

ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON CAL PARA FIRMES Y BLOCKS

Elena Guadalupe Navarro Mendoza¹, Adrià Sánchez Calvillo², Elia Mercedes Alonso Guzmán³

Facultad de Arquitectura, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo-Morelia, Michoacán, México.

¹dnavarrom@gmail.com; ²adria.sanchez.9@hotmail.com

³Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo-Morelia, Michoacán, México.

eliamercedesalonso@gmail.com

Palabras clave: Modificación de arcilla, prueba Eades & Grimm, mejoramiento de suelo

Resumen

La estabilización de suelos con cal fue una técnica utilizada por civilizaciones prehispánicas para la consolidación de los pisos de vías públicas, y en años recientes se ha perdido el uso por la llegada del cemento desplazando este sistema constructivo a base de tierra. En los últimos años las investigaciones de la cal han comenzado a tener mayor importancia y retomando la técnica en la construcción de caminos y carreteras, obteniendo excelentes resultados en las pruebas mecánicas que se realizan. El presente artículo propone la utilización de la prueba Eades & Grimm como opción para conocer el porcentaje ideal de cal necesario para estabilizar un suelo arcilloso y realizar firmes con tierra que presenten más resistencia al uso diario en habitación principalmente. Otra posible aplicación es en la fabricación de block de tierra comprimida, al que esta mezcla otorgará una resistencia mayor que los adobes. La prueba consiste en medir el pH resultante de mezclar suelo con distintos porcentajes de cal y de esta forma obtener el más cercano al valor de 12,4. Este valor numérico indica cuando la cal modifica el comportamiento químico de las arcillas, observando un cambio físico y obteniendo una mejora del comportamiento mecánico del suelo. Se realizó la prueba Eades & Grimm para una muestra en particular, un suelo arcilloso del lago de Zirahuén Michoacán, se le añadió 5% de cal hidratada de construcción, observando resultados inmediatos en su textura y color.

1. INTRODUCCIÓN

El suelo arcilloso está presente alrededor del mundo y son los menos adecuados para edificar por sus deformaciones y su poco soporte de carga que tienen, lo que causa que este material sea desechado en muchas de las obras sin ser aprovechado. Se consideran suelos arcillosos aquellos cuyas partículas son inferiores a dos micras. Estas partículas se componen de minerales arcillosos, aluminio, silicatos de hierros, etc. Además, tienen la característica de adquirir plasticidad al ser mezclada con agua (ANFACAL, 2015a).

Por otro lado, la cal es el material resultante del proceso de calcinación de la piedra caliza tornando en óxido de calcio (conocido como cal viva), para posteriormente someterse a una hidratación transformándose en hidróxido de calcio (llamada cal apagada o cal hidratada). La cal, como producto de construcción, admite varias presentaciones siendo la más común en forma de polvo; esta presentación puede variar en su grado de pureza y color, siendo condicionada por el banco del que se extrae la materia prima y por la calidad.

La cal fue empleada como material de construcción tanto en edificaciones como en infraestructuras por parte de distintas sociedades y culturas tan alejadas como la romana y las prehispánicas. Probablemente de forma accidental, el desarrollo de la construcción en estas sociedades llevó al descubrimiento de las propiedades aglutinantes de la piedra caliza tras su tratamiento (Guerrero, 2013). En las sociedades prehispánicas, para la construcción de los caminos se realizaba una mezcla de los suelos arcillosos que se querían modificar con cal en piedra (cal viva) para evitar que con las lluvias no perjudicaran los caminos generando cambios en su estructura; también en los núcleos de sus fortificaciones, muros y edificios ceremoniales se empleaba una parte de cal para fijar las piezas constituyentes y protegerlas de los agentes externos. (Guerrero, 2013) También se encuentran referencias documentadas al uso constructivo de la cal en los libros de arquitectura de Vitruvio,

explicando el proceso de calcinación e hidratación de la misma (Vitruvio Polión, 1995). Hoy en día el cemento ha desplazado el uso de la cal en la construcción, pero se sabe que su fabricación impacta en el medio ambiente por las altas temperaturas necesarias para su calcinación, mientras la cal requiere de menores temperatura de calcinación ($<900^{\circ}\text{C}$), sumando su menor costo de adquisición, por lo que volver a utilizar la técnica descrita de estabilización con cal grado construcción, puede contribuir con el medio ambiente y habitabilidad de las viviendas.

Para lograr que este sistema constructivo pueda ser recuperado, se propone en el siguiente documento la realización y comprobación de la prueba Eades & Grimm (ASTM D6276, 2006) que consta en conocer cuál es el porcentaje ideal de cal para modificar los minerales arcillosos y que modifique su pH, para que las partículas de arcilla puedan romperse. Para ello se emplearon muestras de tierra arcillosa de la región lacustre de Zirahuén, en el estado mexicano de Michoacán.

1.2 Estabilización de suelos en la historia

La estabilización de suelos es un método que se ha empezado a retomar en la actualidad, por medio de todo tipo de aditivos químicos como pueden ser enzimas, cemento, cal, etc. Sin embargo, muchas culturas descubrieron que agregando y mezclando otros componentes a la tierra, ésta lograba resultados más óptimos y adquiría nuevas propiedades como una mejor resistencia y una mayor durabilidad.

Uno de los estabilizantes más comunes fue la cal, mediante un proceso en el que se combinaba el suelo con la piedra de cal viva para posteriormente añadir agua y compactar la mezcla. Esta técnica se empleaba mayormente en los caminos principales de las poblaciones, así como los que presentaban un mayor tránsito, dando una muestra del valor que estas culturas daban a la tecnología constructiva.

Sin embargo, este conocimiento fue olvidado con el paso del tiempo, excepto por los fabricantes de la cal que sí conservaron el conocimiento transmitiéndolo generacionalmente; no obstante, esta técnica llegó a su casi desaparición a mediados del siglo XX con la llegada de nuevos materiales, principalmente el cemento, cuyo uso en la construcción es ampliamente extendido, relegando a la mayoría de las técnicas tradicionales a su desuso y quedando obsoletas (Guerrero Baca; Soria; García, 2010).

Actualmente este proceso se está tratando de revertir debido a la intención de recuperación de las técnicas tradicionales de construcción y el uso de materiales naturales en vez de los industriales. El uso de la cal en construcción ha recobrado parte de la importancia que tuvo en determinados periodos históricos que anteriormente se comentaron; por ello en los últimos años se ha retomado la investigación de la estabilización de suelos con cal, principalmente en la infraestructura de caminos como en plantillas de cimentación y sub-bases de carreteras (Oliveira; Santiago; d’Affonseca, 1990).

Los sistemas constructivos a base de tierra son una respuesta lógica ante las problemáticas actuales respecto al impacto ambiental que generan los materiales de construcción; por otro lado, la cal también es un recurso más amigable que otro tipo de aglutinantes, ya que, si bien genera emisiones con su proceso de calcinación, durante su fraguado se recupera parte del dióxido de carbono emitido (Guerrero Baca; Soria; García, 2010).

1.3 Suelos arcillosos y su reacción con la cal

La cal en los suelos arcillosos puede ser utilizada para estabilizar la arcilla y secar el suelo. Cada reacción es diferente ya que depende del tipo de suelo, mineralogía, granulometría y del tipo de cal con la que se ha realizado la mezcla. Lo que se busca en la estabilización de suelo es el incremento de la resistencia y la modificación de la textura del suelo, substituyendo la capacidad higroscópica de la arcilla por moléculas de cal entre los espacios interlaminares, evitando que puedan absorber agua.

La mezcla de cal y el suelo genera cuatro reacciones básicas: la floculación, carbonatación de la cal, la reacción puzolánica y floculación y aglomeración de partículas. (Arrieta Baldovino et al., 2019).

Los cambios que se producen se consideran inmediatos y a largo plazo. Los inmediatos son la modificación en la textura, granulometría y compacidad; efectos originados por el intercambio de iones entre la cal y la arcilla, la floculación de las partículas de la arcilla y la reducción de agua al ser absorbida por esta última. Los de largo plazo, son el aumento de la resistencia a la compresión simple por la reacción cementante de la cal y la carbonatación. La resistencia mecánica puede tardar semanas o meses en llegar a su resistencia máxima, esta dependerá de varios factores como el contenido de cal, la temperatura y el tiempo del curado.

Otros efectos de la modificación de los suelos arcillosos son una mejora en la trabajabilidad, el aumento de la permeabilidad, la disminución de la humedad del suelo natural, disminución de los cambios volumétricos, incrementa la compactación.

Los cambios físicos se dan de inmediato, observándose en el cambio de textura. El cambio químico se da cuando los iones de calcio (Ca^{++}) de la cal se intercambian con las partículas de la arcilla, con el agua y otros iones que se encuentren presentes (figura 1).

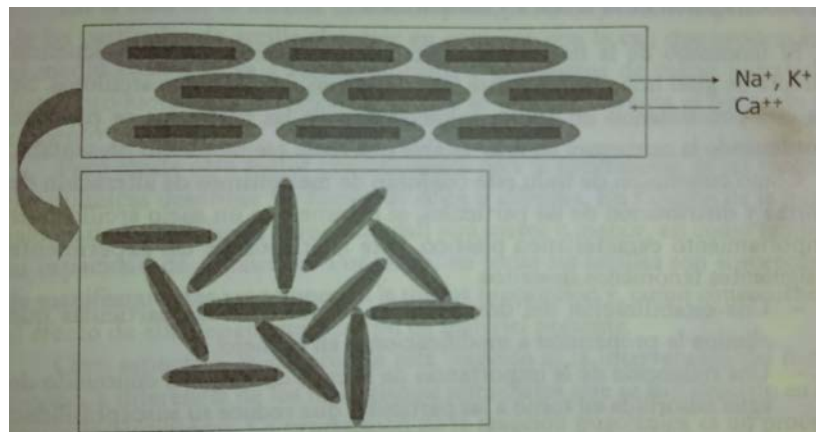


Figura 1. Intercambio de cationes del suelo por la cal (Bauzá Castelló, 2014)

Para que este cambio ocurra es necesario agregar un porcentaje de cal, este puede variar por lo que es recomendable conocer el porcentaje exacto para evitar que se realice una mezcla con bajo porcentaje de cal o con un exceso de la misma. Cualquiera de las dos generaría que la reacción química no sea la adecuada, por lo que es necesario realizar prueba para conocer dicho porcentaje. Existen tres pruebas para determinar la cantidad de cal necesaria para la estabilización y modificación de suelos: Thompson, Texas y Eades & Grimm, siendo esta última la más sencilla de realizar.

2. PROCEDIMIENTO EADES & GRIMM

La prueba tiene como objetivo determinar el porcentaje de cal para el diseño de una mezcla, modificando y estabilizando el suelo, incrementando la resistencia mecánica y la durabilidad. La prueba se basa en la modificación pH de las distintas adiciones a la arcilla, siendo un excelente indicador del porcentaje de cal requerido para estabilizar los suelos arcillosos. Es un método sencillo y no requiere instrumentación especializada. La prueba consiste en:

- 1.- Conseguir muestras representativas del suelo, se aconsejan como mínimo una muestra de masa de 40 kilos, muestreada en sitio y puede ser una muestra alterada o inalterada.
- 2.- La muestra se seca a la intemperie, pero resguardándola de agentes meteóricos. La temperatura de secado de arcillas al horno no puede superar los 60°C para evitar que las láminas se colapsen y se conviertan en cerámicos.

- 3.- Con la muestra seca y sin terrores, se disminuye al tamaño requerido para las pruebas, la reducción de tamaño puede hacerse por cuarteo, hasta obtener una muestra de aproximadamente 20 gramos por cada botella, previamente tamizada por la malla n° 40 ASTM (0,42 mm). La muestra sin estabilizar y las muestras con los distintos porcentajes de adición de cal en peso, variando de 1% a 10%, se vierten en botellas de vidrio o plástico con capacidad de 150 ml, para cada porcentaje de cal que se quiere estudiar.
- 4.- Se añaden 100 ml de agua destilada o desmineralizada (algunos autores sugieren que se utilice la misma agua local que se utilizaría para el mezclado del suelo, con el fin de tener la variable del pH del agua ya contemplada)
- 5.- Agite la mezcla hasta que el material seco arcilloso no se observe, que todo se convierta en una sola fase.
- 6.- Agite la botella durante 30 segundos cada 10 minutos.
- 7.- Después de una hora, el lodo producto de la mezcla se deberá pasar a otro contenedor de plástico para verificar su pH, por medio de un medidor pH y/o con tiras de reactivas de pH. Se busca que tenga un pH de 12,4 que es el porcentaje que se requiere para estabilizar el suelo (ANFACAL, 2015b)

Con esta información se podrán realizar pruebas mecánicas al suelo a estabilizar, en el caso que se requiera de una resistencia específica es recomendable realizar otras pruebas de caracterización. Todas y cada una de las pruebas deberán realizarse por triplicado y los valores reportados serán el promedio de 3 cuantificaciones, si alguna de las cuantificaciones difiere en más del 10% del promedio, la prueba debe repetirse o desecharse, pero indicarse en el informe.

Mediante estas pruebas se observó que los suelos arcillosos montmorilloníticos de la región de Michoacán (figura 2), suelen presentar estabilización mecánica con porcentajes de adición de cal en porcentaje de la masa total de entre 3% y 7% (figura 3), que son los valores con los que los pH de las mezclas se acercan al sugerido por la norma de 12,4 puntos (ASTM D6276, 2006). El pH se cuantificó con tiras reactivas y con un peachímetro portátil, para confirmar los resultados. En el caso de la muestra de Zirahuen se obtuvo un porcentaje del 5% de cal hidratada necesario para su estabilización.

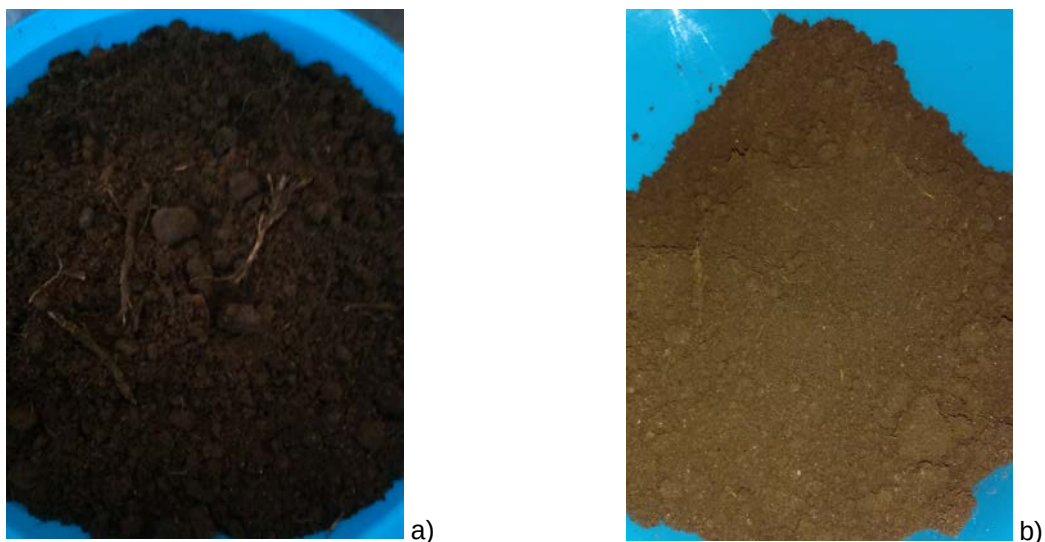


Figura 2. Muestra del lago de Zirahuen, Michoacán. a) Suelo arcilloso; b) Suelo arcilloso con 5% de cal



Figura 3. Prueba Eades & Grimm, arcillas adicionadas con 3% a 7% de cal hidratada (crédito: E. Navarro, 2016)

3. RESULTADOS

Los principales usos que pueden darse a estos suelos estabilizados con cal en la construcción son: block de tierra comprimida (BTC); proceso secado de suelos arcillosos; y firmes de tierra, entre otros.

Para los suelos que se requieren secar por su alto contenido de humedad se recomienda utilizar cal viva (óxido de calcio) ya que aparte de continuar con el ciclo de la cal al hidratarla, la reacción exotérmica evapora parte del agua contenida, mientras para los bajos contenidos de humedad se puede utilizar cal en polvo (hidróxido de calcio).

En cuanto a la gestión ambiental, para la producción de cal solo se requieren 900°C mientras que el cemento son 1400°C, generando un impacto mucho mayor con el medio ambiente.

3.1 Blocks de tierra comprimida

Los BTC son materiales de construcción de tipo mampuesto a base de tierra y algún material estabilizante, fabricados dentro de un molde y comprimidos mediante una prensa mecánica o hidráulica que puede ser a su vez manual o motorizada (González; Cabrera, 2018). Respecto a otras técnicas constructivas de tierra, como adobe, representa una evolución, ya que cuenta con una alta densidad y caras mucho más lisas y perfiladas, además de lograr una mejora de sus propiedades mecánicas mediante el proceso de compactación. Resulta una de las principales alternativas a la construcción con ladrillos cerámicos, ya que el sistema constructivo es muy parecido y puede sustituir fácilmente al mismo; sin embargo, la energía utilizada en su producción es mucho más baja (Roux Gutiérrez; Espuna Mújica, 2012), resultando en un material de construcción mucho más amigable con el medioambiente.

Los principales estabilizantes empleados en la producción de los BTC son el cemento Portland y la cal, además de otros materiales como fibras vegetales, residuos de muchos tipos, materiales alcalinamente activados y también materiales con alto contenido en sal (González-López et al., 2018). Para la fabricación de los BTC puede ser usado el mismo método de búsqueda de porcentaje óptimo de cal para la estabilización de las arcillas. Igualmente, las propiedades de la arcilla no varían durante la fabricación de los bloques, y muchos de los fabricantes aconsejan un 5% de cal para la misma mezcla, otros estudios recomiendan un porcentaje entre 8-10% para incrementar la resistencia de los mampuestos, siendo contraproducente emplear valores más elevados (Taallah; Guettala, 2016).

Entre otras ventajas, el confort térmico de las edificaciones habitaciones con BTC se incrementa por tratarse de un material aislante, de fácil montaje y económicamente reparable. Los materiales de este tipo en los últimos tiempos están funcionando como alternativa a los materiales industriales, ya que las emisiones de CO₂ producidas son mínimas en comparación con la fabricación de un ladrillo cerámico, significando un gran ahorro energético y presentando una alternativa más sostenible con el medioambiente y las poblaciones rurales.

Recientemente se han desarrollado investigaciones de las propiedades estabilizantes de la cal en los BTC con aplicaciones en la restauración y rehabilitación de sitios históricos (Assia; Fazia; Abdelmadjid, 2019), siendo empleadas para estos estudios tanto la cal viva apagada como la cal industrial (hidratada) en combinación con el cemento y recomendando también la adición de fibras naturales a la mezcla logrando resultados favorables principalmente con la combinación de cemento blanco y cal industrial.

3.2 Firmes estabilizados con cal

Los suelos arcillosos tienden a absorber agua, es su mayor cualidad, llamada higroscopía. Esta propiedad se debe a su morfología de capas interlaminares de aluminosilicados hemihidratados; los cambios de humedad se traducen en cambios volumétricos como contracciones o expansiones. También la plasticidad se modifica en función del agua. La cal reemplazará los espacios interlaminares que suele ocupar el agua evitando los cambios volumétricos; incrementando la resistencia mecánica, que es también resultado del confinamiento de la estructura de los pavimentos de suelo.

Los firmes estabilizados con cal dan una gran ventaja económica, ambiental y de confort. Por la parte económica en comparación con firmes de concreto tienen menor costo ya que sólo es necesaria la cal y la mano de obra, mientras que los firmes requieren de acero, cemento, grava y arena, materiales todos ellos más costosos en su conjunto y que para su producción emiten mayor cantidad de contaminantes atmosféricos.

Por la perspectiva del confort térmico en los espacios, un firme estabilizado con cal puede contribuir a una mejora ya que mantiene fresco el lugar. Son sencillos de realizar y solo se requiere añadir cal al suelo.



Figura 4. Plataforma estabilizada en fraccionamiento residencial, Morelia, Michoacán: a) Mezclado con maquinaria; b) Compactación y curado (crédito E. Navarro, 2016)

El proceso de realización de firmes con suelo arcilloso estabilizado con cal se realiza de la siguiente manera:

- 1.- Posterior al conocer el porcentaje de cal óptimo, se debe realizar la mezcla del suelo con cal hasta tener un color homogéneo y se podrá observar el cambio de textura y color.
- 2.- La humedad óptima de la mezcla se puede verificar tomando un puño de tierra modificada y apretar con la mano, sí al abrir la mano la mezcla no se desmorona esta tiene la cantidad de agua necesaria, en caso contrario se deberá agregar agua para una fácil compactación.
- 3.- Se debe humedecer el suelo donde se va colocar el firme, posteriormente se recomienda hacer capas de no más de 30 cm de profundidad, esto para lograr una buena compactación, puede ser por medio mecánicos o manuales.
- 4.- Después de la compactación se deberá colocar un espejo de agua para el curado del firme.

En el caso que el firme tenga desgaste por el tiempo o por el uso, se puede volver a remezclar el firme siguiendo el mismo procedimiento antes descrito.

4. CONSIDERACIONES FINALES

La arquitectura y construcción con tierra ha demostrado a lo largo de la historia que se sirve de una relación beneficiosa con el empleo de la cal en sus sistemas constructivos, siendo materiales compatibles entre sí y que además son amigables con el medioambiente. La estabilización de suelos arcillosos montmorilloníticos como los existentes en Michoacán, puede hacerse con distintos métodos. Sin embargo, la estabilización con cal además de ser amigable con el medio ambiente, permite que el material pueda volver a mezclarse las veces que sea necesario. Los porcentajes de adición de cal a los suelos, suelen ser del orden promedio de 3-7% de la masa total, lo que implica un porcentaje poco elevado. La adición de cal permite seguir usando el suelo en otras aplicaciones, como de nuevo siembra.

Al producir BTC o realizar un firme con el suelo estabilizado con cal se puede tener beneficios económicos, de salud y confort, por lo que es una excelente opción constructiva que puede ser retomada en distintas edificaciones por ser amigable con medio ambiente. Las reacciones que se obtienen de las mezclas son el resultado de la estructura del suelo y propiedades plásticas, están dan como resultado una mayor resistencia mecánica y mayor capacidad de carga.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arrieta Baldovino, J.; Dos Santos Izzo, R.; Batista Moreira, E.; Lundgren Rose, J. (2019). Optimizing the evolution of strength for lime-stabilized rammed soil. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 882-891.
- ANFACAL (2015a). Terminología. En *Manual práctico para la estabilización de suelos con cal*. p.1-3. México: Asociación Nacional de Fabricantes de Cal
- ANFACAL (2015b). Calcular el contenido óptimo de cal. En *Manual práctico para la estabilización de suelos con cal*. p. 31-36. México: Asociación Nacional de Fabricantes de Cal
- Assia, Z.; Fazia, F.; Abdelmadjid, H. (2019). Sustainability of the stabilized earth blocs under chemicals attack's effects and environmental conditions. *Construction and Building Materials*, 212, 787-798. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.324>
- ASTM D6276 (2006). Standard test method for using pH to estimate the soil-lime proportion requirement for soil stabilization. USA: ASTM International
- Bauzá Castelló, J. D. (2014). Aplicaciones de la cal en la obra civil: La estabilización de suelos arcillosos. En F. J. Alejandro Sánchez, *La cal, Investigación y restauración* (págs. 63-79). Sevilla: Universidad de Sevilla.

González, A.; Cabrera, S. (2018). Prensa electromecánica para BTC. X Congreso Regional de Tecnología en Arquitectura (CRETA) p. 325-334. La Plata, Argentina: Universidad Nacional de la Plata.

González-López, J. R.; Juárez-Alvarado, C. A.; Ayub-Francis, B.; Mendoza-Rangel, J. M. (2018). Compaction effect on the compressive strength and durability of stabilized earth blocks. *Construction and Building Materials*, 163, 179-188. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.074>

Guerrero, L. (2013). La cal y los sistemas constructivos. En L. Barba Pingarrón, I. Villaseñor Alonso, La cal: historia, propiedades y usos. Distrito Federal: UNAM, Instituto de Investigaciones Antropológicas; ANFACAL. p.49-72

Guerrero Baca, L. F.; Soria, J.; García, B. (2010). La cal en el diseño y conservación. *Arquitectura construida en tierra, Tradición e Innovación. Congresos de Arquitectura de Tierra en Cuenca de Campos*. Valladolid: Cátedra Juan de Villanueva. Universidad de Valladolid. p. 177-186

Oliveira, M. M.; Santiago, C. C.; d’Affonseca, S. P. (1990). The study of accelerated carbonation of lime-stabilized soils. 6th International Conference on the Conservation of Earthen Architecture: Adobe 90 preprints: Las Cruces, New Mexico, USA. p.166-170

Roux Gutiérrez, R. S.; Espuna Mújica, J. A. (2012). Bloques de tierra comprimida adicionados con fibras naturales. México: Plaza y Valdés Editores, Universidad Autónoma de Tamaulipas.

Taallah, B.; Guettala, A. (2016). The mechanical and physical properties of compressed earth block stabilized with lime and filled with untreated and alkali-treated date palm fibers. *Construction and Building Materials*, 104, 52-62. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.007>

Vitruvio Polión, M. L. (1995). Los diez libros de la arquitectura. Madrid: Alianza Forma.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el Soporte Técnico del Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas” de la Facultad de Ingeniería Civil de la UMSNH, del Laboratorio de Materiales de la Facultad de Arquitectura de la UMSNH, del CONACYT con el apoyo a los autores.

AUTORES

Elena Guadalupe Navarro Mendoza, alumna de la maestría en Arquitectura, Investigación y Restauración de Sitios y Monumentos en la Universidad Michoacana San Nicolás de Hidalgo, especialista en restauración de sitios y monumentos, licenciada en arquitectura. Asesora técnica en los usos de la cal, profesora en la Universidad Internacional Jefferson, estudiosa de la cal y sus aplicaciones en la construcción y la restauración de sitios y monumentos.

Adrià Sánchez Calvillo, alumno del Programa Interinstitucional de Doctorado en Arquitectura, especialista en restauración de monumentos, maestro en construcción avanzada, arquitecto técnico por la Universitat Politècnica de Catalunya. Profesor docente en la Universidad Vasco de Quiroga, investigador en la arquitectura de tierra y la vulnerabilidad sísmica de estos sistemas constructivos.

Elia Mercedes Alonso Guzmán, Profesora e Investigadora Titular de Tiempo Completo de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, adscrita a las Facultades de Ingeniería Civil y Arquitectura, estudiosa de los materiales de construcción tradicionales, artísticos, patrimoniales, históricos, innovadores, eco-amigables y de baja energía.