

CARACTERIZACIÓN DE ADOBES PATRIMONIALES DE CONSTRUCCIONES HISTÓRICAS EN MICHOACÁN, MÉXICO

Adrià Sánchez Calvillo^{1,2}, Elia Mercedes Alonso Guzmán², Antonia Navarro Ezquerro³, Melissa Ruiz Mendoza²

¹Sustainable Energy, Machinery and Buildings (SEMB) Research Group, INSPIRES Research Centre; Universitat de Lleida; Lleida, España, adria.sanchez@udl.cat

²Facultad de Ingeniería Civil; Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo; Morelia, México, adria.sanchez@umich.mx, elia.alonso@umich.mx, melissa.ruiz@umich.mx

³Escuela Politécnica Superior de Edificación de Barcelona; Universitat Politècnica de Catalunya; Barcelona, España, antonia.navarro@upc.edu

Palabras clave: propiedades de materiales, patrimonio arquitectónico, conservación, durabilidad, ensayos de laboratorio

Resumen

En el presente trabajo de investigación se efectuó una caracterización de adobes patrimoniales provenientes de inmuebles históricos construidos con tierra en el estado de Michoacán, en México. Pese al extenso, variado e importante patrimonio construido con tierra que se encuentra a lo largo del territorio, la mayoría de estas edificaciones se encuentran en un avanzado estado de deterioro, desprotegidos de las acciones climáticas y en riesgo de desaparecer progresivamente. Además, el conocimiento técnico de estas estructuras y sus materiales constructivos es limitado, limitando las actuaciones de intervención. Los adobes analizados fueron recolectados de haciendas y templos de la región de Tierra Caliente en varias campañas de campo que incluyeron actividades de levantamiento arquitectónico y fotográfico. Posteriormente, los especímenes fueron transportados al laboratorio de materiales para establecer una propuesta metodológica para materiales de tierra, buscando obtener las propiedades físico-químicas, mecánicas y de durabilidad de los bloques, incorporando el uso de ensayos no destructivos (END). Los resultados de la investigación mostraron unas óptimas características mecánicas y de durabilidad de los bloques, así como una alta confiabilidad en los resultados obtenidos con coeficientes de variación reducidos para varios de los ensayos. El uso de los END demostró ser de utilidad para detectar las propiedades físicas de los bloques e inferir la resistencia mecánica; además, muchos de estos ensayos cuentan con la ventaja de poder ser ejecutados in situ, lo que supone una gran ventaja para evaluar el estado de las construcciones históricas. Estas edificaciones son importantes exponentes del patrimonio cultural arquitectónico de la región, por lo que resulta fundamental incrementar el conocimiento técnico de la tierra como material de construcción y definir mejor los métodos de ensayo para poder llevar a cabo las pertinentes acciones de conservación y restauración.

1 INTRODUCCIÓN

La arquitectura y construcción con tierra, constituyen una de las primeras manifestaciones de la transformación del hábitat por parte del ser humano, ha sido desplazada desde hace mucho tiempo por la llegada de los materiales modernos, que han transformado radicalmente la configuración de los asentamientos urbanos. Este progresivo abandono ha sido un fenómeno a nivel global, recuperando estos sistemas su crédito hasta hace muy poco, gracias a iniciativas de recuperación y revitalización llevadas a cabo por diversos grupos e instituciones.

Debido a factores sociales y económicos la arquitectura y construcción con tierra cuenta con una baja apreciación en la mayoría de los contextos sociales. La consecuencia más directa de esta situación general es el abandono de estos inmuebles que hace unas décadas constituían los núcleos familiares y productivos en las comunidades, generando multitud de imágenes como la de la figura 1, muy representativas de las localidades rurales. En el estado de Michoacán, en México, existe un importante patrimonio arquitectónico de tierra representado principalmente por las construcciones históricas de adobe.



Figura 1. Hacienda abandonada en Huaniqueo, Michoacán, México

Una de las principales causas asociadas al deterioro de este patrimonio es la escasez de regulaciones, normas o lineamientos para su intervención, que contribuyen a acrecentar la desaparición de estos inmuebles ya que no existen protocolos claros de actuación para su salvaguarda. Por ello, la necesidad de un enfoque más tecnificado se hace patente (Rescic et al., 2023), debido a los escasos antecedentes que existen y los múltiples ejemplos de intervenciones inadecuadas en el patrimonio construido.

En este mismo sentido, gran parte de los métodos de ensayo y normas para la caracterización de materiales de construcción han sido desarrollados para el análisis de materiales y técnicas constructivas modernos, especialmente el concreto, con escasas excepciones para los materiales tradicionales o alternativos. Por estos motivos es necesario contar un mejor conocimiento técnico de las estructuras de tierra, empleando herramientas más avanzadas para su análisis.

En los últimos años puede encontrarse una creciente producción científica con interesantes trabajos enfocados a la caracterización de adobes de construcciones vernáculas e históricas, proponiendo interesantes metodologías de ensayo para encontrar las propiedades de estos materiales (Abhilash et al., 2022; Costa et al., 2019; Beckett et al., 2020; Parracha et al., 2021; Silva et al., 2022). Igualmente, han aparecido los primeros esfuerzos a nivel internacional para la estandarización de los métodos de ensayo (Fabbri et al., 2022), uno de los aspectos más complejos y difíciles de abordar para estos sistemas.

A nivel nacional, la mayoría de trabajos de caracterización de adobes se han centrado en la resistencia mecánicas de los bloques y muros. Desde la perspectiva de la gestión de riesgos, una mejor comprensión del comportamiento estructural de las construcciones de adobe es de gran utilidad para garantizar el refuerzo y la preservación de este patrimonio (Parisi et al., 2021). Sin embargo, se han obviado otros enfoques como el uso de técnicas no destructivas o la identificación de la composición química y mineralógica de las arcillas y el resto de los materiales presentes en estas edificaciones.

No obstante, cabe destacar los esfuerzos que se han realizado desde al ámbito del patrimonio arqueológico y la notable producción científica de varios autores, así como la reciente publicación de obras de referencia (Daneels, 2021). En estas investigaciones se encuentran planteamientos de caracterización más completos y complejos (Pérez *et al.*, 2016), con un mayor énfasis en los enfoques previamente citados y un mayor rigor en la metodología y la interpretación de los resultados.

2 OBJETIVOS

La presente investigación tuvo como objetivo principal caracterizar y conocer las propiedades físico-químicas, mecánicas y de durabilidad de construcciones de adobe históricas del estado de Michoacán, en México. Estos inmuebles presentan grandes retos para su preservación, al

encontrarse en muchos casos en estado de abandono o bien con acciones de mantenimiento erróneas o inexistentes. Una mejor comprensión de sus propiedades y su comportamiento

Por otro lado, se establecieron objetivos particulares en referencia a los métodos de caracterización y la posible correlación entre los distintos ensayos y las propiedades físico-químicas, mecánicas y de durabilidad de los adobes analizados. El trabajo interdisciplinario y las diversas técnicas empleadas permitieron un planteamiento inicial del que se desprenden los siguientes objetivos particulares:

- Corroborar el uso de ensayos no destructivos para la obtención de propiedades tanto físicas como mecánicas.
- Obtener coeficientes de correlación entre distintos ensayos de resistencia mecánica.
- Comparación de los coeficientes de absorción capilar con la composición granulométrica de los adobes y su proporción de fibras vegetales.

3 METODOLOGÍA

Se muestrearon adobes de edificios históricos, principalmente templos y haciendas, del estado de Michoacán, en México. La mayoría de estas construcciones, pese a su importancia histórica y su relevante legado sociocultural en las regiones donde fueron erigidas, presentan estados de deterioro avanzados y nulo mantenimiento o acciones de conservación y restauración. Los adobes analizados en esta investigación provienen de tres construcciones monumentales: el templo inconcluso de Taretan (TA) y dos haciendas en las localidades de Santa Cruz de Morelos (SC) y la Huacana (H), mostrados en este orden en la figura 2.



Figura 2. Edificaciones históricas de adobe en Tierra Caliente: (a) Templo inconcluso de Taretan; (b) Hacienda en Santa Cruz de Morelos; (c) Hacienda en La Huacana

Los adobes fueron recolectados de los diferentes casos de estudio en la región de Tierra Caliente en varias campañas de campo. Este trabajo de campo combinó la toma de muestras de adobe y morteros de tierra con ejercicios de levantamiento fotográfico y levantamiento con dron de los monumentos. Pese a la antigüedad de estas edificaciones pudieron obtenerse bloques completos en buen estado, además de la obtención de especímenes cilíndricos siguiendo la norma ASTM C42/C42M-13 diseñada para la extracción de núcleos de concreto (ASTM, 2013).

Las muestras materiales fueron transportadas, analizadas y caracterizadas en el Laboratorio de Materiales "Ing. Luis Silva Ruelas" de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), donde se estableció una propuesta metodológica para materiales de tierra buscando obtener las propiedades físico-químicas, mecánicas y de durabilidad de los adobes estudiados. Mientras que toda la caracterización física y mecánica y los ensayos de durabilidad se realizaron en la UMSNH; la caracterización química y mineralógica se realizó en otra campaña distinta en la Universidad Politécnica de Cataluña y en la Universidad de Navarra, en España.

En la primera campaña realizada en el laboratorio de materiales, los especímenes fueron preparados para la caracterización, realizando cubos de dimensiones 8x8x8 cm, prismas de 4x4x16 cm para el ensayo de flexión; junto con las muestras cilíndricas obtenidas *in situ* (figura 3). Para el caso de estudio de TA, el material presentó demasiado deterioro, por lo que no pudieron realizarse ensayos mecánicos o de resistividad con las muestras.



Figura 3. Preparación de los especímenes para la caracterización

Iniciando con los END, se realizó la prueba de colorimetría con el equipo CRLM-200, siguiendo el sistema de referencia CIE. Este sistema mide tres parámetros: la luminosidad L^* y las coordenadas cromáticas a^* (eje rojo-verde) y b^* (eje amarillo-azul). El colorímetro tomó un mínimo de tres lecturas en cada superficie de los cubos para obtener el promedio de los casos de estudio. Por otro lado, el pH fue medido con tiritas reactivas CVQ2051 de la marca CIVEQ, generando una solución del material de los adobes y agua.

Posteriormente, el material fue secado en el horno a una temperatura constante no superior a los 50° C para no alterar las propiedades de los minerales de arcilla. Mediante este proceso se calcularon la densidad aparente y el contenido de agua de los bloques siguiendo las normas ASTM D7263-21 y ASTM D4643-17. Después de esto proceso los ensayos de mecánica de suelos fueron efectuados conocer la composición de los adobes con el análisis granulométrico seco siguiendo la norma mexicana NMX-C-496-ONNCCE-2014.

La caracterización mecánica incluyó los ensayos de compresión simple uniaxial y de flexión directa con el método de tres puntos (figura 4). Para el primero se ensayaron cubos y cilindros en la máquina universal Forney con una capacidad máxima de 120 t, aplicando una velocidad constante de carga de 0.20 ± 0.05 toneladas/minuto, siguiendo la norma nacional NMX-C-083-ONNCCE-2014. Con el mismo equipo se efectuó la prueba de flexión (figura 4), con prismas labrados de 4x4x16 cm y siguiendo la norma BS EN 12372:2022.

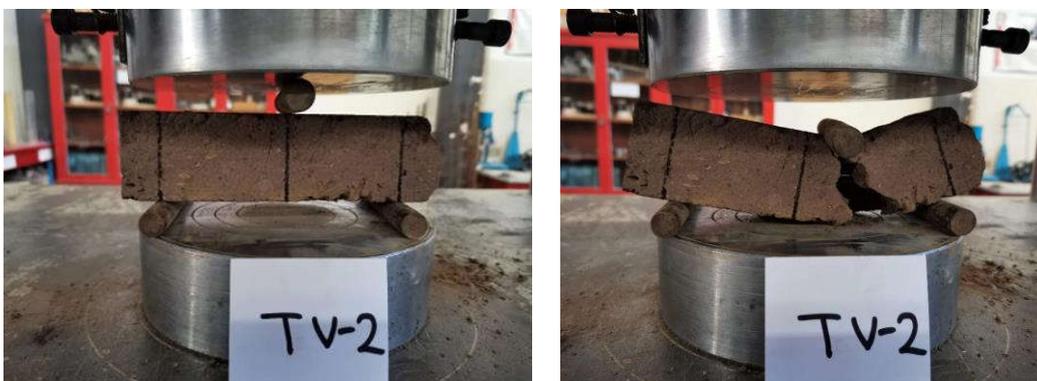


Figura 4. Ensayo de ruptura a flexión

Para evaluar la durabilidad de los adobes se realizó el ensayo de absorción capilar, después de dejar secar los especímenes cúbicos en el horno a no más de 50°C por 8 días. Para el método de prueba se siguió la norma mexicana NMX-C-504-ONNCCE-2015, sellando todas

las caras de los cubos excepto una y dejando esta última en contacto con agua; una vez humedecido, se midió la variación del peso del espécimen en los intervalos de tiempo indicados por la norma. Por último, el ensayo de resistividad se realizó con las muestras saturadas usando el equipo *soil resistance meter* model 400 de la marca Nilsson Electrical Laboratory Inc., siguiendo la norma mexicana NMX-C-514-ONNCCE-2019 diseñada para la medición de concreto.

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La tabla 1 presenta los resultados obtenidos para la densidad aparente (ρ_{ap}) el contenido de agua en los adobes (ω), la resistividad eléctrica (ρ) el potencial de hidrogeno (pH), las coordenadas cromáticas del ensayo colorimétrico (a^* , b^* y L^*), así como el color generado con los valores del sistema CIE. Los resultados fueron el resultado de la caracterización físico-química y el uso de END como la resistividad o la colorimetría.

Tabla 1. Propiedades físico-químicas de los casos de estudio.

| Muestra | ρ_{ap} (kg/m ³) | ω (%) | ρ ($\Omega \cdot m$) | pH | a^* | b^* | L^* | Color |
|---------|----------------------------------|--------------|-----------------------------|-----|-------|-------|-------|---|
| H | 1724.16 | 6.37 | 22.94 | 5.5 | 11.41 | 22.71 | 50.77 |  |
| SC | 1609.09 | 2.69 | 24.44 | 6.0 | 7.01 | 11.10 | 43.04 |  |
| TA | - | 16.31 | - | 5.0 | 12.45 | 16.30 | 30.27 |  |

La densidad tiene relación directa con las propiedades mecánicas, como se discutirá más adelante, pero también ofrece una aproximación de la compacidad y manufactura de los bloques, siendo indicativa de la composición y el uso de mayor o menor cantidad de fibras. Respecto al contenido de humedad, el material de TA obtuvo índices muy elevados, debido al avanzado estado de deterioro presentado por el templo inconcluso (figura 2), seguido de H, que como se verá a continuación contiene una mayor cantidad de finos y presenta una mayor absorción por capilaridad.

La resistividad puede ser indicativa del estado de conservación de los bloques y la presencia de daños internos (Sánchez-Calvillo *et al.*, 2021); además de tener una correlación inversamente proporcional a la densidad y la resistencia mecánica (Barnaure; Bonnet; Poullain, 2021). Los dos casos de estudio en los que se pudo realizar el ensayo presentaron resultados similares y cumplieron con esta relación inversa.

Los datos del pH sugerirían que los adobes no fueron estabilizados, al estar contenidos en el rango típico de las arcillas. Otra posibilidad es que, debido a la antigüedad de estos monumentos, podrían haber sufrido disminución de esta propiedad por el paso del tiempo pese a ser estabilizados antes y durante su construcción, probablemente con cal, la solución más extendida (Navarro; Sánchez; Alonso, 2019). El valor del pH es importante, ya que sí es demasiado bajo puede favorecer la aparición de hongos u otros microorganismos; del mismo modo, unas condiciones de humedad elevadas y la desprotección de los muros pueden alterar los valores iniciales.

Los resultados de la colorimetría pueden ser de gran utilidad, ya que algunos estudios han podido relacionar los valores obtenidos con la resistencia mecánica (Costa *et al.*, 2019), el grado de conservación de las construcciones (Mao *et al.*, 2019), o la identificación de diversos estabilizantes (Alonso *et al.*, 2022). También es importante tomar en cuenta la composición de los adobes cuando se analiza el color, en el caso de H, la alta proporción de material fino tiene una mayor influencia en la tonalidad; mientras que en el caso de SC las arenas tuvieron una incidencia igual o mayor.

La figura 5 muestra las curvas granulométricas de los tres casos de estudio, obtenidas a partir del ensayo de granulometría en estado seco siguiendo la norma NMX-C-496-ONNCCE-2014.

Puede observarse una gran diferencia entre las curvas de TA y H, con un porcentaje muy elevado de material pasando la malla ASTM n°200 (0,075 mm), y la curva de SC, más pronunciada y con tamaños de partícula más variados y más cercana a las recomendaciones para la construcción con tierra y a distribuciones típicas del adobe (Jiménez; Guerrero, 2007).

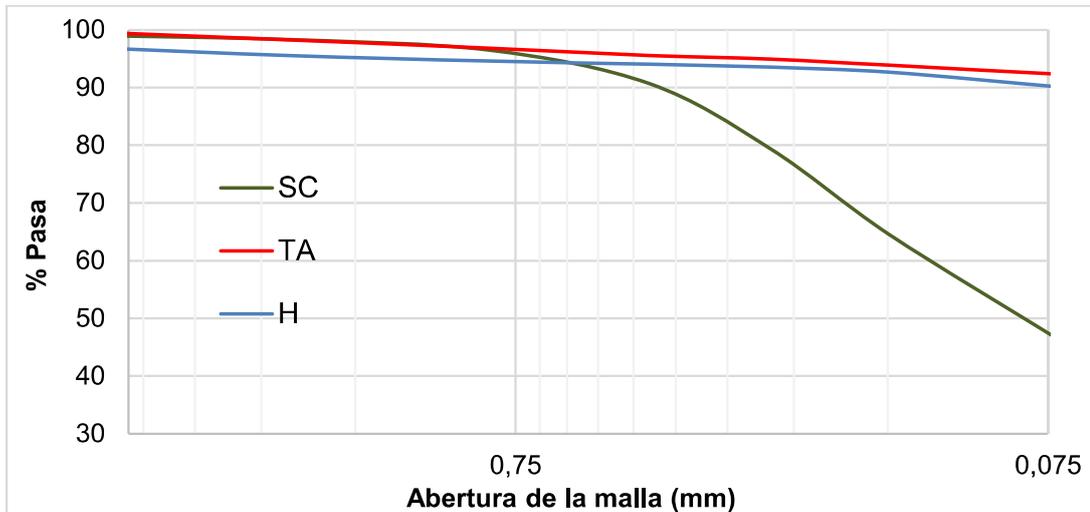


Figura 5. Curvas granulométricas de los adobes.

En la literatura pueden encontrarse múltiples valores de referencia para la composición de las distintas técnicas de construcción con tierra, indicando las proporciones indicativas de material fino, arenas, gravas y fibras (Neves *et al.*, 2009); teniendo en cuenta que no existe un modelo de diseño y que las condiciones de los suelos locales serán las que dictaminen la composición de los bloques y el uso de estabilizantes. La tabla 2 muestra precisamente este concepto, reflejado en la composición de los adobes de los tres casos de estudio, donde dos de ellos presentan características muy distintas al otro.

Tabla 2. Composición granulométrica de los adobes y cantidad de fibras vegetales.

| Muestra | Gravas (%) | Arenas (%) | Finos (%) | Fibras (%) |
|---------|------------|------------|-----------|------------|
| H | 2.49 | 7.98 | 89.21 | 0.32 |
| SC | 2.08 | 53.25 | 44.67 | 0.00 |
| TA | 1.72 | 5.42 | 92.38 | 0.48 |

Llama la atención la ausencia de fibras, imperceptibles a la vista, de los adobes de SC. Estos componentes son de gran ayuda para evitar la fisuración de los bloques tras el secado, y su presencia ha sido reportada en los estudios a lo largo del mundo. Pese a la dispar composición de H y SC, resalta la afinidad de ambos adobes en los ensayos de resistencia mecánica. La tabla 3 presenta los resultados de densidad aparente (ρ_{ap}), resistencia a compresión simple uniaxial (σ_{CSU}), resistencia a flexión directa calculada con el método de los tres puntos (σ_F); además del coeficiente de variación (CV) obtenido en cada ensayo y la correlación entre ambos expresada por medio de un coeficiente adimensional.

Tabla 3. Resistencia mecánica a compresión y flexión de los adobes ensayados

| Muestra | ρ_{ap} (kg/m ³) | σ_{CSU} (kg/cm ²) | CV (%) | σ_F (kg/cm ²) | CV (%) | σ_{CSU}/σ_F |
|---------|----------------------------------|--------------------------------------|--------|----------------------------------|--------|-------------------------|
| H | 1724.16 | 10.48 ± 3.36 | 32.07 | 4.65 ± 2.48 | 53.33 | 2.25 |
| SC | 1609.09 | 9.71 ± 1.69 | 17.44 | 3.85 ± 1.69 | 43.89 | 2.52 |

Respecto a los valores de resistencia a la compresión, ambos casos de estudio se encuentran en un rango aceptable en línea con la literatura existente (Abhilash *et al.*, 2022), pese a que es muy complicado establecer unos parámetros de referencia.

Del mismo modo, la resistencia a flexión obtenida para ambos casos de estudio presentó resultados dentro del rango de valores reportado por Abhilash *et al.* (2022) consistente en el compendio de otros trabajos de caracterización de adobes en todo el mundo.

La correlación entre la densidad y la resistencia es aparente, ya que a mayor compacidad de los bloques mayor capacidad para resistir los esfuerzos. Las fibras contenidas en los adobes de H también tienen una influencia directa en la resistencia a flexión (Costi de Castrillo; Ioannou; Philokyprou, 2021)

Por otro lado, la correlación encontrada entre la resistencia a compresión y a flexión resultaron en coeficientes similares, cercanos al ratio 2:1 que presentan otros materiales de construcción. La revisión efectuada por Sánchez *et al.* (2023) mostraba relaciones de flexión respecto a la compresión en un rango del 20 al 50% para adobes, con H y SC situadas en el límite inferior.

Respecto a los ensayos para determinar la durabilidad, en la figura 6 se puede observar las curvas de absorción de H y SC en función del tiempo, tras aplicar el ensayo de absorción capilar o Fagerlund. Se advierten claras diferencias en el comportamiento de los dos adobes, siguiendo una curva proporcional, pero con un coeficiente de absorción capilar más alto para H, lo que significa que los adobes de esta hacienda son más propensos a absorber agua. Esta diferencia puede deberse a dos factores: la mayor proporción de material fino en H y la ausencia de fibras vegetales en su composición. La inclusión de fibras juega un papel relevante en la absorción, especialmente en el caso de la paja, debido a que ésta contribuye a generar una microestructura de poros más alargados que disminuyen la capilaridad de los adobes (Costi de Castrillo; Ioannou; Philokyprou, 2021).

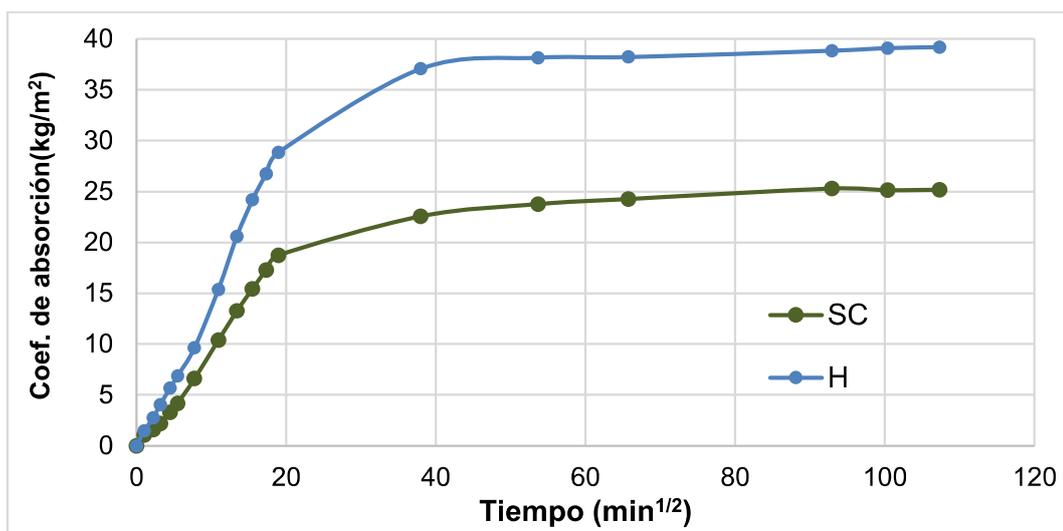


Figura 6. Curvas de absorción capilar de los adobes.

Poniendo en perspectiva los valores obtenidos con casos análogos, los adobes de Leiria, en Portugal, presentaron coeficientes cercanos a los de SC (Parracha *et al.*, 2021); mientras que los adobes caracterizados en la región sur de Lisboa mostraron ratios de absorción menores relacionando esta propiedad con la presencia de arcillas kaolinitas poco expansivas (Silva *et al.*, 2022).

5 CONCLUSIONES

Gran parte del patrimonio construido con tierra en México se está deteriorando y perdiendo a un ritmo alarmante, siendo uno de los factores el desconocimiento generalizado de la tierra como material de construcción y sus propiedades. El agua es la principal enemiga de estas edificaciones, comprometiendo su durabilidad debido al carácter expansivo de las arcillas; por lo que resulta alarmante comprobar que estos monumentos están desprotegidos ante este elemento ya que sus muros han perdido sus revestimientos y no existen acciones de mantenimiento o conservación.

Como pudo comprobarse en la metodología, la gran mayoría de las regulaciones de los ensayos están diseñadas para el concreto u otros materiales industriales, y todavía es necesaria una adaptación para materiales de tierra con base en la experimentación. La mayoría de los trabajos relevantes de caracterización de adobes u otros elementos constructivos de tierra en México han tenido un enfoque primario en la obtención de las características mecánicas de los bloques. El desarrollo de una mejor caracterización de estructuras históricas de tierra pasa por el empleo de los END, debido a las grandes ventajas que presentan estos ensayos para el análisis del patrimonio y la posibilidad de aplicación de las técnicas *in situ*; junto con la inclusión de técnicas de caracterización química y mineralógica que permitan identificar los componentes de las arcillas. Por ello, los resultados presentados aún deberán ser comparados con la segunda campaña de caracterización realizada en la UPC y la Universidad de Navarra.

Respecto al análisis de los casos de estudio, las composiciones granulométricas de H y TA llaman la atención por la elevada cantidad de material fino (limo y arcillas) usado en su manufactura, alejados de otras referencias para los adobes. Probablemente la proporción de limos en ambos casos sea muy alta y las arcillas poco expansivas, hecho que podrá probarse con la caracterización mineralógica. Por otro lado, las propiedades mecánicas de H y SC fueron muy parecidas, lo que nos indica que suelos y arcillas muy distintos pueden ser utilizados para la edificación, demostrando la excelente capacidad de adaptación de la arquitectura vernácula a los recursos disponibles.

Debido al buen estado en que fueron encontrados los adobes, la comprobada durabilidad de los monumentos analizados y los resultados de resistencia mecánica encontrados, se puede entender el uso constante de la tierra en el patrimonio construido de gran parte del mundo. No obstante, los mecanismos de deterioro de estas construcciones son avanzados, y las acciones de intervención y conservación deben ser planteadas para su rescate. En este sentido, los revestimientos pueden dar solución a esta situación generalizada, protegiendo los muros de las inclemencias y aumentando su durabilidad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abhilash, H. N.; Hamard, E.; Beckett, C. T.; Morel, J.-C.; Varum, H.; Silveira, D.; Illampas, R. (2022). Chapter 4. Mechanical behaviour of earth building materials. En A. Fabbri, J.-C. Morel, J.-E. Aubert, Q.-B. Bui, D. Gallipoli, & B. V. Venkatarama Reddy (Eds.), *Testing and Characterization of Earth-based Building Materials* (p. 127-180). Springer. doi:10.1007/978-3-030-83297-1_4
- Alonso-Guzman, E. M.; Martinez-Molina, W.; Sanchez-Calvillo, A.; Chavez-Garcia, H. L.; Ruvalcaba-Sil, J. L. (2022). Propiedades mecánicas estáticas y dinámicas de arcillas estabilizadas. 20° Seminario Iberoamericano de Arquitectura y Construcción con Tierra. Trinidad, Cuba: PROTERRA/Oficina del Conservador. p. 133-142
- ASTM (2013). ASTM C42/C42M-13. Standard test method for obtaining and testing drilled cores and sawed beams of concrete. UAS: ASTM International. doi:10.1520/C0042_C0042M-13.
- ASTM (2017). ASTM D4643-17. Standard test method for determination of water content of soil and rock by microwave oven heating. USA: ASTM International. doi:10.1520/D4643-17.
- ASTM (2021). ASTM D7263-21. Standard test methods for laboratory determination of density and unit weight of soil specimens. USA: ASTM International. doi:10.1520/D7263-21.
- Barnaure, M.; Bonnet, S.; Poullain, P. (2021). Earth buildings with local materials: Assessing the variability of properties measured using non-destructive methods. *Construction and Building Materials*, 281(122613). doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122613
- Beckett, C. S.; Jaquin, P. A.; Morel, J.-C. (2020). Weathering the storm: A framework to assess the resistance of earthen structures to water damage. *Construction and Building Materials*, 242(118098). doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118098
- BS EN 12372 (2022). Natural stone test methods. Determination of flexural strength under concentrated load. London, UK: British Standards Institution.

- Costa, C.; Arduin, D.; Rocha, F.; Velosa, A. (2019). Adobe blocks in the center of Portugal: main characteristics. *International Journal of Architectural Heritage*. doi:10.1080/15583058.2019.1627442
- Costi de Castrillo, M.; Ioannou, I.; Philokyrou, M. (2021). Reproduction of traditional adobes using varying percentage contents of straw and sawdust. *Construction and Building Materials*, 294(123516). doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.123516.
- Daneels, A. (Ed.) (2021). *Arquitectura mesoamericana de tierra. Volumen II*. México: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Investigaciones Antropológicas.
- Fabbri, A.; Morel, J.C.; Aubert, J.E.; Bui, Q.B.; Gallipoli, D.; Reddy, B. (Eds.) (2022). *Testing and characterization of earth-based building materials and elements*, vol. 35. Cham: Springer International Publishing. doi:10.1007/978-3-030-83297-1.
- Jiménez, M.C.; Guerrero, I.C. (2007). The selection of soils for unstabilised earth building: A normative review. *Constr Build Mater*, 21(2), pp. 237–251. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2005.08.006.
- Mao, W.; Sun, M.; Guo, Q.; Cui, M.; Huang, H.; Bai, Y. (2019). Research on in-situ color detection and data analysis on earthen sites. *International Journal of Architectural Heritage*, 13(6), pp. 769–781. doi: 10.1080/15583058.2018.1476605.
- Neves, C. M.; Faria, O. B.; Rotondaro, R.; Cevallos, P.; Hoffmann, M. V. (2009). Selección de suelos y métodos de control en la construcción con tierra - prácticas de campo. https://redproterra.org/wp-content/uploads/2020/05/2a_PP-Selecci%C3%B3n-de-suelos_2009.pdf
- Navarro, E.G.; Sánchez, A.; Alonso, E.M. (2019). Estabilización de suelos arcillosos con cal para firmes y blocks. 19º Seminario Iberoamericano de Arquitectura y Construcción con Tierra (pp. 284-291). San Salvador, El Salvador: FUNDASAL / PROTERRA.
- NMX-C-083-ONNCCE (2014). Building industry – Concrete – Determination of compressive strength of specimen – test method. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación.
- NMX-C-496-ONNCCE (2014). Industria de la construcción – Geotecnia – Materiales para terracerías – Determinación de la composición granular. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación.
- NMX-C-504-ONNCCE (2015). Industria de la construcción - Determinación de la absorción capilar en concreto hidráulico - Método de ensayo. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación.
- NMX-C-514-ONNCCE (2019). Building industry – Electrical resistivity of hydraulic concrete - Specifications and testing methods. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación.
- Parisi, F.; Tarque, N.; Varum, H.; Vargas-Neumann, J. (2021). Adobe constructions in the world: a first overview, p. 1–14. doi:10.1007/978-3-030-74737-4_1.
- Parracha, J.L.; Lima, J.; Freire, M. T.; Ferreira, M.; Faria, P. (2021). Vernacular earthen buildings from Leiria, Portugal – material characterization. *International Journal of Architectural Heritage*, 15(9), pp. 1285–1300. doi:10.1080/15583058.2019.1668986.
- Pérez, N. A.; Bucio, L.; Bokhimi, X.; Lima, E.; Soto, E. (2016). Quantification of amorphous phases in the silt fraction of Mexican pre-Hispanic adobe earth bricks. *Journal of Applied Crystallography*, 49, pp. 561-568. doi:https://doi.org/10.1107/S1600576716002806
- Rescic, S.; Mattone, M.; Fratini, F.; Luvidi, L. (2023). Conservation of Earthen Bricks in Architecture: An Experimental Campaign to Test Different Treatments on Vernacular Built Heritage. *Heritage* 6(2), pp. 1541-1566. <https://doi.org/10.3390/heritage6020083>
- Sanchez-Calvillo, A.; Alonso-Guzman, E. M.; Martinez-Molina, W.; Navarrete-Seras, M. A.; Ruvalcaba-Sil, J. L.; Navarro-Ezquerria, A.; Mitrani, A. (2021). Characterization of adobe blocks: Point-load assessment as a complementary study of damaged buildings and samples. *Heritage*, 4(2), 864-888. doi.org/10.3390/heritage4020047
- Sanchez-Calvillo, A., Alonso-Guzman, E.M., Martinez-Molina, W., Chavez-Garcia, H.L., Ruiz-Mendoza, M. (2023). Characterization and physical-mechanical properties of adobes from La Huacana, Mexico. In: Escalante-Garcia, J.I., Castro Borges, P., Duran-Herrera, A. (eds) *Proceedings of the 75th RILEM*

Annual Week 2021. RW 2021. RILEM Bookseries, vol 40. Springer, Cham. doi.org/10.1007/978-3-031-21735-7_85

Silva, A.; Oliveira, I.; Silva, V.; Mirão, J.; Faria, P. (2022). Vernacular caramel's adobe masonry dwellings – material characterization. *International Journal of Architectural Heritage*, 16(1), pp. 67–84. doi: 10.1080/15583058.2020.1751343.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo técnico del Laboratorio de Materiales de la UMSNH y el soporte económico de CONACYT y CIC-UMSNH a través del programa de Becas Nacionales y del proyecto “Módulos de Poisson y elasticidad, estáticos y dinámicos, para materiales de tierra cruda”, respectivamente. La investigación fue parcialmente financiada mediante el premio del 1er Concurso Internacional de Proyectos de Cooperación y Desarrollo del 15th International Conference on Durability of Building Materials and Components – DBMC2020.

AUTORES

Adrià Sánchez Calvillo, doctor en arquitectura, maestro en construcción avanzada en la edificación, especialista en restauración de sitios y monumentos y arquitecto técnico. Investigador postdoctoral en el grupo Sustainable Energy, Machinery and Buildings (SEMB) de la Universidad de Lleida, e investigador asociado al Cuerpo Académico Consolidado UM-147 de la Facultad de Ingeniería Civil de la UMSNH; miembro del Comité Nacional Español de ICOMOS.

Elia Mercedes Alonso-Guzmán, doctora en ciencias químicas, maestra en metalurgia y ciencias de los materiales e ingeniera civil. Primera profesora emérita de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Es la responsable del Primer Cuerpo Académico Consolidado-UM-147 de la Facultad de Ingeniería Civil “Ciencias, Ingeniería y Tecnología de los Materiales para la Construcción” y del Grupo de Investigación de Materiales.

Antonia Navarro Ezquerro, doctora en Geología por la Universidad de Barcelona y Profesora Lectora Serra Hunter por la universidad Politécnica de Cataluña (UPC). Es profesora de Materiales de Construcción en el Departamento de Tecnología de la Arquitectura de la UPC, e imparte diferentes asignaturas en el Máster universitario en Diagnóstico y Técnicas de intervención en la Edificación y en el Máster de Restauración de Monumentos. Es especialista en materiales de construcción de origen pétreo (tierra, rocas, piedras, áridos, morteros y hormigones de yeso y cal) y sus patologías.

Melissa Ruiz Mendoza, Ingeniera Civil egresada de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo titulada mediante la investigación llamada “Caracterización físico-mecánica de Adobes de la Huacana y Turicato, región Tierra Caliente, Michoacán, México”. Técnica académica en el laboratorio de materiales “Ing. Luis Silva Ruelas” de la UMSNH, apoyando en diversas investigaciones que ahí se desarrollan y llevando a cabo el control de calidad de los materiales de construcción de diversas obras y/o empresas.