

Materiales Compuestos ligeros basados en yeso con refuerzo de fibra de cascarilla de arroz y poliestireno

Lightweight composites based on gypsum with reinforcement of rice husk and polystyrene

Recibido 14-11-2014 Aceptado 24-04-2015

Juan David Pardo¹
Rafael Andrés Robayo²
Luis Anderson Trejos¹
Silvio Delvasto Arjona³

Resumen

Se obtuvieron compuestos aligerados de matriz de yeso reforzados con cascarilla de arroz y partículas de poli estireno. Las muestras fueron caracterizadas por medio de análisis mecánico y morfológico, mediante microscopia electrónica de barrido (MEB) y espectroscopia de electrones dispersados (EDS). La zona interfacial entre la matriz de yeso y la fibra de cascarilla de arroz fue estudiada por medio de una prueba de arrancamiento y análisis microestructural. Los resultados obtenidos mostraron que las partículas de poliestireno permiten la obtención de materiales compuestos aligerados pero al mismo tiempo se comprometen las propiedades mecánicas de los mismos, lo que hace que el uso de estos materiales compuestos sea del tipo no estructural. Por otro lado, las fibras de cascarilla de arroz reforzaron la matriz de yeso incrementando significativamente las propiedades de flexo-tracción de la matriz de yeso y la tenacidad de los compuestos al mismo tiempo que disminuyeron la densidad de los mismos.

Palabras clave: Poliestireno; fibras de cascarilla de arroz; yeso; tenacidad; prueba de arrancamiento.

Introducción

Uno de los materiales de construcción que se ha utilizado desde la antigüedad en grandes cantidades es el material de yeso. Los arqueólogos datan las aplicaciones más antiguas de enlucido de yeso (graniplas) o panel yeso desde el año 7000 A.C. El sector de la construcción moderna no sólo puede utilizar yeso natural como se hacía comúnmente en el pasado, sino que también aparecen formas de yeso como residuos, materia prima secundaria de diversas fuentes como yeso fosfatado, yeso rojo y yeso de desulfuración de gases de combustión,

¹ Colombiano, Estudiante de Maestría en Ingeniería de Materiales. Grupo Materiales Compuestos, Universidad del Valle, Cali, Colombia.

e-mail: juan.pardo@correounivalle.edu.co
² Colombiano, Estudiante de Doctorado en Ingeniería de Materiales. Grupo Materiales Compuestos, Universidad del Valle, Cali, Colombia.

³ Colombiano, Profesor Titular, MSc., PhD. Grupo Materiales Compuestos, Universidad del Valle, Cali, Colombia.

entre otros (Vimmrova *et al.*, 2011). En muchos estudios se ha investigado el refuerzo de la matriz de yeso para un gran número de aplicaciones, principalmente para obtener materiales ligeros con propiedades de aislamiento (Vimmrova *et al.*, 2011; Borreguero *et al.*, 2014; Tonoli *et al.*, 2009; Robayo *et al.*, 2013), además se conoce que el aumento en la porosidad debido a la inclusión de refuerzos disminuye la conductividad térmica del compuesto (Onésippe *et al.*, 2009). Además, propiedades tales como baja densidad, endurecimiento rápido, comportamiento aislante y buena trabajabilidad hacen que los yesos “tengan” un significado potencial en la cruzada permanente para la búsqueda de materiales de construcción alternativos libres de cemento gris que contribuyan en la economía y la reducción de la liberación de CO₂ en pro de la sostenibilidad (Magallanes-Rivera *et al.*, 2012). En este trabajo se estudia la posibilidad de utilizar dos tipos de refuerzos, el poli estireno extendido y las cáscaras de arroz para los materiales compuestos de matriz de yeso, con el objetivo de obtener materiales ligeros. Se analizó tanto la densidad obtenida, como también las propiedades mecánicas de los materiales compuestos y los refuerzos, incluyendo las características morfológicas de la zona de transición Interfacial (ZTI) que desempeña un papel importante en las propiedades finales de los compuestos.

Experimento

Materiales

El enlucido utilizado fue el yeso comercial, desarrollado principalmente para la fabricación de estuco. La cascarilla de arroz (CA) utilizada fue suministrada por un molino de arroz regional. Las muestras de CA se sometieron a un proceso de selección y limpieza. Las características del poliestireno utilizado fueron dadas por el proveedor, mientras que las dimensiones de las fibras de la cáscara de arroz fueron medidas por la figura del MEB, tal y como se ha hecho en otros trabajos del ‘Grupo Materiales Compuestos’ (Pardo and Salinas, 2013). Las partículas esféricas de poliestireno con un diámetro comprendido entre 3,3 mm y 4,8 mm son comerciales. La densidad y tamaño de estos compuestos se observan en la Tabla 1.

Métodos

La prueba de tensión de la fibra se llevó a cabo según las norma ASTM D3822-07, en los extremos de las fibras se adhirieron trozos de papel para someter las mordazas

(figura 1, **derecha**), por lo tanto, el área transversal y el perímetro de la fibra fueron obtenidos por MEB. El tratamiento estadístico de los datos para la resistencia a la tensión de la fibra de la cascarilla de arroz ha aparecido en muchos otros trabajos en el ‘Grupo de Materiales Compuestos’ (Pardo and Salinas, 2013); (Cocuy *et al.*, 2014), en este trabajo siendo el objetivo el aligeramiento de la matriz de yeso, se salta esa parte. Se utilizaron moldes de polipropileno para las medidas de extracción, que tienen una forma cúbica con un área de sección transversal de 12 mm x 12 mm, la fibra se sumergió en el centro de la muestra, y en su otro borde, se pegó un trozo de papel para ser sujetado con la máquina de prueba universal (Figura 1, **izquierda**).

Tabla 1. Características de los materiales

Materia Prima	Densidad Mg/m ³	Dimensiones
Partículas de Poliestireno	0,02	Diámetro Promedio: 4,05 mm
Fibras de Cascarilla de Arroz	0,65	Promedio Área Transversal: 0,20 mm ² Longitud Promedio: 9,7 mm
Yeso	2,33	Tamaño Promedio: 22 μm

Fuente: Los autores

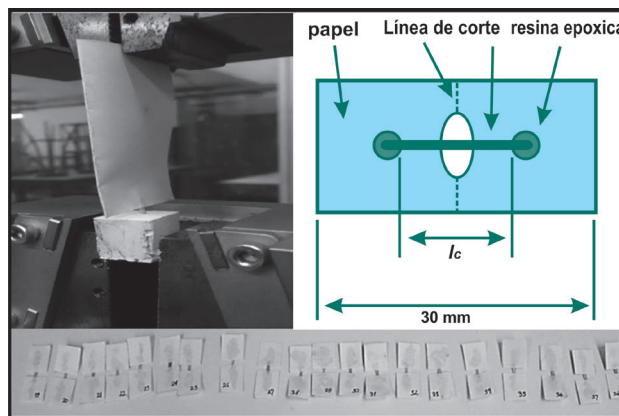


Figura 1. Pruebas de Configuración: (Izq.) Extracción (Der.) prueba de tensión, (abajo) Muestras de prueba de tensión de fibras.

Fuente: Los autores

Los materiales compuestos de matriz de yeso reforzados con un 40% (v / v) de poliestireno (PS) y compuestos reforzados con un 26% (v / v) de cascarilla de arroz (CA) se realizaron por endurecimiento térmico a 40°C durante una hora y un pos- endurecimiento a temperatura ambiente durante 7 días según otros estudios (Yu *et al.*, 2012; Chinta *et al.*, 2013; Gencel, *et al.*, 2014). La

proporción se calculó con una regla de mezclas para obtener una densidad inferior a 1, sin embargo un factor limitante fue la trabajabilidad de la mezcla que produjo restricción en la selección de la adición, por lo que finalmente la proporción se obtuvo principalmente de los resultados de la literatura (Vimmrova, *et al.*, (2011); Aghazadeh *et al.*, (2011); Borreguero *et al.*, (2014); Madariaga and Lloveras, (2008); Sabrine *et al.*, (2013)). Se midieron las propiedades físicas y mecánicas tales como densidad (técnica de cantidad desplazada), resistencia a la flexión (ASTM C293) y resistencia a la compresión (ASTM C 472). La morfología y composición de la zona de transición se analizaron mediante las técnicas MEB y EDS. La tensión de adherencia se determinó usando el método de desprendimiento o extracción de la fibra en tensión (Valadez, 1999), según la ecuación 1.

$$\tau = \frac{F_f}{l_e P_e} \quad (1)$$

Donde F_f es la carga máxima extraíble, L_e representa la longitud integrada y P_e el perímetro de la fibra. La expresión de Kelly y Tyson es una forma alternativa de calcular la tensión de adherencia (Valadez, 1999) en la ecuación 2.

$$\tau = \left(\frac{\sigma_f}{2}\right) \left(\frac{d_f}{l_c}\right) \quad (2)$$

La longitud crítica l_c para una fibra se puede calcular como lo muestra la ecuación 3.

$$l_c = \left(\frac{\sigma_f d_f}{2\tau}\right) \quad (3)$$

Dónde:

σ_f : Máxima resistencia a la tracción de la fibra

d_f : Diámetro de la fibra

τ : Tensión de adherencia

La resistencia a la flexión se realizó utilizando la máquina de pruebas universal Instron 3369 equipada con célula de carga de 1 KN. Se utilizó la configuración de plegado en tres puntos para evaluar el módulo de ruptura (MOR), siguiendo la expresión 4.

$$MOR = \frac{3 \times L \times a}{2 \times b \times t^2} \quad (4)$$

Dónde L es la carga en la falla, a es la distancia del haz entre soportes, b la anchura del haz y t es la profundidad del haz. La dureza se obtuvo mediante la integración del área por debajo de la curva de carga vs de desviación en cuatro puntos, hasta la resistencia máxima en la primera grieta, σ_f , y en los valores $3\sigma_f$, $5.5\sigma_f$ y $10.5\sigma_f$. El índice de dureza de las muestras (I_1 , I_2 , I_3), podrían obtenerse usando las ecuaciones 5, 6 y 7.

$$I_1 = \frac{Area (P - 3\delta_f)}{Area (P_f - \delta_f)} \quad (5)$$

$$I_2 = \frac{Area (P - 5.5\delta_f)}{Area (P_f - \delta_f)} \quad (6)$$

$$I_3 = \frac{Area (P - 10.5\delta_f)}{Area (P_f - \delta_f)} \quad (7)$$

Resultados y discusión

Los dos tipos de refuerzo inducen efectos del aligeramiento sobre el material compuesto, siendo más marcados los resultados obtenidos para el poliestireno expandido. En la Tabla 2 pueden apreciarse los resultados para la densidad. El refuerzo de poliestireno produjo una disminución de la densidad con respecto al patrón cerca del 28,6%, dando una ligereza importante, incluso teniendo la capacidad de flotar sobre el agua; estos resultados confirman que es posible disminuir la masa por unidad de superficie con la adhesión de partículas de poliestireno, resultados similares obtenidos por Madariaga y Lloveras, (2008).

Las partículas esféricas de poliestireno en el compuesto inducen un alto grado de porosidad, funcionando como un agente poroso, debido a los altos contenidos de aire. En las tablas 3 y 4 se muestran los resultados del análisis de compresión y flexión, donde se pueden observar bajas propiedades mecánicas para compuestos con poliestireno comparado con las muestras de patrón, por lo que sus aplicaciones pueden estar limitadas a elementos no estructurales.

Por otro lado, el refuerzo con cascarilla de arroz produjo un aumento significativo en el MOR, aunque tiene una densidad similar con respecto a las muestras de patrón. En la Figura 2a se puede observar la curva de carga vs. de desviación para todos los tipos de compuestos estudiados. Se observó un efecto significativo sobre la

dureza del material compuesto reforzado con cascarilla de arroz, como se observa en la Figura 2b. La Tabla 5 muestra los resultados para la dureza y el índice de dureza flexible, estos valores reflejan claramente el efecto de las fibras añadidas sobre el comportamiento pos-grieta, lo que significa una respuesta eficaz de las fibras sobre la

disminución de la grieta que aumenta con el grado de la carga aplicada que es transmitida desde la matriz a la fibra. La Tabla 5 muestra un incremento de dureza en la primera grieta (δ_f) con el refuerzo de cascarilla de arroz de 2.67 veces la dureza del patrón.

Tabla 2. Resultados de densidad después de 7 días de endurecimiento.

Masa (g)	Volumen		Masa (g)	PE		Masa (g)	RH	
	de yeso (cm ³)	Densidad (g/cm ³)		Volumen (cm ³)	Densidad (g/cm ³)		Volumen (cm ³)	Densidad (g/cm ³)
22,36	16,00	1,40	18,18	18,00	1,01	26,75	20,00	1,34

Fuente: Los autores

Tabla 3. Resultados de la prueba de resistencia a la compresión

Mezcla	Resistencia a Compresión (MPa)	Resistencia a la compresion específica (MPa/Mg/m3)
Yeso	2,42	1,73
PE	1,47	1,45
RH	2,19	1,63

Fuente: Los autores

Tabla 4. Resistencia a la flexión después de 7 días de endurecimiento

Mezcla	Carga máxima (N)	MOR (MPa)
Yeso	31,67	2,19
PE	28,39	1,96
RH	53,51	3,70

Fuente: Los autores

Los resultados de la flexión en el refuerzo con cascarilla de arroz sugieren además una buena adhesión de la fibra a la matriz de yeso, también una distribución homogénea debido al premezclado en seco, en contraste con los resultados obtenidos por Hamza *et al.*, (2013), quien

obtuvo una disminución de las propiedades mecánicas de las muestras reforzadas con fibras naturales, que se asocia con la generación de porosidad además de la distribución no homogénea de las fibras en la matriz.

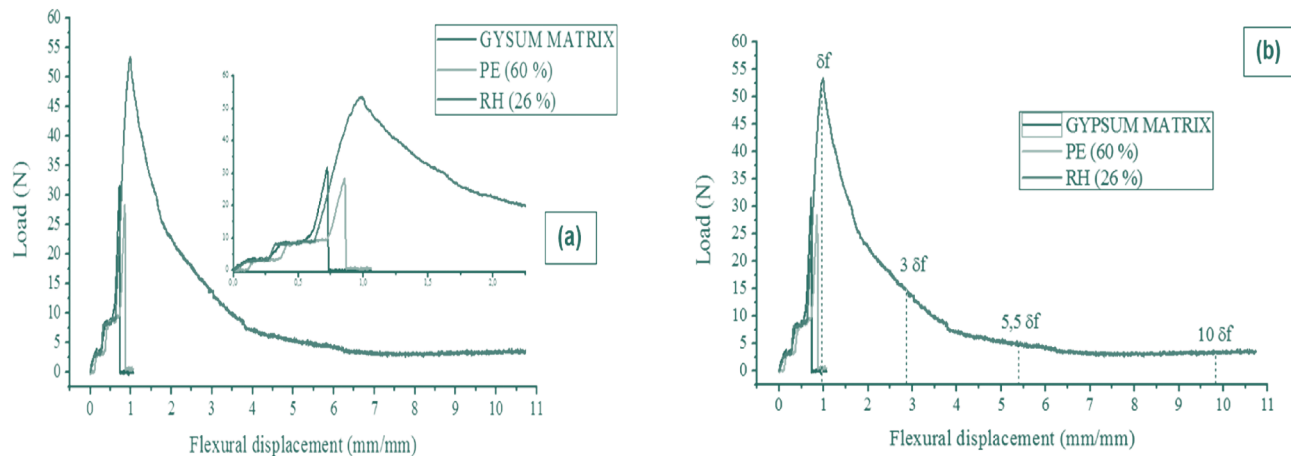


Figura 2. Resultados del análisis de resistencia a la flexión: (a) curva de carga vs. de desviación (b) índice de dureza flexible
Fuente: Los autores

Tabla 5. Índice de dureza y dureza flexible después de 7 días de endurecimiento.

Mezcla	Carga _f (N)	δ_f (mm)	Dureza (N.mm)			Índice de Dureza		
			δ_f	$3 \delta_f$	$5,5 \delta_f$	I_1	I_3	I_5
Yeso	31,66	0,73	5,88	-	-	-	-	-
PE	28,39	0,86	6,21	-	-	-	-	-
RH	53,51	0,98	15,70	86,62	101,79	4,32	5,52	-

Fuente: los autores

Los resultados de la prueba de extracción (Figura 3 y Tabla 6) y los valores obtenidos por el MOR sugieren una adherencia significativa de la fibra de cascarilla de arroz en la matriz de yeso, relacionados con la característica hidrofílica de la fibra y la buena humectación de la matriz; también las características morfológicas de la cascarilla de arroz con una rugosidad alta permite una importante contribución del anclaje mecánico (Pardo y Salinas, 2013).

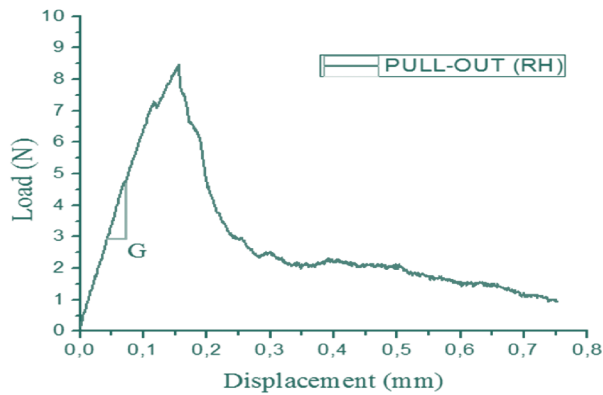


Figura 3. Curva de Extracción.
Fuente: Los autores

Tabla 6. Resultados de la prueba de Extracción.

Fibra	Área integrada (mm ²)	Carga extracción (N)	T (MPa)
RH	24,74	8,47	0,34

Fuente: Los autores

Utilizando la ecuación (3) con los valores obtenidos para la tensión de adherencia se calcula la longitud crítica para las fibras de cascarilla de arroz en una matriz de yeso, los resultados se muestran en la Tabla 7, en la cual se puede observar que el valor promedio de longitud crítica es superior a la longitud de la fibra, lo que indica que los fenómenos de extracción son más propensos a ocurrir. El aumento de la dureza se debe a la energía dispersa por las fibras en el proceso de desplazamiento donde la extracción es dominante en la zona de interfaz debido a la longitud de la fibra (Singh *et al.*, 1994; Savastano *et al.*, 2003) que fue informado en la Figura 3, un módulo G de 62.58 N/mm.

Tabla 7. Prueba de la Longitud Crítica.

Fibra	Resistencia tracción de la fibra (MPa)	Longitud Fibra (mm)	Área Transversal de Fibra Area (mm ²)	Promedio de Longitud crítica de la fibra (mm)
RH	54,53	11,98	0,21	41,46

Fuente: Los autores

Las morfologías de la interfase para el poliestireno expandido así como para la cascarilla de arroz se observan en las micrografías MEB presentadas en la figura 4. Puede verse una interfase con alta porosidad debido al efecto de pared en la zona de transición, el poliestireno (fig. 4c , 4d) presenta una adherencia muy pobre, lo que explica los resultados de las pruebas mecánicas para los dos casos (Martias *et al.*, 2013). La morfología observada sugiere una alta fragilidad de la zona de transición, similar a los hallazgos de otros autores (Tonoli *et al.*, 2009; Pardo and Salinas, 2013).

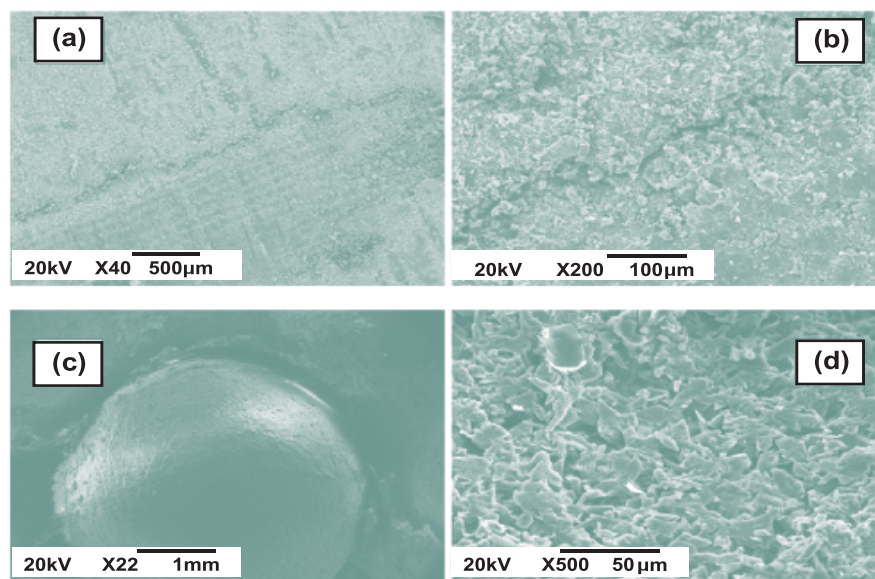


Figura 4. MEB de ZTI para la cascarilla de arroz: (a), (b) y ZTI para el PS (c), (d).
Fuente: Los autores

Conclusiones

Con base en los resultados experimentales se concluye:

- El refuerzo con partículas de poliestireno genera un efecto de aligeramiento significativo en la matriz de yeso. Sin embargo, hay una disminución en las propiedades mecánicas debido no sólo a la porosidad inducida sino también a la adherencia pobre del poliestireno en la matriz de yeso.
- El refuerzo con fibras de cascarilla de arroz mejora la resistencia mecánica y la dureza. Los resultados de la prueba de extracción y de longitud crítica mostraron que durante el agrietamiento la causa principal del aumento de energía absorbida es el fenómeno de desprendimiento y extracción de las fibras.
- Es posible obtener compuestos basados en yeso ligero con propiedades mecánicas mejoradas y resistencia al agrietamiento, mediante su refuerzo con fibras de cascarilla de arroz.

Referencias

- Aghazadeh, J., Sangghaleh, A., Pourjavad, N. (2011). Analytical modeling of strength in randomly oriented PP and PPTA short fiber reinforced gypsum composites. *Computational Materials Science*.50 (5):1619–1624.
- Borreguero, A. M., Garrido, I., Valverde, J., Rodríguez, J.F., Carmona M. (2014). Development of smart gypsum composites by incorporating thermoregulating microcapsules, *Energy and Buildings*. 76: 631–639.
- Chinta,, Katkar, P., Mahamed, M.(2013) Natural fibres reinforced gypsum composites. *International Journal of Eginieering and Management Sciences*. 4: 318-325.
- Cocuy C., Pardo, J., Salinas, E., Delvasto, S. (2014). *Improvement of characteristics of the surface of the rice husk for use in composites based on portland cement FZEA/USP*, 15th NOCMAT, Pirassununga, São Paulo, Brazil.
- Gencel, O., Diaz, J., Sutcu, M., Koksall, F., Rabanal, A., Martinez-Barrera, G., Brostow, W. (2014). Properties of gypsum composites containing vermiculite and polypropylene fibers: Numerical and experimental results. *Energy and Buildings* 70: 135–144.
- Madariaga, G., Lloveras J. (2008). Mezclas de residuos de poliestireno expandido (EPS) conglomerados con yeso o escayola para su uso en la construcción. *Informes de la Construcción* 60: 35-43.
- Magallanes-Rivera, R.X., Juarez-Alvarado, C.A., Valdez, P., Mendoza-Rangel, J.M. (2012), "Modified gypsum compounds: An ecological–economical choice to improve traditional plasters. *Construction and Building Materials*. Volume 37: 591–596.
- Martias, C., Joliff, Y., Nait-Ali, B., Rogez, J., Favotto, C., (2013). A new composite based on gypsum matrix and mineral additives: Hydration process of the matrix and thermal properties at room temperatura , *Thermochimica Acta* 567:15–26.
- Hamza, S., Saada, H., Charrier, B., Ayed, N., Charrier-El Bouhtoury, F. (2013). Physico-chemical characterization of Tunisian plant fibers and its utilization as reinforcement for plaster based composites. *Industrial Crops and Products*. 49: 357– 365.
- Onésippe, C., Passe-Coutrin, N., Toro, F., Delvasto, S., Bilba, K., Arsène. M. (2009). Sugar cane bagasse fibres reinforced cement composites: Thermal considerations'. *Composites: Part A*. 41: 549–556.
- Pardo J., Salinas E. (2013). *Desarrollo de una superficie óptima en la cascarilla de arroz para su aplicación como fibra en una pasta de cemento Portland*. Tesis de Grado, Ingeniería de Materiales, Universidad del Valle.
- Robayo R., Matthey, P., Delvasto, S., (2013). Comportamiento mecánico de un concreto fluido adicionado con ceniza de cascarilla de arroz (CCA) y reforzado con fibras de acero. *Revista de la Construcción*. 12.
- Savastano, H., Warden, P., Coutts, R., (2003). Mechanically pulped sisal as reinforcement in

- cementitious matrices. *Cem Concr Composites*. 25: 311–320.
- Singh, M., Garg M. (1994). Gypsum-based fibre-reinforced composites: an alternative to timber, *Construction and Building Materials*.8(3):155–160.
- Tonoli, G.H.D., Rodrigues, U.P., Savastano, H., Bras, J., Belgacem, M.N., Rocco Lahr, F.N. (2009). Cellulose modified fibres in cement based composites. *Composites: Part A* 40: 2046–2053.
- Valadez G., (1999) *Efecto del tratamiento superficial de fibras de henequén sobre la resistencia interfacial fibra-matriz y en las propiedades efectivas de materiales compuestos termoplásticos*. Tesis doctoral, U. Autónoma Metropolitana.
- Vimmrova, A., Keppert, M., Svoboda, L., Cerny, R., (2011). Lightweight gypsum composites: Design strategies for multi-functionality. *Cement and Concrete Composites*. 33: 84–89.
- Yu, Q., Brouwers H. (2012). Development of a self-compacting gypsum-based lightweight composite. *Cement and Concrete Composites*. 34(9): 1033–1043.