



EL MUCÍLAGO DE *OPUNTIA FICUS* COMO ESTABILIZANTE EN RECUBRIMIENTOS DE TIERRA

Esmeralda Ávila Boyas¹; Luis Fernando Guerrero Baca²

Universidad Nacional Autónoma de México, CDMX, México,

¹arqavilaboyas80@gmail.com; ²luisfg1960@yahoo.es

Palabras clave: sostenibilidad, tradición constructiva, revoque, aglutinante, polisacárido

Los recubrimientos de la arquitectura de tierra cumplen diversas funciones entre las que destacan la protección física de las estructuras, la regularización de las superficies para hacerlas más higiénicas y la posibilidad del intercambio de vapor de agua con el medio circundante, que contribuye al confort higrotérmico de los espacios. Este documento presenta los avances de investigación de procesos de mejoramiento de revoques de tierra a partir de la recuperación de tradiciones regionales derivadas del uso del mucílago de *Opuntia ficus*. Aunque se tiene evidencia de su viabilidad debido a que se ha empleado tanto en la construcción como en la restauración de edificios de tierra, existe un sinnúmero de variables que influyen en su nivel de éxito y posibilidad de replicar los resultados. Entre los principales problemas se encuentra la dificultad para conseguir una concentración normalizada del mucílago, pues ésta varía notablemente dependiendo de fechas y horarios de recolección, madurez de la planta y reacción con el agua. Por ello, en la investigación se evalúa la eficiencia del uso de un procedimiento de extracción del mucílago en seco y su posible impacto en la trabajabilidad y comportamiento de las mezclas. Los resultados obtenidos hasta el momento permiten evidenciar un incremento notable en la plasticidad y consistencia de las mezclas, un retraso en el tiempo de secado que mejora la uniformidad de las superficies, un ahorro de agua para mezclado y un retraso en el tiempo de absorción hídrica superficial cercana al 70%. Finalmente, aunque se manifestó una disminución en la resistencia a la compresión de las probetas, es importante resaltar que se consiguieron datos muy valiosos en cuanto a su aislamiento térmico, lo que garantiza ventajas como componente de control bioclimático de los espacios habitables.

1. INTRODUCCIÓN

Entre los componentes más importantes de la arquitectura y construcción con tierra destacan sus recubrimientos por ser los encargados de mantener la estabilidad en la relación de los edificios con el entorno natural. Aunque existen evidencias del uso de estructuras térreas no revocadas en diferentes lugares del orbe y periodos históricos, la realidad es que la mayor parte de las obras patrimoniales y actuales, a lo largo de su vida útil han recibido procesos de recubrimiento, tendientes a protegerlas de las inclemencias climáticas, del ataque de flora o fauna parásita y para conformar superficies de sacrificio.

Por su condición protectora, estos componentes de la arquitectura tienen la doble función de ser lo suficientemente resistentes como para controlar acciones mecánicas y biológicas, así como el impacto del agua. Pero simultáneamente han de tener la capacidad de presentar respuestas plásticas ante sismos y hundimientos diferenciales, además de ser permeables al vapor de agua a fin de no alterar las ventajas en el comportamiento higrotérmico que siempre se han valorado en la arquitectura y construcción con tierra.

Asimismo, estos elementos deben tener la capacidad de permanecer adheridos a las superficies murales por mucho tiempo a fin de prolongar su vida útil y alargar la periodicidad de las necesarias labores de mantenimiento preventivo (Lozano, 2008).

Para cumplir estas necesidades, a lo largo de la historia se han utilizado diferentes tipos de aglutinantes que además de propiciar la adhesividad de los revoques a los sustratos, les confieran la consistencia necesaria para resistir la erosión y –en cierta medida– la absorción del agua en estado líquido. Empero, no se busca que los recubrimientos sean totalmente

impermeables porque se sabe que ésta es una de las principales causas de su deterioro, como lamentablemente ha sucedido con los revoques de cemento y las pinturas plásticas.

Entre estos recursos de mejoramiento de mezclas, para el caso de México destaca el empleo del *Opuntia ficus*, que se ha usado como aglutinante de recubrimientos desde la época prehispánica (Noriega, 2015), a fin de incrementar plasticidad y liga de los morteros y recubrimientos de cal (Kita; Daneels, 2015). Se ha podido identificar la presencia de esta sustancia en antiguos muros de la zona arqueológica de Teotihuacán (Cruz, 2013: 185).

Además, dadas las capacidades higroscópicas de este compuesto natural, se sabe que su empleo en elementos constructivos de tierra puede reducir la cantidad de agua que se requiere para el mezclado y, sobre todo, propicia un secado más lento y estable que incrementa su resistencia final a los agentes medioambientales.

Actualmente existe una creciente preocupación por el cuidado del medio ambiente, aspecto que cada vez se aborda con mayor frecuencia en el ámbito político, social, científico y tecnológico (Guerrero, 2014). Sin embargo, en la industria de la construcción muchas veces no se toman las medidas necesarias para reducir las fuentes emisoras de contaminantes, pues en los últimos años se ha dado un uso desmedido a los materiales comerciales, en especial, los utilizados para acabados arquitectónicos; esto ha traído como consecuencia una industrialización masiva que ha desplazado a las técnicas constructivas tradicionales, muchas de las cuales están a un paso de la extinción.

Pero a pesar de la importancia que tienen los recubrimientos arquitectónicos en la construcción con tierra, no han recibido la atención que merecerían (Guerrero, 2016). Gran parte de la arquitectura de tierra a lo largo del siglo XX se ha visto fuertemente afectada por haber sido recubierta con materiales de origen industrializado porque se ha perdido la tradición del uso de la tierra y, además, se desprecia bajo el erróneo supuesto de que los acabados que incluyen yeso, cal, cemento o polímeros artificiales son más confiables.

En cambio, se suele desconocer que un revoque de tierra incide favorablemente en el equilibrio de la temperatura dentro de la vivienda, gracias a su masa e inercia térmica, así como su aislamiento por la presencia de poros (Garzón; Neves, 2007). Sin embargo, un aspecto poco documentado se refiere a su potencial de acondicionar la absorción y desprendimiento de vapor de agua (higroscopicidad), proceso que incide directamente en la sensación higrotérmica de confort. En el polo opuesto, los productos industriales para acabados arquitectónicos convencionales resultan ser tóxicos y altamente contaminantes a lo largo de todo su ciclo de vida.

2. OBJETIVO

El presente texto procura mostrar los resultados de una serie de experimentos dirigidos hacia la verificación de la viabilidad de la aplicación de técnicas históricas y tradicionales para la realización de mezclas de tierra estabilizada con mucílago de *Opuntia Ficus* extraído en seco, para obtener revoques que sean sostenibles desde la perspectiva económica, social y ecológica, al ser aplicados tanto sobre muros de tierra como de otros materiales tradicionales y modernos.

3. METODOLOGÍA

La etapa de la investigación que se detalla en esta ponencia se centra en la realización de análisis comparativos de retracción volumétrica, absorción superficial por el método del tubo Karsten, absorción capilar por peso, tiempo de secado, resistencia a la compresión, y conductividad térmica de probetas realizadas con un mismo tipo de tierra, mezclada por una parte con mucílago y, por la otra con agua.

3.1. La extracción en seco

Tradicionalmente se acostumbra extraer el mucílago del *Opuntia Ficus*, que en México se

conoce genéricamente como “nopal” (Hollis, 2002), colocando sus pencas troceadas dentro de un recipiente con agua. De este modo en cuestión de minutos el agua se va tornando espesa y pegajosa a medida que el mucílago se desprende de la pulpa (Torres, 2015).

Sin embargo, esta técnica tradicional presenta al menos tres inconvenientes. El primero es que al entrar en contacto el mucílago (que es un polisacárido) con el agua, inicia su proceso de fermentación por lo que su duración es limitada. El segundo problema es que una vez mezclado con agua es imposible determinar la cantidad de mucílago presente. Finalmente, se trata de un procedimiento altamente impactante en el medio ambiente porque gran parte de la penca del nopal que no está en contacto con el agua se pudre y se desperdician grandes volúmenes de producto y de agua.

Por ello, la forma experimental en la que se realizó la extracción del mucílago fue en “seco”, es decir, a partir de prensado manual directo del material vegetal.

El mucílago de nopal se obtuvo a partir de pencas de nopal maduras cosechadas de un antiguo asentamiento de Hueyotlipan, Tlaxcala, México. Se seleccionó esta especie ya que es una de las más abundantes en la zona central del país¹ además de tener un alto contenido de mucílago (Barrios, 1997). La extracción consistió en el raspado cuidadoso de las paredes de pencas que fueron previamente partidas a lo largo en dos caras. De este modo, de un nopal de 1,8 kg de masa (figura 1a), se consiguió extraer 800 ml de mucílago concentrado. La consistencia del mucílago fue de muy alta viscosidad y el color de la solución era verde intenso (figura 1b).



Figura 1. a) *Opuntia ficus* después de la extracción del mucílago; b) Mucílago de *Opuntia ficus* obtenido a partir de la extracción en seco (créditos: E. Ávila)

3.2 Dosificaciones, variables y elaboración de muestras

La tierra que se utilizó para la elaboración de las muestras en esta investigación fue tomada de la zona de Tepecoacuilco, Guerrero, al sur de la República Mexicana. Se trata de una arcilla inorgánica de plasticidad media correspondiente al tipo “CL” del sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS). La elección de un material tan plástico se realizó con la intención de poder compensarlo a partir del agregado de volúmenes conocidos de arena para los ensayos futuros.

Para formar la solución mucílago-agua se realizó una prueba de campo de viscosidad a partir de agregar 50 ml del concentrado en 5 litros de agua, dejando reposar la solución por un periodo de 48 horas. Una vez reposada, se toma un pequeño volumen con el puño y se eleva a fin de medir la longitud del hilo del material viscoso que cuelga desde la mano. Si el hilo se interrumpe antes de llegar a un metro de longitud significa que la solución requiere

¹ www.biodiversidad.gob.mx

mayor cantidad de mucílago. La solución estará lista en el punto en el que la longitud del hilo no se interrumpa hasta una altura de un metro. Como resultado de esta prueba se obtuvo la viscosidad deseada y se utilizó esta relación para la realización de todas las muestras que se habrían de comparar con los testigos que fueron mezclados solamente con agua.

La mayor parte de las actividades se realizaron en el Laboratorio de Materiales Tradicionales de la Escuela Nacional de Conservación Restauración y Museografía (ENCRyM-INAH). Debido a que no hay una normatividad específica para los recubrimientos de tierra se tomaron como referente técnico los lineamientos de las normas de cementos y pastas. Las pruebas que determinan la consistencia de la mezcla se desarrollaron bajo la norma oficial Mexicana NMX-C-057-ONNCCE (2015) y la ASTM C-305-99 (1999).

Para determinar el tiempo de fraguado inicial y final se utilizó como referencia la norma oficial Mexicana NMX-C-059-ONNCCE (2017) y la ASTM C-807-03 (2003). Para determinar la cantidad de arena como agregado para compensar la mezcla se utilizó la norma ASTM C-778-002 (2002). Para determinar el mezclado se utilizó la norma ASTM-C-595 (2018), y para comparar la retención de agua se usó como referencia la norma ASTM C-1535-04 (2006).

Primero se realizaron cuatro probetas de recubrimientos, con distintas dosificaciones para determinar la proporción de arena de río pasada por la malla #10 (2,0 mm) con la que se compensaría la tierra a utilizar. Las dosificaciones se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Proporción tierra-arena

| Muestra | Dosificación |
|-----------------|--------------|
| a. Tierra-arena | 1:1 |
| b. Tierra-arena | 1:1,5 |
| c. Tierra-arena | 1,5:1 |
| d. Tierra-arena | 2:1 |

Después de dejar las muestras expuestas al sol para observar y determinar cuál proporción arrojaba mejores resultados, se tomó la opción “b” por ser la que dio una mejor respuesta en cuanto adherencia y retracción volumétrica. Dicha dosificación se eligió para la realización de las muestras para los moldes.

Se realizaron cuatro muestras con diferentes dosificaciones, para tener cuatro variantes; las muestras se hicieron sobre un molde de aglomerado de madera con un espesor de 5 mm y con un área de 10 x 10 cm. Para las pruebas de compresión simple se realizaron cubos estándares de 5 x 5 x 5 cm correspondientes a ambas series: con tierra, arena y agua, así como con tierra arena y mucílago disuelto.

Para las pruebas de penetración de agua mediante el tubo Karsten se empleó una adaptación de las normas, DIN 4117 (1960-11) y DIN1048 (1993) debido a que no existe un estándar nacional al respecto y porque se trataba simplemente de contar con un referente comparativo. Para los ensayos de absorción capilar se utilizó una adaptación de la Normal 11-85 (1985), a falta de estándares mexicanos.

Para la realización de las pruebas de resistencia a la compresión simple se usó como referencia tanto la norma mexicana NMX-C-036-ONNCCE-2004 (2004) y la ASTM C-39 (2006) realizando una adecuación debido a que las probetas de tierra tenían forma cúbica (Ramírez; Arellanes, 2012). Se usó la prensa manual ELVEC 657-2 digital que se localiza en el Laboratorio de Materiales de Construcción de la UAM-Xochimilco.

4. RESULTADOS

4.1 Ensayo de retracción volumétrica

Para medir la retracción volumétrica, se tomaron como variables cuatro mezclas, se utilizó un vernier graduado para medir la contracción radial que presentó cada muestra (figura 4), y se hizo una comparativa con las medidas del molde original para saber el porcentaje de reducción de cada muestra. Para conocer el porcentaje de reducción se utilizó un molde de aglomerado de madera de 100 mm x 100 mm, correspondiendo al 100% de la dimensión.

Tabla 2. Porcentaje de retracción de muestras

| Número de Mezcla | Mezcla | Reducción por lado (mm) | Porcentaje de reducción |
|------------------|---|-------------------------|-------------------------|
| 1 | Tierra-mucílago sin reposar 48 horas | 6,5 mm | 13% |
| 2 | Tierra-mucílago reposado 48 horas | 5,0 mm | 10% |
| 3 | Tierra-arena-mucílago reposado 48 horas (1,5:1) | 2,5 mm | 5% |
| 4 | Tierra-arena-mucílago reposado 48 horas (1:1,5) | No presenta reducción | 0 % |

Las mezclas 1 y 2 no estaban compensadas con arena por lo que su retracción radial fue muy considerable debido al alto contenido de arcilla de la tierra que se ensayó. Asimismo, se pudo notar que la mezcla en la que no se dejó reposar el mucílago aumentó su contracción en más de un 10%.

Por otro lado, se observó que al dejar concentrar el mucílago por 48 horas produjo un mejor comportamiento de la mezcla 2 disminuyendo su porcentaje de retracción, esto se debe a que el mucilago es un polisacárido fibroso altamente ramificado² que al tener contacto con agua y dejarse concentrar por un lapso mayor de tiempo, tiende a fermentarse dando como resultado un aumento en su viscosidad.

La muestra 3 presentó mejores resultados teniendo un menor porcentaje de contracción. Sin embargo, mostró un ligero pandeo, mientras que la muestra 4 fue la que desarrolló mejores resultados, pues no tuvo retracción radial ni pandeo.



Figura 2. Muestra 2 para medición de retracción volumétrica (crédito: E. Ávila)

Durante la realización de estas pruebas se pudo documentar la cantidad de agua requerida para la obtención de una mezcla trabajable y adecuadamente plástica. Se realizaron también cuatro mezclas, la de tierra-agua requirió 200 ml de líquido, la de tierra-arena-agua 175 ml, la de tierra-mucílago 165 ml y tierra-arena-mucílago 135 ml.

² www.smbb.mx/congresos/smbb/queretaro11

Como se detallará más adelante, esta información cobra gran relevancia desde la perspectiva de la sostenibilidad ecológica. La tierra es un material que se caracteriza por un óptimo aprovechamiento del agua en comparación con los materiales convencionales de construcción ya que utiliza comparativamente muy poca y, además, no la contamina. Pero si adicionalmente a esta cualidad general se consigue disminuir la cantidad de agua de mezclado, se alcanzan ventajas adicionales.

4.2 Prueba de absorción mediante Tubo de Karsten

El ensayo de penetración de agua se realizó adaptando la norma DIN 1048 (1993), para precisar la cantidad de agua que ingresa, por tiempo y unidad de la superficie de cada muestra. El instrumento para realizar los ensayos fue un tubo de Karsten, que consiste en una cúpula metálica de 30 mm de diámetro unida con un tubo de cristal calibrado con graduación. Se sella la unión del tubo y la superficie de contacto con una masilla impermeable para evitar fugas y concentrar el flujo del agua. "Con este arreglo la columna de agua ejerce una presión en la superficie de 961,38 Pa. Esta presión corresponde a una acción de gotas de lluvia golpeando a la pared con una velocidad del viento estática de 140 km/h perpendicular a la superficie" (Pérez, 2016, p. 75).



Figura 3. A la izquierda se observa el área de contacto de la probeta con la boca del tubo en la que el desgaste del material fue mínimo mientras que, a la derecha, en la cara opuesta de la muestra está la evidencia del flujo de agua sin deterioros (Crédito: L. Guerrero)

Se ensayaron 6 muestras de 100 mm x 100 mm, por un periodo de 3 minutos, de las cuales tres fueron realizadas con la mezcla compensada dejando reposar el mucílago 48 horas. Dicha mezcla fue la que arrojó mejores resultados en la prueba de retracción volumétrica. Las otras tres muestras ensayadas fueron realizadas con la mezcla de tierra y agua sin mucílago, para poder tener así dos variables y comparar los resultados de cada muestra.

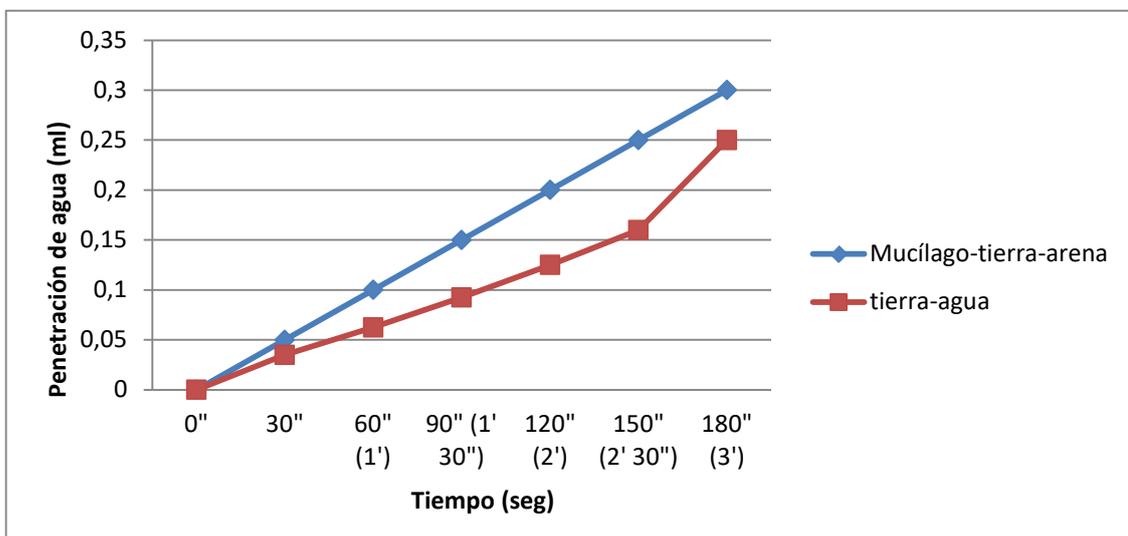


Figura 4. Ensayo de penetración de agua con tubo de Karsten. (Crédito: E. Ávila)

Como resultado se pudo documentar que la muestra tierra, arena y mucílago tuvo mayor absorción de agua que la mezcla tierra-arena, puesto que la arena incrementa su porosidad, lo que trajo como consecuencia que el agua traspasara la muestra. Sin embargo, la muestra compensada con arena y estabilizada con mucílago de *Opuntia* fue la que tuvo un comportamiento comparativo más adecuado debido a que el material no se disgregó más que en la superficie, a pesar de haber traspasado por completo la probeta.

4.3 Prueba para medir la conductividad térmica

Se realizó una muestra mediante un molde de 200 mm x 200 mm hecho con aglomerado de madera con un espesor de 5 mm para la prueba de conductividad térmica. El material para la probeta fue compensado con arena en proporción 1: 1,5 (tierra-arena), y estabilizada con el mucílago. La prueba se hizo con un medidor de flujo de calor.

El equipo se calibró con el patrón de calibración de fibra de vidrio con sección de 200 mm x 200 mm. La muestra tardó más de una hora, y a continuación, se exponen los parámetros de la medición. Se usó como referencia la norma ASTM-E-1530 (2016).

Tabla 3. Coeficiente de conductividad térmica de la tierra estabilizada con mucílago de *Opuntia*

| Mezcla | Temperatura (°C) | Conductividad térmica (W/(m×K)) | Resistencia térmica (m ² ×K/w) | Temperatura gradiente (K) | Tiempo de análisis (h:min) |
|---------------------------------|------------------|---------------------------------|---|---------------------------|----------------------------|
| Tierra- arena- mucílago (1:1,5) | 19,92 | 0,080 | 0,063 | 3984,27 | 1:04 |

Esta prueba se realizó con el propósito de documentar el comportamiento térmico y la transferencia de energía de los revoques de tierra, y considerar comparativamente sus cualidades de confort higrotérmico dentro de un espacio, con respecto a otros materiales utilizados de manera convencional en la construcción, y que ya han sido estudiados.

Cabe mencionar que la conductividad es una de las propiedades más importantes para evaluar el desempeño térmico de un material. Este dato es referido como una propiedad de transporte, que provee una idea de velocidad con la que la energía es transferida por el proceso de difusión, la cual depende de la estructura física, atómica y molecular de un material, así como el estado de integralidad en el que se encuentre.

Se sabe que la tierra es un material con una alta masa térmica, característica que permite que se estabilicen las temperaturas durante el día, contribuyendo de una forma natural a la refrigeración nocturna.

Gracias a la apropiada inercia térmica de un material como la tierra se pueden evitar las alteraciones bruscas de la temperatura que pasan del exterior al interior de un espacio (The European Commission, 2010).

Esta prueba se realizó como el referente acerca de un material que a la fecha no ha sido caracterizado. Este dato resulta relevante porque se sabe que, por ejemplo el aluminio tiene una conductividad térmica de 237 W/(m×K), el hierro de 80 W/(m×K), mientras que el hormigón 0,128 W/(m×K), la madera de 0,13 W/(m×K) y el corcho de 0,03 W/(m×K) (Fernández-Diez, 1992, 394).

Entonces un recubrimiento hecho con tierra adicionada con mucílago con una conductividad de 0,079 W/m×K, a pesar de su reducido espesor, contribuye a lograr un comportamiento mejor que el del revoque de cemento y revestimiento de madera, acercándose al del corcho, material que se suele utilizar de manera convencional para regularizar las condiciones térmicas de las habitaciones, especialmente en regiones con climas extremos.

No obstante, es importante señalar que materiales como el corcho o la madera tienen propiedades aislantes, pero carecen de una elevada inercia térmica como sí sucede con la

tierra, por lo que esta cualidad ralentiza la respuesta de un espacio a los cambios en las temperaturas exteriores, manteniendo estables las del interior.

Esto permite suponer que un revoque de tierra dará una respuesta que mejora el confort térmico de un espacio, independientemente del material constructivo con el que hayan sido elaborados los muros. Esta condición todavía se ve incrementada gracias a la propiedad higroscópica que poseen los recubrimientos de tierra, la cual permite equilibrar la humedad relativa de los espacios a partir del intercambio de vapor de agua. Entonces, la sensación higrotérmica de confort de las habitaciones se estabiliza.

4.4 Absorción capilar

Esta prueba se realizó en dos muestras, la primera fue de tierra con mucílago y la segunda de tierra con agua. Como actualmente en México no existen estándares que permitan conocer el estudio de la absorción capilar, se tomó como referencia la norma italiana Normal 11-85 (1985). En el ensayo de absorción capilar cada muestra es sumergida por una cara en un recipiente con una ligera cantidad de agua durante un lapso 30" y después se pesa con una báscula de precisión. Se repite el proceso hasta que la muestra comience a tener pérdida del material por desmoronamiento.

Cada muestra se ensayó por un lapso de ocho minutos. La cantidad de agua que absorbió la muestra permitió graficar y comparar cada una por diferencia de pesos.

Estos niveles de absorción se pueden observar en la Figura 5 que representa el comportamiento de las muestras al incrementarse su peso en un tiempo determinado, hasta llegar a la saturación o degradación de la muestra. Para determinar el coeficiente de absorción se usó la siguiente fórmula:

$$Abs(\%) = \frac{Ps - Pd}{Pd} \times 100$$

Dónde: Abs (%): Coeficiente de absorción en porcentaje

Ps: Peso desecado (g)

Pd: Peso saturado (g)

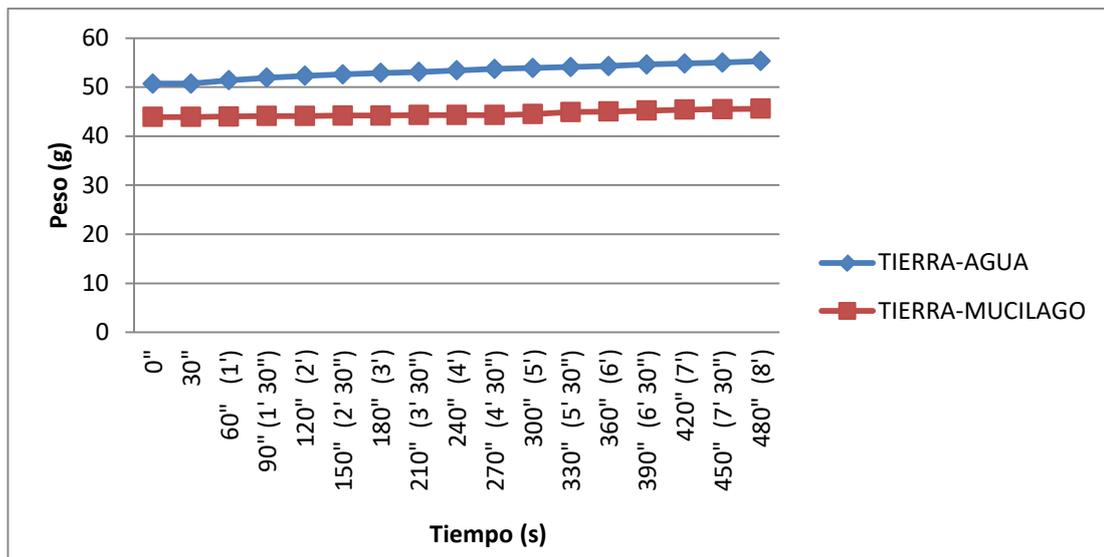


Figura 5. Incremento de peso por absorción capilar. (Crédito: E. Ávila)

Al terminar la prueba se tuvo como resultado que la muestra estabilizada con mucílago de *Opuntia* fue la que presentó un menor coeficiente de absorción (Tabla 4). La diferencia en la cantidad de agua que absorben por capilaridad ambas muestras es notable y representa una disminución cercana al 70% al utilizar mucílago en vez de agua.

Tabla 4. Coeficiente de absorción %

| Muestra | Mezcla | Peso inicial (g) | Peso final (g) | Coeficiente de absorción (CA) (%) |
|---------|----------------------|------------------|----------------|-----------------------------------|
| A | Tierra-agua-mucílago | 43,9 | 45,5 | 3,64% |
| B | Tierra-agua | 66,3 | 73,5 | 10,85% |

4.4 Ensayo a la compresión

Esta prueba se realizó con el fin de determinar la resistencia máxima y conocer el fallo del material en estado natural y estabilizado con mucílago de nopal. Se hicieron probetas cúbicas de 50 mm x 50mm x 50 mm de dos mezclas diferentes, tierra-agua, tierra-mucílago, dejándose secar por un mes, en un ambiente con temperatura y humedad controladas. Los cubos fueron sometidos a cargas axiales después del lapso de secado. Se formó una serie de 3 muestras por cada mezcla sometiendo cada probeta a carga axial en la prensa y los resultados promediados aparecen en la tabla 5.

Tabla 5. Resistencia a la compresión

| Muestra | mezcla | Resultados a la compresión (MPa) |
|---------|----------------------|----------------------------------|
| A | Tierra-agua-mucílago | 5,4 |
| B | Tierra-agua | 7,0 |

Como se puede observar, las muestras con la mezcla B fueron las más resistentes a la compresión. Esto refleja que una tierra que contiene arcillas con tan alta plasticidad, al estar en estado natural mezclada solamente con agua tiene una elevada capacidad de carga la cual disminuye al agregar mucílago.



Figura 6. Las fracciones de una de las probetas correspondientes a la mezcla de tierra sólo con agua, evidencian una elevada densidad y consistencia. (Crédito: E. Ávila)

5. CONCLUSIONES

Como resultado de los avances de la investigación y los ensayos realizados a las diferentes mezclas se puede concluir lo siguiente:

El mucílago de *Opuntia ficus* le confiere mejores condiciones a las mezclas que se utilizan para realizar revoques si se dejan reposar por más tiempo.

Las combinaciones con el mucílago elevan considerablemente la trabajabilidad del material al posibilitar la realización de probetas sumamente delgadas que conservan su geometría y que presentan superficies notablemente lisas y homogéneas en ambas caras. Esta condición permite prever que los recubrimientos realizados con esta mezcla tendrán una superficie lisa y uniforme, lo cual garantiza su calidad visual, durabilidad e higiene.

El tipo de extracción en seco confiere una mayor eficiencia en el manejo de la materia prima en comparación con el agua de mezclado, obteniendo así un mayor aprovechamiento y menor desperdicio de agua.

Pero además, se pudo documentar que para obtener condiciones similares de trabajabilidad del material, cuando se utiliza mucílago se requiere 17,5% menos de líquido en las mezclas de tierra sola y una cantidad 22,8% menor en el caso de las mezclas de tierra compensada con arena. Esto significa que al agregar mucílago al agua se ahorrará aún más este vital líquido, lo que se traduce en un destacable beneficio ecológico.

Adicionalmente, esta condición genera ventajas desde el punto de vista constructivo. Como se sabe, uno de los principales problemas de trabajar con tierra de alta o media plasticidad se deriva de su retracción al secado, la cual se manifiesta en agrietamientos y desprendimientos. En cambio, si se utiliza una menor cantidad de líquido de mezcla se tendrá un componente que conservará sus dimensiones, densidad e integridad al secar.

En lo que se refiere a las posibles afectaciones derivadas del agua en estado líquido que se encuentra presente en el entorno, las pruebas de penetración del tubo de Karsten permitieron mostrar que la aplicación de mucílago protege a los revoques al presentarse solamente disgregaciones en su capa externa. Al permitirse el flujo de agua al interior de la mezcla se consigue un reparto uniforme de la humedad que tenderá a secarse igualmente de manera adecuada y homogénea. Se trata de un material permeable pero consistente.

Así mismo, en los ensayos de absorción capilar se confirmó que el material con mucílago no pierde su porosidad, pero sí disminuye radicalmente la velocidad de flujo del agua en estado líquido. El mucílago evita que pase 66,45% de agua durante los procesos de absorción capilar, sobre todo durante los primeros minutos del proceso.

Con respecto a la capacidad térmica del material con mucílago resulta mejor que la madera y el hormigón y se acerca a las condiciones del corcho. Este aspecto vinculado al concepto de inercia térmica hace que los recubrimientos de tierra con mucílago resulten altamente competitivos para el equilibrio de la temperatura de los espacios, independientemente del material con el que se hayan edificado sus muros. De este modo se abre la posibilidad de emplear revoques de tierra con mucílago sobre paredes de ladrillo o de block de cemento mejorando tanto su imagen como las condiciones de confort al interior.

Finalmente, con los resultados obtenidos en las pruebas a compresión, se pudo determinar que las resistencias más altas se consiguen con la tierra en su estado natural, esto obedece a que su consistencia fue mayor que la del resto de las probetas. El decremento en la capacidad de carga del material está asociado a una menor densidad la cual justamente habla de su potencial como recubrimiento al permitir un adecuado flujo de vapor de agua con el entorno por lo tanto de regular el comportamiento higrotérmico del sistema. Esta menor resistencia comparativa también permite suponer un comportamiento más plástico ante vibraciones y deformaciones como las que caracterizan por ejemplo a los sismos.

El mucílago de nopal extraído en seco mejora radicalmente las propiedades de la tierra para satisfacer los requerimientos esperados de un recubrimiento, entre las que destacan su trabajabilidad, menor absorción hídrica, porosidad, flexibilidad y baja conductividad térmica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM C-39 (2006). Standardized test method for resistance to compression of cylindrical concrete specimens. USA: ASTM International
- ASTM C-305-99 (1999). Standard practice for mechanical of hydraulic cement pastes and mortars of plastic consistency. USA: ASTM International
- ASTM C-595 (2018). Standard specification for blended hydraulic cements. USA: ASTM International
- ASTM C-778-002 (2002). Standard specification for standard sand. USA: ASTM International
- ASTM C-807-03 (2003). Standard test method for time of setting of hydraulic cement mortar by modified Vicat needle. USA: ASTM International
- ASTM C-1535-04 (2006). Standard practice for application of exterior insulation and finish systems class. USA: ASTM International
- ASTM-E-1530 (2016). Standard test method for evaluating the resistance to thermal transmission of materials by the guarded heat flow meter technique. USA: ASTM International
- Barrios, E. P. (1997). *Suculentas mexicanas cactáceas*. México, México: CVS Publicaciones.
- Cruz, S. (2013). El mucílago de nopal como aditivo de las pastas de cal empleadas en conservación. En Barba, L. y Villaseñor, I. (Eds.). *La cal: Historia, propiedades y usos*. México: IIA-UNAM y ANFACAL, A.C., 183-202.
- DIN 1048 (1993) Pressure balance method. Germany: DIN
- DIN 4117 (1960-11). Damp-proofing of buildings against ground moisture. Germany: DIN
- Fernández-Diez, P. (1992). *Ingeniería térmica*. Consultado el 2 de mayo del 2018 en: <http://files.pfernandezdiez.es/IngenieriaTermica/Tablas/PDFs/Tablas.pdf>.
- Garzón, L. E.; Neves, C. M. M. (2007). Investigar, forma, capacitar, transferir. Los grandes desafíos de la arquitectura y construcción con tierra. *APUNTES*, Vol. 20, No.2 , 324-335.
- Guerrero, L. F. (2014). La sostenibilidad de la vivienda tradicional. *Revista de Arquitectura*, Universidad Católica de Colombia, Colombia, 126-133.
- Guerrero, L. F. (2016). El papel de la humedad y la compactación en la elaboración de recubrimientos de tierra. *construcción con tierra CT7*, Junio, 11-22.
- Hollis, H. B. (2002). Pencas de antaño. *Revista Artes de México*, 8-16.
- Kita, Y.; Daneels, A. (2015). Evaluación de bitumen como estabilizante para patrimonio construido en tierra bajo el clima trópico húmedo. *Estudios sobre conservación, restauración y museografía*. v. 2. ENCRyM-INAH. 129-144.
- Lozano, A. L. (2008). *La piel del edificio*. Cali: Universidad del Valle.
- NMX-C-036-ONNCCE (2004). *Industria de la construcción – bloques, tabiques o ladrillos, tabicones y adoquines– resistencia a la compresión. Método de prueba*. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, S.C.
- NMX-C-057-ONNCCE (2015). *Industria de la construcción –cementantes hidráulicos- determinación de la consistencia normal*. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, S.C.
- NMX-C-059-ONNCCE (2017). *Determinación del tiempo de fraguado para cementantes hidráulicos (método de Vicat)*. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, S.C.
- Noriega, M. N. (2015). Los nopales de México, catálogo visual. *Revista Arqueología Mexicana* , 48-53.
- Normal 11/85 (1985). *Assorbimento d'acqua per capillarità – Coeficiente di assorbimento capillare*. Italia: CNR-ICR.
- Pérez, N. (2006). *Los adobes arqueológicos de la Gran pirámide de Cholula*. Tesis Doctoral de Ciencia e Ingeniería de los Materiales. México: UNAM.
- Pezzi, C. H. (2010). *Un Vitruvio ecológico. Principios y práctica del proyecto arquitectónico sostenible*. Barcelona, España: Gustavo Gili. Disponible en <https://ggili.com/un-vitruvio-ecologico-libro.html>

The European Commission. (2010). Un vitruvio ecológico, principios y práctica del proyecto arquitectónico sostenible. Barcelona, España: Gustavo Gili.

Torres, P. (2015). La baba y el mucílago de nopal, una alternativa natural para la conservación de acabados arquitectónicos de tierra. revista interdisciplinaria INAH, No. 99, 93-114.

Ramírez, S.; Arellanes, F. J. (2012). Propiedades de durabilidad en hormigón y análisis microestructural en pastas de cemento con adición de mucílago de nopal como aditivo natural. Materiales de Construcción, v. 62, 307, 327-341.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al CONACYT, al Laboratorio de Materiales de Construcción de la UAM-Xochimilco, al Laboratorio de Materiales Tradicionales de la Escuela Nacional de Conservación Restauración y Museografía (ENCRyM) del Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH), al Laboratorio de Edificación Sostenible de la Facultad de Arquitectura de la UNAM y al proyecto SENER-CONACYT 260155, en la ciudad de México, México.

AUTORES

Esmeralda Ávila Boyas, Arquitecta egresada de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), con especialidad en Diseño de Interiores por CENTRO, Institución en Educación Superior en diseño, comunicación, cine y arquitectura. Actualmente cursando Maestría en Arquitectura en el área de Tecnología en la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) Facultad de Estudios Superiores Aragón.

Luis Fernando Guerrero Baca, Doctor en diseño con especialidad en conservación del patrimonio edificado, Maestro en restauración, Arquitecto, Profesor investigador de tiempo completo en la UAM-Xochimilco, Jefe del Área de Conservación y Reutilización del Patrimonio Edificado. Miembro de la Red Iberoamericana PROTERRA, miembro de la Cátedra UNESCO "Arquitecturas de tierra, culturas constructivas y desarrollo sostenible" de CRAterre.