FRCM. Los resultados presentan los FRCM de fibras de cáñamo y lino como los compuestos que alcanzaron mayor resistencia a tracción, y a los FRCM de fibras de algodón como los de mayor capacidad de alargamiento y multifisuración.

PALABRAS CLAVE: Matriz cementicia, Fibras vegetales, Poliéster

1.- INTRODUCCIÓN

Dentro de las diversas formas de disponer fibras, entre los llamados compuestos de matrices cementicias reforzados con fibras (fibre reinforced cementitious matrix: FRCM), se encuentran los compuestos cementícos reforzados con fibras en forma de tejidos. Estos surgen como una alternativa a la matriz orgánica del FRP (fibre reinforced polymers), pues al tener menos emisiones tóxicas, mayor resistencia al fuego y permeabilidad al vapor del agua, entre otras ventajas, los investigadores lo ven como un posible sustituto del FRP, en el campo del refuerzo y rehabilitación de estructuras.

El aprovechamiento de los recursos naturales y los materiales sostenibles es un tema que cada día adquiere mayor interés de la comunidad científica. La alternativa de usar fibras vegetales como refuerzos de polímeros y morteros, es un ejemplo de ello. Las propiedades mecánicas que han mostrado fibras como el lino, cáñamo, sisal, jute, plátano, entre muchas otras, junto con su bajo costo, baja densidad, reciclabilidad y biodegradabilidad, han hecho de las fibras vegetales una potente alternativa frente a fibras sintéticas. Pues a pesar de presentar muy bajas resistencia en comparación con otros tipos fibras, el bajo costo y la baja densidad de las fibras vegetales permiten utilizar un mayor volumen de fibras y con ello obtener materiales compuestos sostenibles y con propiedades mecánicas comparables con compuestos de fibras sintéticas [1].

En la actualidad ya existen numerosos estudios [2][3][4][5], que analizan el comportamiento de las fibras vegetales en los FRCM, los cuales demuestran el gran potencial de las fibras vegetales como tejidos de refuerzo. Uno de estos estudios fue el presentado por Menna et al. [5], quienes con el objetivo de emplear con mejor eficacia las fibras vegetales dentro del FRCM, estudiaron un sistema innovador de FRCM con mallas de cáñamo impregnadas con resina epoxi. Los resultados mostraron que la impregnación de unos hilos retorcidos de cáñamo con una resina epoxi flexibles permitió una mejor explotación de las propiedades a tracción de las fibras de cáñamo.

A pesar que ya existen numerosos estudios de FRCM de fibras vegetales, hasta la fecha son pocos los que han recurrido a la impregnación de las fibras con resina. Por lo que en este estudio se elaboraron tejidos de fibras vegetales impregnadas con poliéster, para luego fabricar con ellos, y con tejidos técnicos de fibras de basalto, especímenes de FRCM y ensayarlos a tracción. El objetivo era analizar el comportamiento de los tejidos de fibras vegetales impregnados con poliéster en los FRCM, compararlos con los FRCM de basalto, e identificar la influencia de la impregnación de las fibras con poliéster.

2.- PROGRAMA EXPERIMENTAL

El programa experimental se puede dividir en tres etapas: (1) elaboración de la malla de fibras vegetales, (2) elaboración de los especímenes de FRCM y (3) ensayo de tracción de los especímenes de hilos y FRCM.

2.1.- Elaboración de la malla de fibras vegetales

Se elaboraron mallas con hilos de cáñamo, lino, sisal y algodón. Para la elaboración de estas mallas se creó un molde de sección rectangular, con clavos en sus extremos distanciados 12 mm en dirección de la trama y 25 mm en dirección de urdimbre, útiles para estirar y anclar los hilos. Una vez fueron elaboradas las mallas, estas se impregnaron con poliéster, de forma manual con un pincel. Luego de dos días de curado, las mallas eran mecanizadas en tamaños de 45x350 mm.

El poliéster utilizado fue una mezcla de un poliéster estándar para laminar y una resina de poliéster no saturado, flexible, de reactividad baja y viscosidad media, utilizado como

flexibilizante de resina en una proporción de 50% del volumen total resina a utilizar. Esto con el objetivo de reducir el aporte de rigidez del poliéster a las mallas.

Para elaborar las mallas se utilizaron hilos de distintos tipos de fibras vegetales (cáñamo, lino, sisal y algodón). También se prepararon 10 especímenes de hilos por cada tipo de hilo (5 en el caso los mechones de basalto), 5 impregnados con poliéster y 5 sin poliéster, para luego ensayarlos a tracción. Para ello se fabricó una lámina de compuesto de fibra de vidrio con resina epoxi en los extremos de cada hilo o mechón (basalto). Esto con el objetivo de que los hilos y mechones puedan ser sujetos por las pinzas mecánicas de la máquina de ensayo.

Los especímenes de hilos de 40 cm de longitud con y sin poliéster se pesaron en una báscula de precisión antes de fabricar las láminas de sujeción de FRP de vidrio en sus extremos. Esto se hizo para cuantificar la cantidad de resina aplicada en cada hilo, y así estimar la cantidad de resina necesaria para impregnar las mallas.

En la *Tabla 1* se muestra el diámetro de los hilos (medido con un pie de rey), la densidad lineal de los hilos con (hilo impregnado/longitud) y sin poliéster (peso de bobina de hilo/longitud), densidad volumétrica (densidad lineal/área), la cantidad de poliéster utilizado por longitud de hilo y superficie de malla, y la fracción volumétrica de las mallas impregnadas utilizadas en los especímenes de FRCM (volumen de malla/volumen de FRCM).

Tabla 1. Propiedades de los hilos y contenido de poliéster

	<i>Cáñamo</i>	<i>Lino</i>	<i>Sisal</i>	<i>Algodón</i>	<i>Basalto</i>
Diámetro (mm)	0,5	0,5	2,5	1,5	-
Numero de hilo/mechón	8	8	2	4	-
Densidad lineal de hilo (g/m)	0,4	0,43	3,63	1,2	2,43
Densidad volumétrica de hilo (g/cm ³)	2.04	2.17	0.74	0.67	2,8
Densidad lineal de hilo impregnado (g/m)	1,18	1,28	9,36	4,7	-
Poliéster/longitud de hilo (g/m)	0,78	0,85	5,73	3,5	-
Poliéster/ área superficial de malla (g/cm ²)	0,02	0,03	0,04	0,06	-
Fracción volumétrica de malla impregnada en FRCM (-)	0,014	0,014	0,078	0,067	0,010

2.2.- Elaboración de los especímenes FRCM

Se elaboraron 21 especímenes de FRCM con las mallas fabricadas y una malla de basalto suministrada por un distribuidor. Para ello se elaboraron moldes de madera para probetas de 10 x 50 x 400 mm. Luego fueron elaborados los especímenes colocando las mallas en el centro del espécimen. Luego de 7 días de curado los especímenes de FRCMs eran desmoldados, para luego adherirles 4 placas metálica en sus extremos (una de cada lado) mediante un adhesivo bicomponente epoxi (figura 1c) con el objetivo de facilitar el anclaje con la máquina de ensayos.

Para la elaboración de las probetas se utilizó el mortero Sika MonoTop-612, un mortero tixotrópico monocomponente a base de cemento, resinas sintéticas, humo de sílice y reforzado con fibras de poliamida, con una relación agua/mortero de 16.6%, que cumple con los requerimientos de la clase R3 de la UNE-EN 1504-3. Durante la elaboración de los especímenes se tomaron probetas de control del mortero de 40 x 40 x 160 mm de dimensiones, para conocer la resistencia del mortero a los 28 días de curado. Los resultados promedios de los ensayos a compresión y flexión según la norma EN 1015-11:2000 [4] fueron: flexión de 6.56 Mpa, tracción de 2.9 Mpa y compresión de 39.25 Mpa.

2.3.- Ensayo tracción de los especímenes de hilos y FRCM

Luego de 2 días de curado de la superficie de agarre elaborada en los extremos de los hilos, los especímenes de hilos (con y sin poliéster) y mechones eran ensayadas a tracción, en una prensa electromecánica MTS Insight de una capacidad de 10 KN, a una velocidad de 5 mm/min, utilizando un extensómetro MTS de 25 mm de alcance para medir las deformaciones.



Figura 1. Ensayo a tracción de los hilos

Para el caso de los especímenes de FRCM estos fueron ensayados tomando como referencia el procedimiento descrito por AC434-0213-R1 [6]. Los especímenes fueron ensayados a los 28 días de curado en la prensa electromecánica MTS Insight mencionada anteriormente, a una velocidad de 5 mm/min, capturando las deformaciones con el extensómetro de 25 mm de alcance y un sistema desplazable unido a las placas de apoyo, que permitió medir las deformaciones en la zona ubicada entre los bordes de la placa de apoyo de los especímenes.



Figura 2. Ensayo a tracción de FRCM

3.- RESULTADOS Y DISCUSIONES

3.1.- Resultados de hilos y mechones

Con la finalidad de conocer la resistencia mecánica de los hilos de fibras vegetales y mechones de basalto utilizados, y determinar el efecto del poliéster en los hilos de fibras vegetales, se realizaron ensayos a tracción. La tabla 2 muestra los resultados a tensión última y los módulos de elasticidad para cada hilo. Las tensiones fueron calculadas a partir del diámetro del hilo sin poliéster medido con un pie de rey, y el módulo de elasticidad fue calculado considerando la parte lineal de la curva de esfuerzo-deformación.

Tabla 2. Resultados promedios de los ensayos a tracción de los hilos

	Propiedades Mecánica de hilos									
	Sin Poliéster					Con Poliéster				
	Cáñamo	Lino	Sisal	Algodón	Basalto	Cáñamo	Lino	Sisal	Algodón	
No. de ensayos	5	5	5	5	5	5	5	5	5	
F_u(N)	58	81,8	475,2	95,2	607,11	106,8	101,41	453	145,6	
σ_H(MPa)	295,54	416,8	96,86	53,9	698,33	544,2	516,72	92,33	82,43	
(C.V)	(11%)	(17%)	(9%)	(1%)	(6%)	(7%)	(6%)	(12%)	(6%)	
ε_H(%)	1,03	1,65	3,01	10,19	1,01	0,98	1,29	2,61	7,13	
(C.V)	(15%)	(18%)	(11%)	(5%)	(4%)	(14%)	(12%)	(5%)	(12%)	
E_H(GPa)	26,33	24,98	3,75	0,53	76,87	50,58	37,95	3,78	0,88	
(C.V)	(4%)	(8%)	(6%)	(6%)	(6%)	(15%)	(10%)	(8%)	(2%)	
Δ σ_H(%)	-	-	-	-	-	84,14	23,97	-4,68	52,93	
Δ E_H(%)	-	-	-	-	-	92,1	51,92	0,8	66,04	

F_u= Carga ultima promedio, σ_H= Tensión ultima promedio, ε_H= Deformación pico promedio,

E_H= Modulo elástico promedio, (C.V)= Coeficiente de Variación, Δ σ_H(%)= Incremento de resistencia a tensión por impregnación, Δ E_H(%)= Incremento de Modulo elástico por impregnación

Los hilos de fibras vegetales impregnados con poliéster muestran un incremento de la resistencia y del módulo de elasticidad casi en todos los casos (a excepción del sisal); en especial en el hilo de cáñamo, el cual aumentó su resistencia a tracción en aproximadamente un 84 % y su módulo de elasticidad en 92%. Resultados muy superiores en comparación con el efecto del poliéster en los demás hilos impregnados.

Comparando los resultados obtenidos de los hilos de fibras vegetales con los obtenidos por los mechones de basalto se puede ver una resistencia a tracción y módulo de elasticidad superior en el caso del basalto con una resistencia promedio de 698 MPa y un módulo de elasticidad de 77 GPa. Sin embargo, el objetivo de este estudio es probar mechones con los hilos de fibras vegetales que puedan alcanzar niveles de cargas comparables a los mechones de basalto, debido al bajo costo, baja densidad y mayor sostenibilidad que representan las fibras vegetales.

3.2.- Resultados de FRCM

Los resultados obtenidos de los ensayos a tracción de los especímenes de FRCM se muestran en la tabla 3. En esta se muestran capacidad de carga de las mallas y del mortero (calculado a partir de la tensión promedio de los ensayos a tracción directa de los hilos y el mortero), las tensiones últimas promedios, los módulos de elasticidad en las diferentes zonas de comportamiento del FRCM (figura 3f) y el porcentaje de aprovechamiento de las propiedades resistentes de los hilos. Las tensiones últimas fueron calculadas utilizando el área de sección transversal de los FRCM, y del tejido pues éste es quien absorbe las tensiones en las secciones donde el mortero ha fisurado.

Tabla 3. Resultados de los FRCMs a tracción

Propiedades mecánicas del FRCM						
FRCM	Sin malla	Basalto	Cáñamo	Lino	Sisal	Algodón
No de ensayos	3	3	3	3	3	3
Capacidad de carga de la malla (N)	-	1821,3	3257,6	3085	3584	2249,6
Capacidad de carga del mortero (N)	-	2291,4	2274,5	2274,5	2122,6	2173,2
F_u (N)	2303 (11%)	1782 (17%)	2984,88 (11%)	2756,48 (11%)	1683,76 (36%)	2172 (2%)
σ_{FRCM} (Mpa)	4,61 (11%)	3,56 (17%)	5,97 (11%)	5,51 (11%)	3,37 (36%)	4,34 (2%)
σ_T (Mpa)	-	683,27 (17%)	475,3 (11%)	438,93 (11%)	42,9 (36%)	76,86 (2%)
σ_H (Mpa)	-	698,33 (6%)	544,2 (7%)	516,72 (6%)	92,33 (12%)	82,43 (6%)
σ_{Ta}/σ_H (%)	-	97,84	87,34	84,95	46,46	93,23
E-I (Gpa)	8,92 (40%)	7 (24%)	13,03 (38%)	9,78 (37%)	8,7 -	6,55 (40%)
E-II (Gpa)	-	-	0,53 (16%)	0,65 (18%)	0,18 (33%)	0,53 (69%)
E-III (Gpa)	-	-	0,41 (12%)	0,25 (23%)	0,13 (33%)	0,04 (22%)

()= Coeficiente de variación, F_u = Carga última promedio, σ_{FRCM} = Tensión última promedio en FRCM, σ_T = Tensión última promedio del tejido, σ_H = Tensión última promedio de hilos con poliéster, σ_T/σ_H = % de aprovechamiento de resistencia a tensión de los hilos

En la tabla 3 se puede ver que el mortero sin reforzar alcanzó una resistencia a tracción promedio de 4.61 Mpa, superior al valor de 2.9 Mpa a tracción indirecta resultante del ensayo a flexión de las probetas de control.

También se aprecia que los FRCM que soportaron mayores niveles de tensiones fueron los de cáñamo, seguido por los de lino, algodón, basalto y sisal. Sin embargo, en cuanto a

tensiones sobre la malla fueron los de basalto, seguido por los de cáñamo, lino, algodón y sisal.

En el caso de los FRCM de basalto, algodón y sisal, las cargas últimas alcanzadas fueron inferiores a las alcanzadas por el mortero sin reforzar. Pero en el caso del basalto una vez éste alcanzó la fisuración las fibras comenzaron a deslizar, contrario a los FRCM de fibras vegetales, donde continuó la interacción malla-mortero una vez alcanzada la tensión de fisuración. Por consiguiente, las fibras vegetales impregnadas con poliéster desarrollaron una mayor adherencia en la interacción malla-matriz.

En la tabla 3 también se puede apreciar el porcentaje de aprovechamiento de la resistencia a tensión de los hilos dentro del FRCM (σ_T/σ_H), calculado a partir de la relación entre la tensión promedio alcanzada por el tejido impregnado embebido en el FRCM y la tensión promedio de los hilos impregnados con poliéster. Estos resultados muestran que los FRCM con el mayor porcentaje de aprovechamiento mecánico de las fibras fueron los de basalto (97.8%). Pero, si consideramos que el tejido comenzó a deslizar una vez alcanzó la tensión de fisuración, y además, no pudo superar la tensión promedio de rotura del mortero, es posible que la carga haya sido soportada solo por el mortero, sin ningún aporte mecánico del tejido. Esto significaría que no existe una buena compatibilidad entre las fibras y la matriz.

Por el contrario, en el caso del cáñamo, el lino y el algodón hubo un buen aprovechamiento de las propiedades mecánica de los hilos impregnados. Pues, además que se alcanzaron porcentajes de aprovechamiento entre 85 y 93 %, presentaron un patrón de multifisura (ver figura 3 y 4) antes del fallo total del espécimen. En el caso del sisal, hubo un menor porcentaje de aprovechamiento (47%), que se asume que es debido al mayor espesor del hilo (2.5mm), lo que provocó el desprendimiento prematuro de mortero para las dimensiones de la probeta, evitando un mejor aprovechamiento de las propiedades del hilo.

En el caso de los módulos de elasticidad se observa un incremento del módulo en la zona I (antes de fisurar el mortero) solo en los FRCM de cáñamo y lino, pero en los demás casos el módulo presenta una disminución con respecto al mortero sin reforzar. Esto indica que las mallas de cáñamo y lino le aportaron una mayor rigidez al mortero, esto debido a la mayor rigidez que presenta estas fibras en comparación con las demás fibras vegetales.

Por otro lado, en el caso de los FRCM de fibras vegetales, se puede observar una alta degradación de este al pasar de una zona a otra de comportamiento (ver tabla 3 y figura 3f), pues una vez el mortero alcanza la fisuración se produce una fuerte degradación de la rigidez del compuesto.

En la Figura 3 se muestran los diagramas de esfuerzo-deformación de los FRCM reforzados con las mallas de fibras vegetales impregnadas con poliéster, y basalto. Para este caso se utiliza las tensiones resistidas por la combinación malla-mortero considerando el área de 500 mm² de los especímenes de FRCM. Esto debido a los diferentes espesores de malla utilizados.

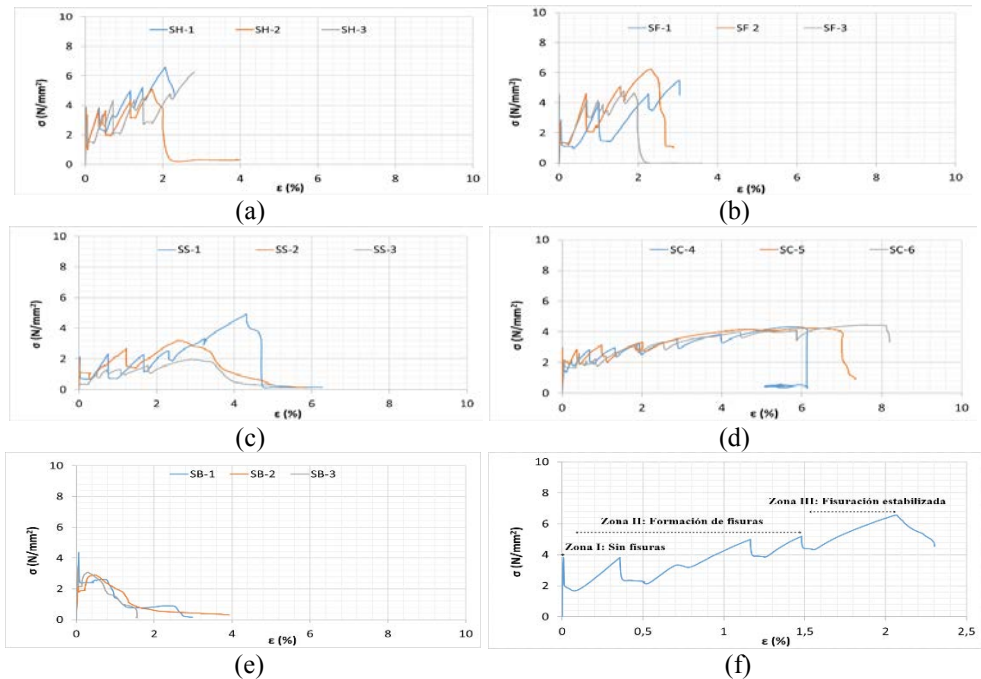


Figura 3. Diagrama Fuerza-Deformación del FRCM: (a) cáñamo, (b) lino, (c) sisal, (d) algodón, (e) basalto, (f) Identificación de zonas de comportamiento del FRCM

Observando los resultados mostrados en la figura 3 se pueden apreciar dos tipos de curvas esfuerzo-deformación distintas, una es el caso los FRCM de basalto mencionado anteriormente (donde la malla desliza cuando el mortero se fisura) y la otra, los FRCM de fibras vegetales que se caracterizan por un comportamiento de multifisuras, causada por la interacción malla-mortero después de fisurar el mortero. Analizando este comportamiento de multifisuras (el cual se corresponde con los resultados obtenidos por otros estudios [3]), se puede identificar tres zonas de comportamiento diferentes (ver figura 3f): una primera zona elástica-lineal sin fisura (donde el mortero y la malla se deforman en conjunto), luego una zona de formación de fisuras (caracterizada por interacción malla mortero en las diferentes secciones del espécimen) y por último, la zona de fisuración estabilizada (donde quien absorbe todas las tensiones es la malla).

3.3.3.- Tipos de Fallos

Durante los ensayos de los FRCM se produjeron 3 tipos de fallos: desprendimiento del mortero, rotura de la malla y deslizamiento de la malla (ver figura 4).

Los fallos por deslizamiento de la malla solo se produjeron en los especímenes de basalto donde una vez se alcanzó la tensión de fisuración del mortero, la malla de basalto comenzó a deslizar. Esto puede ser debido a la falta de adherencia entre la malla y el mortero.

En cambio, los fallos por desprendimiento del mortero y rotura de la malla se produjeron en los especímenes de fibras vegetales. En el caso del sisal todos los especímenes fallaron por desprendimiento del mortero, esto es debido a la mayor sección de la malla (hilos de 2.5 mm de diámetro) en comparación con los demás especímenes. En el caso de los FRCM de cáñamo, lino y algodón hubo también fallos por desprendimiento, pero en algunos casos se produjo la rotura de la malla (alcanzando la tensión de rotura de la malla), lo que indica un mayor aprovechamiento de las propiedades mecánicas de los hilos.

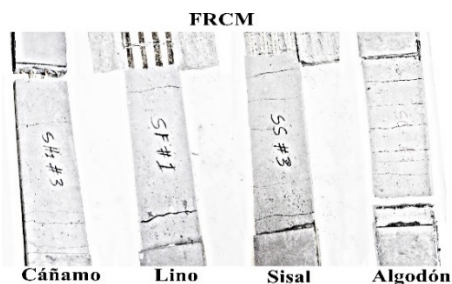


Figura 4. Fallos de especímenes de FRCM

El número de fisuras los FRCM de fibras vegetales difiere en los especímenes de diferentes mallas, esto debido a las diferencias en la capacidad de carga y deformación de cada malla, y los diferentes espesores de mallas utilizados. En los casos del FRCM de cáñamo, lino y sisal se puede apreciar como los especímenes muestran un comportamiento más rígido que los de algodón, consecuente con el comportamiento rígido de los hilos impregnados presentado en el apartado 3.1, alcanzando entre 3 y 6 fisuras (mayor en el caso de sisal). Sin embargo, en el caso del algodón se produjeron entre 7 y 9 fisuras, mostrando una buena interacción malla-matriz y un buen aprovechamiento de la capacidad de elongación de los hilos de algodón.

Tras estos resultados se puede ver la influencia de la relación malla-matriz en el FRCM, pues estos reflejan la necesidad de una buena interacción malla-matriz, para lograr desarrollar ese comportamiento de multifisuras esperado por el FRCM. Por lo que este estudio confirma que el comportamiento a tracción del FRCM, queda muy influenciado por la relación volumen de fibras-mortero, pues un exceso de fibras o de sección de la malla puede provocar el desprendimiento prematuro del mortero, y una mala adherencia entre el tejido y la matriz, puede provocar el deslizamiento del tejido embebido en la matriz.

4.- CONCLUSIONES

Se realizó un estudio experimental sobre el comportamiento de las fibras vegetales en el FRCM y la aplicación de un tratamiento basado en la impregnación de las mallas de fibras vegetales con poliéster. A raíz de este estudio se llega a las siguientes conclusiones:

- La impregnación con poliéster aumenta la resistencia mecánica y la rigidez en todos hilos de fibras vegetales utilizados, sobre todo en el caso del hilo de cáñamo donde se aumentó su resistencia aproximadamente en un 84% y el módulo de

elasticidad en un 92%. Por consiguiente, es necesario dosificar convenientemente la impregnación de resina porque modifica notablemente las propiedades de la fibra y puede alterar el comportamiento resistente que se desee conseguir.

- El FRCM de cáñamo fue el que alcanzó mayores niveles de tensión. Sin embargo, el FRCM de algodón mostró mayor capacidad de alargamiento, con una elongación próxima al 10 %, y un patrón de multifisuras superior a los demás FRCM ensayados.
- La mayor sección de la malla de sisal provocó una precipitación del inicio de fisuración del mortero y un fallo por desprendimiento más prematuro que los otros especímenes, lo que sugiere que el tipo de fallo del FRCM queda influenciado por las dimensiones relativas entre las fibras y el espesor de la matriz, así como por la rigidez del tejido.
- La impregnación de las mallas de fibras vegetales parece mejorar la adherencia con el mortero mostrando un comportamiento de multifisuras y alcanzando unos niveles de cargas superiores a los especímenes reforzados con basalto. Lo que sugiere la posibilidad de que los FRCM de fibras vegetales puedan alcanzar propiedades mecánicas comparables o superiores a los FRCM de fibras sintéticas.

REFERENCIAS

- [1] P. Wambua, J. Ivens, and I. Verpoest, “Natural fibres: Can they replace glass in fibre reinforced plastics?,” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 63, no. 9, pp. 1259–1264, 2003.
- [2] D. Snoeck, P. A. Smetryns, and N. De Belie, “Improved multiple cracking and autogenous healing in cementitious materials by means of chemically-treated natural fibres,” *Biosyst. Eng.*, vol. 139, no. 1998, pp. 87–99, 2015.
- [3] R. S. Olivito, O. A. Cevallos, and A. Carrozzini, “Development of durable cementitious composites using sisal and flax fabrics for reinforcement of masonry structures,” *Mater. Des.*, vol. 57, pp. 258–268, 2014.
- [4] O. A. Cevallos and R. S. Olivito, “Effects of fabric parameters on the tensile behaviour of sustainable cementitious composites,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 69, pp. 256–266, 2014.
- [5] C. Menna, D. Asprone, M. Durante, A. Zinno, A. Balsamo, and A. Prota, “Structural behaviour of masonry panels strengthened with an innovative hemp fibre composite grid,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 100, pp. 111–121, 2015.
- [6] ICC Evaluation Service Inc., “Proposed Revisions to the Acceptance Criteria for Masonry and Concrete Strengthening Using Fiber-reinforced Cementitious Matrix (FRCM) Composite Systems, Subject AC434-0213-R1 (ME/BG),” 2012.