RECUBRIMIENTOS DE TIERRA ESTABILIZADA CON CAL Y MUCÍLAGO DE *OPUNTIA FICUS* PARA LA PROTECCIÓN DE SUPERFICIES DE TAPIA

Esmeralda Avila Boyas[1], Luis Fernando Guerrero Baca[2], Blas Antonio Tepale Gamboa[3]

[1]Universidad Nacional Autónoma de México, México, arqavilaboyas80@gmail.com

[2] Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco, México, México, luisfg1960@yahoo.es

[3] Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Michoacán, México, blasblasarq@gmail.com

Palabras clave: Aglutinante, arquitectura de tapia, revoque, pintura, sostenibilidad

Resumen

La construcción de muros de tapia tradicionalmente se empleó en México tanto en haciendas como fincas agrícolas y un gran número de viviendas, especialmente en la zona del Altiplano Central. Hoy en día se busca la recuperación y mejoramiento del sistema constructivo a fin de darle mayor estabilidad, dureza y resistencia a sus superficies y con ello, brindarles mejor protección mecánica y contribuir con el confort higrotérmico de los espacios. El presente texto muestra algunos resultados de una serie de experimentos dirigidos al desarrollo de procesos para el mejoramiento de revoques de tierra estabilizados con hidróxido de calcio y mucílago de *Opuntia ficus*, aplicados sobre superficies de tapia. Se han podido recuperar y optimizar técnicas ancestrales a fin de conseguir procedimientos constructivos económica y socialmente sostenibles, apropiados a las condiciones climáticas extremosas del centro de México.

1 INTRODUCCIÓN

La edificación de tapias tiene un origen milenario y está presente en diversas partes del mundo. Sin embargo, para el caso de México este sistema constructivo tuvo una acotada expansión regional. A pesar de sus excelentes cualidades se han localizado evidencias de su empleo únicamente en la región limítrofe de los estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz en el centro del país, especialmente en poblados y zonas rurales asociadas al antiguo Camino Real que comunicó durante la época virreinal el puerto de Veracruz con la Ciudad de México. Sus fechas y procesos de difusión territorial todavía no han podido ser definidas con precisión pero se tiene evidencia de un auge importante en su empleo sobre todo durante el siglo XIX (Guerrero, 2011).

La construcción de muros tradicionales de tapia en la región consistía en el uso de moldes de madera conocidos como tapiales, los cuales deberían ser capaces de contener las tongadas de tierra que posteriormente se apisonaba en capas sucesivas que iban de los 13 cm a los 16 cm de espesor hasta completar el llenado del molde. Una vez completado este proceso el molde era retirado y se desplazaba horizontalmente para continuar con el siguiente bloque de tierra, estos pasos se repetían hasta completar la hilada, las hiladas posteriores eran construidas de manera similar pero buscando el traslape de los bloques en lo posible.

Entre los principales motivos de éxito de esta técnica en la región destaca la posibilidad de edificar empleando prácticamente cualquier tipo de tierra y, sobre todo, muy poca cantidad de agua, a diferencia de otras técnicas constructivas. La consistencia de la mezcla debe estar casi seca para permitir una adecuada compactación pues, con una humedad superior al 15%, el trabajo resulta difícil y puede generar alteraciones o deformaciones en los muros durante su secado (Hoffmann; Minto; Heise, 2011).

Los bloques quedaban traslapados y sus dimensiones aproximadas eran de 2,0 m de largo por 1,0 m de alto, con espesores entre 0,5 m y 0,8 m. En las construcciones tradicionales se cuidaba que las juntas verticales entre los bloques no coincidieran con las de las hiladas ya

terminadas, por lo que se colocaban sobre la mitad de la pieza inferior de acuerdo con la lógica de contrapeo de cualquier mampostería (figura 1).

Figura 1. Muro de tapia tradicional. Vivienda en Huamantla, Tlaxcala (crédito: B. Tepale, 2019)

Sin embargo, una de las condiciones que influyó de manera determinante en su destacado empleo como recurso para realizar largas bardas perimetrales de áreas agrícolas y delimitaciones de viviendas tanto rurales como urbanas, se derivaba del hecho de requerir muy poco mantenimiento. Al igual que sucedía con los cercados realizados con piedra seca que se conocen regionalmente como “tecorrales”, la conformación de bardas de tapia permitía su “abandono” sin que las estructuras sufrieran deterioros importantes, aun después de muchas décadas de exposición a la intemperie. Como la tierra para ser compactada requiere tener una baja plasticidad, la presencia de arcillas en su materia prima también era limitada. Esto daba como resultado muros altamente porosos que intercambiaban agua cotidianamente sin sufrir alteraciones notables.

Derivado de la calidad de la materia prima y de los procesos constructivos, los muros de tapia se solían dejar sin protección superficial. Y, a pesar de las condiciones climatológicas extremosas que caracterizan la zona de estudio, la mayoría de las estructuras se conservan en sorprendente nivel de integralidad después de más de cien años a la intemperie.

Sin embargo, en las partes en las que los muros de tapia se integraban a espacios habitables, las comunidades locales procuraban la aplicación de recubrimientos por cuestiones de higiene, estética pero, sobre todo, de imagen social.

Los procedimientos para la realización y aplicación de revoques y pinturas a base de cal que tenía un origen milenario, fue confiriéndole a la arquitectura de tapia un símbolo de estatus y lógicamente una aspiración para sus habitantes. Algunas áreas especialmente vulnerables de las bardas perimetrales por su permanente exposición a erosiones de origen antrópico, y en torno a las fachadas principales de las casas, eran “encaladas” periódicamente.

Cabe hacer notar que, durante la época virreinal poca gente tenía acceso a la cal, pues era un producto muy demandado en México y con una producción limitada. Algunos constructores desconfiaban de los albañiles de origen indígena y decían que “si no eran vigilados con atención solían sustituir la cal por cenizas en la elaboración de las mezclas” (Kubler, 2012, p. 220).

Debido a esta escasez de cal, sólo aquellos pobladores que contaban con recursos económicos desahogados podían aplicarla como recubrimientos mezclándola con arena pues se requerían grandes volúmenes de hidróxido de calcio. Lo más común era la

aplicación solamente de lechadas aguadas de cal en color natural, o pigmentadas con óxidos de hierro.

Pero paradójicamente, la propia resistencia que adquirían los muros de tapia, dificultaba enormemente la colocación de este tipo de recubrimientos por lo que los usuarios de estas obras, alteraban las superficies mediante su perforación, rallado o inserción de piedras y rejones de ladrillos, para ampliar la capacidad adherente del muro y permitir su revoque.

Llama la atención el hecho de que en la actualidad uno de los principales problemas de conservación de esta arquitectura se deba justamente de estos procesos de alteración de la naturaleza de los muros de tapia que fueron "forzados" a recibir revoques. Y, a pesar de los esfuerzos desarrollados, es frecuente ver las fachadas de importantes inmuebles, con amplias pérdidas de los revestimientos porque la propia tierra los repelió.

Este proceso de deterioro se fue acrecentando con el correr del siglo XX cuando, ante la falta de una adherencia adecuada de los revoques de cal y arena se empezaron a utilizar de forma extensiva los enlucidos de cemento.

Como se ha podido demostrar en las últimas décadas, este material es totalmente incompatible con los sustratos térreos porque propicia la acumulación de la humedad al interior de los muros muchas veces por la concentración de sale solubles y la paulatina degradación de la tierra con el consecuente debilitamiento de las estructuras que, al final, colapsan al presentarse movimientos sísmicos o cualquier otro empuje lateral (figura 2).

Figura 2. Muro de tapia horadado para incrementar la adherencia de los revoques primero de cal y más recientemente de cemento, Huamantla, Tlaxcala (crédito: B. Tepale, 2019)

Desde mediados del siglo XX, la pérdida de estas estructuras no sólo se derivó de haberlas dejado al descubierto, sino como consecuencia del nocivo uso de materiales incompatibles de "protección". El uso de pinturas sintéticas, morteros cemento, pastas y materiales poliméricos como recubrimiento ha sido un detonante de la pérdida masiva del patrimonio de tierra.

Por esta razón, actualmente se realizan diversos esfuerzos tendientes a la recuperación de las obras de tapia a través de la aplicación de recubrimientos realizados con materiales que sean compatibles con dichas estructuras. Y qué mejor que emplear un material de su misma naturaleza que se adecue a las condiciones ambientales y que permita una buena adherencia como lo son los recubrimientos de tierra. Estos componentes resultan adecuados para cumplir su función protectora y permitir el intercambio de vapor de agua entre las estructuras de tierra.

Como ya se mencionó, la técnica constructiva de tapia tuvo una reducida difusión regional. Desafortunadamente, ha dejado de emplearse y actualmente sólo quedan algunos maestros constructores de edad avanzada que la conocen, pues las nuevas generaciones ya no la practican y su proceso constructivo se pierde a gran velocidad.

Hoy en día, la arquitectura de tapia sobrevive gracias a su calidad tradicional, pero la falta de conocimiento y difusión hacen que se encuentre a un paso de su extinción. Por ello, algunos investigadores se han dado a la tarea de documentar y rescatar la técnica.

Pero el mismo lamentable proceso de pérdida cultural lo han sufrido los revoques de tierra que fueron el recurso básico de protección superficial de todo tipo de sistemas constructivos, desde miles de años antes de la conquista. En todo México existieron diferentes técnicas y recursos materiales para producir embarrados o “zoqueteados” más estables, resistentes y duraderos. Dentro de las estrategias que mayor difusión alcanzaron como medio de estabilizar a la tierra, destacaba el uso de diferentes mucílagos que agregaban a sus morteros para mejorar los enlucidos. Como se ha documentado desde hace tiempo (Torres et al., 2015; Pérez, 2009) los mucílagos derivados de las cactáceas tienen la propiedad de aglutinar a los componentes de las tierra y, sobre todo, retardar su secado, con lo que se mejoran sus propiedades y durabilidad.

Por otra parte, desde mediados del siglo XX se ha demostrado que el hidróxido de calcio empleado en pequeñas dosificaciones como estabilizante de la tierra, también incrementa su capacidad de carga y resistencia ante los agentes hídricos, gracias al desarrollo de reacciones puzolánicas con las arcillas (Guerrero; Roux; Soria, 2011)

A partir de estos conocimientos se desarrollan diferentes actividades de investigación que buscan retomar el empleo de materiales estabilizantes que tengan un bajo impacto ambiental y que sean compatibles con las edificaciones térreas. El presente trabajo da continuidad a estos estudios y se sustenta en evaluaciones desarrolladas durante los dos últimos años, en las que se retoma el uso del mucílago de *Opuntia ficus*, para revoques de tierra. En esta ocasión se evalúa su aplicabilidad al combinarse con hidróxido de calcio con el fin de conseguir una mayor protección ante la intemperie de estructuras de tapia, y avanzar en la conservación de este tipo de patrimonio.

2 METODOLOGÍA

Se realizaron dos módulos experimentales de tapia para aplicar ocho mezclas de recubrimiento distintas. Los muros se construyeron sobreponiendo dos bloques hechos con un molde de madera de 0,60 m x 0,40 m x 0,20 m. Cada capa de 0,15 m de espesor se compactó con un pisón de madera hasta el llenado total del molde. Una vez terminado el primer módulo se procedió a construir otro a su lado con 0,30 m de separación (figura 3).

Figura 3. Compactación del bloque que formaría el módulo de tapia (crédito: E. Avila)

Una vez terminados los módulos de tapia se dejaron secar durante catorce días hasta que alcanzaron un color uniforme y una dureza adecuada para continuar con la aplicación de los revoques. Pasado el periodo de secado, las superficies de los módulos se dividieron en secciones de 0,25 m x 0,20 m para aplicar en cada dos secciones un recubrimiento diferente.

Con base en los antecedentes históricos y la problemática con respecto al uso de acabados incompatibles, se buscaba comparar el comportamiento con respecto a la adherencia, retracción superficial y exposición a la intemperie. Todos los trabajos fueron realizados en la zona de Chalco al oriente del Estado de México, México.

Se analizaron y estudiaron secciones de muros sin revocar y se compararon con otras que recibieron un recubrimiento con mortero de cemento, pintura vinílica, pintura a la cal y revoques de tierra estabilizados con hidróxido de calcio y mucílago de *Opuntia ficus*. Para el caso de las mezclas de tierra estabilizadas se utilizaron diferentes dosificaciones, diluciones, criterios y procedimientos de aplicación. Estos módulos fueron sometidos a condiciones climáticas reales y monitoreados durante un periodo de cuatro meses que incluyó la época de lluvias.

El orden de las mezclas se planteó con relación al tipo de materiales utilizados en recubrimientos, iniciando desde los industriales más convencionales, como el revoco de cemento y la pintura vinílica (recubrimiento 1 y 2), siguiendo con los recubrimientos tradicionales para la protección en superficies de tapia de acuerdo con los antecedentes históricos antes descritos usando cal y arena (mezcla 3); hasta los recubrimientos de tierra propuestos en esta investigación para otorgar una mejor protección y conservación de las superficies de tapia (mezclas 4, 5 y 6).

Se analizaron dos tipos de pinturas a la cal, la primera en su color natural y la segunda añadiéndole un porcentaje de óxidos minerales (recubrimiento 7 y 8). Cabe mencionar que las pinturas a la cal fueron parte de los recubrimientos tradicionales de muchas de las edificaciones de tapia en la región del altiplano Central de México. Por esta razón se decidió agregar este tipo de pinturas al análisis comparativo de los recubrimientos.

En la tabla 1 se enumeran las mezclas de recubrimientos estudiadas para esta investigación y en los párrafos siguientes se da una breve descripción del procedimiento y las consideraciones que se tomaron en cuenta durante la fase experimental.

Tabla 1. Recubrimientos analizados

Recubrimiento	Descripción
1	Cemento-arena
2	Pintura vinílica
3	Cal-arena
4	Tierra-arena-cal
5	Tierra-arena-cal-mucílago reposada 48 horas
6	Tierra-arena-cal-mucílago reposada 72 horas
7	Pintura a la cal
8	Pintura a la cal con óxidos minerales

Para formar la solución del mucílago se tomaron como base los resultados obtenidos en investigaciones realizadas anteriormente con respecto al uso de *Opuntia* como estabilizante en recubrimientos de tierra. En aquella ocasión se determinó que la proporción mucílago-agua que mejor consistencia le daba a la solución correspondía a 10 ml de mucílago concentrado como gel en 1000 ml de agua (Avila; Guerrero, 2018).

En dicho documento se explicó el tipo de extracción en seco y se habló de los tiempos de

reposo de la solución teniendo como base un periodo de 48 horas. Sin embargo, en la presente investigación se decidió incluir una variable adicional al experimento que consistió en incrementar el tiempo de reposo de la solución. Entonces, se probaron dos soluciones: una reposada 48 horas y la otra 72 horas, con la intención de verificar si la mezcla sufría cambios mecánicos o en su tiempo de secado (figura 4).

El porcentaje de cal utilizado en las mezclas para recubrimientos fue del 10,0 % en volumen con relación al total de cada mezcla. Se empleó hidróxido de calcio en polvo marca Quimex 90, fabricado por grupo Calidra. Este mismo tipo de material se usó para las pinturas a la cal sólo que se dejó reposar por un periodo de seis meses para que se formara una pasta homogénea para su aplicación como pintura, siguiendo la tradición local.

La tierra que se utilizó tanto para la construcción de los módulos experimentales de tapia como para la aplicación de recubrimientos fue tomada de la zona de Valle de Chalco, al oriente del Estado de México, México. Se trata de un limo, areno limoso café claro, correspondiente al tipo “MH” del sistema unificado de clasificación de suelos SUCS (Juárez, 2017). Este material fue compensado con arena con una proporción de 2:1 en volumen, tierra-arena, para que tuviese una buena compactación al momento de construir los módulos de tapia.

Para los recubrimientos de tierra fue necesario compensar el material con arena a proporciones diferentes a las que se utilizaron en la tapia. Para este caso se utilizó una proporción en volumen 1:1 tierra-arena con la intención de obtener recubrimientos más estables que presentaran buena adherencia pero una retracción mínima y nulo patrón de fisuramiento.

Para el primer revoque se aplicó un mortero de cemento-arena con una proporción en volumen de 1:2, la superficie fue preparada previamente humedeciendo el muro para posteriormente revocar con una llana metálica de manera uniforme. Es importante mencionar que para todos los recubrimientos, con excepción de las pinturas, se estableció un espesor de 0,02 m.

Figura 4. Módulos experimentales ya seccionados durante la aplicación de los diferentes revoques. (Crédito: B. Tepale, 2019)

El segundo recubrimiento fue de pintura vinílica la cual se diluyó con agua potabilizada y fue aplicada con brocha sobre la superficie. La tercera mezcla probada fue el revoque tradicional para la protección de tapias que consiste en un mortero de cal-arena, en donde se utilizó una proporción en volumen de 1:2, igual a la dosificación empleada en el mortero de cemento. Del mismo modo, para la aplicación del recubrimiento se humedeció la superficie previamente.

Al terminar de aplicar las tres primeras mezclas, se pasó al segundo módulo en donde se aplicó la cuarta mezcla correspondiente al recubrimiento de tierra, arena y cal. Previamente humedecida la superficie se revocó con una llana metálica con la consistencia apropiada para formar una capa uniforme y lisa.

Las mezclas 5 y 6 fueron estabilizadas con la solución de mucílago de *Opuntia ficus*. La primera tuvo previamente un tiempo de reposo de 48 horas y la segunda de 72 horas. A estas mezclas se les añadió el 10,0 % en peso de hidróxido de calcio en polvo con relación al total de la mezcla.

Los dos últimos recubrimientos por aplicar fueron la pintura a la cal, la primera con cal en su color natural y a la segunda pigmentada con un óxido mineral de color amarillo ocre. A ambas pinturas se les añadió la solución agua-mucílago reposada por 72 horas.

Una vez aplicados los ocho recubrimientos (figura 4), se fue monitoreando el tiempo de secado de cada uno. Posteriormente, al término se realizó un monitoreo periódico durante cuatro meses para observar su comportamiento ante los rayos del sol y las constantes lluvias.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las observaciones se llevaron a cabo desde la preparación de las mezclas hasta el periodo de monitoreo. Se analizó la aplicación de los revoques, su adherencia, proceso de endurecimiento, así como, la comparación entre las secciones revocadas con materiales convencionales incompatibles y los recubrimientos de tierra estabilizada.

Un dato destacable que se documentó durante el proceso de preparación de las mezclas, fue el porcentaje de agua de amasado requerida. Esto ayudó a determinar qué mezcla ahorra el consumo de agua y cuál demanda mayor volumen. Para el caso de la pintura vinílica y las pinturas a la cal la cantidad de agua utilizada fue más de carácter cualitativo por lo que en estos tres casos no se pudo documentar el porcentaje de agua empleada.

El orden del porcentaje con relación al consumo de agua se ordenó de mayor a menor, es decir, de la mezcla que más volumen de agua demandó hasta la que menos volumen de agua necesitó para su amasado. Se tomó como referente la mezcla que consumió mayor cantidad.

Mezcla1. Cemento-arena: 100 % de agua requerida.

Mezcla 3. Cal-arena: 82,14 % de agua (ahorro del 17,86%).

Mezcla 4. Tierra-arena-cal: 60,7 % de agua (ahorro del 39,3%).

Mezcla 5. Tierra-arena-cal-mucílago 48 horas: 53,57% de agua (ahorro del 46,43 %).

Mezcla 6. Tierra-arena-cal-mucílago 72 horas: 46,4% de agua (ahorro del 53,56 %).

La mezcla de cemento requiere más agua porque su fraguado se basa en la transformación de sus componentes en silicato cálcico hidratado (Reichel; Hochberg; Köpke, 2004).

La mezcla 1 tuvo una buena adherencia inicial sobre la superficie de tapia, pero como ya se mencionó, su proceso de endurecimiento acelerado, le hizo absorber la humedad del sustrato hasta terminar por desecarla y presentar puntos de separación y huecos.

En el caso de la mezcla 2, que corresponde a la pintura vinílica ocurre un efecto parecido ya que al ser impermeable sella por completo la superficie. La adherencia de la pintura vinílica fue buena, pero su grado de deterioro se vio reflejado en la decoloración del pigmento al estar en permanente exposición a los rayos del sol.

La mezcla 3 de cal-arena, al igual que las pinturas a la cal, al ser aplicadas sobre el módulo de prueba tuvieron una buena adherencia y su proceso de secado fue menos acelerado que el fraguado del revoque de cemento.

Este tipo de recubrimientos resultan favorables para las superficies de tierra gracias a que su proceso de fraguado se da por carbonatación, es decir, la humedad transporta el CO_2 del aire, que al final generan carbonato de calcio que es muy duradero y resistente al impacto de agentes externos (Reichel, Hochberg, Köpke, 2004). Esta es la razón por la que un edificio antiguo con un revoque tradicional como éste conserva mejor la cara que es expuesta a la intemperie. Además, esta mezcla resultó favorable en cuestión de ahorro de agua, debido a que consumió una cantidad 17,86% menor que el mortero de cemento.

La mezcla 4 tierra-arena-cal, tuvo un considerable ahorro de agua en comparación con la mezcla 1 y 3, pues se redujo en un 39,3 %. Una de las razones por la que ocurrió este ahorro, fue a la compensación que se le dio a la tierra con volúmenes de arena, con lo que el revoque se volvió más poroso y en consecuencia demandó menor cantidad de agua que materiales como el cemento o la cal. A diferencia de los morteros de cemento-arena y cal-arena, la adherencia de la mezcla 2 fue más uniforme y permitió aplicar revoques con un terminado más fino que el que se tuvo en las mezclas 1 y 3.

Las mezclas 5 y 6 que contienen tierra-arena-cal-mucílago, fueron también compensadas con volúmenes de arena y estabilizadas ahora combinando el 10% de hidróxido de calcio y mucílago de *Opuntia ficus*; como ya se explicó, la única variante que se realizó entre una mezcla y otra, fue el tiempo de reposo de la solución mucílago-agua.

Uno de los principales puntos a favor de estas dos mezclas fue el ahorro de agua necesaria para alcanzar la cohesividad adecuada para adherirse al muro. La mezcla 5 tuvo un ahorro de agua del 46,43 %, mientras que la mezcla 6 alcanzó el 53,56 %.

Estas dos mezclas tuvieron mejor adherencia que las primeras cuatro, pues gracias a la consistencia que les otorga el mucílago de *Opuntia* y la cal, su colocación y trabajabilidad fueron mejores, creando un acabado uniforme y liso. El tiempo de reposo influyó en la retracción superficial de los revoques pues, el recubrimiento 5, que fue reposado por 48 horas, al momento de su fraguado presentó pequeñas fisuras, mientras que la mezcla 6 tuvo un fraguado más lento y no presentó fisuras durante su tiempo de secado (figura 5).

a)

b)

Figura 5a). Primer módulo experimental de tapia, de lado izquierdo, revoques convencionales durante su proceso de secado, a la derecha, revoque después de estar expuesto a la intemperie durante cuatro meses, 5b). Segundo módulo experimental de tapia, de lado izquierdo revoques de tierra durante su proceso de secado, a la derecha, revoques después de estar expuestos por cuatro meses a la intemperie (crédito: E. Avila, 2019)

Las mezclas 7 y 8 corresponden a las pinturas a la cal o también conocidas como encalados. En la primera se mantuvo el color natural de la cal y a la segunda se le agregó un pigmento mineral color amarillo ocre, el cual se agregó el 10% con relación al volumen total de la mezcla. En este tipo de pinturas el ligante es el hidróxido de calcio, por ello, se

formó una mezcla con agua para crear una pasta que se dejó en reposo durante seis meses. Pasado este lapso de tiempo se utilizó la solución agua-mucílago reposado de 72 horas para diluir la pasta de cal reposada; finalmente se obtuvo una pintura con una consistencia líquida que fue aplicada en tres capas.

La pintura a la cal se adhiere al paramento por la evaporación del agua disolvente y el ingreso en la mezcla del CO_2 del aire que produce la carbonatación y con ello, el endurecimiento final. Gracias a su valor de pH elevado, el encalado también sirve como desinfectante. La pintura a la cal es permeable al vapor y absorbe mucha agua, aunque la libera de nuevo con rapidez (Reichel; Hochberg; Köpke, 2004, p. 65).

Lo que se pudo observar entre una pintura y otra es que, la que contenía el pigmento tuvo poca fisuramiento; en cambio, la pintura en color blanco presentó un leve craquelado. Otro dato que se obtuvo es que la consistencia de las pinturas a la cal debe ser muy líquida , de otro modo si se agrega una cantidad mayor de cal al fraguar termina por desprenderse en forma de polvo (Minke, 2001, p. 117).

Al poner la última capa de la pintura, el patrón de agrietamiento disminuyó, pero de nuevo en la pintura blanca aparecieron pequeñas fisuras, seguramente asociadas a la repentina pérdida de humedad.

Los recubrimientos fueron monitoreados a diario durante cuatro meses, para observar su comportamiento ante la exposición permanente a los rayos del sol y su reacción ante las lluvias que se presentaron en los dos últimos meses de monitoreo correspondientes a abril y mayo.

En la figura 5a y 5b se puede observar de lado izquierdo el revoque recién aplicado y de lado derecho el revoque pasados cuatro meses; en ambas imágenes las mezclas se enumeran de acuerdo al orden establecido en la tabla 1. Como ya se mencionó la mezcla 1 cemento-arena, fue la que resultó menos favorable pues, al estar expuesta a la intemperie durante cuatro meses, debido a su endurecimiento acelerado comenzó a desprenderse de la superficie de tapia.

La mezcla 2 de pintura vinílica al paso de los meses se fue desgastando conforme la humedad ingresaba y no podría evaporarse. Su patrón de deterioro se caracteriza por pequeñas exfoliaciones que a la distancia lucen como una decoloración de la superficie. La mezcla 3, al transcurrir los meses tuvo un buen comportamiento, pero al tacto desprendía polvo.

Como primer dato comparativo entre los tres primeros revoques aplicados al módulo uno, se puede decir que el que mejor comportamiento tuvo fue el de cal-arena pero su problema de desgaste al tacto no lo hace tan favorable.

En el módulo dos, se aplicaron los revoques de tierra estabilizada con hidróxido de calcio y mucílago de *Opuntia ficus*. De manera general se observó que los tres resultaron compatibles y adecuados para la tapia. Sin embargo, las mezclas que presentaron un patrón de fisuras casi nulo y que mejor trabajabilidad tuvieron fueron las mezclas 4 y 6; correspondientes a tierra-arena-cal y tierra-arena-cal-mucílago con 72 horas de reposo.

4 REFLEXIONES FINALES

La tradición histórica del uso de la tapia se ha caracterizado en muchas partes del mundo por el aprovechamiento de la dureza y resistencia que alcanzan sus superficies, condición que normalmente no ha hecho indispensable el empleo de recubrimientos. La densidad y porosidad de las estructuras genera caras fuertemente cohesionadas en las que se presenta un cotidiano ingreso y salida de agua que ayuda a que se conserven estables por largos periodos de tiempo.

En algunas regiones en las que se presentan cambios violentos de temperatura y humedad a lo largo del día, rachas de viento constante y sobre todo, ciclos de congelamiento, las comunidades locales emplearon históricamente protecciones superficiales que permitieran

incrementar la cohesividad de los componentes de las caras y disminuir el tamaño de los poros a fin de limitar el flujo de agua solamente a una condición de vapor.

En estos procesos se presentaron en general tres tendencias. La primera consistente en la colocación de revestimientos o lechadas de tierra ligeramente más arcillosa que la que componía el núcleo de los muros y que se consideraban superficies de "sacrificio" que se reponían en determinados periodos cuando su desgaste lo ameritaba. La segunda estrategia consistió en el empleo de substancias conglomerantes o hidrofugantes (emulsiones, aceites, resinas, jugos, mucílagos, etc.) ya fuera como parte de los revoques de sacrificio de tierra o directamente sobre los paños de muros como lechadas. Y finalmente, la incorporación de revoques o pinturas en las que se introducían substancias que modificaban químicamente la tierra como sucede con el empleo de hidróxido de calcio.

Cada estrategia tiene ventajas y limitaciones específicas relacionadas principalmente con la disponibilidad de los recursos materiales y de la mano de obra, por lo que existe una amplia diversidad de soluciones. La cal es compatible con las superficies de tierra, pues además de ser permeable, ayuda a prevenir la proliferación de micro flora y fauna nociva.

Sin embargo, en el caso de México se presentó una condición muy singular con respecto al uso de la tapia como material constructivo. Debido a que no se han encontrado antecedentes de su empleo en la época prehispánica, y que su incorporación a las culturas constructivas locales se dio a partir de la conquista española y, sobre todo, durante el siglo XIX, no se desarrolló una tradición depurada en su manejo, a diferencia de lo que sucedió con sistemas de uso milenario como la tierra modelada, el bajareque o el adobe.

El empleo de la tapia como recurso constructivo surgió de condiciones pragmáticas relacionadas con la facilidad de su realización casi con cualquier tipo de tierra, pero, sobre todo, con su baja demanda de mantenimiento. Empero, a consecuencia de la tendencia de fines del siglo XIX cuando por cuestiones de "estatus" se recubrían las fachadas de tierra con cal como muestra de su desarrollo económico, la imagen de los poblados cambió.

Por otra parte, la tradición atávica de utilizar recubrimientos de tierra sobre todo tipo de materiales constructivos paulatinamente fue suplantada por los revestimientos y pinturas a base de hidróxido de calcio, a tal grado que para mediados del siglo XX, los "embarrados" se perdieron por completo en casi todo el centro de México.

Pero paradójicamente, los muros de tapia no tienen "buena relación" con los recubrimientos y pinturas de cal porque su dureza y granulometría impide que se les adhieran correctamente. Por ello en la zona de estudio se experimentaron diferentes estrategias para darle aspereza a las superficies de las tapias mediante su rallado, perforado o la inserción de "anclas" de piedra o pedacería de ladrillo. De este modo el sistema constructivo de las viviendas de tapia, se "hizo invisible".

Ante esta cadena de alteraciones y pérdidas culturales, se planteó una serie de experimentos tendientes a evaluar la posibilidad de emplear revoques de tierra para la protección de los muros de tapia que aún se conservan. Se construyeron exprofeso muretes de tapial para ser dejados a la intemperie durante cuatro meses críticos por los cambios de temperatura y la presencia de lluvia.

Sobre sus caras se aplicaron 8 sistemas de protección superficial a fin de contar con datos reales de su proceso de aplicación, trabajabilidad, consumo de agua para su elaboración, tiempo de secado, retracción superficial, adherencia y desgaste por intemperización.

Los resultados obtenidos confirmaron la ineficacia de los recubrimientos de cemento y las pinturas vinílicas por su falta de adherencia e impermeabilidad, la cual conduce al encapsulamiento interno de la humedad y al desprendimiento final. Asimismo, el consumo de agua para la elaboración de los morteros de cemento sirvió como referente para evaluar comparativamente el resto de los revoques, siendo el que más líquido requirió.

Las pinturas de cal tuvieron mejor comportamiento que los revoques de este mismo aglutinante pues por su espesor desarrollaron buena adherencia al sustrato. Se observó que

la presencia de óxido de hierro como pigmento les confiere una menor retracción al secado evitándose las microfusuras en la superficie.

Finalmente, se comprobó que los recubrimientos de tierra compensada con arena y estabilizada con cal y mucílago de *Opuntia ficus* tuvieron respuestas óptimas en todas las variables evaluadas. A pesar de la intensidad de la lluvia a la que han estado expuestos, estos acabados, mantienen plenamente su integridad.

Se confirmó además, la importancia del tiempo de reposo del mucílago en agua al obtenerse una condición de mayor trabajabilidad para su aplicación como revoque con una menor cantidad de líquido. No se evidenció ninguna retracción al endurecer y se logró un secado más lento que garantiza la conformación más homogénea de su microestructura, que a la larga se traduce en mayor resistencia y durabilidad.

Esta información permite sustentar la necesidad de promover en las comunidades locales el conocimiento y la valoración del empleo de recubrimientos de tierra para las estructuras patrimoniales construidas con tapia, así como de otros tipos de sustratos. La pérdida del conocimiento del potencial de los revoques de tierra puede ser revertida a partir de su puesta en práctica a escala regional, con lo que se fomenta un uso más sostenible de los recursos locales y la posibilidad de reapropiación de saberes que siempre fueron parte de las culturas constructivas.

El mejoramiento en la resistencia ante efectos climatológicos de los revoques de tierra gracias al uso de pequeños volúmenes de cal y mucílago de nopal como estabilizantes, garantiza el desarrollo de componentes constructivos claramente competitivos con relación a los productos de origen industrial que son caros, contaminantes y que, a la larga, no sólo incumplen con su papel como protección de las superficies sino que se vuelven detonantes de procesos de deterioro.

Es urgente que la sociedad recupere la posibilidad de ver la tierra como parte de su entorno. Sólo de este modo podrá apreciarla como un componente constructivo económico, ecológico y estético. Como siempre se ha dicho, es necesario conocer para poder valorar y luego conservar. Pero un componente que ni siquiera está a la vista, no puede ser conocido.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Avila, E.; Guerrero, L. (2018). El mucílago de Opuntia Ficus como estabilizante en recubrimientos de tierra. 18º Seminario Iberoamericano de Arquitectura y Construcción con Tierra. La Antigua Guatemala, Guatemala: USAC-CII/PROTERRA. p. 115-126

Guerrero, L. (2011). Pasado y porvenir de la arquitectura de tapia. Bitácora arquitectura, 22. p. 6-13.

Guerrero, L.; Roux, R.; Soria, F. J. (2011). Ventajas constructivas del uso de tierra comprimida y estabilizada con cal en México. Revista Palapa, 1 (10) p. 45-57.

Hoffmann, M. V.; Minto, F. C. N.; Heise, A. F. (2011). Tapia de pilão. En Neves, C. y Faria, O. B. (Eds.) Técnicas de construção com terra. Bauru, Brasil, FEBUNESP/PROTERRA, p. 46-61.

Juárez, E. (2017). Mecánica de suelos I: Fundamentos de la mecánica de suelos. México: Limusa

Kubler, G. (2012). Arquitectura méxicana del siglo XVI. México: Fondo de Cultura Económica.

Minke, G. (2001). Manual de construcción con tierra. La tierra como material de construcción y sus aplicaciones en la arquitectura actual. Uruguay: Editoria Fin de Siglo.

Pérez, N. (2009). Formulación de un mortero de inyección con mucílago de nopal para restauración de pintura mural. Tlaquepaque, Jalisco: Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente.

Reichel, A.; Hochberg, A.; Köpke, C. (2004). Enlucidos, revocos, pinturas y recubrimientos. Munich, Alemania: Gustavo Gili.

Torres, P.; Cruz, S.; Peña, N. C.; Fernandez, S. E.; Rodríguez, M. A., Cruz, A. (2015). La baba y el mucílago de nopal, una alternativa natural para la conservación de acabados arquitectónicos de tierra. Revista Interdisciplinaria, INAH, 99, p. 93-114.

AUTORES

Esmeralda Avila 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. Profesora en el área de Diseño, subárea de Expresión en la carrera de Arquitectura en la UNAM sede FES Aragón, Actualmente cursando Maestría en Arquitectura en el área de Tecnología en la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

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.

Blas Antonio Tepale Gamboa, Arquitecto, Estudiante del Doctorado en Historia y Conservación de la Arquitectura y la Ciudad en la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Maestro en Arquitectura en el Área de Tecnología de la Facultad de Estudios Superiores Aragón, perteneciente a la Universidad Nacional Autónoma de México.