

Arquitectura en Tierra:

Tecnología sostenible y reutilización patrimonial

XIV CIATTI 2017 MÉXICO
Congreso Internacional de Arquitectura en Tierra,
Tradición e Innovación

Coordinadores:
José Luis Sáinz Guerra
Félix Jové
Luis Fernando Guerrero Baca

ISBN: 978-84-09-06433-5
D.L.: VA 829-2018
Impreso en España
Noviembre de 2018

Publicación online.

Para citar este artículo:

To cite this article:

PÉREZ, Nora; ORTIZ, Soledad; BUCIO, Lauro. "Estudio de la absorción y transporte de agua en adobes prehispánicos con fines de conservación". En: *Arquitectura en tierra. Tecnología sostenible y reutilización patrimonial*. [online]. Cátedra Juan de Villanueva. Universidad de Valladolid, Valladolid 2018. Pp. 107-116

URL de la publicación:

<http://www5.uva.es/grupotierra/publicaciones.html>

Este artículo sólo puede ser utilizado para la investigación, la docencia y para fines privados de estudio. Cualquier reproducción parcial o total, redistribución, reventa, préstamo o concesión de licencias, la oferta sistemática o distribución en cualquier otra forma a cualquier persona está expresamente prohibida sin previa autorización por escrito del autor. El editor no se hace responsable de ninguna pérdida, acciones, demandas, procedimientos, costes o daños cualesquiera, causados o surgidos directa o indirectamente del uso de este material.

This article may be used for research, teaching and private study purposes. Any substantial or systematic reproduction, re-distribution, re-selling, loan or sub-licensing, systematic supply or distribution in any form to anyone is expressly forbidden. The publisher shall not be liable for any loss, actions, claims, proceedings, demand or costs or damages whatsoever or howsoever caused arising directly or indirectly in connection with or arising out of the use of this material.

Copyright © Todos los derechos reservados

© de los textos: sus autores.

© de las imágenes: sus autores o sus referencias.

ESTUDIO DE LA ABSORCIÓN Y TRANSPORTE DE AGUA EN ADOBES PREHISPÁNICOS CON FINES DE CONSERVACIÓN

XIV CIATTI 2017. Congreso Internacional de Arquitectura de Tierra, Tradición e Innovación.
Ciudad de México

Nora A. Pérez. Ingeniero Químico
Soledad Ortiz. Arqueóloga
Lauro Bucio. Físico

Coordinación Nacional de Conservación del Patrimonio Cultural
INAH, México

PALABRAS CLAVE: Permeabilidad, adobe, tubo Karsten

1. Introducción

Uno de los factores principales que afectan al patrimonio cultural edificado es el agua, como un detonador de deterioros. Los materiales implicados en la arquitectura de tierra, sufren erosión con el impacto de la lluvia y además, el suelo tiene la propiedad de retener agua. La absorción de agua es difícil de estudiar debido a que esta interacción es un proceso dinámico.

En este estudio se presentan los resultados de experimentos realizados con el método del

tubo Karsten sobre adobes modelo que simularon los adobes de la Gran Pirámide de la Zona Arqueológica de Cholula, Puebla, México. El objetivo de este estudio fue la comprensión de la interacción de los adobes con el agua, en el cual además de la absorción del agua, también se deseó conocer el perfil de mojado por el contacto con el líquido y registrar el tiempo que tarda en atravesar el flujo de agua. Se emplearon métodos del área de hidrología en los cuales el movimiento del agua se registra mediante imágenes con un

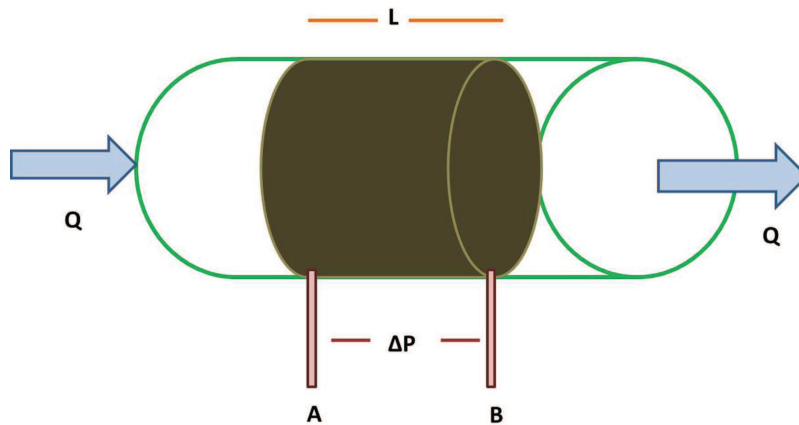


Figura 1. Diagrama del experimento de Darcy para medir la permeabilidad. Donde Q es el flujo de agua, L la longitud entre los dos puntos de medición (A y B) del cambio de presión (ΔP). Fuente: elaboración propia.

método de análisis sistemático, con la finalidad de relacionar los patrones de flujo con la porosidad y estructura del adobe.

El experimento se diseñó considerando tres variables: la granulometría, dirección de flujo y humedad inicial del adobe. Los resultados obtenidos se interpretaron considerando la composición y propiedades físicas de los adobes determinados en estudios de caracterización donde el principal componente de los adobes de la Gran Pirámide fue el material amorfo denominado alófono.

El objetivo de este estudio es la comprensión de la interacción de adobes modelo con el agua, puesto que como se mencionó previamente, el agua es uno de los factores que deterioran la arquitectura de tierra, y en el caso de estudio de la Gran Pirámide de Cholula la interacción con el agua es constante, no sólo del medio ambiente sino por las tuberías que la atraviesan así como por agua estancada en distintas áreas de la Zona Arqueológica. Los resultados obtenidos del análisis se interpretaron considerando la composición y propiedades físicas de los adobes determinados en estudios previos.

2. El transporte del agua en el suelo y su medición en patrimonio cultural edificado

La permeabilidad se define como: el volumen de un fluido que pasa a través de una sección transversal unitaria del medio, por unidad de tiempo, bajo la acción de un gradiente de

presión; es decir, es una medida de la resistencia de un medio poroso a ser atravesado por un fluido.

La permeabilidad se modela con la ley de Darcy (ecuación 1), mediante un experimento en el cual se hace pasar un líquido a flujo constante (Q) a través de un recipiente de sección transversal constante (A) y con dos barómetros, uno a la entrada y otro a la salida que miden el cambio de presión ΔP (a través del cambio en la altura de la columna de agua (Δh) y la longitud (L) entre los puntos A y B, y a través de este se define una constante de permeabilidad K (figura 1).

$$Q = K A \Delta h / \Delta L \quad (\text{ec. 1})$$

Los métodos empleados en patrimonio cultural para medir esta propiedad están basados en un principio general: el agua se pone en contacto con la superficie del material y se registra la cantidad de agua absorbida en función del tiempo. Algunos ejemplos de las técnicas más empleadas son el de capilaridad, tubo *Karsten*, con esponja y la pipa *Mirowski*.

La selección del método depende de su carácter no-destructivo, así como del objetivo del análisis. La técnica de capilaridad requiere toma de muestra, lo cual no se puede realizar durante trabajos de monitoreo en los cuales la misma área se evalúa repetidas veces o en zonas donde no sea posible tomar muestra suficiente para registrar este fenómeno. En contraste, el método del tubo *Karsten* (KT) se

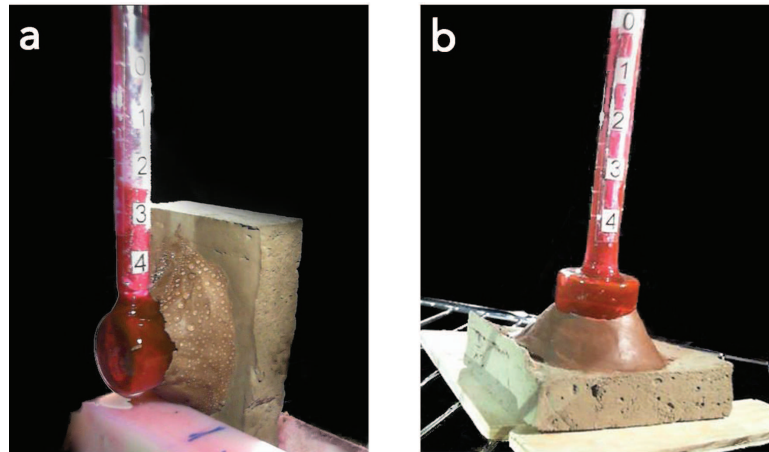


Figura 2. Foto tubo Karsten colocado sobre probetas a) posición vertical b) horizontal. Fuente: elaboración propia.

desarrolló específicamente para ser aplicado in situ de manera no destructiva. Los métodos in situ tienen la ventaja de poder realizar medidas múltiples, permitiendo un análisis representativo en materiales o estructuras no uniformes.

El tubo Karsten es un tubo de vidrio abierto con un cuerpo cilíndrico, al final del cual se sella al contacto con la superficie del material mediante plastilina. El modelo del tubo puede ser horizontal o vertical dependiendo de la superficie a analizar (figura 2). Una vez el tubo está sellado el agua se añade al tubo y se registra el tiempo que tarda en absorber 4 mL de agua. La columna de agua ejerce una presión en la superficie de 961.38 Pa. Esta presión corresponde con gotas de lluvia golpeando la pared con una velocidad de viento estática de 140 km/h perpendicular a la superficie.

La prueba de absorción de agua brinda una medida de la susceptibilidad de la superficie a absorber agua en la superficie expuesta, la selección del método de tubo Karsten para el experimento es debido a que a pesar de que fundamentalmente se utiliza como método comparativo, este método, a diferencia de otros provee datos que pueden ser posteriormente utilizados en simulaciones numéricas hidrotermales. Además, los datos obtenidos reflejan el estado actual en que se encuentra la superficie a analizar, factor de suma importancia puesto que los materiales de construcción con el paso del tiempo presentan capas de polvo, biofilms, sales y otras pátinas que

alteran su resistencia a la absorción de agua respecto al material original.

En el caso de los adobes como material de construcción además de la absorción del agua, también se desea conocer el perfil de mojado por el contacto con el líquido y registrar el tiempo que tarda en atravesar el flujo de agua el adobe.

Respecto a esta propiedad, no hay métodos estandarizados sino que se diseñan los experimentos dependiendo de la situación que se desea emular. Los métodos reportados de perfil de mojado o determinación del flujo de agua son del área de Hidrología donde se estudia el flujo de corrientes de agua contaminadas con fines de control ambiental.

Las técnicas desarrolladas para estudiar la distribución de agua y su movimiento emplean marcadores en el líquido, estos son frecuentemente tintas con diferentes tamaños de partícula dependiendo del tipo de suelo, la duración de la tinta y su toxicidad. El movimiento del agua se registra mediante imágenes con un método de análisis sistemático de la imagen, con la finalidad de relacionar intensidad de color con concentración y patrones de flujo con la porosidad.

3. Metodología

Se tamizaron adobes prehispánicos de Cholula de acuerdo a la norma ASTM D422 para tener las granulometrías definidas con la mis-

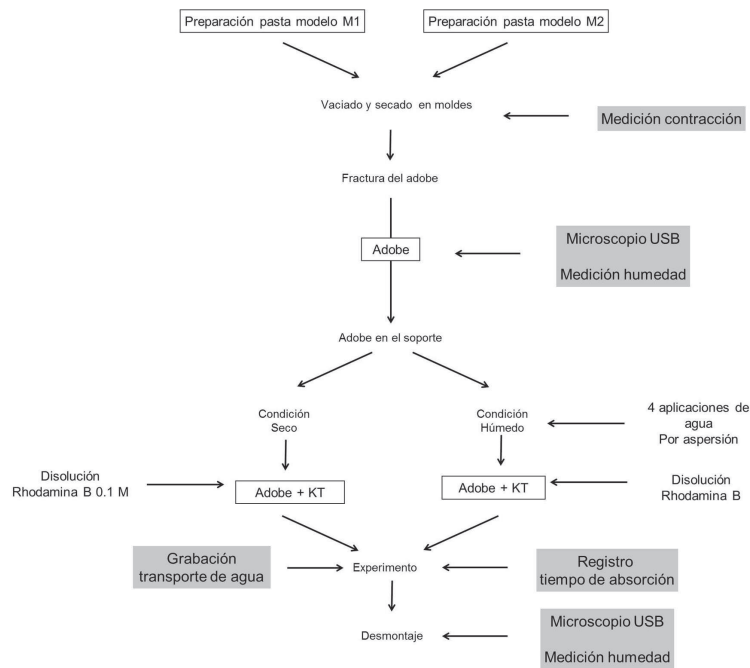


Figura 3. Diagrama de la metodología general de análisis. M1(mezcla 1), M2 (mezcla 2), KT (tubo Karsten). Fuente: elaboración propia.

ma composición de los adobes originales. Con las fracciones granulométricas se fabricaron 2 pastas modelo, una con la proporción original de los adobes (mezcla 1) y otra con baja proporción de material fino (mezcla 2). Las pastas se vaciaron en moldes de madera de dimensiones 12.5x12.5x2 cm, posteriormente se cimbraron para evitar espacios vacíos y aire en los adobes. Se secaron durante 1 mes a temperatura ambiente en interior.

En total se fabricaron 20 adobes considerando las variables definidas para el experimento y además, cada experimento se realizó 5 veces para determinar la repetitividad en el fenómeno de transporte de agua. El experimento de transporte de agua se diseñó considerando tres variables: granulometría, dirección del flujo de agua y humedad inicial del adobe.

- La granulometría influye en la estabilidad del adobe, así como en su consistencia por la composición determinada de cada fase granulométrica. Para el experimento se utilizaron dos proporciones granulométricas diferentes.

- El flujo de agua en los adobes en la Z.A. de Cholula puede ser en diferentes direc-

ciones, dependiendo del origen del líquido. Para el modelo experimental se consideraron únicamente dos: vertical y horizontal.

- El movimiento del agua está influenciado por las condiciones de saturación de los poros. Se consideró que el flujo de agua en la Z. A. de Cholula ocurre en el inicio de la temporada de lluvia cuando los adobes están inicialmente secos y posteriormente durante la temporada de lluvia cuando los adobes están previamente mojados. Así, los experimentos se realizaron en dos condiciones iniciales: seca y húmeda.

El experimento con el tubo Karsten es dinámico y se esperó a observar los patrones de flujo en el adobe, por tanto se diseñó un montaje con cámaras de video con el objetivo de registrar los cambios en el adobe por la absorción de agua.

Se emplearon dos cámaras web *lifecam* marca Microsoft que tomaron video en tiempo real, una cámara de *iphone* y una cámara de *ipad* en las que se usó la aplicación *imotion* para tomar fotografías en lapsos de tiempo y juntar todos los cuadros y crear una película rápida.

El tiempo de toma (time lapse) varió dependiendo de la posición y condición inicial del adobe, puesto que el fenómeno de transporte ocurrió a distintas velocidades y por tanto se requirieron distintos tiempos. También la posición de las cámaras fue determinada por las condiciones del experimento. Se definió una cámara en tiempo real al frente del tubo Karsten para medir los tiempos de absorción del agua y las otras tres cámaras se colocaron con la finalidad de grabar todas las caras del adobe y poder seguir el frente de mojado.

Se midió el porcentaje de contracción de los adobes modelo después del secado con un vernier. Para el experimento de KT se preparó una disolución de Rodamina B al 5×10^{-4} M con la finalidad de brindar color al agua e intensificar su tono al entrar en contacto con el adobe.

Previo al montaje de cada adobe en el soporte y después de desmontar cada experimento, se realizó la observación con microscopio USB en todas las caras del adobe y se midió la humedad relativa de las superficies superior e inferior con un higrómetro de contacto (figura 3). Para la condición en seco después de montar el tubo Karsten sobre el adobe se añadió el volumen requerido de la disolución de Rodamina B y se comenzó el experimento. Para la condición en húmedo después de montar el tubo Karsten se aplicó con un aspersor de agua en la superficie del adobe, se realizaron cuatro aplicaciones por lado a una distancia aproximada de 10 cm.

El procesamiento de datos se hizo registrando el tiempo de absorción de los 4 mL del tubo Karsten. Las imágenes de las cámaras se seleccionaron para tener un seguimiento representativo del transporte de agua en cada adobe modelo, se registró la erosión y el tiempo que tardó en observarse la humedad en el extremo opuesto al tubo Karsten. Posteriormente se modeló la infiltración con una ecuación empírica de Ingeniería de suelos (ecuación 2). Donde I es la cantidad de agua en el suelo, t es el tiempo, a y b son parámetros que dependen de la propiedades del suelo.

$$I = a t^b \quad (\text{ec. 2})$$

El coeficiente a está relacionado con la velocidad inicial de la infiltración, y por tanto depende de la estructura y de la condición del suelo en el momento en que se aplica el agua.

Un valor de a grande (cercano a 1) se obtiene si el suelo tiene grietas y poros grandes. El exponente b se relaciona con la estabilidad estructural del suelo; un valor pequeño de b (cercano a cero) indica que la estructura del suelo no es estable y la velocidad de infiltración se reduce debido a la destrucción de la estructura. Los suelos que son estables tienen exponentes mayores a 0.6 y pueden aproximarse a 1.0, este parámetro depende además de la geometría del flujo. Los datos de infiltración por volumen de agua de los experimentos y los datos de la distancia de infiltración se ajustaron a esta ecuación empírica y se presentan los valores obtenidos para el coeficiente a y el exponente b .

4. La estructura del suelo y erosión de los adobes

En general se observó que de las variables estudiadas la geometría fue la más importante puesto que definió los tiempos de absorción del tubo Karsten (KT) y en geometría horizontal generó fracturas completas del adobe antes de que se absorbiera toda el agua, mientras que en la geometría vertical la erosión de la superficie fue significativa pero sin fracturar estructuralmente el adobe.

Esto se explica debido a que el suelo seco ejerce una gran presión cuando se está humedeciendo y en la geometría horizontal el peso es fundamental estructuralmente. El proceso de hinchamiento de los suelos se define como el fenómeno que ocurre cuando aumenta el volumen de un sólido y disminuye su cohesión, mientras éste absorbe un líquido sin perder su homogeneidad aparente. Los factores que influyen en el hinchamiento son: el tipo de arcilla, arena superficial, densidad de carga superficial, cationes y aniones asociados a la arcilla, materia orgánica, sesquióxidos y agua entre las capas de arcilla.

Se considera que los suelos arenosos con partículas grandes tendrán espacios porosos grandes y menos poros de tamaño pequeño que un suelo arcilloso constituido de partículas finas, indicando una relación entre el tamaño de poro y el contenido de humedad. Estas dos características están asociadas con dos interfases importantes del suelo:

- Interfase sólido-líquido que ocurre en donde las partículas del suelo y las del agua se ponen en contacto.

- Interfase aire-agua que ocurre donde la disolución del suelo se pone en contacto con el aire del mismo.

Esta relación se observa de manera específica en las medidas de humedad superficial tomadas antes y después del experimento, en las cuales el contenido de humedad en todos los casos fue menor para la mezcla 1 (menor material fino) en comparación con la mezcla 2 (mezcla original).

El término estructura de suelo se refiere morfológicamente a la disposición de partículas elementales (arena, limo y arcilla) que forman partículas compuestas, separadas de las contiguas y que tienen propiedades diferentes de las de una masa igual de partículas elementales sin agregación. Una propiedad importante de la estructura del suelo es la capacidad que tienen los granos de retener su forma cuando se humedecen y de permitir el paso del agua a través del suelo. A esta propiedad se le llama estabilidad estructural. Los granos de suelo deben tener suficiente estabilidad para que permitan el libre paso del agua y la entrada de aire conforme el agua sale.

Los cambios estructurales que ocurren en el suelo tienen lugar con la mojadura inicial y pueden manifestarse simultáneamente por un hinchamiento rápido de los vacíos del suelo. La influencia de la mojadura en la estructura la pone de manifiesto la proporción de permeabilidad intrínseca al agua, con la permeabilidad al aire. El movimiento del agua ocurre cuando hay diferencias de potencial entre diferentes puntos del sistema.

En los experimentos en geometría vertical se observó erosión superficial desde el inicio del contacto agua-adobe, estabilizándose posteriormente. Si el adobe está previamente humedecido se observa que entonces la erosión no es agresiva, sino lenta y homogénea formando un patrón de erosión circular no profundo. La estabilidad de los agregados y poros disminuye al mojar el suelo seco rápidamente, puesto que el mojado rápido también causa daño por aire atrapado en el agua que llena los poros externos antes de avanzar hacia adelante, y por tanto, esta presión por aire fractura a los suelos.

En la geometría horizontal fue muy notorio como las condiciones iniciales de humedad cambiaron la estabilidad del adobe, provo-

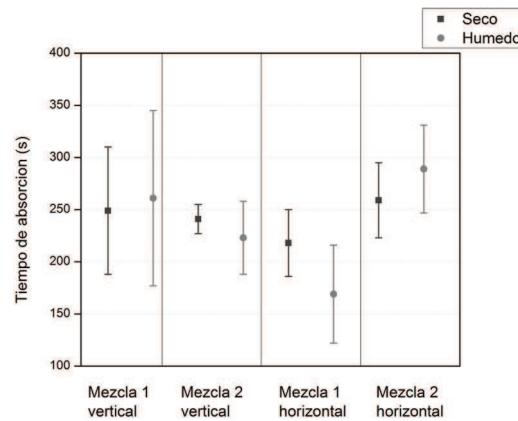


Figura 4. Tiempos de absorción del tubo Karsten. Fuente: elaboración propia.

cando mayor erosión en seco que en húmedo. Asimismo, la pérdida de material fino ocurrió en todos los casos de la configuración vertical mientras que en la geometría horizontal se perdió sólo en la condición seca.

El hinchamiento y pérdida de la estructura de los adobes por el agua en ambas geometrías fue inicialmente por micro exfoliaciones que derivaron en micro fracturas y posteriormente en fracturas estructurales en la geometría horizontal.

Por tanto, existe un cambio en la erosión inicial o en la manera en la que se hincha el suelo dependiendo de las condiciones iniciales y de la granulometría para ambas configuraciones.

5. Sobre la infiltración y el frente de mojado

Está reportado que el agua avanza en el suelo como un frente de humedad. Cuando la humedad llega hasta el suelo seco del frente de mojadura, la conductividad disminuye bruscamente dando la impresión de que el agua se acumula detrás del frente hasta que el suelo tiene alrededor del 80% de saturación, después de lo cual se mueve bastante rápido hasta el próximo agregado o grano.

Si el suelo dentro del que se está infiltrando el agua estaba inicialmente húmedo, el movimiento del frente de mojadura hacia abajo es más gradual que en suelo seco. El frente de mojadura es muy pronunciado en el suelo seco.

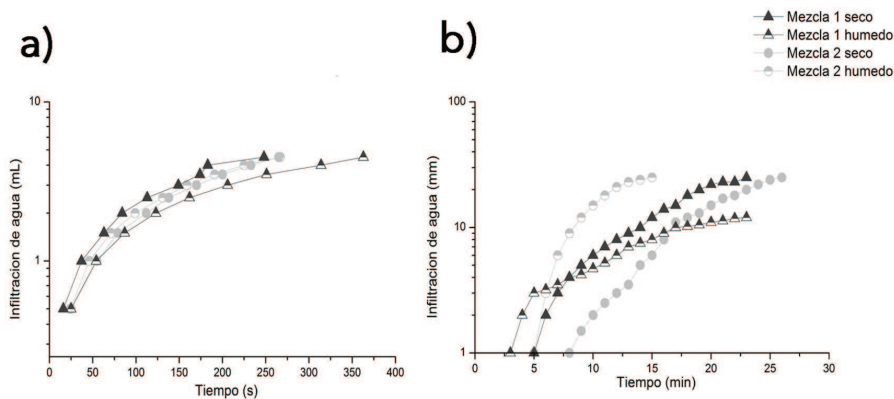


Figura 5. a) Gráfica de volumen de infiltración en geometría KT vertical. b) Gráfica de profundidad de infiltración en geometría KT vertical. Fuente: elaboración propia.

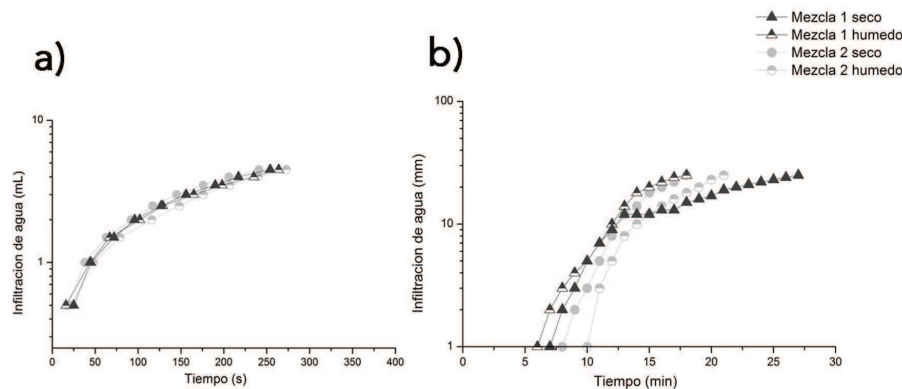


Figura 6. a) Gráfica de volumen de infiltración en geometría KT horizontal. b) Gráfica de profundidad de infiltración en geometría KT horizontal. Fuente: elaboración propia.

En la geometría vertical, el frente de mojado en la mezcla 1 tardó más tiempo en aparecer en condición inicial de humedad, mientras que en la mezcla 2 fue constante y por tanto indica que el agua se distribuyó en el adobe y continuó fluyendo. En geometría horizontal, se observaron cambios de velocidad en frente de secado por granulometría y condición inicial, siendo más rápido en la mezcla 1 que en la mezcla 2 y también en condición seco, como se esperaba, debido a que la conductividad de humedad del suelo es función del número y espesor de las películas conductoras, relacionado con el potencial de humedad (figura 4).

En la geometría horizontal, el tiempo de absorción en la mezcla 1 tuvo un cambio significativo absorbiendo más rápido en húmedo que en seco; sin embargo, fue en esta geometría en la que se tardó más en observar la mancha en la cara inferior, entonces, proba-

blemente el que estén llenos los poros previamente causó que se retrasara el flujo debido a la disminución del potencial de humedad.

La infiltración y la permeabilidad están íntimamente relacionadas con el tamaño de los poros y la estabilidad de las unidades estructurales del suelo. En los suelos que tienen grietas grandes, la infiltración puede ser alta inicialmente, sin embargo, la velocidad de infiltración bajará tan pronto como las grietas grandes se llenen, luego el suelo se hincha y la velocidad se puede reducir hasta un valor cercano a cero.

Los resultados experimentales de infiltración se ajustaron a la ecuación 2 (figura 5) donde para la geometría vertical los valores de a muestran que no hay grietas o grandes poros, sin embargo la diferencia entre la mezcla 1 y mezcla 2 en la profundidad de infiltración es significativa, mostrando que hay menos po-

ros en la mezcla 2 y que la condición inicial de seco o húmedo no afecta. Asimismo, en la mezcla 2 los valores de b son mayores que en la mezcla 1 mostrando que tiene una estructura más estable. Nuevamente, no se observó que afecte la condición inicial de seco o húmedo.

En la geometría horizontal (figura 6) los valores de a indican que los adobes no tienen grietas o poros grandes, sin embargo, los coeficientes de la mezcla 1 son un poco mayores que los de la mezcla 2, esto es consistente con la distribución granulométrica de las mezclas. Los valores del exponente b son cercanos o mayores a 1, por tanto indican que el suelo es estable. En este caso específico el valor de b en condición seca es mayor en la mezcla 1 que en la mezcla 2, mientras que en la condición inicial húmedo es mayor en la mezcla 2. Estos resultados coinciden con lo observado respecto a que la mezcla 2 en condición húmedo es más estable que las otras mezclas. Para este caso sí fue importante la condición inicial de humedad

Cuando el agua se infiltra en el suelo, se llena el reservorio de humedad hasta rebasarlo en cada intervalo sucesivo de profundidad, por lo tanto la cantidad de agua que entra en un suelo dado, depende de la cantidad de agua que ese suelo puede almacenar y de la velocidad con que el exceso de agua se transmite a través del suelo húmedo, al frente de mojado en contacto con el suelo seco de abajo. Estos reservorios de humedad por profundidades explican el deterioro por capas que se observaron en la microscopía óptica y la razón por la cual el deterioro comienza de esta manera.

El movimiento del agua hacia la parte posterior para la mezcla 1 en geometría vertical tuvo cambios en su tendencia, probablemente por la destrucción temprana de la estructura del adobe y además, cuando está húmedo se observa que se satura en un tiempo corto, lo que previene su movimiento y por tanto, retrasa la aparición de la mancha en la cara posterior.

A partir de los experimentos y la forma en la que aparece el frente de mojado en todas las caras de los adobes se determinó que en geometría vertical las líneas de flujo atraviesan transversalmente el adobe desde el centro hacia el exterior y en geometría horizontal lo hacen de la misma manera pero formando círculos concéntricos. Esto es consistente con

los modelos computacionales reportados que modelan la absorción de agua de un ladrillo belga antiguo con un tubo Karsten en posición vertical, el patrón de flujo parece ser similar, así como los tiempos y profundidad de penetración, sin embargo, es difícil comparar los resultados directamente, puesto que en este caso se están observando sólo las caras finales de los adobes, pero coinciden razonablemente con la simulación.

Por tanto, se observa que en geometría vertical, la distribución granulométrica de los adobes fue relevante para el transporte de agua dentro de ellos y que la condición inicial de seco o húmedo puede o no ser relevante dependiendo de la granulometría de los adobes. Si la granulometría cambia por el deterioro siendo más arenosa, el transporte de agua dentro de los adobes será diferencial dependiendo de si el adobe está previamente seco o húmedo. En la geometría horizontal también es relevante la granulometría puesto que la mezcla 2 no sufrió pérdida de material fino y además, si el adobe estaba previamente húmedo la erosión disminuye considerablemente y el colapso por fractura ocurre en un tiempo más largo del experimento.

6. Consideraciones experimentales y recomendaciones en materia de conservación

La aplicación del tubo Karsten requiere una superficie adecuada y precisión para su colocación, ya que aunque sea una prueba sencilla, la textura de la superficie es un factor importante a considerar, puesto que si es pulverulento o muy rugoso no se puede pegar la plastilina en el material. En el caso de la posición vertical para los adobes, si se erosiona demasiado, la pulverulencia causa el despegue del tubo y se escurre el agua antes de terminar el experimento.

En general, la pérdida de material fino no es tan agresivo para el deterioro de los adobes realizados con la mezcla 2 puesto que hay mayor cantidad de material fino que agrega las partículas grandes, sin embargo, es necesario evaluar con suficientes ciclos de humedad cuando se alcanza el estado crítico de pérdida total de este material y por tanto se pierde la estructura y estabilidad del adobe.

La cantidad de agua que se infiltra en un suelo en un intervalo de tiempo es máxima al comenzar la aplicación del agua en el suelo.

Después de un tiempo largo la velocidad con que el agua entra en el suelo se acerca a un valor constante conforme la curva se aproxima a una línea recta, como se observó en las figuras de resultados para todos los casos.

La velocidad de infiltración depende de muchos factores, entre ellos: el espesor de agua empleado, la temperatura del agua y el suelo, la estructura y compactación, textura, contenido de humedad del suelo, estratificación, agregación y actividades microbianas.

En este experimento el modelo empírico para la infiltración fue aplicable puesto que fue un "suelo" que permaneció homogéneo durante el proceso de flujo y el contenido de agua fue la única variable del potencial del agua. Sin embargo, las mismas ecuaciones no se aplican si se están considerando los factores mencionados arriba. De especial importancia es la temperatura, puesto que hay un cambio en la viscosidad y tensión superficial del agua pura.

En el caso de la Gran Pirámide los resultados que se presentaron aquí son una primera aproximación, pero es necesario construir otros modelos que consideren la estratificación, que en este caso serían las distintas etapas constructivas, además del sistema constructivo completo y no sólo como unidad; y puesto que está recubierta por vegetación se debe plantear en un sistema aire-agua-suelo-raíces.

Otro factor que se debe de estudiar, es el cambio en las condiciones de la doble capa difusa por la presencia de sales solubles como se puede atestiguar en el túnel de Bebedores.

La conservación del suelo para fines agrícolas se da por medio de una agregación que disminuya la destrucción y el transporte del material erosionado por medio de agua o del aire y aumenten las condiciones favorables para la infiltración y percolación, de manera que la erosión y los deslaves se mantengan al mínimo. Por tanto se pueden buscar estabilizantes similares a los de esta área para regular la humedad y aireación con la finalidad de mantener la estructura de los adobes.

Se confirmó que es posible modelar los adobes con pastas de distintas granulometrías y así comprender la relación de composición-microestructura-propiedades para este material de construcción. En este estudio, a pesar de lo simple del modelo, se logró determinar la importancia de la dirección en la que fluye la humedad como un factor determinante para los colapsos: si el agua llega en configuración vertical entonces habrá erosión pero no colapsos inmediatos; mientras que si el agua llega en configuración horizontal, entonces el peso de la tierra mojada causará colapsos antes que erosión. Finalmente, este conocimiento se puede aplicar para fabricar nuevos adobes con propiedades mejoradas o conservar los ya existentes.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Arqlogo. Cedillo del Centro INAH Puebla por proveer los adobes para el estudio. La investigación fue apoyada por los proyectos CONACYT CB-211/167624, LN 260779, LN271614 y LN232619, CB2396 09. Así como al Dr. Luis Fernando Guerrero y al Laboratorio de Materiales de CYAD (UAM-Xochimilco). NAP y SO agradecen a CONACYT por la beca de doctorado.

Bibliografía

- ALLAIRE, Suzanne; et al. "Quantifying preferential flow in soils: A review of different techniques", *Journal of Hydrology*. 378 (2009) 179–204.
- ALLAIRE, Suzanne.; et al. "Water and solute movement in soil as influenced by macropore characteristics - 1. Macropore continuity". *Journal of Contaminant Hydrology*. 41 (2000) 283–301.
- ASTM INTERNATIONAL, "ASTM D422: Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils", 2007. Estados Unidos de América.
- DUARTE, Ruben et al. "In Situ Testing Techniques for Evaluation of Water Penetration in Rendered Facades - the Portable Moisture Meter and Karsten Tube". *International Conferencie on Durability of Building Materials and Components*, Porto, 2011. Portugal.
- FORRER, I.; et al. "Quantifying dye tracers in soil profiles by image processing". *European Journal of Soil Science*. 51 (2000) 313–322.
- GAVANDE, Sampat. *Física de suelos. Principios y aplicaciones*. Limusa, Ciudad de México, 1976. México
- GIRALDI, David.; et al. "Hydrodynamics of vertical subsurface flow constructed wetlands: Tracer tests with rhodamine WT and numerical modelling", *Ecological Engineering*. 35 (2009) 265–273.
- GITIS, Vitaly.; et al. "Fluorescent clays-Similar transfer with sensitive detection", *Chemical Engineering Journal* 174 (2011) 482–488.
- HENDRICKX, Roel. "Using the Karsten tube to estimate water transport parameters of porous building materials", *Materials and Structures*. (2012) 1–12.
- HERNÁNDEZ, Dante. *Efecto de la Mojabilidad sobre el flujo a través de un medio poroso*, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, 2013. México.
- MUSKAT, Morris. *The Flow of Homogeneous Fluids through Porous Media*, McGraw-Hill, Nueva York, 1937. Estados Unidos de América.
- PÉREZ, Nora; et al. "Identification of allophane and other semi-crystalline and amorphous phases on pre-Hispanic Mexican adobe earth bricks from Cholula, Mexico" *Microchemical Journal*. 126 (2016) 349-258.
- REN, K.B.; KAGI, D. A. "Upgrading the durability of mud bricks by impregnation", *Building and Environment*. 30 (1995) 433–440.
- VANDEVOORDE, Delphine.; et al. "Validation of in situ Applicable Measuring Techniques for Analysis of the Water Adsorption by Stone". *Procedia Chemistry*. 8 (2013) 317–327.
- VANDEVOORDE, Delphine. et al. "Comparison of non-destructive techniques for analysis of the water absorbing behavior of stone". *12th International Congress of Deterioration and Conservation of Stone*, Nueva York, 2014. Estados Unidos de América.
- WEILER, Markus.; FLÜHLER, Hannes. "Inferring flow types from dye patterns in macroporous soils", *Geoderma*. 120 (2004) 137–153.

Citas y notas

* **Nora A. Pérez.** Ingeniero Químico, Responsable del Laboratorio de Conservación, Diagnóstico y Caracterización Espectroscópica de Materiales (CODICE), Coordinación Nacional de Conservación del Patrimonio Cultural - INAH, Ciudad de México, México.

Soledad Ortiz. Arqueóloga, estudiante de doctorado en el Posgrado de Estudios Mesoamericanos, LANCIC sede Instituto de Física - UNAM. Ciudad de México, México.

Lauro Bucio. Físico, Investigador del Laboratorio de Cristalofísica y Materiales Naturales del Instituto de Física - UNAM. Ciudad de México, México.