

MEJORA DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE UN SISTEMA COMPUESTO CEMENTICIO MEDIANTE EL USO DE UN TEJIDO DE SISAL DISEÑADO

Improvement Of The Mechanical Properties of A Cementitious Composite System Using A Designed Sisal Fabric

Oscar-A. Cevallos*, Cristian Marcillo, Andrea Miño

Universidad Nacional de Chimborazo, Facultad de Ingeniería, Carrera de Ingeniería
Civil, Av. Antonio José de Sucre km 1 ½ vía a Guano, Riobamba, Ecuador.

*ocevallos@unach.edu.ec

R esumen

En los últimos años, los materiales compuestos FRCM (*fabric-reinforced cementitious matrix composites*) producidos con tejidos de fibras naturales se han convertido en potenciales sustitutos de sistemas compuestos de fibras sintéticas o minerales. La eficiencia de los materiales compuestos FRCM depende, entre otras cosas, de su capacidad de adherencia y transmisión de los esfuerzos internos entre sus componentes. En esta investigación se diseñó un sistema FRCM cementicio reforzado con tejidos de sisal para que alcance niveles satisfactorios de adherencia y resistencia. Para mejorar sus propiedades mecánicas y obtener un sistema adecuado para el reforzamiento de elementos de hormigón armado, fue necesario el diseño y fabricación de tejidos de sisal de características geométricas particulares, favorables a la penetrabilidad. El comportamiento mecánico del sistema FRCM diseñado en este estudio se verificó llevando a cabo pruebas de corte SLS (Single Lap Shear test) y pruebas *pull-off*. Los resultados se compararon con aquellos obtenidos probando materiales compuestos FRCM producidos con tejidos no diseñados de sisal.

Palabras claves: materiales compuestos, ensayo de materiales, fibras naturales.

A bstract

In recent years, FRCM (*fabric-reinforced cementitious matrix*) composites produced with fabrics of natural fibres have become potential substitutes for composite systems produced with synthetic or mineral fibres. The efficiency of FRCM composites depends, among other things, on their ability to bond and transmit internal stresses between their components. In this research, a cementitious FRCM system reinforced with sisal fabrics was designed to achieve satisfactory levels of bond and strength. To improve the mechanical properties of the material and obtain a proper method for strengthening reinforced concrete elements, sisal fabrics with particular geometrical characteristics, favourable to penetrability, were designed and manufactured. The mechanical behaviour of the FRCM system developed in this study was verified by performing SLS (Single Lap Shear) and pull-off tests. The results were compared with those obtained by testing FRCM composite materials produced with non-designed sisal fabrics.

Keywords: composite materials, materials testing, natural fibres.

I. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de reforzamiento a base de materiales compuestos nacieron como una alternativa para incrementar la capacidad de carga y niveles de servicio de una estructura, mejorando además, sus deficiencias constructivas. Durante las últimas décadas, los sistemas compuestos FRP (*fiber-reinforced polymer composites*) producidos a base de fibras sintéticas, metálicas o minerales embebidas en una matriz polimérica han sido extensamente estudiados. Estos sistemas han probado ser eficaces, pero poseen ciertas desventajas, tales como: su inaplicabilidad en ambientes húmedos o a bajas temperaturas, pobre compatibilidad térmica con un sustrato de hormigón y susceptibilidad a la radiación (1). Además de los sistemas FRP, surge otra solución tecnológica a base de hormigón reforzado con textiles, conocida como TRC (*textile-reinforced concrete*). Este material ofrece la posibilidad de construir elementos estructurales esbeltos reforzados con varias capas de textiles y mortero (2). Los materiales compuestos FRCM (*fabric-reinforced cementitious matrix composites*) se consideran un tipo particular de TRC, en los cuales se aplican fibras a una estructura a través de un mortero de cemento, y se utilizan específicamente para el fortalecimiento de estructuras. Sus propiedades mecánicas dependen de la unión entre las fibras y la matriz cementicia. Este material exhibe varias ventajas tales como: una mayor resistencia a altas temperaturas y a radiaciones ultravioletas, mayor permeabilidad al vapor, menores costos de producción y aplicación y una reversibilidad completa de la instalación, aumentando la resistencia a la tracción de los elementos reforzados (3).

Desde un punto de vista ecológico, el uso de fibras naturales para producir sistemas compuestos FRCM podría ayudar significativamente a resolver varios problemas ambientales y a dar sostenibilidad en la industria de la construcción. Razón por la cual, varios investigadores han dirigido su atención hacia el estudio de nuevos materiales basados en fibras naturales y recursos renovables. Los sistemas de reforzamiento FRCM mejoran el comportamiento de los elementos estructurales frente a sollicitaciones de flexión y tracción (4-6). Sin embargo, la falta de adherencia entre la matriz y el tejido afecta frecuentemente el comportamiento de materiales FRCM producidos a base de tejidos de fibras naturales, causando principalmente, fallas en el sistema conocidas como debonding. Este fenómeno ha sido observado en investigaciones previas (7,8) en las cuales se concluye que la poca separación entre los hilos del tejido afecta la adherencia entre los estratos o capas de los componentes del

material. De esta manera, los problemas en el comportamiento mecánico de los materiales FRCM producidos con fibras naturales han limitado su uso para el reforzamiento de estructuras.

Por otro lado, en Ecuador no existe actualmente un tejido de sisal que favorezca la adherencia en aplicaciones FRCM, siendo la geometría de los tejidos el principal problema. Al considerar los tejidos de sisal que se comercializan en el país, la adherencia entre la matriz y el tejido y entre la matriz y el sustrato de hormigón se ve afectada principalmente por el excesivo número de hilos transversales (8), mismos que no contribuyen a aumentar la resistencia del material, y en ciertos casos, incluso podrían causar que las tensiones internas no se distribuyan adecuadamente entre los estratos de tejido y se separen prematuramente sus componentes (7).

Sobre la base de los problemas antes mencionados, el objetivo de este trabajo es mejorar el comportamiento de un material compuesto FRCM de sisal mediante el diseño de sus tejidos de refuerzo y se presentan los resultados de un extenso estudio experimental de las propiedades físicas y mecánicas del sistema FRCM. Adicionalmente, se presentan los resultados de pruebas de corte SLS (Single Lap Shear tests) y *pull-off* llevadas a cabo para evaluar la eficacia del reforzamiento.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Materiales

En este estudio se analizaron dos tipos de tejidos de sisal que se comercializan en los mercados de la ciudad de Riobamba. Al analizar muestras de fibras en un microscopio electrónico de barrido (SEM) se pudo observar la morfología y la estructura interna de los hilos. En la figura 1a, se muestra un hilo de sisal de diámetro 1456,72 μm y se observa que

su conformación se logra mediante el hilado de múltiples filamentos. Por otro lado, la estructura interna de las fibras de sisal se caracteriza por la presencia de agujeros de lumen en toda la sección transversal, limitados por paredes celulares bien definidas (ver figura 1b).

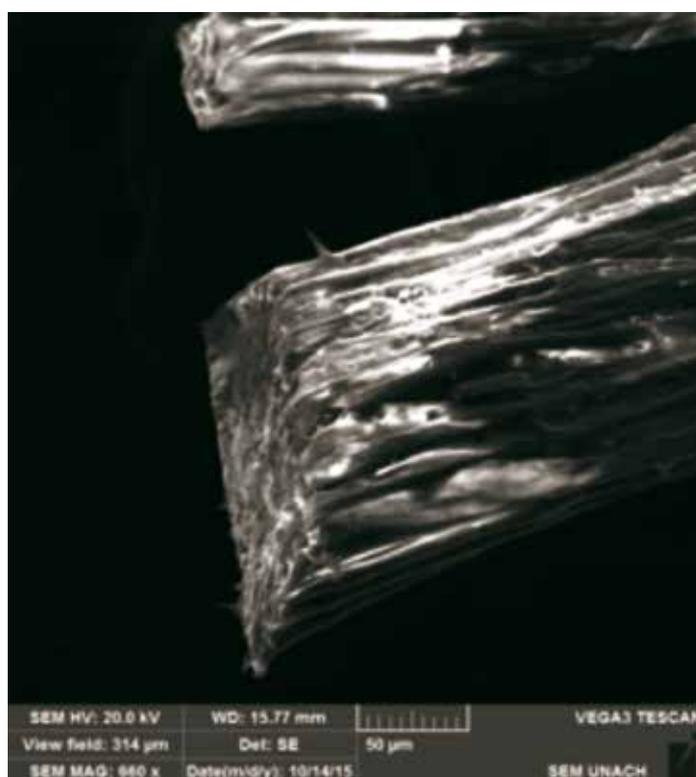
El primer tejido analizado se presenta en forma de rollos de manufactura ecuatoriana y tiene un proceso de fabricación manual. La manera como se cruzan los hilos de la urdimbre en este tejido es de tipo tafetán (ver figura 2a); esta estructura se caracteriza por formar un patrón simple de punto cruz. El tejido de rollos generalmente se utiliza para realizar arreglos ornamentales y se lo encuentra en presentaciones de 100 m de longitud. El diámetro promedio de sus hilos es de 2 mm y la separación entre hilos longitudinales y transversales es de 3,5 mm. También se usó en este estudio un tejido que se comercializa en forma de sacos. Este tejido se usa generalmente para el transporte de productos agrícolas. Es de manufactura colombiana y su fabricación es parcialmente industrializada. Al igual que el tejido de rollo, tiene una estructura tipo tafetán (ver figura 2b). El diámetro promedio de sus hilos es de 2 mm y la separación entre hilos longitudinales y transversales es de 2 mm.

El mortero usado para preparar la matriz del material FRCM fue elaborado con cemento portland puzolánico (tipo IP) proveniente de la empresa Cemento Chimborazo. Como agregado fino se utilizó arena de río de una mina ubicada en el cantón Penipe. La arena fue tamizada por una malla No. 20. El mortero se diseñó para que se alcance una resistencia de 45 MPa a los 28 días.

Para realizar las pruebas SLS y *pull-off*, las muestras de materiales compuestos se aplicaron sobre prismas y losas de hormigón, respectivamente. El hormigón fue elaborado con el mismo tipo de cemento y agregado fino usados en la fabricación de la matriz de mortero, y como agregado grueso, se utilizó ripio



(a)



(b)

Figura 1. Análisis microscópico SEM: (a) Hilos de sisal, (b) Sección transversal de una fibra de sisal



(a)



(b)

Figura 2. Tejidos de sisal usados en la investigación: (a) tejido de rollo, (b) tejido de saco

triturado proveniente de la Mina “Cerro Negro”, ubicada en el cantón Riobamba. Este material fue tamizado por una malla de abertura 3/8”. La dosificación del hormigón fue diseñada para obtener una resistencia de compresión de 21 MPa. Antes de la preparación de las muestras de material compuesto, los tejidos se impregnaron con resina poliéster para evitar que las fibras de sisal entren en contacto directo con el mortero y estas se envejecen prematuramente (9). El material compuesto se preparó con tres estratos de tejido de sisal mediante un proceso de moldeo manual, luego de lo cual se curaron por 28 días.ç

Caracterización de los hilos y tejidos

Para la caracterización física del tejido, se realizaron ensayos de densidad, densidad lineal (TEX) y masa por unidad de área, de acuerdo a procedimientos especificados en normas ASTM e ISO. Un equipo Humboldt Master Loader HM-3000 fue utilizado para estudiar las propiedades mecánicas a tracción de los hilos y tejidos. La velocidad de aplicación de las cargas de tracción fue de 250 mm/min, para los hilos, y de 20 mm/min, para los tejidos.

Diseño del tejido de sisal

El objetivo del diseño del tejido fue el de obtener un material de refuerzo del sistema FRCM que proporcione una mayor capacidad de penetración de la matriz y que se alcancen niveles de resistencia comparables a los alcanzados con un material compuesto preparado con tejidos no diseñados. Analizando los resultados obtenidos en las pruebas mecánicas de los hilos de rollo y de saco, se diseñó una primera propuesta de tejido con una urdimbre tipo semi-esteril (10), con las dimensiones y geometría indicadas en la figura 3. Los rollos de hilos de sisal usados en la confección del tejido fueron de procedencia ecuatoriana, y el tejido fue

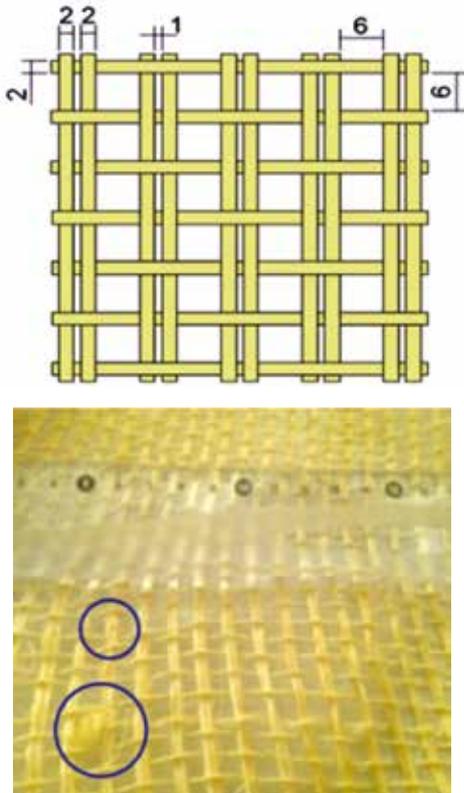


Figura 3. Tejido diseñado de urdimbre tipo semi-esterila

manufacturado en una fábrica artesanal, ubicada en el cañón Otavalo, Ecuador.

En Ecuador, las técnicas de elaboración de tejido de sisal no son industrializadas. En consecuencia, los hilos longitudinales de este primer tejido diseñado no se tejieron de una manera apropiada para transmitir uniformemente los esfuerzos de tracción. El principal problema en la manufactura de este tejido fue la presencia de un gran número de hilos no tensados o que se encontraban trenzados entre sí, tal como se observa en la figura 3. Por este motivo, se decidió descartar este diseño de tejido y además, buscar otro fabricante con procesos de manufactura no artesanal. Para facilitar el proceso de producción del tejido, se propuso un nuevo diseño con una urdimbre tipo tafetán, y se solicitó a la fábrica Fideca, ubicada en la ciudad de San José, Colombia, que confeccione el nuevo diseño (ver figura 4). Para la caracterización del tejido diseñado, se usaron las mismas normas y procedimientos usados en la caracterización del tejido de rollo y de saco. Los resultados obtenidos en la caracterización de los hilos y tejidos se presentan en la tabla 1. En esta tabla se incluyen también los coeficientes de variación de los resultados (valores entre paréntesis) como un indicador estadístico de su variabilidad. Estos coeficientes, expresados en porcentaje, fueron calculados dividiendo la desviación estándar para el promedio.

Caracterización del material compuesto FRCM

La densidad del material compuesto fue una de las propiedades físicas consideradas en este estudio. Tomando como referencia la norma ASTM C642 (11), se ensayaron seis muestras y se evaluó su densidad usando la siguiente ecuación:

$$\delta = \frac{S}{R-T} \quad (1)$$

dónde: δ = Densidad del material compuesto, expresado en g/cm^3 , S = Peso del material compuesto seco, expresado en gramos, R = Peso del recipiente más el agua en la segunda lectura, expresado en gramos y T = Peso del recipiente más agua en la primera lectura, expresado en gramos. Además de la densidad del material compuesto, el porcentaje de absorción se consideró como otra propiedad física de importancia para el estudio. Tomando como guía la norma ASTM C642 se evaluó el porcentaje de absorción de seis muestras, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\% \text{ adopción} = \frac{W-D}{D} * 100 \quad (2)$$

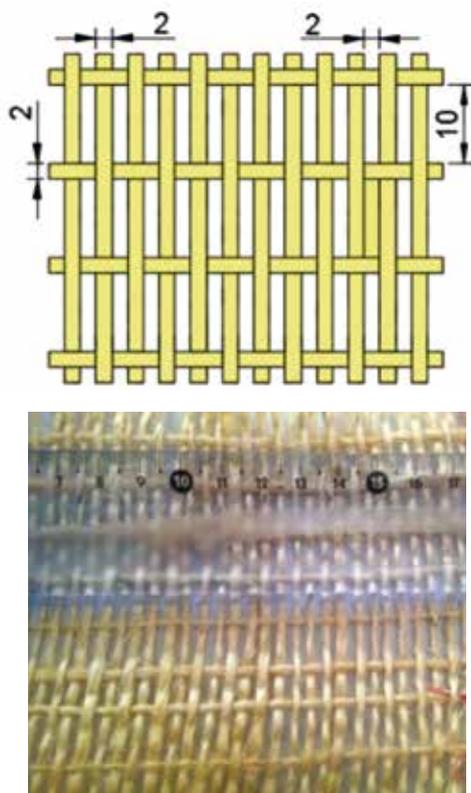


Figura 4. Tejido diseñado de urdimbre tipo tafetán

	Propiedades	Unidad	Tejido de Rollo	Tejido de Saco	Tejido Diseñado
Hilos longitudinales	Densidad de la fibra	g/cm ²	1,44 (1,39%)	1.43 (1.40%)	1.47 (4.08%)
	Masa por unidad de área	g/m ²	287,10 (4,14%)	400.50 (2.10%)	278.40 (3.14%)
	Densidad lineal Tex	g/km	679,50 (11,43%)	773.33 (3.59%)	778.67 (3.54%)
	Esfuerzo máximo a tracción	MPa	382,37 (16,83%)	278.29 (12.28%)	293.96 (15.04%)
	Carga máxima a tracción	N	180,48 (16,83%)	155.42 (12.28%)	155.80 (15.04%)
	Deformación unitaria máxima (tracción)	mm/mm	0,04 (23,74%)	0.04 (9.914%)	0.04 (11.30%)
	Módulos de elasticidad	MPa	8778,82 (5,062%)	7311.74 (5.97%)	7939.17 (5.06%)
Hilos transversales	Densidad de la fibra	g/cm ²	1,44 (1,39%)	1.43 (1.40%)	1.47 (4.08%)
	Masa por unidad de área	g/m ²	287,10 (4,14%)	400.50 (2.10%)	278.40 (3.14%)
	Densidad lineal Tex	g/km	846,67 (3,91%)	821.43 (12.71%)	824.29 (11.05%)
	Esfuerzo máximo a tracción	MPa	259,33 (22,47%)	303.51 (17.15%)	304.64 (16.10%)
	Carga máxima a tracción	N	144,01 (22,47%)	174.22 (17.15%)	170.90 (16.10%)
	Deformación unitaria máxima (tracción)	mm/mm	0,05 (21,87%)	0.05 (9.36%)	0.05 (7.80%)
	Módulos de elasticidad	MPa	4835,73 (11,61%)	6232.09 (9.18%)	6262.26 (32.09%)
Tejidos (sentido longitudinal)	Esfuerzo máximo a tracción	MPa	118,30 (8,51%)	306.77 (5.02%)	321.64 (10.88%)
	Carga máxima a tracción	N	558,38 (8,51%)	1990.77 (6.56%)	2045.66 (10.88%)
	Deformación unitaria máxima	mm/mm	0,04 (9,08%)	0.05 (5.02%)	0.05 (13.72%)
	Módulo de elasticidad	MPa	3771,60 (22,13%)	6629.38 (2.60%)	7195.33 (12.48%)
Tejidos (sentido transversal)	Esfuerzo máximo a tracción	MPa	130,94 (17,62%)	275.40 (22.51%)	267.133 (26.44%)
	Carga máxima a tracción	N	611,40 (17,62%)	1898.34(22.51%)	599.445 (26.44%)
	Deformación unitaria máxima	mm/mm	0,03 (11,24%)	0.05 (10.69%)	0.047 (21.68%)
	Módulo de elasticidad	MPa	5387,36 (19,64%)	5662.59 (19.64%)	6314.948 (15.76%)

Tabla 1. Caracterización de hilos y tejidos de sisal

dónde: W= peso de la muestra en estado SSS (saturado superficialmente seco), expresado en gramos y D= peso de la muestra seca, expresado en gramos. Pruebas de tracción y flexión se llevaron a cabo para estudiar el comportamiento mecánico de los materiales compuestos. En el caso de la prueba de tracción, los procedimientos usados se basaron en las recomendaciones de la norma ASTM D3039 (12). Para proveer un mecanismo de sujeción efectiva durante las pruebas de tracción, en los extremos de las muestras se fijaron placas de acero (ver figura 5). Para este ensayo se utilizó un equipo de prueba Humboldt Master Loader HM-3000, con una velocidad carga de 0,5 mm/min.

El comportamiento mecánico de las muestras de materiales compuestos se verificó también por medio de pruebas de flexión (ver figura 6). Para esta prueba se adaptaron procedimientos descritos en la norma ASTM C78 (13). La velocidad de ensayo usada fue de 0,5 mm/min. Tanto en los ensayos de flexión y de tracción se registraron automáticamente los desplazamientos y las deformación con la ayuda de un transductor de deformación.

Los resultados obtenidos en la caracterización de los materiales compuestos se presentan en la tabla 2. De la mis-

ma manera que en la tabla 1, aquí se presentan entre paréntesis los coeficientes de variación (expresados en porcentaje), que fueron calculados dividiendo el coeficiente de variación para el promedio.

Prueba de corte SLS

La prueba SLS (Single Lap Shear test) se realizó sobre la base de procedimientos descritos en la norma ASTM D5868-01 (14) y en el trabajo presentado por Oliveira et al. (15). Antes de esta prueba, se aplicaron materiales compuestos sobre la superficie de prismas de hormigón y posteriormente fueron curadas por 28 días. Se realizaron 12 pruebas SLS en especímenes reforzados con materiales FRCCM de tejido diseñado y 12 pruebas SLS en especímenes reforzados con materiales FRCCM de tejido no diseñado. Para analizar si la



Figura 5. Ensayo de tracción de material compuesto FRCM reforzado con tejido de saco y tejido diseñado.



Figura 6. Ensayo de flexión en el material compuesto FRCM reforzado con tejido de saco y tejido diseñado

longitud de pegado del material compuesto produce algún efecto en el comportamiento mecánico de las muestras, se consideraron en este estudio diferentes longitudes de pegado. De esta manera, se ensayaron tres especímenes para cada longitud de pegado, y las longitudes fueron: 10, 15, 18 y 20 cm. En este ensayo, una configuración clásica *push-pull* fue adoptada, en la cual, las fibras fueron sometidas a tracción, mientras que el prisma de hormigón se restringió para evitar su rotación (ver figura 7). La velocidad de ensayo fue de 0,3 mm/min.

Propiedades	Unidad	Tejido no diseñado (3 estratos) (a)	Tejido diseñado (3 estratos)
Densidad en estado endurecido	g/cm ³	1.829	1.786 (2.20%)
Absorción en estado endurecido	%	12.322	14.231 (2.38%)
Esfuerzo máximo de tracción	MPa	7.625	12.003 (9.96%)
Carga máxima de tracción	N	6104.892	5281.120 (9.96%)
Deformación unitaria máxima de tracción	mm/mm	0.047	0.070 (24.75%)
Módulo de elasticidad de tracción	MPa	581.007	567.963 (9.71%)
Esfuerzo máximo de flexión	MPa	13.846	26.959 (7.74%)
Carga máxima de flexión	N	590.759	573.789 (7.75%)
Deformación unitaria máxima de flexión	mm/mm	0.386	1.973 (16.44%)
Deflexión Máxima de flexión	mm	7.78	18.786 (7.75%)
Módulo de Young a flexión	MPa	785.13	597.961 (24.23%)

(a) Datos referenciados del estudio llevado a cabo por Cevallos et al. (8)

Tabla 2. Caracterización del material compuesto FRCM de sisal

Prueba de *pull-off*

Esta prueba se llevó a cabo en losas de hormigón que fueron reforzadas con los materiales compuestos FRCM de sisal. El material compuesto fue aplicado usando un estrato de tejido recubierto con resina poliéster. Para verificar la eficacia del material, las losas se dividieron en dos partes, y se aplicó, en la primera mitad de la losa, el sistema FRCM de tejido diseñado y en la segunda mitad, un material compuesto de tejido no diseñado. Luego de 28 días y con la ayuda de un dispositivo para extracción de núcleos de 5 cm de diámetro, se realizaron 30 perforaciones para obtener las muestras de ensayo. Posteriormente, se pegaron placas metálicas sobre el material compuesto usando una resina de polímero termoestable. Las pruebas se llevaron a cabo usando un equipo LOK-TEST DK 2400 (ver figura 8), mismo que permitió aplicar una carga de desprendimiento sobre el material compuesto. Las pruebas *pull-off* se realizaron de acuerdo a procedimientos descritos en la norma ASTM D4541 (16).

Los tipos de fallas que se observan en las muestras ensayadas con este método se ilustran en la norma ASTM D4541, de los cuales se pueden destacar las fallas tipo “A” (falla en el sustrato), tipo “B” (falla en la interface del sustrato y la matriz), tipo “C” (falla en la interface del tejido-matriz) y tipo “D” (falla en la matriz cementicia antes de llegar al tejido de refuerzo).

Análisis y validación de resultados

Los resultados obtenidos se analizaron y validaron usando un modelo ANOVA de una vía. Los resultados de este análisis se presentan más adelante al comparar las me-

dias de muestras ensayadas en las pruebas SLS y *pull-off*. El método ANOVA, al ser muy flexible, permitió construir modelos estadísticos para el análisis de contraste de medias de los resultados experimentales con un 95% de confiabilidad. Cuando no fue posible asumir que las varianzas poblacionales eran iguales, se utilizó una prueba robusta de Welch.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Características mecánicas del tejido de sisal diseñado

Al comparar los resultados presentados en la tabla 1, se puede notar que las características mecánicas del tejido diseñado y tejido de saco no presentaron diferencias significativas entre sí. Esto puede atribuirse a que, en ambos tejidos, el número y diámetro de los hilos longitudinales fue el mismo; mientras que, el tejido de rollo, al tener un menor número de hilos longitudinales, exhibió niveles de resistencia menores; razón por la cual se descartó su utilización en las etapas posteriores del estudio.

Ventajas de la arquitectura del tejido de sisal diseñado

La arquitectura del tejido diseñado ofreció mayor penetrabilidad que el tejido de saco. La capacidad de penetración del mortero entre las aberturas de las mallas es una característica muy importante en los tejidos usados para producir sistemas FRCM con fines de reforzamiento estructural; tal es el caso de las fibras sintéticas que se comercializan actualmente (por ejemplo: PBO, carbono, vidrio, basalto, entre otras), mismas que se caracterizan por poseer una estructura abierta (17,18). En investigaciones previas (8), se verificó que la resistencia de materiales compuestos producidos con tejidos de saco (no diseñados) fue lo suficiente alta para mejorar el com-



Figura 8. Configuración de la prueba de *pull-off*.

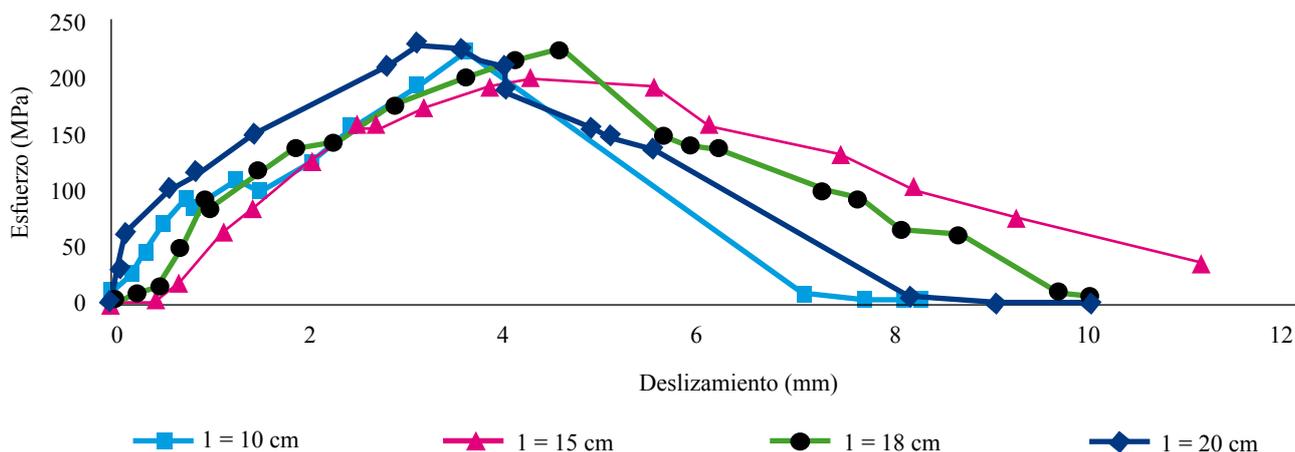


Figura 9. Curvas del comportamiento mecánico durante las pruebas SLS: Esfuerzo vs. Deslizamiento de muestras FRCM de tejido diseñado, con longitudes de pegado (l) de 10 cm, 15 cm, 18 cm y 20 cm.



Figura 10. Ensayo SLS: Mecanismo de falla de las muestras FRCM con tejido diseñado; falla por rotura del tejido

portamiento mecánico de columnas y vigas de hormigón. Por este motivo, el tejido diseñado debía garantizar niveles iguales o superiores de resistencia del sistema FRCM. En la Tabla 2 se puede observar que los esfuerzos de tracción de los materiales compuestos de tejidos

diseñados fueron mayores a los esfuerzos de materiales compuestos de tejidos no diseñados. Es necesario aclarar que las cargas máximas alcanzadas por los FRCM de tejidos no diseñados fueron mayores debido a la mayor sección transversal de los especímenes. De la misma manera, se observa en la tabla 2 que los resultados de los esfuerzos a flexión de los materiales FRCM de tejidos diseñados son hasta 94,71% mayores a los obtenidos con muestras FRCM de tejidos no diseñados. Esto podría atribuirse a la mayor capacidad de adherencia entre matriz y tejido, alcanzada gracias a la mayor superficie de contacto entre los estratos de mortero.

Pruebas SLS

Como se mencionó anteriormente, las pruebas SLS se realizaron en muestras FRCM adheridas a prismas de hormigón con diferentes longitudes de pegado; esto permitió una mejor valoración de los efectos de la arquitectura del tejido sobre el desarrollo de resistencia o mecanismos de falla de las muestras. Con los resultados se obtuvieron curvas del comportamiento. En la figura 9 se presentan las curvas de esfuerzo vs. deslizamiento de las muestras FRCM de tejido diseñado.

Al analizar estas curvas se observan resistencias y deslizamientos comparables entre grupos (coeficiente de variación de 6,93%); por lo que, el comportamiento de las muestras FRCM de tejido diseñado no depende de la longitud de pegado del material compuesto. El mecanismo de falla en estas muestras se caracterizó por la rotura del tejido en su extremo libre (ver figura 10); y esto podría atribuirse a que la capacidad de adherencia desarrollada por el sistema fue mayor a la resistencia del tejido.

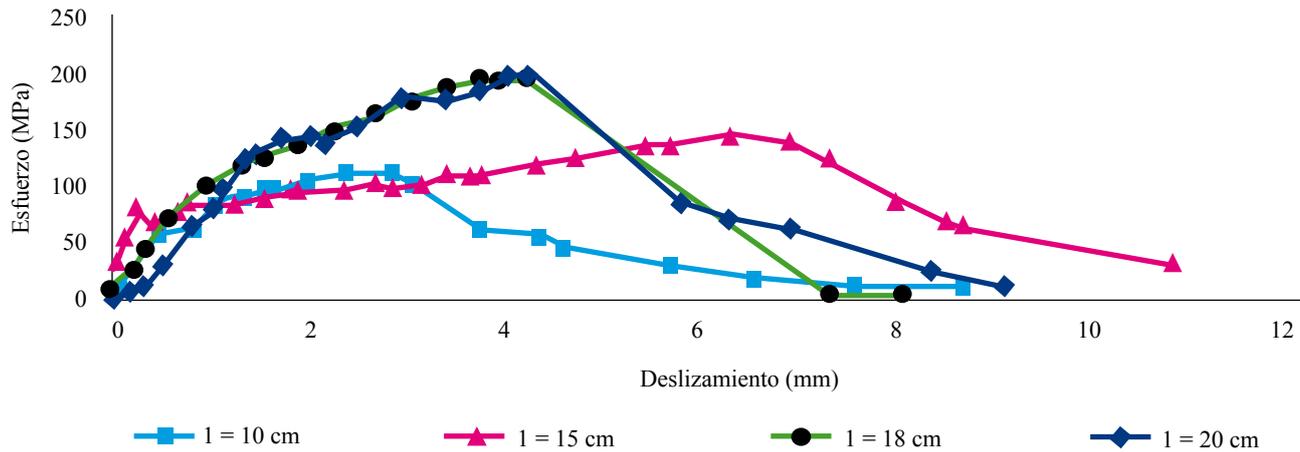


Figura 11. Curvas del comportamiento mecánico durante las pruebas SLS: esfuerzo vs. deslizamiento de muestras FRCM de tejido no diseñado, con longitudes de pegado (l) de 10 cm, 15 cm, 18 cm y 20 cm

Por otro lado, al observar los resultados de las pruebas SLS realizadas en muestras FRCM de tejido no diseñado que se presentan en la figura 11, se puede notar cómo el comportamiento entre grupos sí presenta diferencias, y se comprueba que estas diferencias son significativas al realizar el análisis ANOVA de una vía, en el cual se obtuvo un p valor de 0,013; valor que está por debajo del nivel de significancia del 5%. La longitud de pegado, en este caso, sí afectó la capacidad resistente del sistema. Es así que, con longitudes cortas de pegado, como es el caso de las muestras FRCM de 10 y 15 cm, se produjo el desprendimiento del material antes de alcanzar los niveles de resistencia que se obtuvieron con longitudes de pegado de 18 y 20 cm. Esto podría atribuirse a que la arquitectura del tejido no diseñado afectó la capacidad de adherencia del sistema y que las longitudes de pegado mayores (18 y 20 cm) desarrollaron resistencias mas altas debido a la fricción entre matriz y tejido. En este caso, el coeficiente de variación (desviación estándar/promedio) de los resultados de esfuerzos máximos entre grupos fue de 24,43%.

Pruebas de *pull-off*

Mediante las pruebas de *pull-off* se pudo evaluar la resistencia al desprendimiento del material compuesto FRCM aplicado sobre un sustrato de hormigón. Adicionalmente, los resultados fueron evaluados en función del mecanismo de falla de los especímenes. Bajo esta consideración, las muestras reforzadas con tejido no diseñado, presentaron un 100% de fallas tipo “D” (falla en la matriz cementicia antes de llegar al tejido de refuerzo); mientras que, en las muestras reforzadas con tejido dise-

ñado, el 53.33% presentó fallas tipo “D” y el 46.67% de fallas tipo “C” (falla en la interface del tejido-matriz). Los resultados obtenidos con las muestras FRCM reforzadas con el tejido no diseñado podrían atribuirse a la poca penetrabilidad entre hilos de las malla, misma responsable del desprendimiento casi inmediato del primer estrato de mortero, sin llegar a niveles de carga elevados. En el caso de las muestras FRCM reforzadas con el tejido diseñado, también se observó la falla tipo “D”, pero esta ocurrió a niveles de carga mucho mayores a los obtenidos con las muestras FRCM de tejido no diseñado, lo que significaría que la resistencia de la adherencia entre el FRCM y el sustrato de hormigón fue mayor a la resistencia a tracción de la matriz. Las fallas tipo “C” observadas en las muestras FRCM de tejido diseñado podrían haberse producido debido a que las mallas dentro de las matrices forman puntos de discontinuidad entre los estratos de mortero, llevando a la falla de las muestras en la interface de los componentes. En la tabla 3 se presentan los resultados de las pruebas de *pull-off*. Al comparar los resultados obtenidos entre las muestras FRCM de tejido diseñado y aquellas de tejido no diseñado, se puede notar que la variación de resistencias es significativa (Análisis ANOVA

Muestra	Tejido no diseñado			Tejido diseñado		
	Tipo de falla	Carga (N)	Resistencia (MPa)	Tipo de falla	Carga (N)	Resistencia (MPa)
1	D	674.172	0.343	D	3745.4	1.908
2	D	743.264	0.379	C	4645.4	2.366
3	D	524.356	0.267	D	3745.4	1.908
4	D	425.448	0.217	D	3545.4	1.806
5	D	656.172	0.334	C	3645.4	1.857
6	D	639.426	0.326	C	3365.4	1.714
7	D	659.080	0.336	C	3295.4	1.678
8	D	677.426	0.345	C	3565.4	1.816
9	D	693.080	0.353	D	3465.4	1.765
10	D	627.372	0.32	D	3485.4	1.775
11	D	659.772	0.336	C	3665.4	1.867
12	D	641.818	0.327	D	3775.4	1.923
13	D	645.218	0.329	D	3795.4	1.933
14	D	597.618	0.304	C	3515.4	1.79
15	D	618.372	0.315	D	3435.4	1.75
Media		632.173	0.322		3646.067	1.857
Desviación estándar		74.646	0.038		315.786	0.161
Coeficiente de variación (%)		11.808	11.804		8.661	8.664

Tabla 3. Resultados del ensayo de pull-off en materiales compuestos reforzados con el tejido no diseñado y el tejido diseñado

con un p valor igual a $5,516 \times 10^{-25}$). Es así que, los resultados de las muestras reforzadas con tejidos diseñados alcanzaron valores hasta 700% mayores que los obtenidos con las muestras FRCM de tejido no diseñado.

IV. CONCLUSIONES

Este artículo describe los resultados de una investigación experimental realizada para mejorar el comportamiento mecánico de un material compuesto FRCM de sisal mediante el diseño de un tejido de refuerzo que beneficie la capacidad del sistema para el fortalecimiento de elementos de hormigón armado. Sobre la base de los resultados de este estudio, se presentan a continuación las siguientes conclusiones:

- Los materiales compuestos cementicios reforzados con fibras de sisal ofrecen excelentes propiedades mecánicas a tracción y flexión.

- La arquitectura del tejido de sisal diseñado favoreció la capacidad de penetración de la matriz.

- La longitud de pegado del material compuesto no influyó en el comportamiento de las muestras de materiales FRCM reforzados con tejidos diseñado al someterlas a pruebas SLS.

- La resistencia al desprendimiento de las muestras FRCM de tejidos diseñados observada en las pruebas de *pull-off* fue hasta siete veces mayor a la resistencia de las muestras FRCM de tejidos no diseñados.

- La limitada capacidad de penetración de los tejidos de sisal no diseñados ocasionó problemas de adherencia entre la matriz y el tejido y produjo mecanismos de falla no deseables en las muestras.

- Se requieren investigaciones futuras que aborden, desde un punto de vista teórico, el comportamiento mecánico de materiales compuestos FRCM reforzados con tejidos de sisal diseñados.

V. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al personal técnico del Laboratorio de Control de Calidad de Materiales de la UNACH por toda la ayuda brindada en cada etapa de la fase experimental de este estudio.

R eferencias

1. Nanni A. Flexural Behavior and Design of RC Members Using FRP Reinforcement. *J Struct Eng.* 1993;119(11): 3344–3359.
2. Hartig J, Häußler-Combe U, Schick Tanz K. Influence of Bond Properties on The Tensile Behaviour of Textile Reinforced Concrete. *Cem Concr Compos.* 2008; 30:898–906.
3. Ombres L. Analysis of The Bond Between Fabric Reinforced Cementitious Mortar (FRCM) Strengthening Systems and Concrete. *Compos Part B Eng.* 2015; 69:418–26.
4. Carozzi FG, Colombi P, Fava G, Poggi C. A cohesive interface crack model for the matrix-textile debonding in FRCM composites. *Compos Struct.* 2016; 143:230–41.
5. Nanni A. Concrete Repair with Externally Bonded FRP Reinforcement. *Concr Int.* 1995; 17(6):22–6.
6. Trapko T. Confined Concrete Elements with PBO-FRCM Composites. *Constr Build Mater.* 2014; 73:332–8.
7. Cevallos OA, Olivito RS. Effects of Fabric Parameters on The Tensile Behaviour of Sustainable Cementitious Composites. *Compos Part B Eng.* 2014; 69:256–66.
8. Cevallos OA, Almache C, Tapia D. Desarrollo de un material compuesto sostenible con adherencia mejorada para el reforzamiento de estructuras de edificación. *Perfiles.* 2017; 18(2): In Press.
9. Menna C, Asprone D, Durante M, Zinno A, Balsamo A, Prota A. Structural Behaviour of Masonry Panels Strengthened With an Innovative Hemp Fibre Composite Grid. *Constr Build Mater.* 2015; 100:111–21.
10. M. Santiago Poveda. *Lecturas complementarias - Materiales compuestos. Mater compuestos.* 2000; 123–139, Vol 1.
11. ASTM. ASTM C642: Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete. West Conshohocken, PA; 2013.
12. ASTM. ASTM D3039/D3039M-14: Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. West Conshohocken, PA; 2014.
13. ASTM. ASTM C78/C78M-02: Historical Standard: Método de Ensayo Normalizado para la Determinación de la Resistencia a la Flexión del Concreto (Utilizando Viga Simple con Carga en los Tercios del Claro). West Conshohocken, PA; 2002.
14. ASTM. ASTM D5868-01: Standard Test Method for Lap Shear Adhesion for Fiber Reinforced Plastic (FRP) Bonding. West Conshohocken, PA; 2014.
15. Oliveira D V., Ghiassi B, Lourenço PB. Bond Behaviour and Durability of FRP Composites Applied Externally to Masonry Structures. *9th Int Mason Conf.* 2014.
16. ASTM. ASTM D4541: Standard Test Method for Pull-Off Strength of Coatings Using Portable Adhesion Testers. West Conshohocken, PA; 2017.
17. Sika. Concrete SikaFiber® Technology Fibers Improve Your Concrete And Your Structure - Fiber Reinforcement; 2017. p. 9. Disponible en: https://www.sika.com/en/solutions_products/construction-markets/sika-tunneling-mining/mining-solutions/fibers.html
18. Ruredil. Mesh, X C; 2017. p. 8. Disponible en: http://english.ruredil.it/Ruredil_Prodotti_chimici_per_edilizia/cataloghi.asp