



Tierra vertida compactada, estabilizada con cal y puzolanas

Luis Fernando GUERRERO BACA, Francisco Javier SORIA LÓPEZ

Article disponible dans les actes du colloque Terra 2016:

JOFFROY, Thierry, GUILLAUD, Hubert, SADOZAÏ, Chamsia (dir.) 2018, *Terra Lyon 2016: Articles sélectionnés pour publication en ligne / articles selected for on-line publication / artículos seleccionados para publicación en línea*. Villefontaine : CRAterre. ISBN 979-10-96446-12-4.

RESUMEN

El presente texto caracteriza un sistema constructivo basado en la técnica de la tapia pero que gracias al equilibrio entre la humedad requerida para su elaboración y el manejo de la estabilización del suelo con cal y puzolanas, puede ser compactada con notable facilidad y velocidad dentro de moldes ligeros. El trabajo parte de la identificación de las necesidades constructivas de una zona del centro de la República Mexicana donde históricamente se edificó con tapia, pero que en la actualidad está perdiendo su tradición. En la ponencia se detallan las premisas de la búsqueda por optimizar los procesos constructivos para hacerlos accesibles mediante un sistema de edificación totalmente manual y se analiza su implementación en dos edificios concretos: un módulo experimental desarrollado con el fin de monitorear su comportamiento higrotérmico, y una vivienda de dos niveles en la que se pudo documentar el procedimiento completo de su elaboración. Los resultados son muy alentadores porque gracias a la estabilización de la tierra y a su compactación por capas, se han obtenido componentes constructivos óptimos para la autoconstrucción asistida de viviendas, con destacables resistencias mecánicas e hídricas, y con cualidades bioclimáticas apropiadas para climas templados como los que predominan en México.

1. INTRODUCCIÓN

Dentro de las diversas técnicas de construcción con tierra desplegadas en México, la tapia ha sido de las menos estudiadas a pesar del amplio desarrollo que alcanzó durante los dos siglos pasados en la construcción vernácula de regiones del centro del país. Aunque la tierra compactada tiene orígenes prehispánicos la edificación de muros realizados mediante al uso de encofrados, proviene de influencias europeas posteriores a la época de la conquista.

Lamentablemente, la tradición constructiva con tapia ha decaído drásticamente y actualmente casi no se realiza, perdiéndose una valiosa cultura constructiva que además tiene un alto potencial desde la perspectiva de la sostenibilidad ambiental, social y económica.

Entre las razones que más han incidido en su pérdida se encuentra el requerimiento de gruesos muros que demandan mucha tierra por compactar y ocupan amplias áreas de desplante en predios que con el desarrollo periurbano, cada vez incrementan más su costo. Por otra parte, la elaboración de muros de tapia demanda un fuerte trabajo físico de compactación además de que los encofrados requeridos tienen que hacerse con gruesos tablonés o bien, con placas metálicas para resistir tanto el peso del material como los golpes del pisón.

Finalmente, un problema que se presenta en el manejo de la vivienda de tapia, deviene de su vulnerabilidad ante las afectaciones hídricas derivadas de la lluvia, el granizo, la absorción capilar de los mantos freáticos y los procesos de congelamiento que se presentan en invierno.



Figura 1. Erosión basal de muros históricos de tapia. Calpan, Puebla. Foto: Luis Guerrero.

Ante esas condicionantes, en la Universidad Autónoma Metropolitana Xochimilco, en la Ciudad de México, se planteó un proyecto de investigación aplicada, tendiente a optimizar la técnica de la tapia, pero incorporando un método que estableciera un equilibrio entre la fuerza de compactación requerida y la humedad óptima, para suelos que fueran estabilizados con hidróxido de calcio.

2. PREMISAS DE LA PROPUESTA

La mayoría de los procesos constructivos que han aspirado a actualizar la edificación con tapia al incorporar la lógica constructiva del hormigón armado, utilizan tierra moldeada en estado plástico. Sin embargo, para agilizar su secado y endurecimiento, estos sistemas alternativos (tierra vertida, suelocemento, *cast earth*, *poured earth*, H.T.E., etc.) emplean cemento o yeso, y se vierten en grandes moldes deslizables, soportados por complejos sistemas de apuntalamiento y requieren de sistemas automatizados de mezclado y bombeo del material constructivo.

Tales condiciones obedecen al hecho de que estas técnicas se han desarrollado principalmente en países en los que la mano de obra es costosa por lo que buscan tecnificar los procesos, además de estar generalmente localizados en zonas débilmente sísmicas.

Empero, en la UAM-Xochimilco, desde el año 2009 se desarrollan ensayos y prototipos tendientes a ampliar la aplicabilidad de la tecnología de la tierra, a partir de su estabilización con cal, porque genera mucho menor impacto ambiental que el cemento (Guerrero, Roux y Soria, 2011). Sin embargo, dado que algunos tipos de arcillas no se llegan a estabilizar adecuadamente al añadirles hidróxido de calcio (Fernández, 1992: 114) se planteó la estrategia de agregar a las mezclas, cal aérea combinada con materiales puzolánicos tales como zeolita, piedra pómez, cenizas volcánicas, diatomeas y polvo de ladrillo (Guerrero y Soria 2014).

De este modo las arcillas presentes en el suelo que tienen capacidad de reaccionar con la cal, quedan adecuadamente consolidadas (Hoffmann et. Al., 2011). Pero el sistema se refuerza gracias a la formación de sílicoaluminatos de calcio, derivados de la reacción hidratada entre la cal y los materiales puzolánicos agregados adicionalmente a la tierra (Sepulcre, 2005).

Además de esta premisa de comportamiento químico del material estabilizado, se buscó plantear una alternativa tanto a los procedimientos constructivos de tierra vertida convencionales que demandan de alta tecnología, como a la edificación con tapial, que como ya se mencionó, implica una elevada incorporación de recursos materiales y energéticos, sean mecanizados o humanos.

La propuesta parte de considerar a los muros no como estructuras monolíticas sino como mamposterías de grandes bloques, que desarrollen respuestas flexibles ante sismos, pero que se puedan construir con moldes pequeños y livianos, fácilmente desplazables por operarios poco tecnificados, así como por autoconstructores.



Figura 2. Taller comunitario de transferencia de tecnología en Oaxaca, México. Foto: Luis Guerrero.

Pero la clave para cumplir con estos objetivos radica en contar con elementos de tierra vertida que se puedan desmoldar en poco tiempo, habiendo adquirido una densidad tal que les confiera la consistencia adecuada para poder avanzar de manera dinámica en la conformación de las hiladas.

Siglos de experiencia en la construcción de componentes de tapia han demostrado que la tierra para ser adecuadamente compactada, requiere de bajos niveles de hidratación, los cuales giran en torno al 10%, dependiendo de la granulometría del material.

Como se sabe, cuando se pretende compactar capas de tierra con espesores mayores a los 8cm, se presenta un fenómeno de amortiguamiento caracterizado por un diferencial de densidad entre las partes altas en contacto con el pisón y las zonas más profundas. Este fenómeno se vuelve crítico al aumentar la cantidad de agua presente en el suelo. La tierra húmeda atenúa los golpes de las herramientas para compactar y solamente adquieren densidad las capas altas.

Es por esto que los componentes constructivos que se han experimentado, se realizan agregando prácticamente el doble de volumen de agua, es decir, entre un 25 y un 30%, pero los encofrados se llenan mediante la superposición de capas de tierra de 2 a 4 cm de espesor.

La técnica propuesta resuelve el problema de la retracción y el equilibrio hídrico mediante la estabilización con cal y materiales puzolánicas de origen volcánico. Estos componentes son abundantes en las regiones centrales de México y generan un relativamente bajo impacto ambiental durante su obtención.

De este modo, se ha desarrollado el sistema constructivo al que se denomina Tierra Vertida Compactada (TVC) que surge de la lógica constructiva de la tierra apilada de origen prehispánico y de la tapia, con la finalidad de realizar componentes constructivos sostenibles desde el punto de vista ecológico y económico, y que a la vez resulten fáciles de realizar.

En este sistema se procura hacer más eficiente la edificación empleando herramientas ligeras que simplemente ejerzan la fuerza necesaria para incrementar la densidad de la tierra estabilizada, pero sin requerir de cimbras excesivamente resistentes y por lo tanto pesadas, con el fin de que puedan ser fácilmente empleados en procesos de autoconstrucción asistida, como la que predomina en la producción social de viviendas rurales y de las periferias urbanas de todo México.

Con esta técnica, durante 2014 se realizaron diversos prototipos de secciones de muros aislados, como parte de talleres de transferencia de tecnología en los que participaron estudiantes, profesores, constructores y público en general, con lo que se ha podido optimizar su metodología de operación y verificar su aplicabilidad.



Figura 3. Encofrados ligeros que facilitan el proceso constructivo. Tlaxco, Tlaxcala. Foto: Luis Guerrero.

3. APLICACIÓN CONSTRUCTIVA

Con los resultados obtenidos en el Laboratorio de Materiales de la Universidad Autónoma Metropolitana Xochimilco, en los que se pudieron obtener dosificaciones apropiadas que permitían alcanzar capacidades de carga de entre 20 y 30 kg/cm², y la posibilidad de evitar la disolución de la tierra incluso estando totalmente inmersas en agua (Soria, Guerrero y Roux, 2013), se procedió a llevar a cabo la construcción de un módulo en una zona experimental que se localiza al norte de la Ciudad de México.

En el sitio elegido, desde hace varios años se han venido desarrollando diferentes análisis comparativos sobre estrategias bioclimáticas (García y Fernández, 2013) utilizando locales construidos ex profeso con condiciones equivalentes de materialidad, dimensiones y asoleamiento. Estos módulos experimentales tienen una geometría cúbica de 2.4 m de largo, ancho y alto interiores, y con ventanas idénticas de 1.2 m de lado, localizadas una en cada muro, con orientaciones geográficas Norte, Sur, Este y Oeste.

El sistema constructivo de los cuatro módulos de control previamente construidos es a base de muros y cubiertas de paneles prefabricados de malla metálica y espuma de poliestireno, recubiertos finalmente con morteros de cemento-arena y pintados de blanco con cal.

El procedimiento constructivo empleado para el módulo experimental de TVC se asentó sobre una placa de cimentación de hormigón, con planta cuadrada de 3.6m de lado y 15 cm de espesor, similar a la utilizada en los módulos preexistentes ya evaluados. Sobre ella se edificaron en una semana los cuatro muros de TVC de 13 cm de grosor.

El techo y los pretilos se construyeron de mismo modo que el resto de los módulos con los paneles prefabricados descritos. Finalmente, el local fue revocado y pintado en interior y exterior de manera similar al resto de los módulos.

Entre los resultados obtenidos de ese proceso, además de haber podido documentar todo el proceso constructivo y los diferentes ajustes que fue necesario hacer a los moldes, destaca el hecho de las condiciones higrotérmicas del local de TVC permanecieron en zona de confort con temperaturas máximas 4.92 K menores que las que se presentó en el módulo de control (Guerrero, Soria, García y Fernández, 2015).

Se trata de un importante hallazgo pues significa que a pesar de tratarse de muros relativamente angostos, como los que se emplean en la mayor parte de la vivienda convencional del centro y sur de México, se pueden conseguir mejores condiciones de confort que las que se generan con los paneles antes mencionados, que por tener espuma de poliestireno, se consideran ya de por sí buenos aislantes.



Figura 4. Módulo de TVC con muros de 15cm de espesor, Zacatenco, Ciudad de México.
Foto: Luis Guerrero.

A partir de esta información se decidió realizar una vivienda totalmente en TVC desarrollada en dos niveles de altura, en los terrenos del Proyecto San Isidro, Tlaxco, Tlaxcala, en el centro-oriente de la República Mexicana. El diseño fue realizado y supervisado por la Arq. Alejandra Caballero con la asesoría constructiva de los autores del presente texto.

Para optimizar el trabajo se proyectó una modulación a partir de bloques de 1.10m x 0.6m x 0.35m. Este espesor fue más del doble del que se utilizó en el primer módulo debido por una parte a que la región en la que se edificó es notablemente más extremosa que la Ciudad de México y puede llegar a tener algunos días con heladas matutinas en invierno, o presentar temperaturas de más de 30°C en verano. Además, se previó que el diseño habría de incorporar una bóveda vaída hecha de adobe por lo que se calculó tener un área de desplante lo suficientemente adecuada como para contrarrestar sus cargas y empujes laterales.

El proceso de trabajo se llevó a cabo de manera totalmente manual por sólo una pareja de albañiles apoyados por un peón que se encargaba simplemente de realizar y transportar las mezclas a pie de obra. Esta mezcla para la tierra vertida tuvo una dosificación de un volumen de la tierra local, un volumen de material de origen volcánico llamado localmente “tepojal” que es muy similar a la piedra pómez y que desarrolla reacciones puzolánicas, y finalmente 10% de hidróxido de calcio en polvo. Debido al grosor de los muros se decidió hacer realizar cada capa con un espesor máximo de 4 cm antes de ser compactada.

Gracias a la humedad de aproximadamente 23% de la tierra, la compactación resultaba sencilla y rápida. Se utilizó una especie de mazo de madera de perfil cuadrangular de 10 x10cm de base y 80cm de longitud. Con diez o doce golpes en la tierra localizada en el borde interno del encofrado y otros tantos en las áreas centrales, cada capa quedaba suficientemente compactada como para recibir la siguiente. La ligereza de los mazos y la poca fuerza de golpeo necesario, permitió utilizar tablas de 1.5cm de espesor con lo que los moldes resultaron sumamente manejables.

Se pudo documentar que trabajando de manera continua fue posible llenar el molde en un lapso de 45 minutos en promedio y, gracias a la escasa cantidad de agua de mezclado se podía descimbrar inmediatamente. Esto significa que en una jornada de trabajo de 8 horas se realizaron 8 módulos (5.28 m²) incluyendo el trabajo de preparación y acarreo de las mezclas.



Figura 5. Primera hilada de los bloques de TVC para la casa de Tlaxco, Tlaxcala. Foto: Luis Guerrero.

4. CONCLUSIONES

En los momentos actuales en que los recursos naturales se vuelven cada vez más limitados ante el crecimiento de la población mundial, se hace imperativa la búsqueda de alternativas de edificación que aprovechen racionalmente la energía y las materias primas, y que además generen la menor cantidad posible de desechos al medio ambiente. Para los países en desarrollo esta condición tiende a hacerse crítica porque las comunidades pobres que están acostumbradas a la autoconstrucción de sus viviendas, cada vez con mayor frecuencia pasan por alto los saberes constructivos de origen ancestral que heredaron de sus antepasados y caen en la destructiva dinámica de la dependencia de los materiales constructivos industrializados y de alta tecnificación.

En el caso de México estos procesos han incidido de manera radical en la generación de espacios inseguros e insalubres que se construyen mal con materiales que prometen ser de larga duración pero que, al ser utilizados de forma inadecuada, en pocos años se deterioran.

De este modo se entra en un círculo vicioso de pobreza y dependencia en el que los entornos rurales y periferias urbanas día con día son alterados de manera irreversible por la generación de estructuras ajenas a las condicionantes geográficas locales y que, para colmo, no satisfacen las condiciones mínimas de confort higrotérmico de sus habitantes.

Es por ello que el diseño de mejoras en la construcción tradicional con tierra, la cual es conocida por la mayor parte de las comunidades de origen tradicional del país, puede resultar altamente sostenible desde el punto de vista ecológico, económico y social. Además, permite conformar espacios realmente habitables siguiendo una serie de principios de edificación que han probado su eficacia a lo largo de milenios.



Figura 6. La bóveda de adobe fue diseñada por el Arq. Ramón Aguirre. Tlaxco, Tlaxcala, Foto: Luis Guerrero.

Este es el caso del sistema constructivo de Tierra Vertida compactada (TVC) que se describe en el presente texto en el que, a partir de una serie de adecuaciones a procesos edilicios existentes y mediante la incorporación de materiales locales de muy bajo impacto ambiental como la cal y el triturado de piedras volcánicas extrusivas, fue posible desarrollar componentes constructivos de un elevado potencial de aplicación en viviendas sociales para México.

Entre las ventajas del sistema propuesto destaca la generación de elementos constructivos más ligeros, porosos y, por lo tanto, térmicamente aislantes y permeables al vapor de agua con lo que se favorece un adecuado control de las condiciones higrotérmicas de los espacios interiores. Además, el uso de la cal garantiza una destacable resistencia ante los embates de la lluvia, al tiempo que se propicia que los espacios tengan un secado más rápido cuando este fenómeno se presenta.

Los tiempos de construcción resultan equiparables con que caracterizan a los sistemas convencionales de edificación con la ventaja de que los propios habitantes, pueden llevar a cabo procesos de autoconstrucción sin ninguna complicación técnica y utilizando materia prima surgida de su propio suelo. Adicionalmente, en caso de que los inmuebles se dañen o deterioren las reparaciones pueden ser realizadas sin complicación alguna con lo que se fortalece la independencia y el trabajo solidario.

Las construcciones realmente sostenibles no son las que cumplen con las normas y estándares generados e impuestos por las instituciones vinculadas con la producción industrial, sino las que permiten elevar la calidad de vida de sus habitantes, tejen relaciones sociales y fortalecen las raíces de las comunidades al valorar su historia, tradiciones y entorno natural.

BIBLIOGRAFÍA

- Fernández, C. (1992). *Mejoramiento y estabilización de suelos*. Limusa, México D.F.
- García, J. R., Fernández, F. (2013). "Application of combined passive cooling and passive heating techniques to achieve thermal comfort in a hot dry climate". *Elsevier 2013 ISES Solar World Congress Energy Procedia*.
- Guerrero, L. (2007). "Arquitectura en tierra. Hacia la recuperación de una cultura constructiva". *Apuntes* 20 (2), 182-201. Bogotá.
- Guerrero, L.; Roux R. y Soria, F. J. (2011). "Ventajas constructivas del uso de tierra comprimida y estabilizada con cal en México". *Palapa V-1* (10): 45-57. Colima.
- Guerrero, L. y Soria, F. J. (2014). "Estabilización de suelos con cal y puzolanas". *Construcción con Tierra*, 6, 15-24. Buenos Aires.
- Guerrero, L.; Soria F.; García, J. R. y Fernández, F. (2015). "Comportamiento Térmico de un Módulo Experimental Construido con Tierra Vertida Compactada en la Ciudad de México". En *Memorias de EURO-ELECS-2015*. 739-746. Guimarães, Portugal.
- Hoffmann, M.; Minto, F.; Heise, A. (2011). "Tapia". En Neves, C. y Faria, O. (Coord.), *Técnicas de construcción con tierra*, FEB-UNESP/PROTERRA, 46-61. Bauru, SP. Brasil.
- Sepulcre, A. (2005). "Análisis comparativo de determinados aspectos sobre la hidraulicidad en los morteros de cal". En *Tratamientos y metodologías de conservación de pinturas murales*. Fundación Santa María la Real, 71-121. Palencia.
- Soria, F.; Guerrero, L. y Roux, R. (2013). "Alternative earth building techniques and their experimental applications". En *Proceedings-EARTH USA 2013*, Adobe in action, 406-410. Santa Fe, N.M.

NOTA BIOGRÁFICA

Luis Fernando Guerrero Baca. Arquitecto, Maestro en Restauración Arquitectónica, Doctor en Diseño Con especialidad en Conservación del Patrimonio. Profesor Investigador de la Universidad Autónoma Metropolitana. Miembro de la Red Iberoamericana PROTERRA. *Expert Member* de ICOMOS-ISCEAH. Representante ante la UAM de la Cátedra UNESCO de Arquitectura de Tierra.

Francisco Javier Soria López. Arquitecto, Maestro en Restauración Arquitectónica en la ENCRYM-INAH, Doctor en Proyectos Arquitectónicos en la ETSAB. Profesor Investigador de la Universidad Autónoma Metropolitana. Jefe del departamento de Tecnología y Producción de la UAM-Xochimilco.