

Resumen

En este artículo se presenta un estudio sobre el comportamiento mecánico de morteros modificados con fibras de aserrín bajo cargas de compresión. Se estimó la densidad, la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad dinámico de morteros modificados con 0%, 0,5%, 1% y 3% en peso de fibra de aserrín. Los compuestos se evaluaron luego de siete, 30 y 90 días de curado. Además, se utilizó microscopía electrónica de barrido (SEM) y espectroscopía de rayos X de energía dispersa (EDX) para caracterizar la morfología y encontrar la composición elemental tanto de las fibras como de la matriz de cemento. Los resultados muestran cómo a mayor porcentaje de aserrín, la resistencia, el módulo de elasticidad y la densidad disminuyen. Se sugiere utilizar hasta un 1% de fibra de aserrín en morteros para evitar una reducción importante en las propiedades mecánicas de los morteros.

Palabras claves: aserrín, fibras naturales, mortero, resistencia a la compresión.

Abstract

In this paper, a study about the mechanical behavior of mortar modified with sawdust fibers under compression load was performed. Density, compressive strength and dynamic elastic modulus of mortar modified with 0%, 0,5%, 1% and 3% of sawdust were estimated. Composites were evaluated after seven, 30 and 90 days of curing. In addition, scanning electron microscopy (SEM) and energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX) were used to characterize the morphology and to find elemental composition for both, fibers and cement matrix. The results show that compressive strength, elastic modulus and density decreases as sawdust percentage increases. It is suggested to use 1% of sawdust fiber mortars in order to avoid an important reduction of the mortar mechanical properties.

Keywords: compressive strength, mortar, natural fibers, sawdust.

Fecha de recepción: 22 de junio de 2018
Fecha de aceptación: 24 de Octubre de 2018

I. INTRODUCCIÓN

Desde hace algunos años se ha investigado el uso de diferentes tipos de fibras para reforzar concretos y morteros, con el fin de suplir la carencia en cuanto a resistencia a la tensión de este tipo de materiales cerámicos, así como aumentar en buena medida su tenacidad. En la actualidad, se ha buscado realizar reemplazos de materiales asociados a la composición de estos compuestos, debido a que en el sector de la construcción se necesita una gran cantidad de materias primas no renovables, tales como la caliza o la arena.

Alvarado [1] investigó acerca de los concretos base cemento Portland reforzados con fibras naturales (agave lechuguilla), como materiales para construcción en México, y encontró que la fibra de lechuguilla es resistente a la tensión, pero se deteriora en gran medida por el medio alcalino del concreto. Además, encontró que fibras largas y en cantidades reducidas proporcionan incrementos en la resistencia a flexión y tensión del concreto. Wang et al. [2] investigaron acerca de las características de flexión de los compuestos cementicios reforzados con fibra de coco, y encontraron que dichos compuestos eran más ligeros que los morteros convencionales – entre un 5 y 12% menores en densidad –, mientras que el índice de dureza y tenacidad aumentó cerca de 10 veces.

Turgut [3] realizó un estudio sobre compuestos de cemento con caliza y diferentes grados de aserrín, y encontró que los compuestos con altos reemplazos de desechos de aserrín no exhibían fractura frágil, además de tener alta capacidad de absorción de energía. Bederina et al. [4] mostraron que el aserrín se puede adicionar a los morteros sin ningún tratamiento preliminar y, como consecuencia, se obtiene una reducción de la densidad, así como de la conductividad térmica. Por su parte, Wei et al. [5] estudiaron la correlación entre la hidratación del cemento y la durabilidad de los compuestos de cemento reforzado con fibra natural, y encontraron que la hidratación del cemento era un factor clave en el comportamiento de la degradación de la fibra. Esto se atribuye a la alcalinidad reducida de la solución de poro y al contenido de hidróxido de calcio (Ca(OH)_2). La degradación de la fibra natural se mitigó de manera significativa y la durabilidad de los compuestos de cemento se mejoró. Corinaldesi et al. [6] caracterizaron morteros livianos que contenían desechos de madera como sustitución de arena, y concluyeron que el máximo porcentaje aceptable para no perder excesivamente las propiedades mecánicas del mortero era del 5%.

A partir de esta revisión de literatura, se encuentra, de forma general, que el uso de agregados livianos como, por ejemplo, el aserrín, posee la ventaja de reducir la cantidad de materia prima necesaria para los compuestos y se aprovechan los residuos obtenidos a partir del procesamiento de materiales como la madera. Sin embargo, es necesario realizar más estudios de durabilidad de este tipo de fibras naturales, así como de sus efectos en las propiedades mecánicas en compuestos con matriz de cemento.

El objetivo de este artículo es determinar la viabilidad de reducir la densidad de las mezclas de mortero al usar aserrín como refuerzo, sin que se disminuya de forma ostensible la resistencia del compuesto. Para esto, se estimó la densidad, la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad dinámico para diferentes tiempos de curado, mientras que las fibras naturales fueron caracterizadas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM). Además, se realizaron ensayos de durabilidad de la fibra mediante inmersión en un ambiente alcalino simulado para predecir su comportamiento en cortos periodos de tiempo.

II. METODOLOGÍA

A. Materiales

Las fibras de aserrín utilizadas son de producción colombiana. Se recolectaron durante procesos de corte de madera y luego se clasificaron de acuerdo con un proceso de tamizado. Para la elaboración de las muestras se utilizó el material retenido en malla # 4 (4,76 mm). El contenido de humedad de la fibra se estimó en aproximadamente 1 g de fibra, mediante un analizador de humedad RADWAG PMC 210/WH a 105 °C. El cemento que se utilizó para la realización de las muestras fue cemento Portland Tipo I de uso general. Este cemento se caracteriza por su alta retención de agua, lo que garantiza una excelente manejabilidad y un moderado calor de hidratación que minimiza la aparición de fisuras. Se utilizó, además, arena de cuarzo con un tamaño inferior a 600 μm .

B. Preparación de las mezclas

Los morteros se manufacturaron con una relación de agua/cemento/arena de 0,4:1:1. La pasta de cemento se adicionó con la arena en una mezcladora mecánica a 65 rpm durante dos minutos, con el 40% del agua total requere-

rida. Luego, las fibras de aserrín se adicionaron lentamente y se adicionó el resto de agua seguida por dos minutos de descanso. Posteriormente, se vaciaron muestras cúbicas de 2 pulgadas de lado en moldes de acero. A cada molde se le adicionó una pequeña capa de agente desmoldante para facilitar el proceso de desencofrado. Se siguió el apisonamiento en tres capas y se realizó un proceso de 32 golpes en 10 segundos, distribuidos en cuatro etapas de ocho golpes, y en cada etapa se aplicaron los golpes siguiendo una dirección perpendicular a los del anterior. Al aplicar la última capa, se enrasó la superficie con un palustre para garantizar una muestra plana.

Los cubos se almacenaron durante las primeras 24 horas de curado en una cámara de humedad al 100% de humedad relativa (HR), y luego se desmoldaron y ubicaron en un ambiente a 22 °C y 78 ± 3% de HR. Las muestras se elaboraron por triplicado para siete, 30 y 90 días de curado. El contenido de fibra de aserrín fue de 0%, 0,5%, 1% y 3% en peso.

C. Ensayos

Luego de que las muestras cumplieran el correspondiente tiempo de curado, se midió la densidad y la velocidad de pulso de ultrasonido (UPV). La UPV se estimó siguiendo la norma ASTM C597-16 [7], con un equipo Controls modelo E48 en el que se obtiene un tiempo medido en microsegundos (μs). Una vez se obtuvo el tiempo promedio para cada muestra, se estimó el módulo de elasticidad dinámico mediante la siguiente ecuación [8]:

$$E_{med} = \rho c^2 \frac{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}{(1 - \mu) \times 10^9} \quad (1)$$

Donde, E_{med} es el módulo de elasticidad dinámico del mortero (GPa), ρ es la densidad del mortero endurecido (kg/m^3), c es la UPV (m/s) y μ es la relación de Poisson. La relación de Poisson utilizada se obtuvo a través de la literatura ($\mu = 0,2$), de acuerdo con Rosell y Cantalapiedra [9].

Las muestras se fallaron a compresión siguiendo la norma ASTM C109 [10]. Para algunas muestras seleccionadas, tanto de la fibra como de la matriz, se realizaron observaciones morfológicas a través de un SEM modelo JSM6490-LV de la compañía JEOL. El voltaje de aceleración usado fue de 20 kV.

La durabilidad de las fibras se estimó mediante ensayos de inmersión que simulan el ambiente alcalino del mortero. Se utilizó una solución de 0,1M de NaOH a pH 13. En recipientes de polietileno se introdujo aproximadamente 15 mL de la solución y, luego, se adicionó 0,1 g de fibra. Luego de siete días de inmersión, se analizó el aspecto de la fibra y se estimó la pérdida de masa mediante una balanza analítica con una sensibilidad de 0,0001g. Este ensayo se realizó por triplicado.

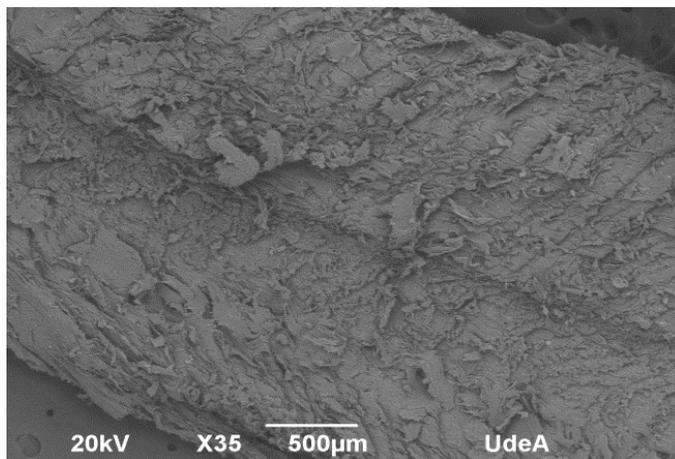
III. RESULTADOS Y ANÁLISIS

A. Propiedades y morfología de las fibras

La densidad de las fibras de aserrín obtenida mediante experimentos independientes fue, en promedio, de 178,83 kg/m³. El contenido de humedad de las fibras fue de 8,72 ± 0,4%, el cual está muy cercano al reportado en la literatura [11]. Dicho valor se tuvo en cuenta en el momento de la adición del agua, con el fin de producir mezclas de mortero efectivas.

En la Figura 1 se muestran las micrografías obtenidas por SEM para las fibras de aserrín. Las fibras tienen forma irregular y se caracterizan por una estructura de filamentos [12]. Se puede apreciar que la superficie de la fibra es un poco rugosa, con un ancho, en promedio, de 2790 μm, y presenta poros de menos de 10 μm, lo que posiblemente indique una buena adherencia con la matriz de cemento.

a)



b)

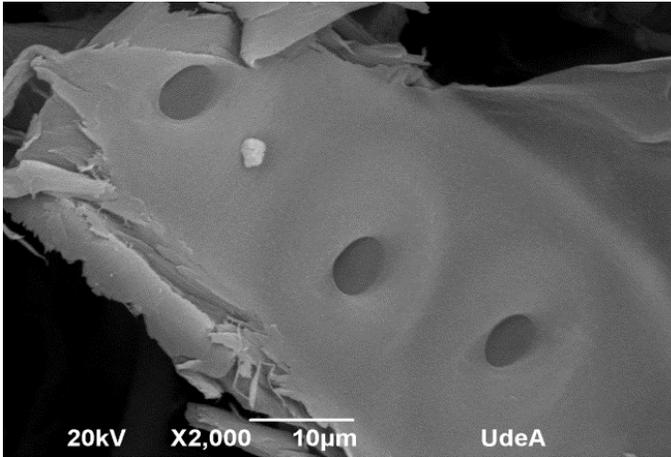


Figura 1. Micrografías SEM para las fibras de aserrín: (a) con 35 aumentos y (b) con 2000 aumentos

B. Densidad de los morteros

En la Figura 2 se muestra la variación de la densidad de los diferentes morteros contra el tiempo de curado. Las densidades para morteros con porcentaje de 0%, 0,5% y 1% de fibra de aserrín, no tienen diferencia estadística entre sí, pues sus valores promedios caen dentro de la desviación estándar de los datos. Los valores promedio de densidad obtenidos luego de 90 días de curado fueron de 2,02, 1,99 y 2,05 g/cm³ para 0%, 0,5% y 1% de porcentaje en peso de fibra, respectivamente.

Para el caso de morteros con refuerzo del 3% se observa una gran diferencia con respecto a las demás muestras, con un valor promedio de 1,75 g/cm³ luego de 90 días de curado. Según Corinaldesi et al. [6], se considera que 1,8 g/cm³ es el máximo límite para que un mortero se considere liviano. Por tanto, solo los morteros reforzados con 3% de aserrín son adecuados para catalogarse como livianos. Cerca del 13,28% de reducción en densidad se obtuvo para este tipo de compuesto comparado con el mortero sin refuerzo. Estos resultados están de acuerdo con investigaciones anteriores en las que se usaban subproductos de la industria de la madera en morteros livianos [4].

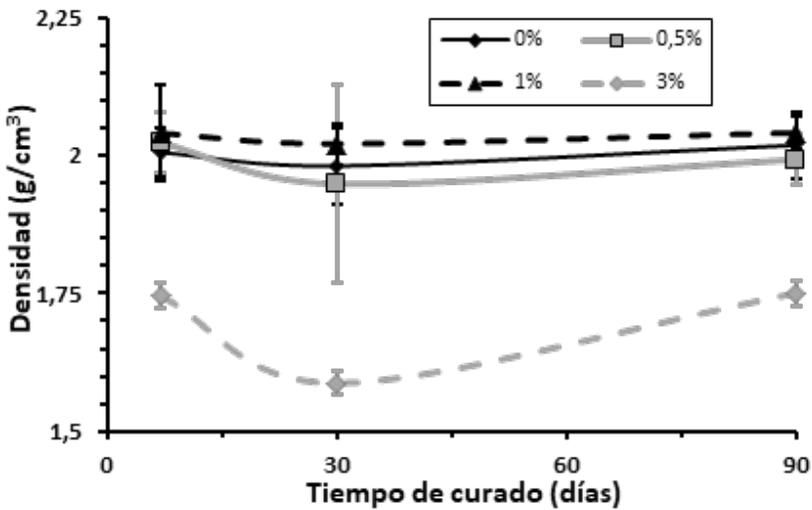


Figura 2. Densidad de los compuestos como función del tiempo de curado para morteros con 0%, 0,5%, 1% y 3% de aserrín

C. Módulo de elasticidad dinámico

En la Figura 3 se presenta la evolución del módulo de elasticidad dinámico con el tiempo de curado para los diferentes morteros. Sideris et al. [13] obtuvieron valores del módulo de elasticidad dinámico de mortero sin refuerzo con una tendencia en el tiempo parecido al presente estudio. Los valores promedio de módulo de elasticidad obtenidos luego de 90 días de curado fueron de 22,66, 20,16, 21,04 y 16,57 GPa para 0%, 0,5%, 1% y 3% de porcentaje en peso de fibra, respectivamente. Esto comprueba que mediante la adición de fibras de aserrín a los morteros, los compuestos disminuyen su rigidez. Al igual que la densidad, no existe una diferencia estadística apreciable para morteros modificados con aserrín con menos de 3% de fibra. Los morteros con 3% de fibra presentaron los valores más bajos de módulo de elasticidad, lo cual indica un compuesto con mayor ductilidad, algo que se evidenció al momento de la falla. Esto se puede explicar debido a la morfología alargada de las fibras (véase la Figura 1) lo cual le permite mejorar la capacidad de deformación a los morteros [6], [14].

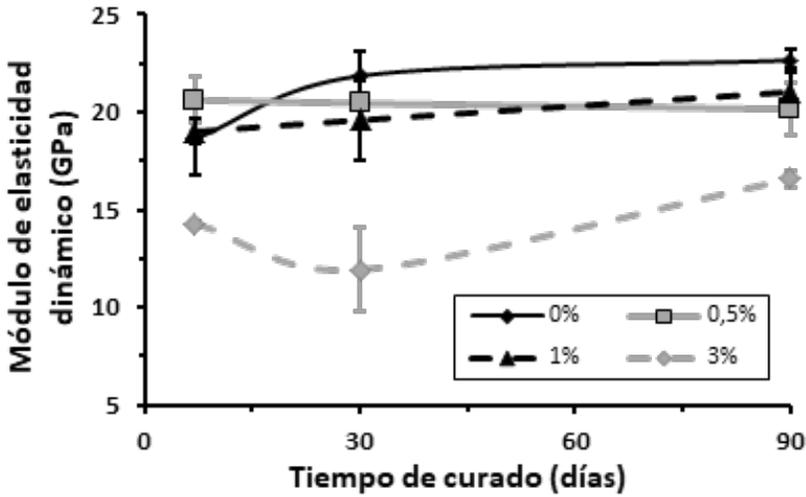


Figura 3. Módulo de elasticidad dinámico de los compuestos como función del tiempo de curado para morteros con 0, 0,5, 1 y 3% de aserrín

D. Resistencia a la compresión

En la Figura 4 se observa un aumento del periodo de curado del mortero conforme se aumenta su resistencia a la compresión. Por el contrario, a medida que se aumenta el porcentaje de refuerzo, la resistencia a la compresión del mortero disminuye. La resistencia disminuye dramáticamente con la inclusión de un 3% de fibra de aserrín, lo cual se encuentra de acuerdo con los resultados de densidad obtenidos. Asimismo, los resultados concuerdan con Gopinath et al. [15], quienes encontraron que el reemplazo del agregado fino por ceniza de aserrín reducía la resistencia a la compresión a medida de que aumentaba su porcentaje de ceniza.

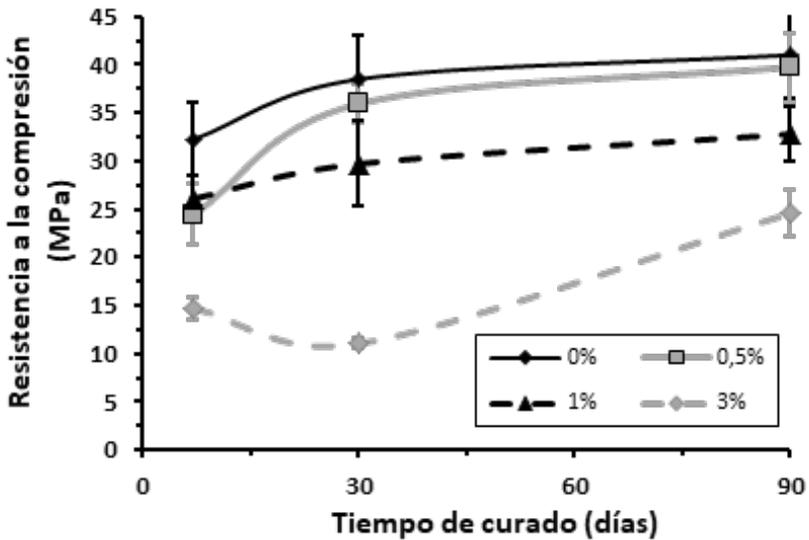


Figura 4. Resistencia a la compresión de los compuestos como función del tiempo de curado para morteros con 0%, 0,5%, 1% y 3% de aserrín

En la Figura 5 se presenta una variación general entre los resultados promedio de la resistencia a la compresión (σ) y la UPV promedio obtenidas para los diferentes morteros durante siete, 30 y 90 días de curado. Se encontró un coeficiente de correlación (R) de 0,92, lo que indica una buena relación exponencial entre estas dos propiedades. Para los resultados se encontró el siguiente modelo entre la resistencia a la compresión (MPa) y UPV (m/s) como:

$$\sigma = 0,0469e^{0,0019UPV}(2)$$

Este modelo es similar al reportado por Gul et al. [16] para morteros con humo de sílice y cenizas volantes, al de Tharmaratnam y Tan [17] para morteros de cemento y al de Demirboga et al. [18] para mezclas de concreto. El incremento de un componente liviano, como lo es el aserrín, tiene un impacto tanto en la densidad como en la reducción del UPV. Los resultados muestran que los valores del UPV son más altos para los compuestos con 0 y 0,5 % de fibra (parte derecha de la Figura 5). En el caso de los compuestos con 3% de fibra, se obtiene una hidratación menor de la matriz como consecuencia de la absorción de humedad del aserrín. Esto trae como consecuencia que el sólido sea menos denso y, debido a que la velocidad del pulso a través

de espacios vacíos es menor que en materia sólida [19], [20], se obtienen menores valores de UPV (véase región izquierda de la Figura 5).

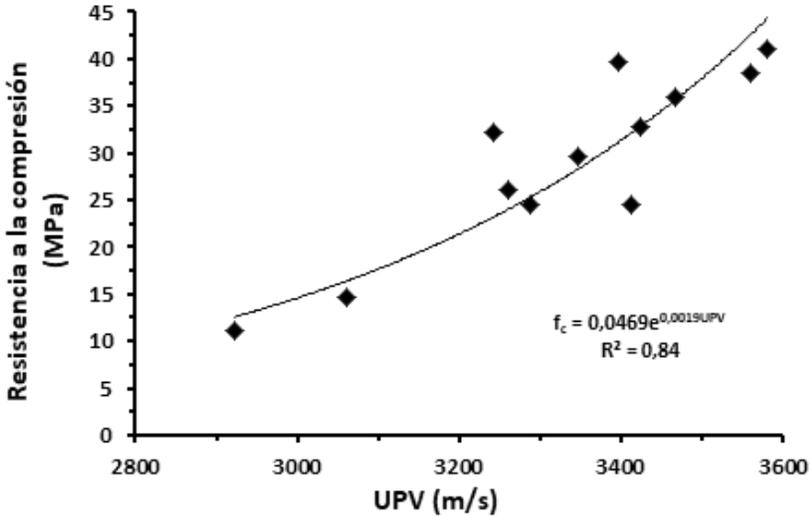
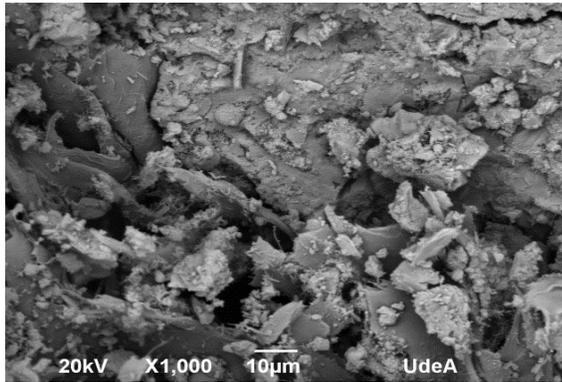


Figura 5. Resistencia a la compresión de los compuestos como función de la velocidad de pulso de ultrasonido para morteros con 0, 0,5, 1 y 3% de aserrín y siete, 30 y 90 días de curado

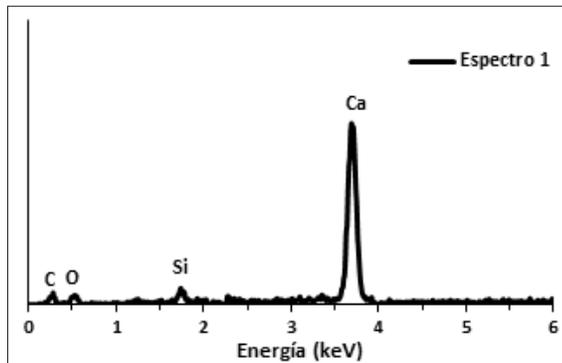
E. Caracterización de los morteros

La Figura 6a exhibe una micrografía para mortero reforzado con 3% de fibra de aserrín después de 90 días de curado. Se puede apreciar que la fibra de aserrín no presenta evidencia de daño luego de 90 días, algo que se observó en las demás condiciones de morteros modificados. De acuerdo con el análisis de espectroscopía de rayos X de energía dispersa (EDX) (véase la Figura 6 (b)), se detectó carbono y oxígeno en las fibras de aserrín. La presencia de silicio y calcio se debe al contacto con la matriz. Cuando se realizó el análisis EDX en la matriz, se detecta la presencia de aluminio, calcio, silicio y oxígeno, componentes principales del cemento. La adhesión de las fibras naturales en general fue buena, aunque con la condición de 3% de fibra dicha adhesión fue menor de acuerdo con el análisis visual, como se observa en la interfase en la Figura 6 (a).

a)



b)



c)

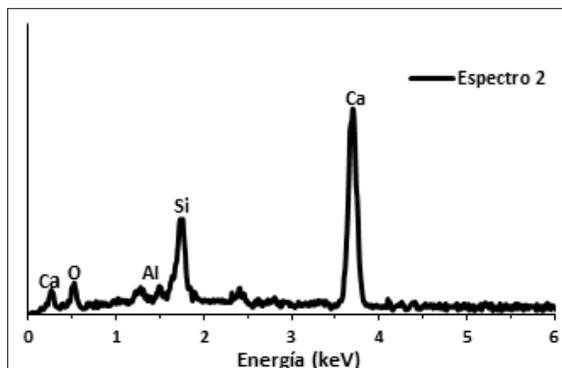


Figura 6. (a) Micrografía SEM de mortero con 3% de fibra de aserrín luego de 90 días de curado y resultados EDX de dos diferentes espectros locales dentro de (b) la fibra y (c) la matriz

F. Durabilidad

En la 7a y 7b se muestra la evolución del proceso de inmersión de la fibra de aserrín en una solución de 0,1M de NaOH a temperatura ambiente. Luego de siete días de inmersión, es posible notar un cambio de coloración superficial en las fibras. La pérdida de masa observada en este ambiente alcalino fue de $0,0953 \pm 0,0006$ g, en promedio, lo que corresponde a una reducción de 4,67%. Mediante el análisis de microscopía óptica, antes y después de la inmersión de la fibra en el reactivo, no se encontraron cambios apreciables en su superficie. Esto confirma lo observado mediante el análisis SEM, el cual no evidenció una degradación apreciable de las fibras dentro del mortero. En general, no se presenta una reducción substancial de la masa de las fibras, aunque es claro que es necesario realizar más estudios de durabilidad en los que se analice el ataque alcalino del $\text{Ca}(\text{OH})_2$ hacia las fibras, así como métodos de protección superficial y su repercusión en sus propiedades mecánicas. Dicho estudio lo desarrollan en la actualidad los autores de este artículo, a fin de obtener futuros resultados.

a)



b)



Figura 7. Muestras de aserrín después de (a) cero días y (b) siete días de inmersión en una solución de 0,1M de NaOH

IV. CONCLUSIONES

En este estudio se analizó la viabilidad del uso de fibras de aserrín para modificar mezclas de mortero durante tiempos de curado hasta de 90 días.

Los morteros modificados con fibra de aserrín presentaron menores densidades que los morteros sin fibras. De los porcentajes en peso de fibra evaluados, se concluye que los morteros con 3% de fibra se pueden catalogar como livianos (densidad menor de 1,8 g/cm³).

La resistencia a la compresión de los compuestos disminuye a medida de que aumenta su porcentaje de fibra, pero incrementa a mayor periodo de curado. Cuantitativamente, la resistencia a la compresión, luego de 90 días de curado, se reduce en comparación con el mortero sin fibra en un 3,07%, 20,02% y 40,07% para porcentaje en peso de aserrín de 0,5%, 1% y 3%, respectivamente. La adición de altos porcentajes de fibra disminuye de manera significativa la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad de los compuestos.

Los morteros modificados con fibra de aserrín conservaron su núcleo luego de ser falladas a compresión, lo que indica una mejora en el comportamiento posfalla de los compuestos gracias a la morfología fibrosa del aserrín. Esto permite una mejora en la ductilidad de los morteros, lo cual se corrobora visualmente durante la falla.

De acuerdo con los ensayos SEM, la condición de 3% de fibra de aserrín presenta menos adherencia que las demás condiciones, lo que está de acuerdo con los resultados de la resistencia a la compresión y del módulo de elasticidad.

El uso del mortero reforzado con 1% de aserrín puede tener aplicaciones en aquellos elementos estructurales que tiendan a presentar más fisuras, puesto que para este porcentaje la reducción de la resistencia a la compresión no es tan considerable como para otros porcentajes de refuerzo más altos. El uso del mortero reforzado con 3% de aserrín puede tener aplicaciones en aquellos elementos no estructurales que requieran poco peso, es decir, que necesariamente requieran ser livianos (por ejemplo, paneles no estructurales o aumento del nivel del piso acabado (losas)).

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al profesor Juan Carlos Cardona del Laboratorio de Concretos del Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid por su colaboración en equipos de laboratorio y conocimientos del área temática. También se agradece a la Dirección de Investigación (Proyectos de investigación, sede central, Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, 2016) por la asistencia financiera.

REFERENCIAS

- [1] C. A. Juárez Alvarado, "Concretos base cemento Portland reforzados con fibras naturales (Agave Lechugilla), como materiales para construcción en México", 2002.
- [2] Z. Li, L. Wang y X. Wang, "Flexural characteristics of coir fiber reinforced cementitious composites", *Fibers Polym.*, vol. 7, n.º 3, pp. 286-294, 2006. doi: <https://doi.org/10.1007/BF02875686>
- [3] P. Turgut, "Cement composites with limestone dust and different grades of wood sawdust", *Build. Environ.*, vol. 42, n.º 11, pp. 3801-3807, nov. 2007. doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.11.008>
- [4] M. Bederina, B. Laidoudi, A. Goullieux, M. M. Khenfer, A. Bali y M. Quéneudec, "Effect of the treatment of wood shavings on the physico-mechanical characteristics of wood sand concretes", *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, n.º 3, pp. 1311-1315, Mar. 2009. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.07.029>
- [5] J. Wei, S. Ma y G. T. D'Shawn, "Correlation between hydration of cement and durability of natural fiber-reinforced cement composites", *Corros. Sci.*, vol. 106, pp. 1-15, 2016. doi: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2016.01.020>
- [6] V. Corinaldesi, A. Mazzoli y R. Siddique, "Characterization of lightweight mortars containing wood processing by-products waste", *Constr. Build. Mater.*, vol. 123, pp. 281-289, 2016. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.011>
- [7] "ASTM C597-16-Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete." [En línea]. Disponible en: <https://shop.bsigroup.com/ProductDetail/?pid=00000000030344342>. Accedido: En. 30, 2018].
- [8] R. E. Philleo, "Comparison of results of three methods for determining young's modulus of elasticity of concrete", *J. Proc.*, vol. 51, n.º 1, pp. 461-470, En. 1955.
- [9] J. Rosell y I. Cantalapiedra, "Método simple para determinar el módulo de Young dinámico a partir de una excitación por impacto aplicado a morteros de cal y cemento", *Mater. Constr.*, vol. 61, n.º 301, pp. 39-48, 2011.

- [10] C. ASTM, "109 Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)", *Phila. PA Am. Soc. Test. Mater.*, vol. 318, 1999.
- [11] M. Mageswari y B. Vidivelli, "The use of sawdust ash as fine aggregate replacement in concrete", *J. Environ. Res. Dev.*, vol. 3, n.º 3, 2009.
- [12] J. Singh, N. Mishra, S. Banerjee y Y. C. Sharma, "Comparative studies of physical characteristics of raw and modified sawdust for their use as adsorbents for removal of acid dye", *BioResources*, vol. 6, n.º 3, pp. 2732-2743, 2011.
- [13] K. Sideris, P. Manita y K. Sideris, "Estimation of ultimate modulus of elasticity and Poisson ratio of normal concrete", *Cem. Concr. Compos.*, vol. 26, n.º 6, pp. 623-631, 2004. doi: [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(03\)00084-2](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(03)00084-2)
- [14] B. Belhadj, M. Bederina, N. Montrelay, J. Houessou y M. Quéneudec, "Effect of substitution of wood shavings by barley straws on the physico-mechanical properties of lightweight sand concrete", *Constr. Build. Mater.*, vol. 66, pp. 247-258, Sep. 2014. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.090>
- [15] K. Gopinath, K. Anuratha, R. Harisundar y M. Saravanan, "Utilization of saw dust in cement mortar & cement concrete", *Int. J. Sci. Eng. Res.*, vol. 6, n.º 8, pp. 665-682, 2015.
- [16] R. Gül, R. Demirboğa y T. Güvercin, "Compressive strength and ultrasound pulse velocity of mineral admixed mortars", 2006.
- [17] K. Tharmaratnam y B. S. Tan, "Attenuation of ultrasonic pulse in cement mortar", *Cem. Concr. Res.*, vol. 20, n.º 3, pp. 335-345, 1990. doi: [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(90\)90022-P](https://doi.org/10.1016/0008-8846(90)90022-P)
- [18] R. Demirboğa, İ. Türkmen y M. B. Karakoc, "Relationship between ultrasonic velocity and compressive strength for high-volume mineral-admixed concrete", *Cem. Concr. Res.*, vol. 34, n.º 12, pp. 2329-2336, 2004. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.04.017>
- [19] J. A. Bogas, M. G. Gomes y A. Gomes, "Compressive strength evaluation of structural lightweight concrete by non-destructive ultrasonic pulse velocity method", *Ultrasonics*, vol. 53, n.º 5, pp. 962-972, 2013. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2012.12.012>
- [20] A. A. Ikpong, "The relationship between the strength and non-destructive parameters of rice husk ash concrete", *Cem. Concr. Res.*, vol. 23, n.º 2, pp. 387-398, 1993. doi: [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(93\)90104-H](https://doi.org/10.1016/0008-8846(93)90104-H)