

DESARROLLO DE UN MATERIAL COMPUESTO SOSTENIBLE CON ADHERENCIA MEJORADA PARA EL REFORZAMIENTO DE ESTRUCTURAS DE EDIFICACIÓN

Development Of A Sustainable Composite Material With Improved Adhesion For The Reinforcement Of Building Structures

¹Oscar-A. Cevallos*, ¹Carolina Almache, ¹Darío Tapia

¹Universidad 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 este estudio se desarrolló un material compuesto FRCM (*fabric reinforced cementitious matrix*) producido con tejidos de fibras de sisal y una matriz de mortero de cemento Portland. Este material se aplicó en vigas y columnas de hormigón armado a manera de un sistema de reforzamiento, y se analizaron cuatro diferentes técnicas de aplicación del material compuesto con el fin de reducir los problemas de unión que se presentan frecuentemente entre este material de refuerzo y el sustrato. Para evaluar la eficacia del sistema y su adherencia, un total de 32 especímenes de vigas y columnas fueron sometidos a pruebas de flexión a tres puntos y de compresión excéntrica, respectivamente. Los resultados muestran que los elementos de hormigón armado reforzados con los compuestos FRCM exhibieron un incremento en la resistencia de hasta 71,16 % en columnas y 71,80 % en vigas, respecto a los no reforzados. Por otro lado, al usar una técnica de aplicación del material compuesto basada en un sistema de anclajes se alcanzaron capacidades de deformación en las columnas de hasta 61,60 % y en las vigas de hasta 80,30 %, y se evitó, en todos los casos, su falla prematura ocasionada por la delaminación del sistema de refuerzo.

Palabras claves: material compuesto, fibra de sisal, propiedades mecánicas, reforzamiento estructural.

A bstract

In this study, an FRCM (*fabric reinforced cementitious matrix*) composite system produced with fabrics of sisal fibres and a Portland cement mortar matrix was developed. This material was applied to RC beams and columns as a strengthening system. Additionally, four different techniques of composite application were analysed to reduce debonding problems that frequently occur between this strengthening material and the substrate. For assessing the effectiveness of the system and its bonding capacity, a total of 32 specimens of beams and columns were subjected to three-point bending and eccentric compression tests, respectively. The results show that RC elements reinforced with the FRCM composites exhibited an increase in resistance of up to 71,16 % in columns and 71,80 % in beams, compared to non-strengthened elements. More over, when using an anchoring technique to apply the composites, deformation capacities of up to 61,60 % in the columns and up to 80,30 % in the beams were achieved, and in all cases, a premature failure caused by the delamination of the strengthening system was avoided.

Keywords: Composite material, Sisal fibre, Mechanical properties, Structural strengthening

Fecha de recepción: 21-10-2017

Fecha de aceptación: 01-12-2017

INTRODUCCIÓN

El uso de técnicas de reforzamiento y restauración estructural constituye uno de los fundamentos básicos dentro del mantenimiento de una obra civil. Actualmente, los materiales compuestos FRCM (*fabric reinforced cementitious matrix*) producidos a base de tejidos y una matriz cementicia emergen como una nueva clase de material para el reforzamiento estructural y como un potencial sustituto de los tradicionales materiales compuestos FRP (*fibre reinforced polymer*) (1). Un material compuesto es aquel que está formado por dos o más fases o constituyentes que actúan de manera conjunta y solidaria (2). En este contexto, los materiales FRCM están constituidos por una matriz de aglomerante cementicio reforzada con una malla o tejido de fibras naturales, minerales o sintéticas (1). Una de las ventajas de los materiales compuestos FRCM es su fácil uso y aplicación, que ocasiona una mínima alteración arquitectónica en las edificaciones (3). Este tipo de sistemas de reforzamiento debe garantizar un comportamiento mecánico satisfactorio y cumplir con rigurosos estándares y especificaciones para que puedan ser aceptados o recomendados en los códigos de construcción (1,4).

Generalmente, los tejidos de refuerzo usados en los materiales FRCM son producidos con fibras de carbono, vidrio resistente a los álcalis (AR) o de polímeros: polipropileno (PP), polietileno (PE) o alcohol polivinílico (PVA) (5). Sin embargo, las nuevas investigaciones se orientan hacia el uso de tejidos de fibras naturales en su producción, lo que ha contribuido a mejorar la ductilidad de los sistemas de refuerzo y a dar sostenibilidad a este tipo de materiales (6). Ecuador cuenta con diversas especies de fibras vegetales (por ejemplo: abacá, sisal —cabuya—, coco, etc.) que han sido utilizadas principalmente en la producción textil y artesanal (7); por lo que estudiar sus posibles usos en la industria de la construcción impulsaría este

sector económico-productivo. Sin embargo, uno de los principales retos que se presentan al usar tejidos de fibras naturales en sistemas FRCM es garantizar una unión adecuada entre el tejido y la matriz y entre la matriz y el sustrato (6,8). El objetivo de este trabajo fue el desarrollo de un material compuesto FRCM producido con tejidos de fibras de sisal para el reforzamiento de elementos de hormigón armado. Adicionalmente se mejoró la adherencia entre el sistema de refuerzo y el material de sustrato. Para esto, se llevaron a cabo pruebas de flexión en vigas y compresión excéntrica en columnas, y se consideraron varios métodos de aplicación del sistema compuesto sobre el hormigón.

MATERIALES Y MÉTODOS

Caracterización de los materiales

Para producir los materiales compuestos FRCM se usó una matriz de mortero de cemento Portland de la empresa Cemento Chimborazo y arena de río de la mina Penipe (ubicadas en la provincia de Chimborazo), en una dosificación de 1 : 1,10 (una parte de cemento y 1,10 partes de arena), de acuerdo a las recomendaciones de la norma INEN-1806 (9). La relación a/c (agua/cemento) usada en la preparación del mortero fue igual a 0,47; y se incorporó a la mezcla un aditivo plastificante Sika BV40, en la proporción recomendada por el fabricante. Los tejidos de fibras de sisal fueron obtenidos de los sacos de cabuya que se comercializan en los mercados de la ciudad de Riobamba para el transporte de productos agrícolas. Para combatir el envejecimiento prematuro de las fibras, las muestras de tejidos fueron impregnadas con resina poliéster Cristalan 859 producida por Andercol, siguiendo las recomendaciones presentadas por Menna et al. (10). En la tabla 1, se presentan los resultados de las propiedades físicas y mecánicas de los tejidos de sisal estudiados.

Las propiedades mecánicas de las muestras de materiales compuestos FRCM se estudiaron mediante pruebas de tracción y de flexión, de acuerdo a procedimientos descritos por Cevallos (11). Las muestras se elaboraron usando una técnica de moldeo a mano y con tres capas (*layers*) de tejidos de sisal impregnados con resina poliéster, mismos que se orientaron con sus hilos longitudinales en concordancia con el sentido logitudinal de las muestras FRCM. En este estudio, se decidió el uso de tres capas de tejido de refuerzo en función de los altos niveles de resistencia a tracción que se desean alcanzar con el sistema de reforzamiento. Las muestras de materiales compuestos

Propiedades	Unidad	Resultado promedio	Norma	Número de probetas ensayadas
Densidad específica fibra	g/cm ³	1,441	ASTM-D792-0	10
Masa por unidad de área	g/cm ³	394,2	ISO:3374	10
Densidad lineal –TEX	g/1000m	763,33	ASTM-D1577	10
Porcentaje de absorción	%	54,231	ISO:3344	10
Ensayo de tracción (tejidos impregnados)				
Esfuerzo máximo	MPa	349,68	ISO:4606	10
Carga máxima	N	2222,811		
Deformación unitaria máxima	mm/mm	0,05		
Módulo de elasticidad	MPa	8075,735		
Ensayo de tracción (tejidos no impregnados)				
Esfuerzo máximo	MPa	304,659	ISO:4606	10
Carga máxima	N	1936,626		
Deformación unitaria máxima	mm/mm	0,044		
Módulo de elasticidad	MPa	8739,921		

Tabla 1. Propiedades físicas y mecánicas de los tejidos de sisal

se sometieron a condiciones de humedad adecuadas para un curado homogéneo del mortero por un período de 28 días. Los ensayos se realizaron usando una máquina Multi-Propósito de 50 kN, con una velocidad de carga de 0,5 mm/min y con una precarga de 10 N. El desempeño mecánico de las muestras fue el típico observado en este tipo de materiales, en el cual se pueden apreciar claramente diferentes etapas que describen su comportamiento, tal como lo explica Martínez (3) y Olivito et al. (12). En la tabla 2 se presentan los resultados de la caracterización de los materiales compuestos FRCM de sisal.

Muestras de vigas y columnas

Los elementos de hormigón armado fueron construidos con arena de río de la mina Penipe y agregado grueso de la mina Politécnica (minas ubicadas en la provincia de Chimborazo), en una dosificación de 1 : 1,6: 2,6 (cemento : agregado fino : agregado grueso), con una relación a/c de 0,70. El asentamiento de la mezcla de hormigón fresco fue de 7 cm, determinado de acuerdo a los procedimientos

Propiedades	Unidad	Resultado promedio	Norma	Número de probetas ensayadas
Densidad en estado endurecido	g/cm ³	1,83	INEN:198	5
Absorción de mortero en estado endurecido (28 días)	%	12,32	ASTM-C642	5
Ensayo de tracción				
Resistencia a tracción	MPa	7,63	-	5
Carga máxima	N	6104,89		
Deformación unitaria máxima	mm/mm	0,047		
Módulo de elasticidad	MPa	581,01		
Ensayo de tracción (tejidos no impregnados)				
Resistencia a flexión	MPa		-	5
Carga máxima	N			
Deformación unitaria máxima	mm/mm			
Deflexión máxima	mm			
Módulo de elasticidad	MPa -			

Tabla 2: Propiedades físicas y mecánicas del material compuesto FRCM de sisal

descritos en la norma INEN 1578 (13). Se analizaron un total de 32 elementos de hormigón armado (16 vigas de sección 13 cm x 17 cm y una longitud de 1,50 m y 16 columnas de sección variable de 10 cm x 10 cm y una longitud de 0,85 m) (ver figuras 1a y 1b).

Con el propósito de mejorar la adherencia del sistema de refuerzo, en este estudio se han propuesto cuatro diferentes métodos de aplicación del material FRCM (ver tabla 3). El método que se apunta como “Rugoso” se consiguió mediante la preparación de la superficie del hormigón usando un disco abrasivo, y de esta manera, se produjeron surcos e irregularidades en el sustrato, las que se estimaron cualitativamente al tacto. El método que se denota como “Liso” no consideró la alteración de la superficie del hormigón, y en este caso, solo se limpió la superficie del sustrato para retirar objetos y/o sustancias extrañas. En el método que se denomina “Primer” se aplicó un polímero termoestable sobre la superficie del sustrato. En el sistema con anclajes se usaron placas metálicas y pernos de expansión, que permitieron sujetar y presionar el sistema FRCM contra el sustrato. Los anclajes se ubicaron en los extremos y zonas centrales de los elementos (zonas de concentración de esfuerzos de flexo-tracción).

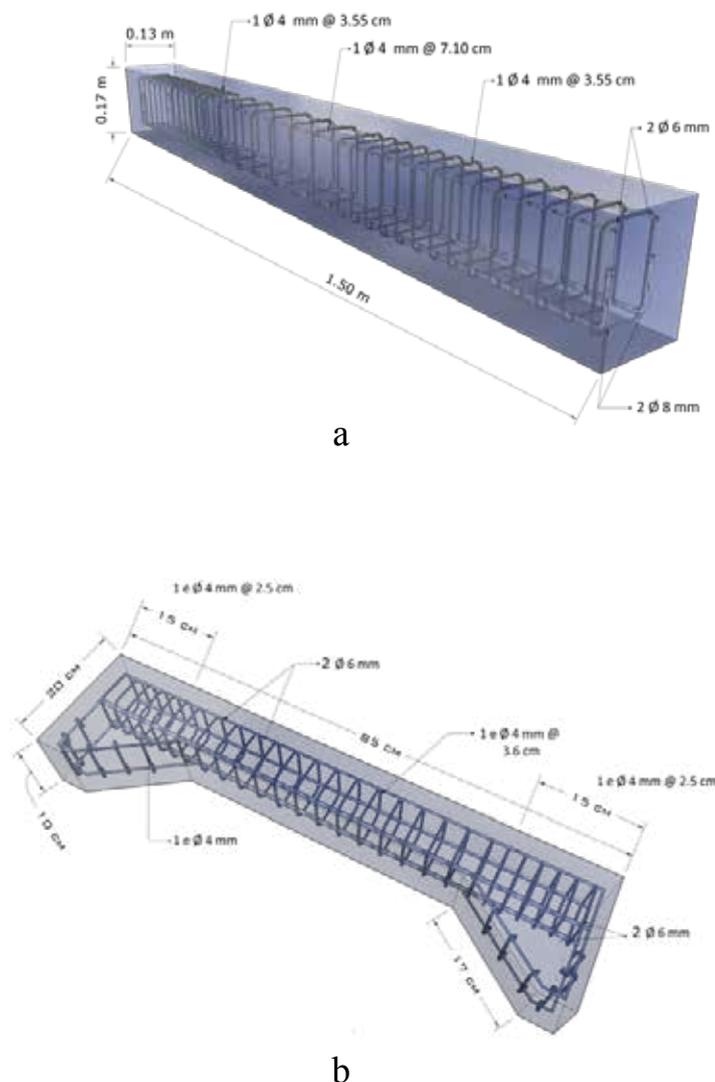


Figura 1. a) Vigas de hormigón armado, y b) Columnas de hormigón armado

Métodos de aplicación	Codificación	Número de vigas ensayadas	Número de columnas ensayadas
Sin Refuerzo FRCM	SR	3 (de control)	3 (de control)
Rugoso + FRCM	R+FRCM	3	3
Liso + Primer + FRCM	L+P+FRCM	3	3
Rugoso + Primer+ FRCM	R+P+FRCM	3	3
Rugoso + Primer + Anclajes + FRCM	A+FRCM	4	4

Tabla 3. Métodos de aplicación del sistema de refuerzo FRCM

Ensayos de flexión y compresión excéntrica

Con el propósito de simular problemas estructurales en vigas y columnas, los

elementos de hormigón armado se construyeron con una armadura de acero insuficiente; esto fue verificado de acuerdo a métodos de diseño establecidos en el código ACI-318-08S (14) y descritos por McCormac (15). En la figura 1, se presentan los detalles del acero de refuerzo co-

locado en los elementos de hormigón armado. Para evaluar el comportamiento estructural de los elementos, las vigas se sometieron a cargas de flexión pura, mediante la aplicación de cargas puntuales en los tercios medios del elemento, y las columnas se sometieron a cargas de compresión excéntrica que produjeron pandeo por flexión. El refuerzo FRCM se aplicó en la cara de la viga sometida a tracción (ver figura 2a) y en la cara externa de las columnas que resiste el momento flector (ver figura 2b). De acuerdo con la teoría descrita por Como (16), la carga de compresión fue aplicada considerando un caso de fuerte excentricidad (excentricidad mayor al 70 %). Tanto los ensayos de flexión como los de compresión se llevaron a cabo en un marco de pruebas de 50 toneladas, y se usaron diales comparadores para medir las deformaciones producidas por los esfuerzos de compresión, tracción y flexión, para el caso de las vigas, y las deformaciones producidas por los esfuerzos de compresión y efectos de pandeo y curvatura, para el caso de las columnas (ver figura 2).

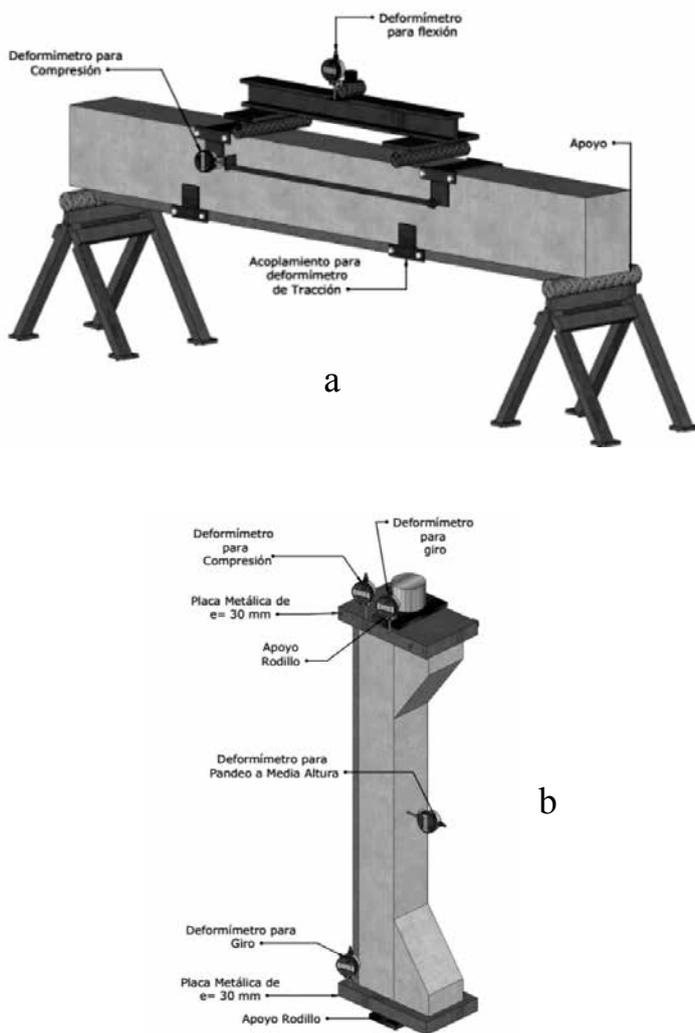


Figura 2. Configuración de pruebas y reforzamiento: a) Pruebas de flexión a tres puntos en vigas, y b) Pruebas de compresión excéntrica en columnas

RESULTADOS

Vigas sometidas a cargas de flexión

Las vigas reforzadas fueron capaces de soportar deformaciones grandes que ocasionaron múltiples grietas en el hormigón desde la zona de tracción hacia la zona de compresión. Los diales de deformación ubicados en el extremo inferior de los elementos permitieron medir las deformaciones a tracción que se produjeron en el material FRCM, y estos valores se compararon con las deformaciones producidas en el hormigón en la zona de compresión (extremo superior de las vigas). El comportamiento de los elementos se analizó en términos de curvas de carga vs. defor-

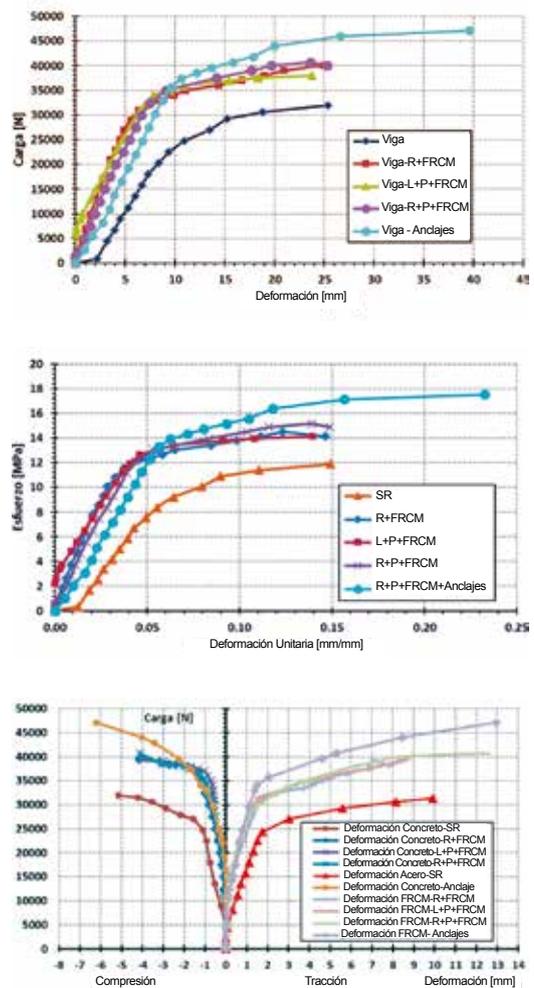


Figura 3: Comportamiento de las vigas ensayadas a flexión: a) Curvas de carga vs. deflexión al centro de la viga, b) Curvas de esfuerzo vs. deformación unitaria y c) Curvas de carga vs. deformaciones a compresión y a tracción

Tipo de sistema	Carga Max. (N)	Esfuerzo (MPa)	Def. unitaria max. (mm/mm)	Ductilidad de deformación (mm/mm)	Reserva de la energía de deformación (J/J)	Energía absorbida (J)	Energía de fractura o tenacidad (J/m ²)
Sin refuerzo	31 950	12	0,145	2,9	7,1	550,4	24 904,5
Rugoso + FRCCM	40 433,3	15,1	0,154	4,8	9,2	836,5	37 849,8
Liso + Primer + FRCCM	38 410	14,3	0,143	3,8	7,3	737,6	33 376,6
Rugoso + Primer + FRCCM	41 100	15,3	0,142	3,4	5,9	780,8	35 328,1
Rugoso + Primer + Anclajes + FRCCM	45 897,5	17,1	0,233	4,5	11,1	1592,5	72 059,7

Tabla 4: Resultados obtenidos en vigas sometidas a cargas de flexión

mación y curvas de esfuerzo vs. deformación unitaria (ver figura 3). En la tabla 4, se listan los resultados de las pruebas en vigas sin refuerzo y se comparan con los resultados de las vigas reforzadas con cada método de aplicación del sistema FRCCM.

Columnas sometidas a cargas de compresión excéntrica

Al realizar este tipo de prueba, se obtuvieron como resultado deformaciones por pandeo en las columnas; con lo que fue posible evaluar la adherencia entre el sistema de refrozamiento y el sustrato de hormigón. Los momentos flectores producidos en las columnas se localizaron en la cara externa del elemento, tal como se observa en las figuras 4a y 4b. Los resultados obtenidos en las pruebas de compresión excéntrica se ilustran en la figura 5 y se resumen en la tabla 5.

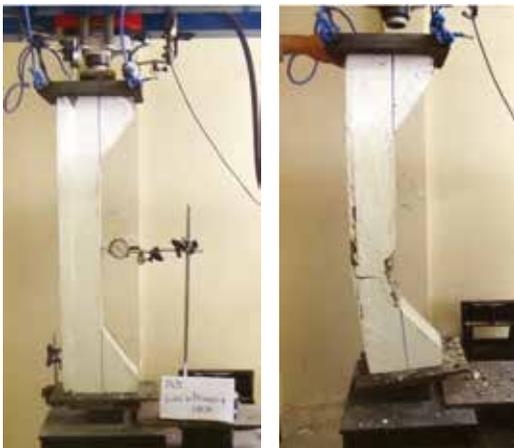


Figura 4. Prueba de compresión excéntrica en columnas: a) elemento durante el ensayo, y b) falla del espécimen

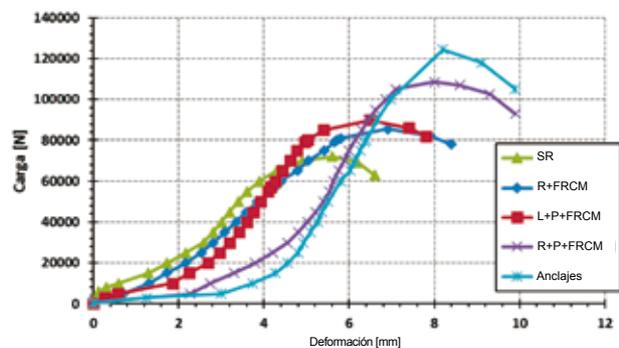
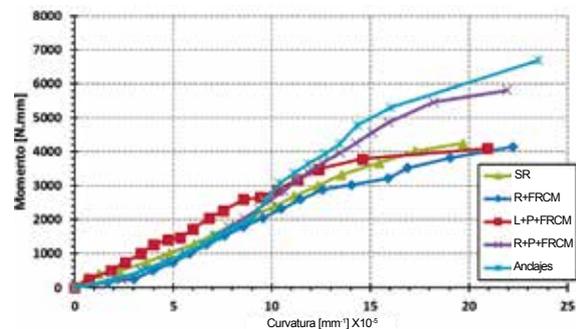
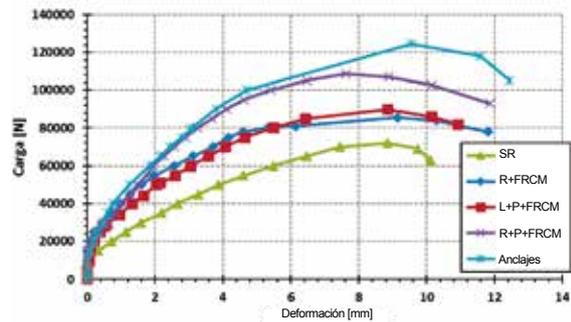


Figura 5. Comportamiento de las columnas sometidas a cargas de compresión excéntrica: a) Curvas de carga vs. deformación por pandeo, b) Curvas de momento vs. curvatura, y c) Curvas de carga vs. deformación longitudinal

Tipo de sistema	Carga max. (N)	Deformación a compresión (mm)	Deformación por pandeo (MPa)	Momento (kN·mm)	Curvatura (mm-1x10-5)	Ductilidad de deformación (mm/mm)	Reserva de la energía de deformación (J/J)	Energía absorbida (J)
Sin refuerzo	78 713,3	6,9	8,7	4560,6	18,9	1,37	1,36	330,7
Rugoso + FRCM	84 166,7	7,7	8,5	4636,4	22,9	1,46	1,78	413,7
Liso + Primer + FRCM	88 066,7	8	8,7	4574,9	22,5	1,43	1,51	378,5
Rugoso + Primer + FRCM	98 690	8,6	8,9	5623,9	23	1,39	1,59	433,3
Rugoso + Primer + Anclajes + FRCM	112 025	8,5	9,9	6273,9	24,1	1,47	2,24	480,7

Tabla 5. Resultados del comportamiento mecánico de las columnas sometidas a cargas de compresión excéntrica

DISCUSIÓN

Al analizar las curvas de carga vs. deformación y los resultados reportados en las tablas 4 y 5, se puede notar que el uso de un sistema de reforzamiento FRCM de sisal incrementa la resistencia en 71,16 %, en las columnas, y en 71,80 %, en las vigas; asimismo, la capacidad de deformación en las columnas se incrementó en un 61.60% y en un 80,30 % en las vigas. Por otro lado, al comparar la adherencia conseguida por cada uno de los métodos de aplicación del material FRCM, el sistema con anclajes se destacó frente a los otros métodos, proporcionando mayor resistencia, ductilidad y rigidez en los elementos. Esto podría atribuirse a que los anclajes mejoraron la capacidad de propagación de las grietas en los elementos y en el material FRCM, lo que permitió disipar la energía acumulada y evitar la falla prematura de los elementos. Al usar un sistema con anclajes, el material compuesto permaneció adherido a los elementos sin que se produzcan problemas de desprendimiento o *debonding* del material.

En la tabla 5, se muestran los índices de ductilidad de deformación de las columnas; en este caso, todos los sistemas de reforzamiento FRCM obtuvieron resultados muy similares. Esto podría atribuirse a la fuerte excentricidad considerada en este estudio, misma que produjo una elevada acumulación de las tensiones internas en las columnas durante las pruebas. Las elevadas tensiones internas ocasionaron la falla de los elementos a niveles muy bajos de deformación y una vez que fue superada la carga máxima; este efecto no se manifestó durante las pruebas en las vigas reforzadas, mismas que exhibieron una amplia zona plástica en las curvas de esfuerzo vs. deformación unitaria (ver figura 3b).

Por otro lado, en las columnas reforzadas con los sistemas Rugoso+FRCM y Liso+Primer+FRCM, los diagramas de momento vs. curvatura fueron muy similares a los obteni-

dos por los elementos sin refuerzo. Solo las columnas reforzadas con un sistema a base de anclajes exhibieron una evidente mejora en su capacidad de momento-curvatura; estopodría atribuirse a que el sistema FRCM se mantuvo adherido durante toda la prueba y, de esta manera, los elementos soportaron mayores deformaciones transversales (pandeo) antes de su falla. Asimismo, los momentos de segundo orden, producidos por la carga excéntrica y responsables del fallo de las muestras de columnas, fueron, en el caso del sistema Rugoso + Primer + FRCM, hasta un 18 % mayores que los registrados en las muestras de control (SR) y las reforzadas con los sistemas Rugoso+FRCM y Liso+Primer+FRCM. Las muestras reforzadas con materiales compuestos aplicados con un sistema de anclajes fueron capaces de soportar momentos 27,31 % mayores que los máximos registrados en las pruebas de elementos sin refuerzo.

CONCLUSIONES

Los resultados permiten concluir que los tejidos de sisal podrían ser usados en sistemas FRCM con aplicaciones de reforzamiento y rehabilitación de elementos de hormigón armado. Las muestras de vigas y columnas reforzadas con los materiales FRCM alcanzaron mayores resistencias y capacidades de deformación que las muestras de control (sin refuerzo).

Los métodos de aplicación Rugoso +FRCM, Liso+Primer+FRCM y Rugoso+Primer+FRCM demostraron tener una similar capacidad de adherencia entre el material compuesto y el sustrato. El sistema de reforzamiento Rugoso + Primer + Anclajes + FRCM obtuvo los mejores resultados de resistencia y deformación en los elementos. Al un sistema de reforzamiento con anclajes no se manifestaron problemas de adherencia entre el refuerzo y el sustrato, lo que permitió aprovechar toda la capacidad de reforzamiento de los tejidos de fibras de sisal. Los resultados

alcanzados en este estudio confirman que los materiales compuestos FRCM producidos con tejidos de fibras de sisal, obtenidos de sacos de cabuya, poseen un gran potencial en aplicaciones dentro de la industria de la construcción; sin embargo, se deben llevar a cabo adicionales estudios que involucren, entre otras cosas, la mejora de la durabilidad de las fibras naturales en contacto con matrices de cemento Portland.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses con la ejecución de este estudio.

Referencias

1. ACI Committee 549.4R-13 Guide to Design and Construction of Externally Bonded Fabric-Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) Systems for Repair and Strengthening Concrete and Masonry Structures. Farmington (MI): ACI; 2013.
2. Brandt AM. Fibre Reinforced Cement-Based (FRC) Composites after over 40 Years of Development in Building and Civil Engineering. *Compos Struct.* 2008; 86: 3-9.
3. Martínez F. Guía para el diseño de refuerzos de elementos de hormigón armado mediante material compuesto por mallas de fibras minerales embebidas en matriz cementicia (FRCM). [tesis] Santiago (CL): Universidad de Chile; 2016.
4. Arboleda, D. Fabric Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) Composites for Infrastructure Strengthening and Rehabilitation: Characterization Methods [tesis]. Miami (FL): University of Miami; 2014.
5. Pickering, K. (ed.) Properties and Performance of Natural-Fibre Composites. Vol 2. Sawton (UK); Woodhead Publishing; 2008.
6. Cevallos OA, Olivito RS, Codispoti R, Ombres, L. Flax and Polyparaphenylene Benzobisoxazole Cementitious Composites for the Strengthening of Masonry Elements Subjected to Eccentric Loading. *Compos B Eng.* 2015; 71: 82-95.
7. Gallegos, S. Obtención de un material compuesto de matriz elastomérica y fibra de coco [tesis]. Quito: Escuela Politécnica Nacional; 2011.
8. Dittenber DB, GangaRao HVS. Critical Review of Recent Publications on Use of Natural Composites in Infrastructure. *Compos Part Appl Sci Manuf.* 2012; 43(8):1419-29.
9. INEN. Cemento de mampostería. Requisitos. 2.^a rev. Quito: INEN; 2015.
10. Menna C, Aspronea D, Durantec 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.
11. Cevallos O. Sustainable Fabric-Reinforced Cementitious Composites for the Strengthening of Masonry Elements. [tesis de doctorado]. Arrabat (IT): University of Calabria; 2014.
12. Olivito R, Cevallos O, Carrozzini A. Development of Durable Cementitious Composites Using Sisal and Flax Fabrics for Reinforcement of Masonry Structures. *Mater Des* 2014; 57: 258-68.
13. INEN. 1578. Determinación del asentamiento en hormigones de cemento hidráulico. Quito: INEN; 2010.
14. ACI Committee 318-08S. Requisitos de reglamento para concreto estructural y comentario. Farmington (MI): ACI; 2008.
15. McCormac J, Brown R. Diseño de estructuras de hormigón armado. 8.a ed. México: Alfaomega; 2011.
16. Como M. Statics of Historic Masonry Constructions. Berlín: Springer; 2013.