



## RESISTENCIA MECÁNICA Y CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE SUELO CEMENTO PLÁSTICO CON ADICIÓN DE FIBRA VEGETAL

Edgardo J. Suárez-Domínguez<sup>1</sup>, Yolanda G. Aranda-Jiménez<sup>2</sup>, Carlos Zúñiga-Leal<sup>3</sup>

Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo (FADU). Universidad Autónoma de Tamaulipas. Tampico, México

<sup>1</sup>edgardo.suarez@docentes.uat.edu.mx, <sup>2</sup>yaranda@docentes.uat.edu.mx, <sup>3</sup>czuniga@docentes.uat.edu.mx

**Palabras clave:** losa de tierra, capacidad calorífica, resistencia mecánica

### Resumen

Actualmente existen propuestas de elaboración de losas a base de tierra con diversas áreas de oportunidad, principalmente en su resistencia a la flexión y en los tipos de elementos de refuerzo que deben colocarse para incrementar su tiempo de vida. Además de lo anterior, su capacidad de transferencia de calor es importante debido a que es común que se corresponda a la estructura que mayor tiempo está en contacto con la radiación solar y por lo tanto puede relacionarse con el confort. El objetivo de este trabajo es exponer el análisis mecánico realizado a una estructura tipo losa y los efectos de dosificación de estabilizantes en el coeficiente de difusividad térmica. Para esto se realizó el diseño teórico de una losa a base de tierra conformada por una mezcla de tierra estabilizada con mucílago de nopal y fibras de ixtle. Se propuso un análisis estructural para determinar los esfuerzos flexionantes para superficies de dimensiones menores a 4 m x 3 m. Se encontró que la difusividad térmica en estos materiales dosificados con mucílago y fibras naturales es menor en comparación a la difusividad térmica de losas construidas con materiales tradicionales.

### 1. INTRODUCCIÓN

El empleo de tierra como material de construcción es en realidad un método antiguo que, en la arquitectura moderna, se sustituyó por hormigón armado, metal y muchos otros materiales convencionales (Sargentis; Kapsalis, 2009). En contradicción, la tierra es un material económico de fácil acceso y que puede ser producido a partir de la misma tierra excavada donde se realiza la obra o bien de terrenos circundantes disminuyendo así los costos de transporte; es amigable con el medio ambiente y tiene una tasa de durabilidad elevada si se toma en cuenta el número de construcciones antiguas a base de tierra que permanecen casi en perfecto estado (Revuelta-Acosta et al., 2010).

Así, las construcciones modernas de tierra se consideran sustentables y la edificación con este material puede aplicarse para la mayoría de los estilos de construcción, lo que se traduce en el logro de una conciencia más centrada sobre el consumo de energía para producir los materiales de construcción convencionales (Dobson, 2000).

Los términos conductividad térmica, estabilización y resistencia mecánica comienzan a tener entonces un papel relevante en el tema de la edificación con tierra cuando se pretende emplear este material en la mayor cantidad de construcciones posibles. Considerando que la segunda ley de la Termodinámica implica que la energía siempre fluye de un estado mayor a uno menor, es evidente que el calor se transmite de un cuerpo caliente a uno frío o menos caliente. De aquí que la conductividad y difusividad térmicas sean parámetros relevantes en la caracterización de los materiales y que conlleven a la selección de un determinado material de construcción en detrimento de otro o viceversa (Suárez-Domínguez et al, 2014).

La conductividad térmica se refiere a la capacidad de conducción de calor que tiene un material y la difusividad térmica se refiere a la capacidad de este para transmitir una variación de temperatura, es decir en el estado no estacionario. La conductividad térmica es, por consiguiente, una propiedad específica de cada material que caracteriza el transporte de calor en estado estacionario y se puede calcular de forma general usando la ecuación 1.

$$\lambda(T) = \rho(T) \cdot C_p(T) \cdot a(T) \quad (1)$$

Donde (Bird et al, 2007):

- $\lambda$  es la conductividad térmica
- $\rho$  es la densidad del material
- $C_p$  es la capacidad calorífica
- $a$  es la difusividad térmica

El proceso de estabilización de la tierra, por su parte, puede ser físico, fisicoquímico o químico con el objetivo primordial de reducir el volumen de espacios vacíos entre las partículas de suelo (porosidad), rellenar espacios que no pueden ser eliminados (permeabilidad) y unir o mejorar las uniones existentes entre las partículas (fuerza mecánica) (Suárez Domínguez; Aranda Jiménez; Roux Gutiérrez, 2013). Aranda-Jiménez et al. (2012) describen un método para elaborar mezclas con tierra vertida que fue aplicado para proponer un muro monolítico en vivienda (Aranda-Jiménez, Suárez Domínguez, 2014) cuyas propiedades fueron mejoradas posteriormente con la adición de mucílago de nopal o acíbar. Se conoce como tierra vertida a una técnica de edificación que emplea suelo de características plásticas con agregados finos y gruesos y que puede desempeñar la misma función que el concreto magro, en combinación con estabilizantes orgánicos e/o inorgánicos, siendo de aplicación más sencilla que otras técnicas similares (Suárez-Domínguez et al, 2015a).

Es posible que exista una relación entre la interacción de los componentes que debe profundizarse al igual que otras propiedades de las mezclas a base de tierra. Se han realizado otras estabilizaciones principalmente con compuestos alcalinos que cambian iones con los componentes del suelo (Cristelo et al. 2012), pero, independientemente del material dosificado, la caracterización mecánica determina el primer requisito necesario para un diseño posterior. El mucílago de nopal y la goma xantana, que son químicamente similares, no presentan cationes en su estructura ni otro tipo de metal, pero tienen la capacidad de modificar la superficie y logra estabilizar suelos de tal suerte que pueden ser usados estructuralmente en la edificación (Suárez Domínguez; Aranda Jimenez, 2013).

Por otra parte, las fibras extraídas de las hojas de los magueyes y otras plantas de la familia de las agaváceas o afines a ellas reciben el nombre coloquial de ixtle y debido a su resistencia son conocidas como fibras duras. La lechuguilla (*Agave lechuguilla* Torrey) es un maguey nativo mexicano y es una de las plantas que durante muchas generaciones ha constituido la fuente principal de ingresos de miles de familias campesinas, en localidades donde la actividad recolectora está siempre ligada o complementada con la agricultura temporal o la ganadería (Reyes Agüero; Aguirre Rivera; Peña Valdivia, 2000). El ixtle de lechuguilla se utiliza en la elaboración de cepillos, escobetas, costales, cubiertas para pacas de algodón, jarciería, cordelería, bajo alfombras, aseo de edificios, fabricación de laminados, aglomerados, cartón, papel filtro, entre otros. En la actualidad se ha tratado de integrar y dar utilidad a los residuos del proceso de industrialización, que por su alto contenido en sapogeninas adquieren propiedades detergentes que les permiten ser aprovechados para el lavado de ropa, losa o usarlo como producto de limpieza capilar o incluso como abrasivos en la en la fabricación de vidrio y en la elaboración de filtros de automóviles o productos esteroides (Velasco et al., 2009).

Se ha reportado que la adición de fibras de ixtle en mezclas de tierra para edificación produce buenas propiedades en los materiales (Suárez-Domínguez et al., 2017a, 2017b). Además de otros cambios físicos, se han tenido mejoras como por ejemplo la transferencia de calor (Suarez-Dominguez et al., 2015b) lo que puede deberse a que, aunque exista un mejor arreglo, no necesariamente se traduce en una separación infinitamente pequeña, sino que existe una separación tal en su conformación que inhibe el paso de calor.

## 2. PARTE EXPERIMENTAL

Se elaboraron muestras con las siguientes proporciones de materiales: suelo tipo Champayán, cemento al 16% (en peso), fibras en 100 miligramos por cada kilogramo de mezcla y estabilizante al 1% (en peso). El suelo denominado Champayán proviene del sur del Estado de Tamaulipas, México y fue caracterizado en su composición granulométrica en laboratorio.

Las fibras fueron obtenidas de un plantío dentro de las instalaciones universitarias, establecido específicamente para la obtención de dicha materia prima. El agave fue procesado para la obtención de la fibra de acuerdo con las especificaciones recomendadas y reportadas (Castillo-Quiroz et al., 2014; Ramírez, 2005). El mucílago de nopal y la goma xantana fueron los estabilizantes utilizados en pruebas independientes. El extracto de mucílago de nopal se preparó tomando los cladodios de nopal y cortándolos en piezas de aproximadamente 5x5 cm, se dejaron macerar en agua en proporción 1:9 durante 48 horas. La mezcla obtenida es totalmente triturada de forma mecánica durante 5 min, y se preservó con benzoato de sodio y ácido cítrico. Por otro lado, la goma xantana se adquirió grado industrial de la marca Pochteca. En ambos casos se evaluó la resistencia a la compresión de ocho probetas utilizando una máquina universal marca Controls.

A partir de los resultados de las pruebas preliminares de resistencia mecánica a la compresión, se decidió utilizar uno de los dos estabilizantes para evaluar la resistencia a la flexión y a la compresión de la mezcla final y los resultados se contrastaron con aquellos observados para un concreto elaborado de forma tradicional (para fines comparativos con un valor de resistencia a la compresión de 20 MPa).

Todas las probetas se realizaron por moldeo en recipientes cilíndricos de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura y los análisis se desarrollaron posteriormente a los 28 días, periodo tradicionalmente aceptado para obtener una resistencia máxima cuando se realizan mezclas con cemento dosificado.

Finalmente, para la determinación de la conductividad térmica del material se utilizó un equipo KP2867 con sensor TR-01 (Decagon Devices, Inc.) a una temperatura de 25°C. La medición se realizó por triplicado durante un tiempo de 60 min. La determinación de tiempo de tránsito de ondas ultrasónicas se realizó con un medidor de velocidad de pulso ultrasónico marca Controls modelo E48.

## 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La tabla 1 muestra los resultados de la caracterización granulométrica del suelo tipo Champayán.

Tabla 1. Caracterización granulométrica del suelo tipo Champayán

Número de malla	Apertura de malla (mm)	Contenido en peso (%)
2	50,80	0
1 ½	38,10	17
1	25,40	9
¾	19,00	8
3/8	9,50	16
4	4,76	13
8	2,38	37

Al realizar mezclas de prueba con mucílago de nopal y goma xantana dosificados, no se encontraron diferencias significativas de resistencia mecánica a la compresión, cuyo

resultado fue de  $8,4 \pm 0,3$  MPa. Cuando se dosifica la fibra de nopal, la resistencia puede modificarse hasta 14,5 MPa y por esta razón se decidió utilizar dicho material como estabilizante, aunado a la disponibilidad en la región y a la facilidad de manipulación. El peso volumétrico entre ambos materiales tampoco mostró variaciones significativas, estableciéndose en un valor de  $1,91 \pm 0,02$  ton/m<sup>3</sup>. Sin embargo, la misma tierra utilizada sin estabilizantes ni cemento y solo añadiendo agua obtuvo un resultado de  $1,78$  ton/m<sup>3</sup>, lo que representa mas de un 7% de incremento en la densidad. Este incremento que es directamente relacionado al incremento de masa por unidad de volumen solo puede deberse por una disminución de espacios vacíos entre las partículas, lo que supone una mejor interacción entre los componentes. Estos resultados son similares a los encontrados con anterioridad por los mismos autores de este artículo con una tendencia similar en los cambios al dosificar productos químicos.

Una representación de la realización de la prueba de conductividad térmica y velocidad ultrasónica se muestra en la figura 1.



Figura 1. Representación de la toma de conductividad térmica (izquierda) y de pulso ultrasónico (derecha).

Los resultados con respecto a la conductividad térmica y resistencia mecánica a la compresión se presentan en la tabla 2.

Tabla 2. Conductividad térmica para los ensayos realizados posterior a los 28 días (promedios con desviaciones máximas del 5%).

Muestra	Capacidad calorífica (°C×m/W)	Conductividad térmica (W/m×K)	Resistencia a la compresión (MPa)
Tierra con estabilizante	1,180	0,846	14,5
Tierra sin estabilizante	1,320	0,786	8,4
Concreto tradicional (muestra control)	0,510	1,959	20,0

Los resultados en este trabajo soportan aquellos obtenidos anteriormente y permiten determinar las causas en las mejoras de superficie: los cambios observados en los pesos volumétricos y la resistencia a la compresión como los expuestos en la tabla 2, mismos que son producidos por la adición de estabilizantes, producen además un reacomodo de los componentes en la mezcla que resulta en una disminución de la rugosidad, además de incrementar su resistencia a esfuerzos externos, efecto observado con otros tipos de estabilizantes naturales (Zarazúa Portes et al., 2016).

Los resultados obtenidos con respecto a la velocidad ultrasónica se muestran en la tabla 3. Puede observarse un decremento del tiempo de tránsito sonoro por unidad de distancia cuando se utilizan estabilizantes, lo cual soporta la hipótesis establecida sobre la reducción de espacios interiores en la mezcla cuando se emplean estos componentes.

Para realizar el análisis de diseño de una tapa de concreto se realizó un cálculo de acuerdo con la normativa mexicana de la construcción (Normas técnicas complementarias sobre criterios y acciones para el diseño estructural de las edificaciones, 2012) aplicada a losas de

concreto y cimentaciones con los datos especificados en la tabla 4 y cuyos resultados se muestran en la tabla 5. Estos resultados muestran que el estabilizante ayuda a incrementar sustancialmente la resistencia al momento resistente (MR) y el cortante resistente (VCR).

Tabla 3. Pulso ultrasónico para la muestra con y sin estabilizante natural (ASTM C597, 2016).

Muestra	Tiempo de tránsito por unidad de distancia [ $\mu\text{s}/\text{cm}$ ]
Muestra con estabilizante	2,04
Muestra sin estabilizante	2,40

Tabla 4. Características de los materiales consideradas para análisis estructural.

Material	Resistencia a la compresión (MPa)	Peso volumétrico ( $\text{t}/\text{m}^3$ )
Tierra vertida con fibra	14,78	1,91
Tierra vertida sin fibra	8,51	1,90
Concreto	20,0	2,40

Tabla 5. Análisis de elemento resistente de 20 cm de peralte.

Material	MR ( $\text{kgf}\times\text{cm}$ )	VCR (kgf)	Vd (kgf)
Tierra vertida con estabilizante	425060,7	8700	4875
Tierra vertida sin estabilizante	401147,7	6501	3487
Concreto	432556,2	10119	4944

MR = momento resistente, VCR = cortante resistente, Vd = cortante de diseño

Puede notarse entonces una relación entre el momento resistente que en este caso es mayor cuando se estabiliza la tierra vertida con mucílago natural, incrementando su resistencia mecánica a la compresión, pero simultáneamente la densidad y a su vez reduciendo el tránsito de pulso ultrasónico.

Puede observarse que el material estabilizado tiene una conductividad térmica menor o, lo que es equivalente, capacidad calorífica mayor en contraste con el concreto tradicional que tiene una difusión de más del doble. Esto puede relacionarse no solo con la compacidad del material si no también con las características fisicoquímicas de los mismos.

#### 4 CONCLUSIONES

Se encontró que la difusividad térmica de la mezcla de tierra estabilizada con fibra natural es menor comparada con aquella observada en losas construidas con concreto, además que su peso volumétrico también es menor. Lo anterior puede deberse a la reducción de los espacios vacíos entre los componentes de la mezcla. Simultáneamente se encontró que cuando la densidad es mayor la transferencia de calor también es mayor, siendo inversamente proporcional a los valores de tiempo de pulso ultrasónico observados.

El trabajo futuro para estos materiales es su aplicación directa en edificación y la observancia del comportamiento de sus propiedades mecánicas, térmicas y acústicas a través del tiempo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM C597 (2016). Standard test method for pulse velocity through concrete. USA: ASTM International
- Aranda-Jiménez, Y.G. González-Defelice, A.A. Roux-Gutierrez, R. Espuna-Mujica, J.A. Arvizu-Sánchez, E. (2012) Tierra vertida. Hormigón verde. Estudio de los materiales componentes, su dosificación, interacción y puesta en obra de dos contextos. Informe Técnico. Programa de cooperación bilateral México- Argentina, CONACYT-MINCYT.
- Aranda Jimenez, Y. G.; Suárez Domínguez, E. J. (2014). Diseño de muros monolítico para un prototipo de vivienda sustentable. *Contexto*, 8(9), 67-76.
- Bird, R.B., Stewart, W.E., Lightfoot, E.N. (2007) *Transport Phenomena*. Jhon Wiley and Sons, New York. Pp 265-289.
- Castillo-Quiroz, D., Martínez-Burciaga, O. U., Ávila-Flores, D. Y., Castillo-Reyes, F., Sánchez-Chaparro, J. D. (2014). Identification of potential areas for establishment of plantations of agave lechuguilla Torr. in Coahuila, Mexico. *Open Journal of Forestry*, 4(5):520-526.
- Cristelo, N.; Glendinning, S.; Miranda, T.; Oliveira, D.; Silva, R. (2012). Soil stabilization using alkaline activation of fly ash for self-compacting rammed earth construction. *Construction and Building Materials*, 36, 727-735.
- Dobson, S. (2000). Continuity of tradition: new earth building. In: *Terra 2000: Eighth International Conference on the Study and Conservation of Earth Architecture*. London: James & James
- Normas técnicas complementarias sobre criterios y acciones para el diseño estructural de las edificaciones, Reglamento de construcciones para el Estado de Tamaulipas (2012) Disponible en: [http://po.tamaulipas.gob.mx/wp-content/uploads/2012/08/Regla\\_Construcciones.pdf](http://po.tamaulipas.gob.mx/wp-content/uploads/2012/08/Regla_Construcciones.pdf)
- Ramírez, M. C. C. (2005). Plantas de importancia económica en zonas áridas y semiáridas de México. *Anales del X Encuentro de Geógrafos de América Latina*, 3388-3407.
- Revelta-Acosta, J. D., Garcia-Diaz, A., Soto-Zarazua, G. M., Rico-Garcia, E. (2010). Adobe as a sustainable material: A thermal performance. *Journal of Applied Sciences*, 10(19), 2211-2216.
- Reyes Agüero, J. A., Aguirre Rivera, J. R., Peña Valdivia, C. B. (2000). Biología y aprovechamiento de Agave lechuguilla Torrey. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 67:75-88.
- Sargentis G-fivos., Kapsalis V.C. (2009) Earth building. Models, technical aspects, test and environmental evaluation. *International Conference on Environmental Science and Technology*.
- Suárez Domínguez, E. J.; Aranda Jimenez, Y. G. (2013). Diferencia fractal en superficies de tierra vertida con suelo de Tamaulipas. *Contexto*, 7(7), 65-72.
- Suárez Domínguez, E. J.; Aranda Jiménez, Y. G.; Roux Gutiérrez, R. S. (2013) Tierra vertida: Una descripción global. *Arquitectura y Humanidades*. Disponible en: <http://www.architecthum.edu.mx/Architecthumtemp/colaboradores/dominguez.et.al/dominguez.et.al.htm>
- Suárez-Domínguez, E. J., Aranda-Jiménez, Y. G., Palacio-Pérez, A., Izquierdo-Kulich, E. (2014). Modelo matemático para la descripción de la transferencia de calor para tierra vertida. *Nova scientia*, 6(12), 379-390.
- Suarez-Dominguez, E. J., Aranda-Jimenez, Y. G., Pérez, A. P., Kulich, E. I. (2015a). Determinación de los perfiles de temperatura y tiempo en un proceso de transferencia de calor en tierra vertida. *Revista Cubana de Ingeniería*, 6(1), 23-28.
- Suárez Domínguez, E. J., Aranda-Jiménez, Y. G., Palacio-Pérez, A.; Rodríguez-Valdés, A.; Izquierdo-Kulich, E. (2015b). Oscillating temperature profile model for a poured earth wall. *Concreto y cemento. Investigación y desarrollo*, 7(1), 44-51.
- Suarez-Dominguez, E. J., Aranda-Jimenez, Y. G., Zuñiga-Leal, C., De Leon-Ramirez, A. (2017a) Effect of the addition of cactus mucilage and fibers to samples of poured earth. *International Journal of Engineering Sciences & Research Technology*, 6(5), 132-136.
- Suárez-Domínguez, E. J., Aranda-Jimenez, Y. G., Fuentes-Perez, C., Zúñiga-Leal, C. (2017b) Behavior of the heat capacity and ultrasonic characterization for poured earth. *Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 14(6), 18-22.

Velasco, B. E., Arredondo, G. A., Zamora-Martínez, M. C., Moreno, S. F. (2009). Modelos predictivos para la producción de productos forestales no maderables: Lechuguilla. Manual Técnico Núm. 2. CENID-COMEF. INIFAP, México

Zarazua Portes, E.; Zuñiga-Leal, C.; Gallegos-Villela, R. R.; Aranda-Jiménez, Y. G. (2016). Mechanical resistance to compression poured earth, mixed with natural latex obtained from *Tabernaemontana alba Mill Apocynaceae*. American Journal of Engineering Research, 5(10), 363-366.

### **AGRADECIMIENTOS**

La presente investigación se llevó a cabo con apoyo del programa PRODEP para nuevos profesores de tiempo completo, solicitud número 214889, UAT-PTC-0239.

La parte experimental se desarrolló utilizando parcialmente equipos brindados por apoyo PROFOCIE al laboratorio de materiales de la FADU de la UAT.

### **AUTORES**

Edgardo J. Suárez-Domínguez, doctor en el área fisicomatemática por la UNAM, con posdoctorado en Materiales. Profesor investigador y jefe de la Unidad de Posgrado de la FADU-UAT. Los últimos 5 años ha publicado más de 20 artículos en revistas indexadas y cuenta con más de 6 patentes.

Yolanda G. Aranda-Jiménez, doctorado en Arquitectura con énfasis en vivienda (UAT 2010), línea de investigación en construcción con tierra. Miembro del SNI nivel I. Miembro de Proterra desde 2005. Representante de la Catedra UNESCO para la tierra en la FADU-UAT. Cuenta con varios artículos indexados y participación en congresos internacionales.

Carlos Zúñiga-Leal. Maestría en construcción por la Universidad Autónoma de Tamaulipas. Profesor investigador con perfil deseable PROMEP. Participa en el desarrollo de métodos aplicados a estructuras en el laboratorio de materiales de la FADU-UAT.