

Compuestos cementantes fibroreforzados de bajo impacto ambiental comportamiento mecánico

C. A. Juárez-Alvarado¹, J. R. González López*¹, J. M. Mendoza-Rangel¹, A. A. Zaldivar Cadena¹

* Autor de Contacto: rhodio@hotmail.com

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v7i2.189>

Recepción: 16/03/2017 | Aceptación: 27/05/2017 | Publicación: 31/05/2017

RESUMEN

El presente texto expone los resultados del estudio del comportamiento mecánico de compuestos cementantes fibroreforzados utilizando consumos moderados y altos de ceniza volante (CV) en sustitución de volúmenes determinados de cemento (20%, 40% y 60%), con el objetivo de producir elementos constructivos primarios de bajo impacto ambiental. La experimentación realizada indicó que el esfuerzo a compresión, el módulo de elasticidad y la resistencia a flexión post agrietamiento, para los especímenes con relación $a/mc = 0.60$ y con 20% de sustitución con CV registraron incrementos en sus valores con respecto al control para ambas edades. No se evidenció deterioro en las mallas de fibras naturales por la exposición al medio alcalino. Los resultados hasta ahora obtenidos indican que es viable el uso de estos compuestos cementantes fibroreforzados como alternativa de construcción primaria de bajo impacto ambiental.

Palabras clave: fibra; cementicios; compuestos; ceniza volante; material de impacto.

Citado como: C. A. Juárez-Alvarado, J. R. González López, J. M. Mendoza-Rangel, A. A. Zaldivar Cadena (2017). “*Compuestos cementantes fibroreforzados de bajo impacto ambiental comportamiento mecánico*”, Revista ALCONPAT, 7 (2), pp. 135-147, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v7i2.189>

¹Universidad Autónoma de Nuevo León, México.

Información Legal

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org

Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

Queda totalmente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la ALCONPAT Internacional A.C.

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el primer número del año 2018 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del tercer número del año 2017.

Low impact fiber reinforced material composite

ABSTRACT

This article investigates the mechanical behavior of fiber-reinforced cementitious composites using moderate to high contents of fly ash (FA) as a replacement for cement; the goal is to create primary building elements with low environmental impact. The experimental results showed that the compressive strength, modulus of elasticity, and post-cracking flexural strength for specimens with $w/cm = 0.60$ and 20% FA substitution increased with respect to the control. Moreover, the specimens with high FA substitutions had significantly lower mechanical strength values and elastic modulus values. The results indicate that it is feasible to use fiber-reinforced concrete composites as an alternative for low-environmental impact primary construction.

Keywords: fiber; cementitious; composites; fly ash, impact material.

Compostos cimentantes reforçados com fibra e de baixo impacto ambiental

RESUMO

Este artigo apresenta algumas importantes propriedades mecânicas obtidas numa pesquisa de materiais cimentantes reforçados com fibras, nos quais foram utilizados consumos moderados e altos de cinza volante (fly ash, FA), em substituição ao cimento Portland (20%, 40% e 60%), com o objetivo de produzir elementos primários de baixo impacto ambiental. Os resultados experimentais mostraram que a resistência à compressão, o módulo de elasticidade e a resistência à flexão, aumentaram em relação ao de referência, para as misturas de $a/cm = 0,60$ e 20% de substituição. Para os demais casos de substituição foram encontradas resistências e módulo mais baixos que o de referência. Os resultados mostraram que pode ser viável o uso desses materiais cimentantes reforçados com fibras, como alternativa de construção primária de baixo impacto ambiental.

Palabras chave: fibra; cimento; compósitos; cinzas volantes; material de impacto.

1. INTRODUCCIÓN

La industria de la construcción cada vez enfoca más sus proyectos hacia un cambio de compromisos y responsabilidades en la forma en que se construye. La investigación de materiales de construcción se ha intensificado en la atención a estas ideas, por lo que muchos autores se cuestionan sobre el significado de la edificación sostenible, entendida como aquella que considera el impacto ambiental de todos los procesos implicados en una construcción, desde la selección de los materiales hasta la colocación final de los residuos de la misma en su disposición final, y que de manera integral generen el menor impacto ambiental posible.

En este contexto se debe considerar también la ubicación de las edificaciones y su huella en el entorno, el consumo energético de la misma, así como el posible reciclaje de los residuos después de demolición de la edificación cuando haya cumplido su función o ciclo de vida (Alfonso, 2003; Gundes 2016). Tomando en cuenta esta definición, se deberán considerar todos los criterios para un diseño sostenible, que implica un análisis sobre la ubicación, proceso de construcción, uso y demolición, con miras a minimizar aquellas circunstancias que podrían causar deterioro al medio natural en cada una de tales etapas.

El desarrollo de edificaciones es una demanda social y con la implementación de nuevos materiales y procedimientos de construcción que tengan como premisa tanto la economía como el bajo impacto ambiental, se podría pensar en una posible solución a la inminente demanda de habitabilidad básica para los países de economías emergentes. Considerando algunas tasas

aproximadas de crecimiento, como las reportadas en el informe de la Organización de las Naciones Unidas 2013 (Population Reference Bureau, 2014), se espera que en el año 2050 el mundo tendrá 9,600 millones de habitantes, es decir 33% más de los aproximados 7,200 millones de hoy en día. Además, los países pobres o en vías de desarrollo serán los que aumentarán más su población (Population Reference Bureau, 2014).

Este hecho lleva a suponer que anualmente se deberá ofrecer vivienda para alojar a 65 millones de seres humanos, lo que implica la construcción de unos 15 millones de nuevos alojamientos. Esto significa que harán falta 600 millones de metros cuadrados (a razón de 40 m² por familia) lo cual equivale a producir y utilizar aproximadamente unos 400 millones de metros cúbicos o unos mil millones de toneladas anuales de materiales, componentes y subsistemas, sólo para atender la construcción de nuevas viviendas (Salas & Oteiza, 2008).

Aunado a esto, se debe considerar también, el incremento de emisiones de CO₂, consumo energético masivo, daños al paisaje natural, la explotación de recursos naturales, problemas de durabilidad y otros tantos factores para la producción de materiales y construcción de estos complejos habitacionales.

Por estos motivos la propuesta de desarrollar materiales de construcción alternativos a los que se emplean de manera convencional para cuya producción se genere un menor impacto ambiental y con bajos costos es una solución real a las condiciones mundiales de habitabilidad.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 Materiales de bajo impacto ambiental

El uso y reutilización de materias primas alternativas se ha generalizado alrededor del mundo con la finalidad de obtener materiales de bajo impacto ambiental. Tal es el caso de Uruguay donde se ha empleado un sistema de construcción utilizando bloques de Suelo-Cemento fabricados con cargas de compresión elevadas a fin de conferirles una alta resistencia, excelente aislamiento térmico y durabilidad (Patrone, García & Nigro, 2005). En Venezuela, los cimientos son de piedra combinados con tierra, techumbres de madera y para los muros pacas de paja recubiertas con mezclas de cal o tierra para protegerlas de los agentes externos (Patrone, García & Nigro, 2005). En Cuba,

se determinaron las propiedades físicas, mecánicas y de durabilidad de un concreto con adiciones inertes y activas, fabricados con 25% y 100% de agregado grueso reciclado. Los resultados muestran que el concreto fabricado con agregado reciclado con adiciones activas mejora la durabilidad de un concreto convencional (Pavo, Etxeberria & Martínez, 2011).

En Chile, se han diseñado casas en donde los cimientos son a base de piedra con una estructura de tronco y brea colocada dentro de mallas metálicas y revestidas con barro (Patrone, García & Nigro, 2005). En México, la utilización de suelos, cal o cemento Portland como estabilizante, mucilago de nopal y agua como mezcladores, han permitido fabricar bloques de tierra comprimida (BTC) que se utilizan en diversos tipos de vivienda para reducir los costos y emisiones de CO₂ (Roux 2010). Asimismo, se han llevado a cabo estudios de materiales cementantes de bajo impacto ambiental que han utilizado fibras que permiten reducir el uso del acero de refuerzo estructural. De manera general, las fibras pueden ser clasificadas según su origen en vegetal (provenientes de tallos o de hojas), minerales (asbesto) y producidas por el hombre (acero, vidrio y poliméricas). Se han realizado investigaciones sobre el uso de fibras vegetales como una alternativa a las fibras minerales para reforzar materiales cementantes (Juárez, Valdez & Durán, 2004).

Estas fibras se pueden considerar como un “material verde” o amigable con el medio ambiente, y son una opción viable para los años venideros. Además, se encuentran distribuidas en todo el mundo por lo que su uso como material de refuerzo en una matriz cementante es una alternativa económica y de bajo impacto ambiental para la construcción.

Para conocer la factibilidad de las fibras como un material de refuerzo es necesario un estudio de sus propiedades y morfología (Pacheco-Torgal, Jalali, 2011; Jarabo, Monte, Blanco & Tijero, 2012). Se han hecho muchas aportaciones con el paso del tiempo en la utilización de distintas fibras naturales tales como las provenientes del coco, sisal, bagazo de caña, bambú, palma, yute y madera debido a su abundancia en ciertas regiones del mundo (Pacheco-Torgal, Jalali, 2011). En años recientes ha ido creciendo el interés por la utilización de estas fibras como refuerzo en materiales cementantes. Algunas investigaciones han demostrado que empleadas como refuerzo presentan propiedades comparables y competitivas a los concretos reforzados convencionales (Azis & Lee 1984; ACI, 1998).

Adicionalmente al uso de la fibra vegetal como sustituto del acero de refuerzo, se puede reducir el impacto ambiental de compuestos cementantes al agregar materiales de desecho industrial como sustitutos del cemento, tal es el caso de la ceniza volante. El beneficio de esta sustitución radica en la reducción del consumo del cemento, principal componente del concreto, pero que presenta el inconveniente ecológico de liberar una importante cantidad de CO₂ y otros gases nocivos al ambiente durante su fabricación (USGS, 2015). Además, el uso de cenizas volantes como sustituto de cierta cantidad de cemento en el concreto está justificado por dos razones adicionales: el ahorro económico que supone la reducción del cemento empleado y los cambios microestructurales motivados por la sustitución. Sobre este segundo punto existe consenso en considerar que las cenizas generan un concreto más denso y una reducción del tamaño medio del poro.

2.2 Aspectos de durabilidad.

Otro aspecto clave a considerar en los materiales de bajo impacto ambiental se vincula con su durabilidad en condiciones de servicio. Se ha visto que la sustitución parcial del cemento portland con ceniza volante en cantidades del orden de 50% al 60% conduce a tener materiales cementantes con mejor desempeño de durabilidad (Malhotra 2001). Sin embargo, es necesario tomar en cuenta que el uso de las fibras naturales dentro de la matriz cementante presenta una serie de problemas relacionados con su naturaleza orgánica. Diversos estudios han encontrado que existe una degradación de las fibras naturales cuando están inmersas en la matriz cementante debido a que ambientes de elevada alcalinidad de la matriz disuelven los compuestos primarios de las fibras como son la lignina y la hemicelulosa y en consecuencia se debilita su microestructura (Stancato, Burke & Beraldo, 2005; Sedan, Pagnoux, Smith & Chotard, 2008; Kriker, Bali, Debicki, Bouziane & Chabannet, 2008). Otro factor a considerar es la elevada absorción que presentan las fibras naturales (Savastano, Warden y Coutts 2005). Para reducir este fenómeno se ha reportado el uso de sustancias orgánicas para recubrirlas, limitando el porcentaje de absorción de la fibra hasta un 4% (Alawar, Hamed y Al-Kaabi 2009; Bilba y Arsene 2008); otras alternativas están en el uso de la hornificación (Claramunt, Ardanuy, García-Hortal & Filho, 2011).

Así como la modificación de la alcalinidad de la matriz utilizando cementos mezclados adicionando puzolanas tales como ceniza volante, cascarilla de arroz y bagazo de caña (Agopyan et al. 2005; De Gutiérrez, Díaz y Delvasto 2005; Savastano, Warden y Coutts 2003). Sin embargo, se ha encontrado que el uso de estos materiales cementantes suplementarios no garantiza necesariamente la no degradación de las fibras, debido a que los diferentes compuestos en las mismas no reducen sustancialmente la alcalinidad de la matriz cementante (Mohr, Biernacki y Kurtis 2007; John 2005; Tonoli et al. 2010). Bajo esta perspectiva, el objetivo de la investigación que se documenta en el presente artículo consiste en estudiar el comportamiento mecánico de compuestos cementantes de bajo impacto ambiental que usen como refuerzo fibras vegetales embebidas en la matriz binaria utilizando diferentes porcentajes de ceniza volante en sustitución del cemento.

3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

3.1 Materiales.

En este proyecto de investigación se utilizó fibra vegetal de la familia de la agave conocida como “Lechuguilla” con la cual se formó una malla del tipo textil. Además, se empleó cemento Portland CPC 30R, Ceniza Volante (CV) y agregados calizos de tamaños máximos de 10 mm para el grueso y 4.75 mm para el fino. La CV es una puzolana artificial, que proviene de la planta de Río Escondido, ubicada en Piedras Negras, Coahuila. La composición química de la CV y el cemento se muestra en la Tabla 1. La CV fue utilizada en porcentajes de 20, 40 y 60% en sustitución del cemento para dos diferentes relaciones agua/material cementante (*a/mc*) de 0.60 y 0.70. El consumo de cemento utilizado fue de 350, 280, 210 y 140 kg/m³ para 0, 20, 40 y 60% de CV en sustitución respectivamente.

Tabla 1. Composición química de los materiales cementantes (% en masa).

Material	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O
Ceniza Volante	63.93	24.32	4.29	2.34	0.78	0.20
Cemento Portland	17.55	4.7	1.77	64.74	1.23	0.37

3.2 Fabricación de la malla

La malla tipo textil a base de fibra vegetal, tiene dimensiones de 1100 x 600 mm y se conformó a manera de retícula como observa en la Figura 1. La unión de los tramos longitudinales y transversales para formar la malla se realizó utilizando un adhesivo polimérico aplicado en sus puntos de contacto, el cual se dejó secar por 24 h a temperatura de 23°C, en ambiente de laboratorio. Para evitar la afectación de la lignina –componente primario de la fibra vegetal– contra el medio alcalino propio de la matriz cementante, se impregnó con una sustancia a base de parafina (Malhotra, 2001).

La malla fue introducida en un horno a 100°C durante 24 h para secar la humedad ambiente presente en las fibras y así tener la condición seca. Después, se fundió la parafina a 67 °C aproximadamente. Como se observa en la Figura 1, la malla fue impregnada durante 5 min, posteriormente se dejó secar a temperatura ambiente durante 30 min.

Además de la protección contra el medio alcalino de la matriz cementante, el recubrimiento le permitirá a la fibra reducir de manera importante la absorción de humedad. Lo anterior incrementa su durabilidad dentro de la matriz cementante y por consiguiente, se conserva la resistencia del material compuesto.

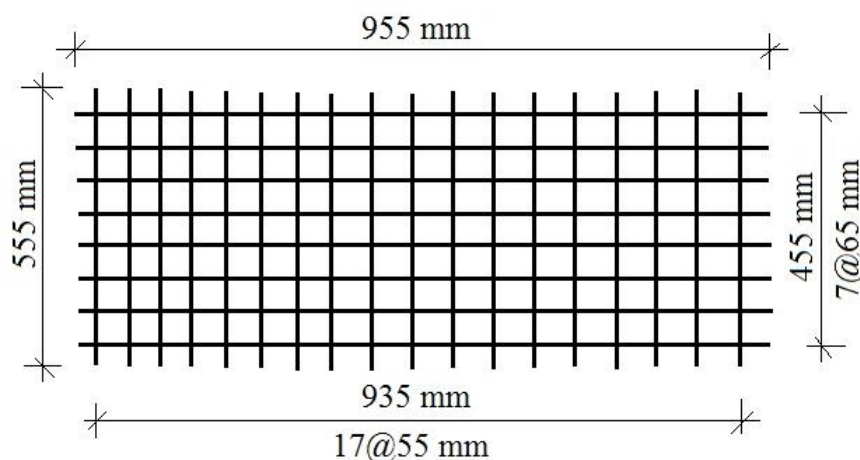




Figura 1. Arreglo e impregnación de la malla de fibra natural.

3.3 Mezclado, colado y curado

Se fabricaron por duplicado 32 paneles de 960 x 560 x 50 mm reforzados con malla de fibra natural y por triplicado 48 cilindros de concreto de 100 mm de diámetro y 200 mm de altura. El proporcionamiento de las mezclas de concreto utilizadas se indica en la Tabla 2. Se utilizó una revoladora con una capacidad de 100 L. El mezclado del concreto fue de acuerdo a la norma ASTM C192 y se realizó la prueba de revenimiento según la norma ASTM C143. El procedimiento de colado y curado se desarrolló de acuerdo a la norma ASTM C31.

Tabla 2. Proporcionamiento de mezclas de concreto (kg/m³)

a/mc	0.60				0.70			
	0%	20%	40%	60%	0%	20%	40%	60%
Materiales								
Agua	229	229	229	229	263	263	263	263
Cemento	350	280	210	140	350	280	210	140
CV	0	70	140	210	0	70	140	210
Grueso	705	698	690	682	667	659	652	644
Fino	1055	1043	1032	1020	998	986	975	963
Revenimiento (cm)	9.0	10.5	11.5	13.0	23.5	24.5	25.5	26.5

El colado de los paneles fibroreforzados se realizó en dos capas de aproximadamente 25 mm cada una. La primera capa se compactó aplicando 15 golpes con un mazo de goma en las caras laterales de la cimbra de madera, después se colocó la malla manualmente en la mitad del espesor del panel, posteriormente, se compactó en una mesa de vibrado por un período de 1 minuto. Para la segunda capa se llevó a cabo el mismo procedimiento de colado y compactado de la primera, la malla se mantuvo en la parte media del espesor y se finalizó con el enrase de la cara superficial.

3.4 Ensayes mecánicos

Los ensayos mecánicos de los paneles fibroreforzados y de los cilindros de concreto se realizaron a dos edades 2 y 4 meses, para cada relación a/mc. Los cilindros de concreto se ensayaron a compresión de acuerdo a la norma ASTM C39 y se obtuvo su módulo de elasticidad de acuerdo a la norma ASTM C469 a las edades establecidas y para los diferentes porcentajes de CV. Del mismo modo, los paneles de concreto fibroreforzados fueron ensayados a flexión aplicando una carga a los tercios del panel, el claro libre entre apoyos fue de 900 mm, la deformación fue medida al centro del claro por medio de un transductor de desplazamiento (LVDT), los datos fueron capturados en un adquisidor de datos. En la Figura 2 se muestra la habilitación de la prueba a flexión de los paneles.

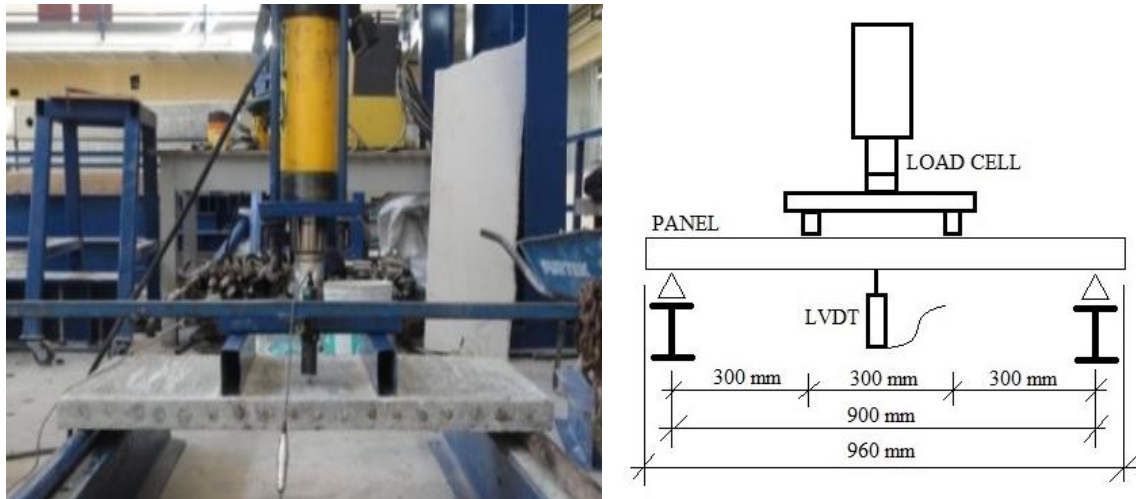


Figura 2. Ensayo de flexión del panel fibroreforzado.

4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 Esfuerzo de compresión y módulo de elasticidad

En la Figura 3 se muestra el efecto que tiene la sustitución de un 20% de cemento por CV en el esfuerzo de compresión obtenido de cilindros de concreto. El resultado muestra que se mantiene prácticamente el mismo valor de control para ambas relaciones a/mc y para 2 y 4 meses de edad. La relación a/mc tiene un efecto significativo en el incremento del esfuerzo para 20% de CV y para el control, para las sustituciones de 40% y 60% por CV los esfuerzos disminuyeron con respecto al control, además la relación a/mc así como la edad no parecen afectar significativamente.

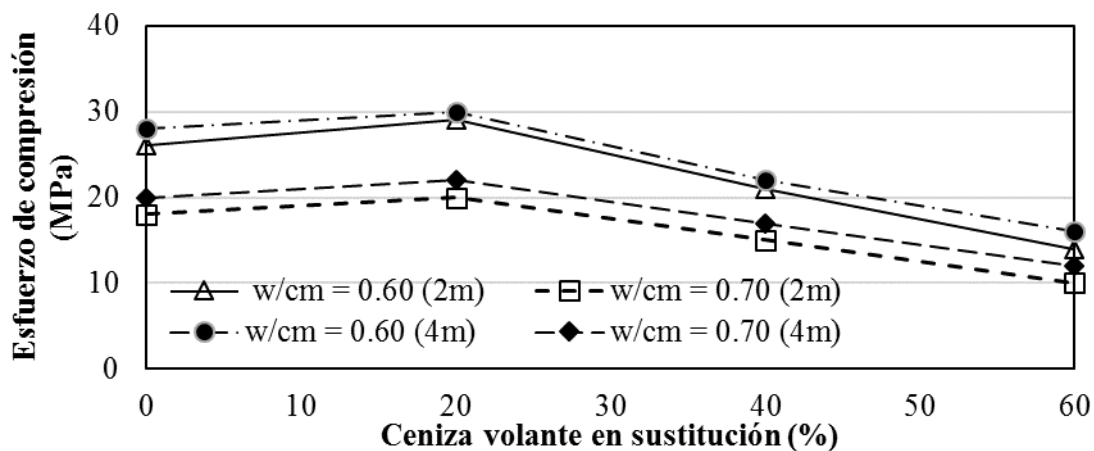


Figura 3. Comportamiento del esfuerzo a compresión con respecto al % de CV para 2 y 4 meses de edad.

Un comportamiento mecánico similar se puede observar para el módulo de elasticidad, aunque, como se muestra en la Figura 4, la relación a/mc no produce incremento significativo en el módulo para ningún porcentaje de CV (Shen, Shi, Zhu, Duan & Zhang, 2016), (Siddque, 2004). La sustitución del 20% de CV sigue manteniendo al menos el mismo valor en comparación con el control. De acuerdo a los resultados experimentales, para el esfuerzo a compresión y para el módulo de elasticidad, los especímenes con relación $a/mc = 0.60$ y con 20% de sustitución de CV mantuvieron los valores del control, e inclusive registraron algunos incrementos de un 24 y 15% respectivamente, lo anterior para ambas edades.

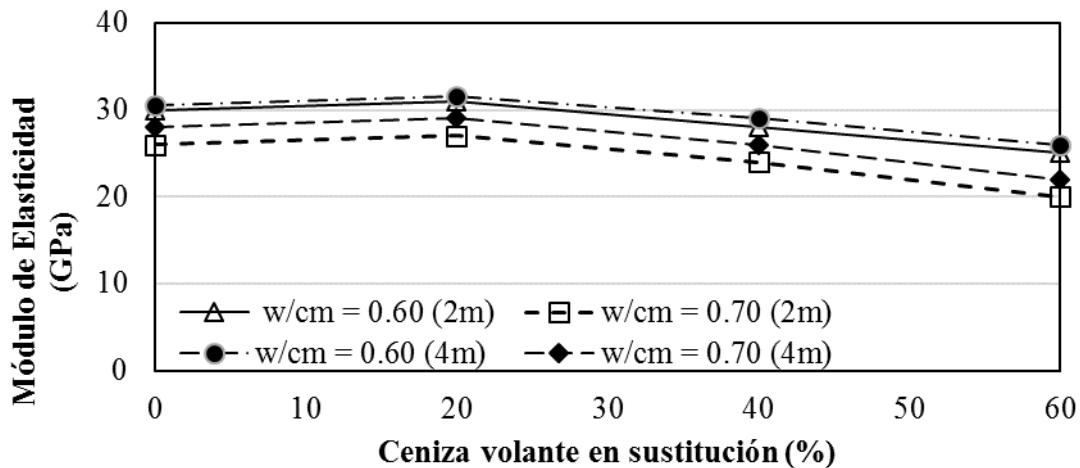


Figura 4. Comportamiento del módulo de elasticidad con respecto al % de CV para 2 y 4 meses de edad.

Como es sabido, la CV produce una reacción puzolánica con el hidróxido de calcio presente en las reacciones de hidratación del cemento, que le permite aportar resistencia mecánica a la matriz cementante cuando las sustituciones son relativamente bajas y para lo cual toma una cierta cantidad de agua de la relación a/mc.

Por otra parte, cuando se usan altos porcentajes de sustitución de CV por el cemento también se reduce la cantidad de hidróxido de calcio presente en la mezcla y es posible que los aluminosilicatos de la CV no tengan suficiente hidróxido de calcio para la reacción puzolánica y aunado al bajo consumo de cemento se genera una reducción de su resistencia mecánica, lo que permite asumir que el resto de la CV interactúa en la matriz más como un relleno que como un cementante. Estudios previos sobre el comportamiento mecánico en especímenes con sustitución de CV por cemento en porcentajes relativamente bajos han mostrado un adecuado comportamiento mecánico, lo cual es verificado en esta investigación (Durán-Herrera, Juárez, Valdez & Bentz, 2011), (Siddique, 2004).

4.2 Esfuerzo de flexión en los paneles

La Figura 5 muestra el efecto de la CV y la edad en la resistencia a flexión en los paneles de concreto fibroreforzados. Se puede observar que las dos relaciones a/mc tienen un comportamiento similar: con una sustitución de 20% de cemento por CV para 2 y 4 meses de edad se tiene un incremento en la resistencia a flexión de un 20% y 25% respectivamente con respecto al control. En el caso contrario, para los porcentajes de 40 y 60% de sustitución de CV se observa una disminución de la resistencia con respecto al control, lo que es congruente con los resultados encontrados a compresión y módulo de elasticidad, en donde la sustitución de cemento por el 20% de CV para ambas relaciones a/mc y ambas edades presenta una mejora en el comportamiento mecánico. En la Figura 5 se puede observar también que la edad parece no tener un efecto significativo en la ganancia de resistencia a flexión, principalmente para la relación a/mc = 0.70.

En las Figuras 6 y 7 se observa la aportación a la resistencia a flexión de la matriz cementante y la malla de fibra natural como reforzamiento del panel, la aportación únicamente de la malla se produce cuando la matriz cementante alcanza la carga máxima de agrietamiento y le sigue una descarga súbita. En la Figura 6, los especímenes de control presentaron un incremento de la carga post agrietamiento y en la Figura 7 son los especímenes con 20% de CV los que tuvieron mejor comportamiento post agrietamiento. Por otra parte, los paneles con altas sustituciones de CV (40% y 60%) tuvieron una reducción importante en la carga post agrietamiento con respecto a la carga máxima a flexión que resistió el panel antes de agrietarse (Bernal, De Gutierrez, Delvasto & Rodriguez, 2010).

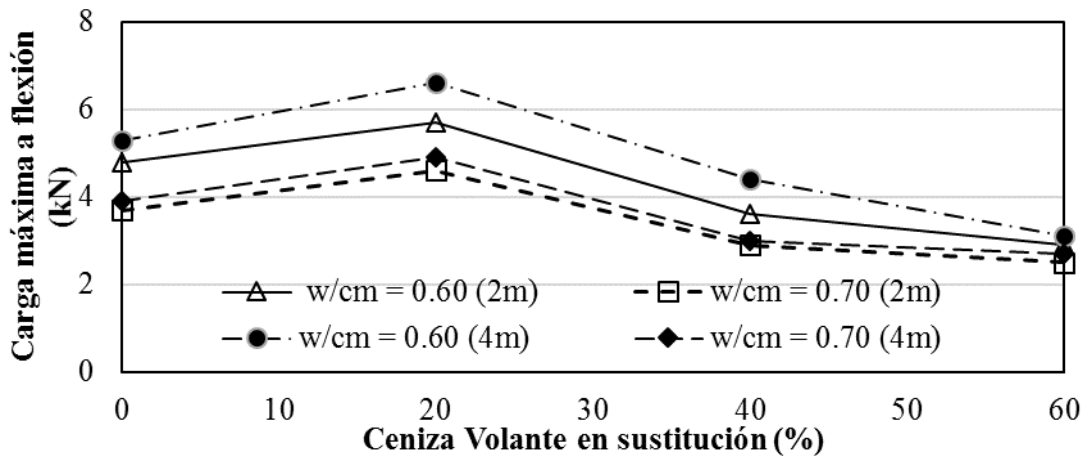


Figura 5. Comportamiento de la carga de falla a flexión con respecto al % de CV para 2 y 4 meses de edad.

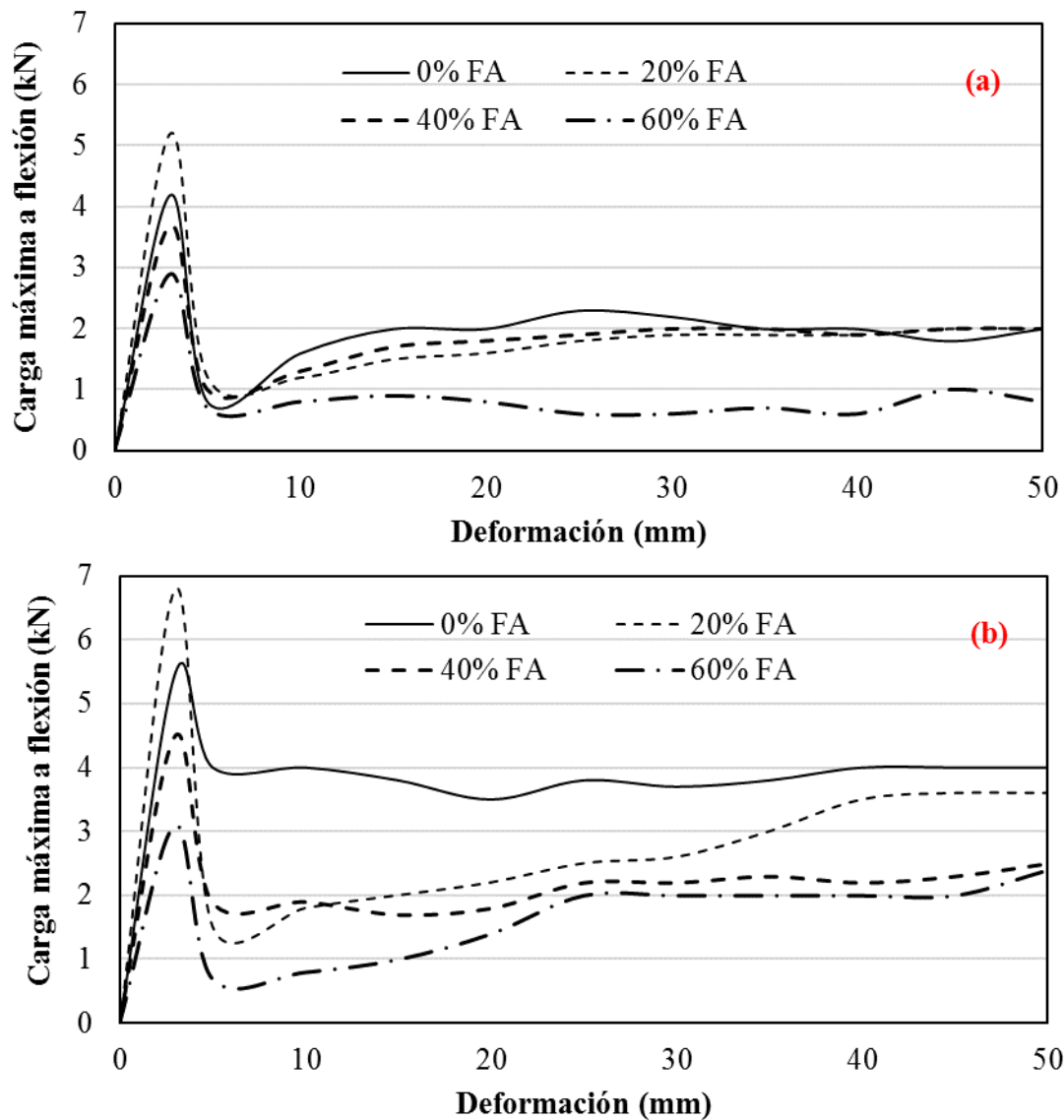


Figura 6. Comportamiento a flexión después del agrietamiento, Rel. a/mc = 0.60. (a) 2 meses de edad. (b) 4 meses de edad.

La adición de la malla a base de fibras naturales como refuerzo en los paneles de concreto, contribuyó en primera instancia a mejorar el comportamiento en el estado fresco del concreto impidiendo el agrietamiento por contracción plástica, una vez endurecido el concreto, el reforzamiento de la malla modificó el modo de falla frágil propio del concreto, aportándole ductilidad (Sahib Banyhussan, Yildirim, Bayraktar, Demirhan & Sahmaran, 2016). En las Figuras 6 y 7 se puede observar que la malla contribuyó a que el panel tuviera un comportamiento dúctil, además de que en algunos casos la carga se recuperó aunque sin llegar a la carga máxima de agrietamiento. De acuerdo con los resultados obtenidos la sustitución de un 20% de CV, registró la mayor carga de agrietamiento a flexión para las dos relaciones a/mc y para las dos edades. También se observa que la carga se incrementó hasta un 10% para 4 meses de edad en comparación con 2 meses en la mayoría de los casos estudiados.

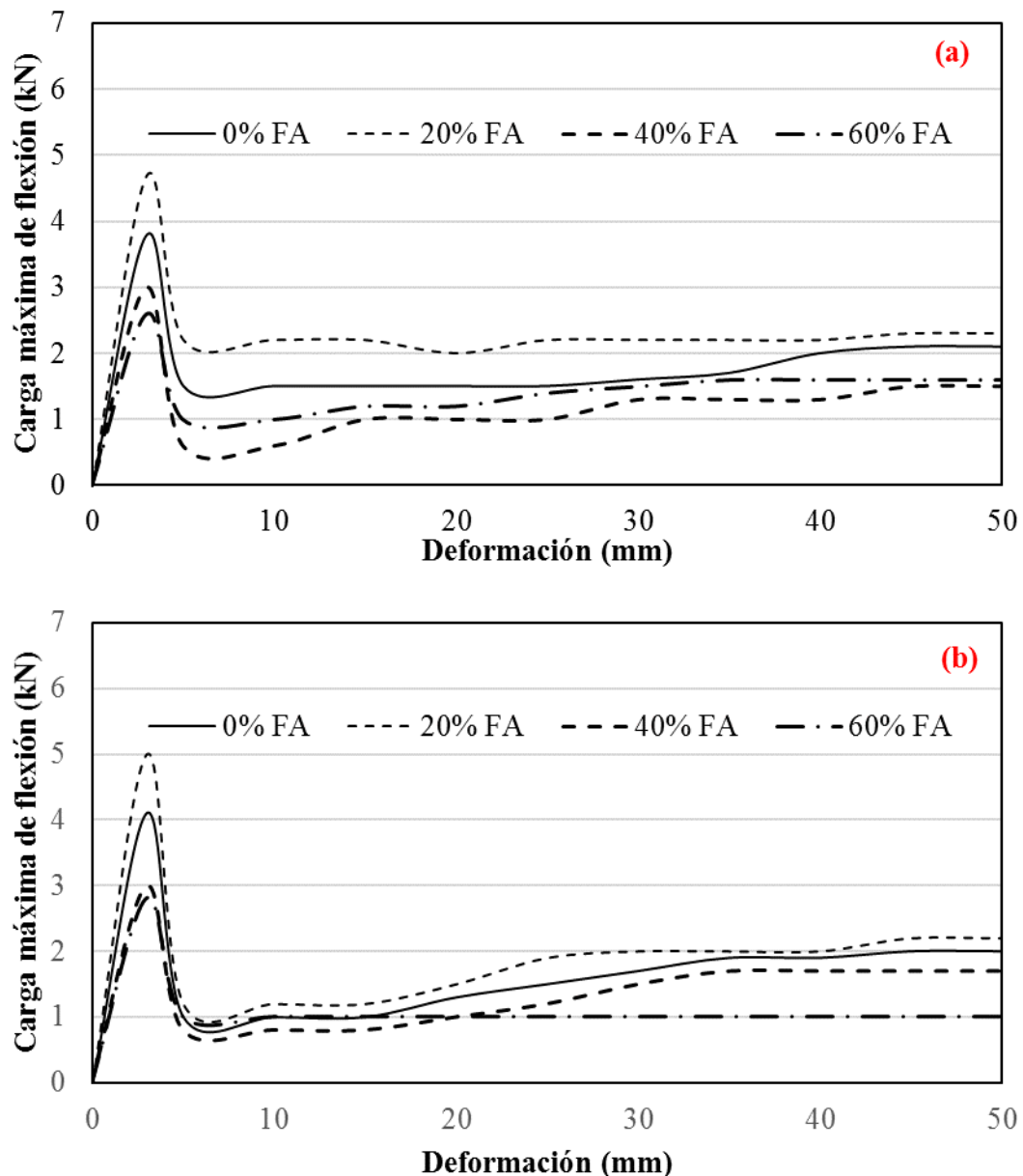


Figura 7. Comportamiento a flexión después del agrietamiento, Rel. a/mc = 0.70. (a) 2 meses de edad. (b) 4 meses de edad.

Una vez ensayados a flexión los especímenes en las dos edades correspondientes, no hubo evidencia de degradación en las fibras naturales ocasionadas por la exposición al medio alcalino

durante el periodo de tiempo antes mencionado. Lo anterior, se verificó físicamente ya que el modo de falla de todos los especímenes ensayados fue dúctil. El efecto de diferentes condiciones de humedad y/o temperatura que se relacionan al deterioro de las fibras vegetales y que generan un mecanismo de falla frágil (Juárez, Durán, Valdez & Fajardo, 2007), debe ser ampliamente estudiado para determinar la factibilidad del uso a largo plazo de este tipo de reforzamiento a base de malla (Georgiou & Pantazopoulou, 2016), a fin de generar materiales alternativos de construcción.

5. CONCLUSIONES

A partir de la confrontación de los resultados obtenidos con los referentes existentes es posible concluir que:

1. Para el esfuerzo a compresión y para el módulo de elasticidad, los especímenes con relación $a/mc = 0.60$ y con 20% en sustitución de CV mantuvieron los valores del control, e inclusive registraron algunos incrementos de un 24 y 15% respectivamente, para las dos edades que se documentaron.
2. Las sustituciones de 40% y 60% CV registraron menores valores de resistencia a esfuerzos a compresión y módulo de elasticidad con respecto al control. Además, para estos porcentajes de sustitución la relación a/mc así como la edad parecen no afectar significativamente.
3. Los especímenes de control y los de 20% de CV de sustitución tuvieron mejor comportamiento a flexión post agrietamiento para ambas relaciones a/mc y ambas edades. Por otra parte, los paneles con altas sustituciones de CV (40% y 60%) tuvieron una reducción importante en la carga post agrietamiento con respecto a la carga máxima a flexión que resistió el panel antes de agrietarse.
4. El reforzamiento de la malla de fibra natural modificó el modo de falla frágil propio del concreto aportándole ductilidad.
5. No se evidenció deterioro en las mallas de fibras naturales por la exposición al medio alcalino durante 2 y 4 meses, tiempo transcurrido para llevar a cabo los ensayos a flexión, lo que permite asumir que el recubrimiento de parafina utilizado fue adecuado.
6. Los compuestos fibroreforzados con 20% de CV en sustitución podrían ser considerados apropiados para ser aplicados como elementos primarios en edificaciones, ya que presentaron un adecuado comportamiento mecánico a compresión y flexión. Sin embargo, los especímenes con 40% CV y 60% CV en sustitución no son recomendables para su aplicación en los elementos antes mencionados.

6. REFERENCIAS

- ACI Manual of Concrete Practice, Part 5, (1998). *State of-the-Art on Fiber Reinforced Concrete*. ACI Committee 544.
- Agopyan, V., Savastano, H., John, V. M., Cincotto, M. A. (2005). *Developments on vegetable fibre-cement based materials in São Paulo, Brazil: an overview*. Cement and Concrete Composites, 27(5), 527-536. doi:10.1016/j.cemconcomp.2004.09.004.
- Alawar, A., Hamed, A. M., Al-Kaabi, K. (2009). *Characterization of treated date palm tree fiber as composite reinforcement*. Composites Part B: Engineering, 40(7), 601-606. doi:10.1016/j.compositesb.2009.04.018.
- Alfonso, C. (2003). *La vivienda del siglo XXI: edificación sostenible*. Ambiental: Revista del Ministerio de Medio Ambiente, (23), 22-28.
- Alvarez Anton, L., Díaz, J. (2014). *Integration of life cycle assesment in a BIM environment*. Procedia Engineering, 85, 26-32.

- Aziz, M. A., Lee, S. L. (1984). *Concrete Reinforced with Natural Fibers*. Surrey R. N., Ed. New Reinforced Concretes, Oxford: University Press, 106-140.
- Bernal, S., De Gutierrez, R., Delvasto, S., Rodriguez, E. (2010). *Performance of an alkali-activated slag concrete reinforced with steel fibers*. Construction and Building Materials, 24, 208-214. doi:10.1016/j.conbuildmat.2007.10.027
- Bilba, K., Arsene, M. (2008). *Silane treatment of bagasse fiber for reinforcement of cementitious composites*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 39(9), 1488-1495. doi:10.1016/j.compositesa.2008.05.013.
- Claramunt, J., Ardanuy, M., García-Hortal, J. A., Filho, R. D. T. (2011). *The hornification of vegetable fibers to improve the durability of cement mortar composites*. Cement and Concrete Composites, 33(5), 586-595. doi:10.1016/j.cemconcomp.2011.03.003.
- De Gutiérrez, R. M., Díaz, L. N., Delvasto, S. (2005). *Effect of pozzolans on the performance of fiber-reinforced mortars*. Cement and Concrete Composites, 27(5), 593-598. doi:10.1016/j.cemconcomp.2004.09.010.
- Ding Grace, K. C. (2008). *Sustainable construction – The role of environmental assessment tools*. Journal of Environmental Management, 86, 451-464.
- Durán-Herrera, A., Juárez, C. A., Valdez, P., Bentz, D. P. (2011). *Evaluation of sustainable high-volume fly ash concretes*. Cement Concrete Composites, (33)1, 39-45.
- Georgiou Antroula, V., Pantazopoulou Stavroula, J. (2016). *Effect of fiber length and surface characteristics on the mechanical properties of cementitious composites*. Construction and Building Materials, 125, 1216-1228. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.009>
- Gudes, S. (2016). *The use of life cycle techniques in the assessment of sustainability*. Procedia – Social and Behavioral Sciences, 216, 919-922.
- Jarabo, R., Monte, M. C., Blanco, A., Negro, C., Tijero, J. (2012). *Characterisation of agricultural residues used as a source of fibres for fibre-cement production*. Industrial Crops and Products, 36(1):14–21. doi:10.1016/j.indcrop.2011.07.029.
- John, V. M. (2005). *Durability of slag mortar reinforced with coconut fibre*. Cement and Concrete Composites, 27, 565-574. doi:10.1016/j.cemconcomp.2004.09.007.
- Juárez C. A., Valdez P. L., Durán A. (2004). *Fibras Naturales de Lechuguilla como Refuerzo en Materiales de Construcción*. Revista Ingeniería de Construcción. Santiago: Escuela de Ingeniería Pontificia. Universidad Católica de Chile, 19 (2): 83-92.
- Juárez C., Durán A., Valdez P., Fajardo G., (2007). *Performance of “Agave Lechuguilla” natural fiber in Portland cement composites exposed to severe environment conditions*. Building and Environment, 42 (3), 1151-1157.
- Kriker, A., Bali, A., Debicki, G., Bouziane, M., Chabannet, M. (2008). *Durability of date palm fibres and their use as reinforcement in hot dry climates*. Cement and Concrete Composites, 30(7), 639-648. doi:10.1016/j.cemconcomp.2007.11.006.
- Malhotra, V. M., (2001). *High-performance, high-volume fly ash concrete for sustainability*. P.-C Aïtcin Symposium on the Evolution of Concrete Technology, Sherbrooke: Université de Sherbrooke, 19-74.
- Mineral Commodity Summaries. (2015). U.S. Geological Survey. Virginia, USA.
- Mohr, B. J., Biernacki, J. J., Kurtis, K. E. (2007). *Supplementary cementitious materials for mitigating degradation of kraft pulp fiber-cement composites*. Cement and Concrete Research, 37(11), 1531-1543. doi:10.1016/j.cemconres.2007.08.001.
- Pacheco-Torgal, F., Jalali, S. (2011). *Cementitious building materials reinforced with vegetable fibres: A review*. Construction and Building Materials, 25(2): 575–581, doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.07.024.
- Patrone, A., García, B., Nigro E. (2005). *Muro monolítico con suelo estabilizado*. Construcción con Tierra, Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires, (1), 60-65.

- Pavon, E., Etxeberria, M., Martinez, I. (2011). *Properties of recycled aggregates concrete using active and inert additions*. Revista de la Construcción [online], 10(3), 4-15, doi.org/10.4067/S0718-915X2011000300002.
- Population Reference Bureau (2014), *World population data sheet*. (n.d.) Retrieved from http://www.prb.org/pdf14/2014-world-population-data-sheet_eng.pdf. [visited 19.10.14].
- Roux, R. (2010). *Los bloques de tierra comprimida en zonas húmedas, méxico: plaza y valdés*.
- Salas, J., Oteiza, I. (2008). *Los materiales de construcción ante las ingentes necesidades de hábitat en el tercer mundo (Carencias de una investigación necesaria)*. II Jornada de Investigación en Construcción. (p. 463), Madrid: Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja. Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
- Sahib Banyhussan, Q., Yildirim, G., Bayraktar, E., Demirhan, S., Sahmaran, M. (2016). *Deflection-hardening hybrid fiber reinforced concrete: The effect of aggregate content*, Construction and Building Materials, 125, 41-52. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.020>
- Savastano, H., Warden, P. G., Coutts, R. S. P. (2005). *Microstructure and mechanical properties of waste fibre–cement composites*. Cement and Concrete Composites, 27(5), 583-592. doi:10.1016/j.cemconcomp.2004.09.009.
- Savastano, H., Warden, P., Coutts, R. S. (2003). *Potential of alternative fibre cements as building materials for developing areas*. Cement and Concrete Composites, 25(6), 585-592. doi:10.1016/S0958-9465(02)00071-9.
- Sedan, D., Pagnoux, C., Smith, A., Chotard, T. (2008). *Mechanical properties of hemp fibre reinforced cement: Influence of the fibre/matrix interaction*. Journal of the European Ceramic Society, 28(1), 183-192. doi:10.1016/j.jeurceramsoc.2007.05.019.
- Shen, D., Shi, X., Zhi, S., Duan, X., Zhang, J. (2016). *Relationship between tensile Young's modulus and strength of fly ash high strength concrete at early age*. Construction and Building materials, 123, 317-326. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.145>
- Siddique, R. (2004). *Performance characteristics of high-volume Class F fly ash concrete*. Cement and Concrete Research, 34, 487-493.
- Stancato, A. C., Burke, A. K., Beraldo, A. L. (2005). *Mechanism of a vegetable waste composite with polymer-modified cement (VWCPMC)*. Cement and Concrete Composites, 27(5), 599-603. doi:10.1016/j.cemconcomp.2004.09.011.
- Tonoli, G. H. D., Santos, S. F., Joaquim, A. P., Savastano, H. (2010). *Effect of accelerated carbonation on cementitious roofing tiles reinforced with lignocellulosic fibre*. Construction and Building Materials, 24(2), 193-201. doi:10.1016/j.conbuildmat.2007.11.018.