

Biocompuesto cemento tepexil reforzado con fibras de *Agave angustifolia* Haw. como mortero ligero

Andy A. Olivera^{1§}
Magdaleno Caballero Caballero¹
Rafael Alavéz Ramírez¹
Fernando Chiñas Castillo²
José Luis Montes Bernabé¹
María Eugenia Silva Rivera¹

¹Instituto Politécnico Nacional- CIIDIR Unidad Oaxaca, Departamento de Investigación Hornos No. 1003, Col. Noche Buena, Municipio de Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca, CP. 71230, Oaxaca. Tel. (951) 517 0610 Ext. 82742 (mcaballero@ipn.mx; arrafael@yahoo.com.mx, mbernabejoseluis@yahoo.com.mx, marusr@yahoo.com). ²Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Oaxaca, Departamento de Ingeniería Mecánica, Calz Tecnológico No. 125, CP. 68030, Oaxaca, Oaxaca. Tel. (951) 50 15016. (fernandochinas@gmail.com).

§Autor para correspondencia: andy.oliverarivas@gmail.com.

Resumen

El bagazo de agave es un material residual que se obtiene en el proceso del mezcal. La acumulación de este material se considera un problema ambiental en las comunidades que producen esta bebida espirituosa de forma artesanal. Este residuo contiene fibras óptimas para su uso como material de refuerzo, obteniéndose un valor agregado y reduciendo la contaminación ambiental. En el desarrollo de un nuevo material, se necesita conocer sus propiedades mecánicas. Para saber si el nuevo material es factible, una de las propiedades más importantes es la resistencia a la compresión. Para este trabajo se tuvo como objetivo determinar la resistencia a la compresión de un material biocompuesto de matriz cemento/tepexil, reforzado con fibras de bagazo de agave. Para la obtención del material, las fibras fueron lavadas con agua con una hidrolavadora, secadas a la intemperie durante 7 h y molidas en un molino de cuchillas a 1 mm de longitud. Posteriormente, se trataron con una solución acuosa de hidróxido de calcio al 10%, durante 34 h. Se realizaron cinco distintas formulaciones con diferentes proporciones de fibra/tepexil. La resistencia a la compresión se midió en una máquina universal Geotest a 7, 14 y 28 días. Se observó que en el aumento de la proporción de fibras hay una disminución en la resistencia a la compresión y densidad del material biocompuesto. La proporción óptima de fibras fue de 1:0:1 (cemento Portland:tepexil:fibra), con una resistencia a la compresión de 6.19 MPa y una densidad de 1 366.73 kg/m³ a los 28 días.

Palabras clave: fibras de bagazo de agave, material biocompuesto, resistencia a la compresión.

Recibido: junio de 2018

Aceptado: julio de 2018

Introducción

En el proceso de producción de mezcal se generan residuos, principalmente el bagazo de agave. En el estado de Oaxaca se producen aproximadamente 4 807 275 ton de bagazo de *Agave angustifolia* Haw (Gutiérrez, Altamirano y Urrestazaru, 2012). Éste residuo contiene fibras lignocelulósicas que no son aprovechadas y se vierten en campos o arroyos (Cortés, 2009) las cuales contribuyen al efecto invernadero (Gómez, 2014). En los últimos años, se ha preferido usar fibras vegetales para desarrollar materiales de construcción por sus ventajas técnicas: densidad baja, valor comercial bajo, resistencia a la tensión y excelente confort térmico (Aguilar *et al.*, 2005). En la actualidad, no existen estudios que encuentren utilidad industrial al bagazo. Por cada tonelada de bagazo de *Agave angustifolia* Haw se obtiene 3.1% de fibras. Las fibras se componen principalmente por celulosa (43%), hemicelulosa (19%), lignina (15%), azúcares (10%), entre otros (Zárate, 2006).

Los materiales compuestos son de gran importancia en la ciencia y tecnología de los materiales, ya que sus combinaciones brindan propiedades físicas y mecánicas distintas a las de sus componentes. Abdullah *et al.* (2011) hicieron un material compuesto de cemento Portland reforzado con fibra de coco y arena, el tamaño de la arena fue menor a 2 mm, con una relación agua cemento de 0.55. Se sustituyó la arena por fibra de coco a 3, 6, 9, 12 y 15%. Los resultados al módulo de ruptura y resistencia a la compresión con 9% de fibra fueron los más altos con 43.8 MPa a los 28 días. Por otro lado, Darsana *et al.* (2016) desarrollaron con un material compuesto de cemento, arena y fibras de coco de 25mm. Sustituyeron la arena por fibras a 10 y 15%, con una relación agua/cemento de 0.6, obteniendo resultados a resistencia a la compresión de 40.10 MPa con 10% de sustitución de fibra. Roma *et al.* (2008) realizaron una evaluación mecánica, física y térmica de tejas con varias formulaciones de cemento portland puzolánico y humo de sílice, reforzadas con fibras de eucalipto de 0.66 mm y/o sisal de 1.66 mm. Se encontró que los materiales reforzados con fibras de sisal a 28 días tuvieron los mejores resultados en tenacidad y carga máxima de 1152 J/m² y 1111 N respectivamente. Observaron también que el tipo de fibras influyen en la absorción de agua, densidad aparente y permeabilidad. Por último, el rendimiento térmico del material reforzado con sisal mostró que son aceptables como sustitutos de láminas de fibrocemento.

El objetivo del presente estudio fue determinar la resistencia a la compresión de un material biocompuesto de matriz cemento/tepexil, reforzado con fibras de bagazo de agave para aplicaciones posteriores en la construcción.

Materiales y métodos

Acondicionamiento de fibras

Bagazo de agave *angustifolia* Haw fue recolectado en un palenque de Santiago Matatlán, Oaxaca, 16° 51' 55.4" latitud norte 96° 22' 41.1" longitud oeste (Figura 1). Se sumergió el bagazo en agua potable hasta cubrirlo totalmente durante 24 h para poder separar y ablandar la pulpa de las fibras. Se lavó el bagazo con una hidrolavadora KARCHER Modelo K4 Premium Car, con el fin de retirar la pulpa y azúcares de las fibras y no alterar los resultados finales de las mezclas del mortero. Las fibras lavadas se expusieron al sol durante 7 h para ser

secadas. Una vez secas, se cortaron las fibras en un molino de cuchillas marca Fritsch Pulverisette 19 con tamiz de 1 mm (Figura 2). Por último, las fibras fueron sumergidas durante 34 h en una solución acuosa de hidróxido de calcio al 10%, dicho tratamiento fue realizado con el objetivo de eliminar la lignina de las fibras y mejorar la interfaz de las fibras con cemento.



Figura 1. Recolección de bagazo de agave *angustifolia* Haw.



Figura 2. Molienda de fibras.

Matriz

Se utilizó cemento portland compuesto (CPC) Impercem 30R que satisface las especificaciones de la norma mexicana NMX-C-414-ONNCCE. En el Cuadro 1 se muestra su composición química del Impercem.

Cuadro 1. Composición estándar del cemento Portland compuesto IMPERCEM 30R.

Componente	Masa (%)
Óxido de calcio	≈ 57.62
Óxido de silicio	≈ 22.03
Óxido de aluminio	≈ 4.74
Óxido de hierro	≈ 2.79
Óxido de magnesio	≈ 1.30
Sulfatos	----
Otros materiales	< 11

Se adquirió tepexil proveniente de los bancos del Perote, Veracruz. Se tamizó en las mallas #4, #8 y #16 con un Rotap modelo RX-29, el cual realiza dos movimientos, un movimiento horizontal circular y un movimiento de clavado vertical. Se seleccionó tepexil retenido en la malla #16 ya que se busca fabricar un material con densidad baja. En el Cuadro 2 se muestra la composición química del tepexil.

Cuadro 2. Composición química del tepexil.

Componente	(%) masa
Óxido de calcio	≈ 1.7
Óxido de silicio	≈ 67.5
Óxido de aluminio	≈ 14.52
Óxido de hierro	≈ 2.41
Óxido de magnesio	≈ 0.44
Sulfatos	----
Otros materiales	< 13

Fuente: Méndez (2008).

En el Cuadro 3 se muestra el diseño experimental para evaluar el efecto de las fibras en la matriz en las propiedades mecánicas.

Cuadro 3. Diseño experimental.

Longitud de fibras (mm)	Tamaño de tepexil (mm)	Relación cemento/agua
		1:0.5 y 1:0.4
		Proporciones de fibras
		CPC: tepexil: fibras
1	1.18	1:1:0
		1:0.6:0.4
		1:0.5:0.5
		1:0.4:0.6
		1:0.2:0.8
		1:0:1

Se realizaron 3 repeticiones por edad para la prueba de resistencia a la compresión.

Elaboración del material biocompuesto

Para la elaboración de los biocompositos, se hicieron cubos de 50 mm con base en la norma ASTM C 109/C 109M - 05 con proporciones de 1:1 CPC: tepexil (control) y 5 mezclas más, sustituyendo una parte del tepexil por fibras de agave en las siguientes concentraciones: 40, 50, 60, 80 y 100% en peso. Previamente, el cemento, tepexil y fibras se mezclaron en seco en una batidora marca Hamilton Beach durante 4 min para homogeneizar los materiales. Posteriormente, se agregó agua en la batidora con una relación agua/cemento de 0.5 para las concentraciones 40 al 80% y 0.4 para la concentración de 100% de fibras y se mezcló nuevamente durante 4 min (Figura 3).



Figura 3. Mezcla hidratada en la batidora.

Una vez lista la mezcla, se llenaron cubos metálicos de 50 x 50 x 50 mm siguiendo el método de la norma ASTM C 109/C 109M - 05. Después de 24 h se sumergieron los cubos en una solución acuosa con hidróxido de calcio 3% respecto al peso del agua como se observa en la Figura 4, para su curación.



Figura 4. Curado de cubos.

Resistencia a la compresión

Se ensayaron los especímenes a las edades de 7, 14 y 28 días como lo establece la norma. Las máquinas utilizadas para estas pruebas, debido a la capacidad de carga, fueron una prensa marca Geotest, modelo S5830 Multiloader, aplicándose carga a una velocidad de 1 mm/min (Figura 5) y una prensa manual de 120 t marca Helicoio. Para obtener el valor de la resistencia a la compresión se utilizó la siguiente ecuación:

$$f_m = P/A \quad (1)$$

Donde: f_m - resistencia a la compresión en MPa; P - carga máxima total en N; A - área de la superficie cargada en mm^2 .



Figura 5. Resistencia a la compresión en la prensa GEOTEST.

Resultados y discusión

En la Figura 6 se puede observar que el aumento en el contenido de fibras produce una densidad baja en las muestras. Esto se debe al difícil empaquetamiento de las fibras,

introduciendo huecos en el biocompuesto. A causa de la baja densidad, la resistencia a la compresión disminuye cuando la proporción de fibras aumenta (Paramasivam *et al.*, 1984; Khedari *et al.*, 2001). En el Cuadro 4, es posible observar que el aumento de fibras reduce la resistencia a la compresión y la densidad del material, pero este valor aumenta a mayor edad. Para las muestras de especímenes con sustitución 100% de fibras tuvo valores de 80%, debido a la relación agua:cemento de 0.4 que se agregó y que causo un aumento en la resistencia a la compresión. La proporción de 1:0:1 (CPC:tepxil:fibras) redujo a la mitad su resistencia con respecto a la proporción control 1:1:0 a los 28 días. Todas las proporciones a los 14 días tienen una resistencia a la compresión mayor a los 5.2 MPa, que es mayor a lo requerido por la norma ASTM C 270 - 07. En la Figura 7 se puede ver el aumento de la resistencia a la compresión conforme pasan los días. Una de las ventajas de las fibras lignocelulósicas es su baja densidad, lo cual se traduce en materiales más ligeros. En las proporciones de 1:0.2:0.8 y 1:0:1 se tiene una resistencia a la compresión superior a 5.2 MPa a los 14 días.

Cuadro 4. Resistencia a la compresión.

Proporción de fibras CPC: tepxil: fibras	7 días		14 días		28 días	
	f _c ^A (MPa)	Densidad (kg/m ³)	f _c (MPa)	Densidad (kg/m ³)	f _c (MPa)	Densidad (kg/m ³)
1:1:0	10.76 ±	1451.46	10.71±	1502.95	12.4 ±	1566.77
	2.03 ±	13.58	4.73 ±	5.83	0.99 ±	85.43
1:0.6:0.4	6.61 ±	1478.30	9.13 ±	1499.51	10.08 ±	1512.32
	2.12 ±	34.87	0.06 ±	20.34	0.35 ±	19.50
1:0.5:0.5	5.6 ±	1383.11	5.89 ±	1383.79	7.06 ±	1401.06
	0.64 ±	1.43	1.05 ±	22.09	0.60 ±	14.04
1:0.4:0.6	5.23 ±	1442.32	5.81 ±	1428.92	6.24 ±	1452.94
	0.67 ±	11.49	0.30 ±	18.26	0.76 ±	8.56
1:0.2:0.8	4.67 ±	1376 ±	5.47 ±	1386.8 ±	6.38 ±	1453.29
	0.29 ±	13.56	0.33 ±	16.98	0.49 ±	7.70
1:0:1	4.94 ±	1364.73	5.55 ±	1355.27	6.19 ±	1366.73
	0.31 ±	17.56	0.30 ±	1.38	0.30 ±	12.67

^A f_c= resistencia a la compresión.

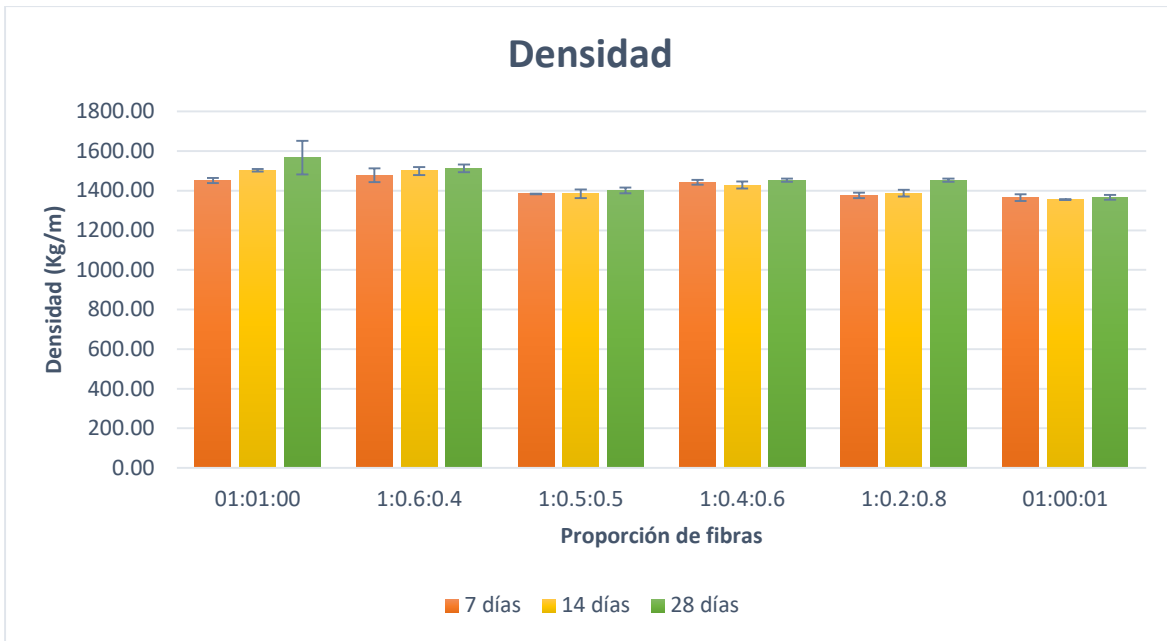


Figura 6. Comparación gráfica de las densidades obtenidas.

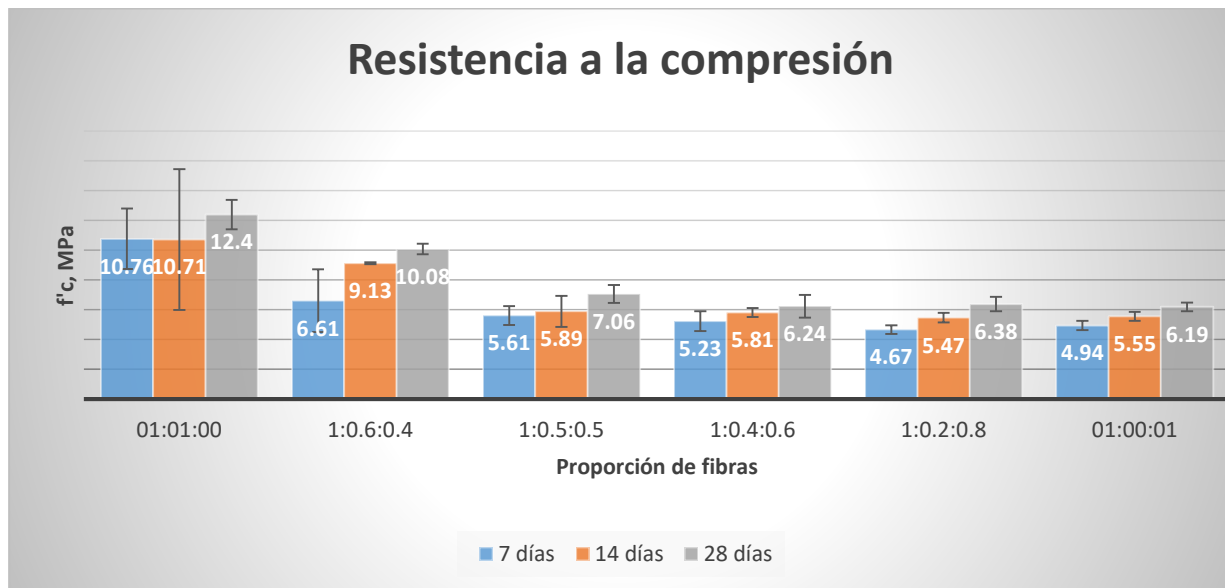


Figura 7. Comparación gráfica de resistencias a la compresión obtenidas.

La proporción 1:0:1 (CPC:tepxil:fibras) tiene la menor densidad con resistencia a la compresión aceptable por la norma ASTM C 270 - 07. La densidad y resistencia a la compresión de un mortero ordinario es de 2 000 kg/m³ y 22 MPa respectivamente Khedari *et al.* (2001). En este estudio se logró realizar un mortero ligero con una densidad de 1 366.73 kg m³, pero no se superó la resistencia a la compresión.

Khedari *et al.* (2001) realizaron dos materiales compuestos hechos de cemento, arena y fibras de coco y cemento, arena y fibras de durian, teniendo como resultado en la resistencia a la compresión de 2.46 y 3.29 MPa, con densidades de 959 y 1 456 kg m³ respectivamente. Se

observa que la muestra de proporción 1:0:1 supera la resistencia a la compresión de las muestras con fibras de coco y con fibras de durian y se tiene menor densidad de la muestra de cemento, arena y fibras de durian.

Abdullah *et al.* (2011) desarrollaron un material compuesto con cemento, arena y fibras de coco teniendo una resistencia a la compresión de 43.8 MPa y densidad de 1 955 kg m³, si se compara al mortero ordinario, no se tiene un material ligero debido a que la densidad tiene un valor similar. Sin embargo, la proporción 1:0:1, aunque no supera la resistencia a la compresión, si se logró disminuir su densidad, haciendo un mortero ligero.

La proporción 1:0:1 también supera la resistencia a la compresión y es más ligero que el material compuesto de Khedari *et al.* (2005) hechas con cemento, tierra, arena y fibras de coco obteniendo valores de resistencia a la compresión de 3.88 MPa y densidad de 1 586.77 kg m³,

Conclusiones

La presencia de las fibras vegetales en matriz cemento/tepexil permite la obtención de materiales más ligeros que los tradicionalmente utilizados en la industria de la construcción. Sin embargo, la presencia de las fibras reduce la resistencia a la compresión de estos materiales. Según la norma ASTM C 270 - 07, establece que la resistencia mínima a la compresión de este tipo de materiales debe ser mayor a 2.4 MPa, mientras que los materiales estudiados en este trabajo presentan valores 250% mayores al valor mínimo. La proporción óptima de fibras es 1:0:1 (CPC: tepexil: fibras) con una resistencia a la compresión de 6.19 MPa a los 28 días. Con ésta proporción se pueden realizar distintos productos para la construcción, como son: bloques, tejas, tabiques, entre otros, con la ventaja de ser un mortero ligero de baja densidad.

Literatura citada

- Abdullah, A.; Jamaludin, S. B.; Anwar, M. I.; Noor, M. M. and Hussin, K. 2011. Assessment of physical and mechanical properties of cement panel influenced by treated and untreated coconut fiber addition. *Physics Procedia*. 22:263-269.
- Aguilar, P. A.; Quesada, S. K.; Sibaja, B. R. y Vega, B. J. R. 2005. Utilización de las fibras del rastrojo de piña (*Ananas comusus*, variedad champaka) como material de refuerzo en resinas de poliéster. *Rev. Iberoamericana de Polímeros*. 6(2):4-21.
- C 109/C 109M - 07. Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens). 9 p.
- Cortés, M. C. I. 2009. Propiedades mecánicas a tensión de las fibras del bagazo de *Agave angustifolia* Haw. residuo proveniente del proceso de la producción artesanal del mezcal. Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional. Instituto Politécnico Nacional. Tesis de Maestría.
- Darsana, P.; Abraham, R.; Joseph, A.; Jasheela, A.; Binuraj, P. R. and Sarma, J. 2016. Development of coir-fibre cement composite roofing tiles. *Procedia Technology*. 24:169-178.

- Gómez, G. A. V. 2014. Producción de biogás a partir de bagazo y vinaza de *Agave angustifolia* Haw. generada como residuo en la elaboración de mezcal. Ingeniería- CIIDIR Oaxaca IPN. Tesis de Maestría.
- Gutiérrez, G. A.; Altamirano, G. Z. and Urrestazaru, M. 2012. Maguey bagasse waste as sustainable substrate en soilless culture by melon and tomato crop. J. Plant Nutr. 2135-2144.
- Khedari, J.; Suttisonk, B.; Pratinthong, N. and Hirunlabh, J. 2001a. New lightweight composite construction materials with low thermal conductivity. Cement and Concrete Composites. 23(1):65-70.
- Khedari, J.; Watsanasathaporn, P. and Hirunlabh, J. 2005b. Development of fibre-based soil-cement block with low thermal conductivity. Cement and Concrete Composites. 27(1):111-116.
- NMX-C-414-ONNCCE-2014. Industria de la construcción - cementantes hidráulicos-especificaciones y métodos de ensayo. 5 p.
- Paramasivam, P.; Nathan, G. K. and Gupta, N. D. 1984. Coconut fibre reinforced corrugated slabs. Inter. J. Cement Composites and Lightweight Concrete. 6(1):19-27.
- Roma, L. C.; Martello, L. S. and Savastano, H. 2008. Evaluation of mechanical, physical and thermal performance of cement-based tiles reinforced with vegetable fibers. Construction and Building Materials. 22(4):668-674.
- Zárate, A. G. 2006. Caracterización y evaluación agronómica de materiales orgánicos potenciales para utilizarse como sustratos en cultivo sin suelo de melón (*Cucumis melo* L.). Producción y protección vegetal. CIIDIR - Oaxaca, IPN. Tesis de Maestría.