

## 4.4 Edificación de muros de tierra vertida estabilizados con cal y puzolanas. Luis Fernando Guerrero Baca/ Francisco Javier Soria/, Rubén Roux Gutiérrez

Luis F. Guerrero<sup>1</sup> Baca, Francisco Javier Soria<sup>2</sup>, Rubén Roux Gutiérrez<sup>3</sup>  
Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco, México.  
luisfg1960@yahoo.es; 2fjst\_62@hotmail.com  
Universidad Autónoma de Tamaulipas-Tampico, México.  
3rroux28@gmail.com

Palabras clave: estabilización de suelos, hidróxido de calcio, hidráulidad, resistencia mecánica

### Resumen

La mayoría de los procesos constructivos que utilizan tierra moldeada en estado plástico (tierra vertida, suelocemento, cast earth, poured earth, H.T.E., etc.) se caracterizan por emplear cemento o yeso y, por aplicar la lógica constructiva del hormigón convencional con grandes moldes deslizables y sistemas automatizados de mezclado y bombeo.

Tales condiciones obedecen al hecho estas técnicas provienen de países con alto desarrollo tecnológico, mano de obra costosa y ubicados en zonas débilmente sísmicas.

Empero, en la UAM-Xochimilco, se desarrollan ensayos y prototipos tendientes a ampliar la aplicabilidad de la tecnología de la tierra vertida. La idea central consiste en recuperar la sabiduría de la construcción tradicional con cob, adobe y tapia, pero estabilizando la tierra con cal aérea combinada con materiales puzolánicos tales como zeolita, piedra pómez, cenizas volcánicas, diatomeas y polvo de ladrillo. La premisa parte de considerar a los muros de tierra vertida no como estructuras monolíticas sino como mamposterías de grandes bloques, que desarrollen respuestas flexibles ante sismos. Además, se pueden construir con moldes pequeños y ligeros, fácilmente desplazables por operarios poco tecnificados así como por autoconstructores.

Pero la clave para cumplir estos objetivos radica en contar con elementos de tierra vertida que se puedan desmoldar en poco tiempo. Los componentes constructivos que se han experimentado se realizan llenando los encofrados por capas de tierra como se procede para construir tapias, pero mezclada con aproximadamente 20% de agua. Los resultados que se presentan en este texto son muy prometedores pues se han obtenido elementos constructivos listos en 40 minutos, en los que, después de su curado y secado total, se ha incrementado la resistencia a la compresión simple en rangos cercanos al 20% con respecto a la tierra sin estabilizar. Pero sobre todo, se ha conseguido evitar la desintegración del material en presencia del agua, incluso en condiciones radicales de inmersión total.

## 1. INTRODUCCIÓN

La tierra cruda fue el material que se utilizó en mayor volumen para la conformación de la arquitectura de México desde épocas muy remotas. A partir del empleo de tierra apisonada, cob, bajareque y adobe se edificaron pirámides, templos, palacios, fortalezas, depósitos y la mayoría de las viviendas de las civilizaciones prehispánicas. Cuando la calidad de la materia prima era adecuada y las condiciones climatológicas lo permitían, esta arquitectura recibía procesos de mantenimiento periódico a partir del uso de tierra en combinación con sustancias de origen orgánico para proteger sus superficies del viento y de lluvias con medianas intensidades.

Pero en regiones con climas extremos o con altas precipitaciones pluviales, las estructuras de tierra tuvieron que ser preservadas mediante el uso de materiales más resistentes como la piedra y la cal. Éste es el caso por ejemplo de las grandes pirámides de Teotihuacán, Tula o Cholula que, aunque su apariencia es la de monumentos de piedra, en realidad este material solamente corresponde a su capa externa, puesto que el núcleo de las estructuras es de tierra compactada y de adobe (Guerrero, 2008).

El papel de la cal en la arquitectura prehispánica y virreinal de la mayor parte del territorio mexicano fue fundamental gracias a su aplicación como conglomerante de mamposterías y como protección superficial. El carbonato de calcio permitió que complejos sistemas constructivos de tierra subsistieran hasta nuestros días,

manteniendo en gran medida sus cualidades estáticas, estéticas, físicas y químicas (Guerrero, 2007a).

Aunque la mayoría de los estudios que se han hecho respecto al uso de la cal en la arquitectura histórica de tierra en México se han focalizado hacia los estucos, pinturas murales y relieves policromados que se integraban a templos y palacios, es evidente que la presencia de superficies encaladas, así como de morteros, formó parte de prácticamente todos los muros, cubiertas y pavimentos de espacios destinados a funciones rituales, productivas, civiles y habitacionales, todavía incluso hasta mediados del siglo XX.

Sin embargo, la aplicación de la cal como material estabilizante en la arquitectura de tierra ha sido escasamente estudiada. Desde tiempos remotos se utilizaron pequeñas proporciones de hidróxido de calcio para incrementar la resistencia mecánica de la tierra, así como para disminuir las afectaciones derivadas de agentes climáticos como la lluvia, el viento o la nieve. Se ha documentado la presencia de cal en muros y recubrimientos de tierra de la zona arqueológica de Paquimé en Chihuahua (Figura 1), así como en la mayor parte de las cimentaciones de la ciudad de Tenochtitlan en el centro de México.

Pero, esta cultura constructiva que todavía en los años cincuenta y sesenta del siglo XX era muy frecuente, paulatinamente fue desplazada por el uso de componentes constructivos industrializados como el cemento.

Figura 1. Estructuras de tierra de la zona arqueológica de Paquimé. (Foto: L. Guerrero)



Dos cambios generacionales fueron suficientes para que la sabiduría de miles de años fuera considerada obsoleta y el patrimonio intangible constituido por el conocimiento de sus condicionantes de elaboración fuera olvidado. Afortunadamente en años recientes, a partir del auge que presenta la arquitectura sostenible, el uso de la tierra y la cal paulatinamente va adquiriendo una nueva dimensión al ponerse en evidencia sus calidades económicas, ecológicas y sanitarias.

## 2. CAL Y PUZOLANAS

El término 'puzolana' se usaba originariamente para denominar al material de origen volcánico que existía en torno a la localidad italiana de Pozzuoli, el cual, debido a su contenido de alúmina y sílica amorfa de alta superficie específica, al ponerse en contacto con hidróxido de calcio en condiciones húmedas, genera una serie de compuestos que tienen la propiedad de adquirir una notable dureza a temperaturas normales, e incluso de fraguar debajo del agua (Sepulcre, 2005).

Se sabe que el conocimiento de las reacciones que generan estos productos fue la base para buena parte de la avanzada tecnología constructiva que desarrollaron los romanos, y que en el siglo XVIII fue redescubierta y optimizada para la invención del cemento Portland. Los estudios fisicoquímicos de estos procesos han permitido demostrar que además del material proveniente de Pozzuoli existen muchas otras sustancias –a las que se les denomina genéricamente puzolanas– que poseen propiedades similares.

Estos compuestos pueden ser de origen mineral como sucede con derivados de procesos piroclásticos alterados por la acción atmosférica, pueden tratarse también de residuos orgánicos como los sedimentos conformados a consecuencia de antiguos depósitos submarinos, o bien, de origen antrópico, derivados de la combustión de diversos productos industriales como las escorias de fundición, el polvo de ladrillo, las cenizas volantes, cenizas de cascarilla de arroz o de caña de azúcar.

Se conoce con el nombre de 'actividad puzolánica' o 'puzolanidad' a la propiedad que presentan los compuestos de sílice y alúmina amorfos o débilmente cristalizados para disolverse en un medio altamente alcalino como el creado por una solución de hidróxido de calcio, y que, a partir de una reacción química irreversible, generan aluminosilicatos dicálcicos y tricálcicos similares a los obtenidos en el fraguado del cemento portland (Quintana, 2005).

Esta reacción, consiste en la disolución de sílice vítreo o amorfo, que interactúa con el calcio hidratado para formar gel de silicatos cálcicos hidratados. La alúmina también se disuelve por las condiciones de elevado pH y reacciona para formar fases de aluminatos cálcicos hidratados y sílico-aluminatos cálcicos hidratados normalmente cristalinos, los cuales contribuyen al proceso de cementación y al incremento en la resistencia del conjunto.

El grado de solubilidad de los materiales puzolánicos dependerá de la superficie específica, que es el factor principal dentro de los diferentes procesos producidos por

las distintas puzolanas. Es por ello que los mejores comportamientos al inicio de las reacciones se derivan del trabajo con puzolanas finamente pulverizadas.

Además, con el paso del tiempo la mayoría del sílice se va disolviendo con lo que se consigue un incremento en la resistencia de los materiales también a largo plazo (Sepulcre, 2005:95). Pero adicionalmente a los compuestos cuya actividad puzolánica ha sido estudiada, es importante destacar que la mayor parte de los suelos, al estar constituidos por sílica y alúmina, resultan potencialmente puzolánicos.

Sin embargo, dada la conformación de sus cristales, las reacciones necesarias para la formación de aluminatos cálcicos hidratados y sílico-aluminatos cálcicos hidratados son mucho más lentas que en los materiales antes mencionados y 'la consolidación puede durar un año o más' (Fontaine; Anger, 2009: 189).

Se conoce como estabilización de la tierra a los procesos físicos, químicos o físico-químicos que permiten controlar los cambios dimensionales que sufren las arcillas al entrar en contacto con el agua (Fernández, 1992). Para llevar a cabo estos procedimientos, además de la compactación y el control granulométrico, históricamente se ha utilizado el agregado de diferentes tipos de materiales orgánicos e inorgánicos tales como la paja, los mucilagos, el estiércol, las grasas animales, los aceites vegetales y, desde luego, la cal.

Aunque existen documentos antiguos que hablan de la aplicación de hidróxido de calcio en estructuras de tierra en textos tales como Los Prolegómenos de Ibn Jaldun, escritos aproximadamente en el siglo XIV (Monjo, 1998), es evidente que su uso es mucho más remoto y tuvo difusión en todo el orbe dentro de diversas culturas constructivas.

La cal se ha empleado como consolidante de pavimentos de tierra, en cimentaciones, en cisternas, en la elaboración de adobes, muros de tapia y, más recientemente, en la fabricación de bloques de tierra comprimida (Oliveira, 2005). Desde la segunda guerra mundial los suelos estabilizados con cal han sido muy utilizados en obras de ingeniería civil, principalmente en sub bases de carreteras, vías del ferrocarril y presas. Por este motivo, se han desarrollado importantes investigaciones y prácticas sobre esta técnica, que han derivado en una destacada cantidad de normas y especificaciones técnicas probadas por más de cuarenta años en países tales como Estados Unidos, Francia, Alemania y Gran Bretaña por sólo nombrar unos cuantos (Hoffmann, 2002). Aunque se cuenta con datos históricos acerca de este tema y se han

corroborado científicamente las cualidades de la aplicación de cal como estabilizante de la tierra, todavía quedan muchos datos por descubrir, sobre todo acerca de los fenómenos químicos que se desarrollan internamente en estas mezclas.

Se sabe de manera general que en virtud de la dimensión y estructura laminar de las partículas de los minerales arcillosos del suelo, los cationes de calcio se insertan entre las micelas de las arcillas incrementando su estabilidad sobre todo ante la presencia del agua. Pero, dada la

diversidad de arcillas presentes en la naturaleza y la gran cantidad de componentes químicos que suelen contener, la relación de los cationes presenta notables variaciones en su comportamiento. Algunos estudios han demostrado que en estas mezclas se detectan formaciones de neosilicatos y aluminatos hidratados de calcio, que son muy adecuadas para mejorar las propiedades de los suelos, además de la contribución derivada de la propia carbonatación del hidróxido de calcio que se genera conforme la cal entra en contacto con el bióxido de carbono del aire (Oliveira, 2005).

### 3. TRABAJO EXPERIMENTAL

Con estos antecedentes, en la Universidad Autónoma Metropolitana Xochimilco, durante más de cinco años se ha venido desarrollando una serie de investigaciones tendientes a recuperar el uso de la cal como estabilizante de la tierra. (Guerrero et al, 2011). Estos trabajos tuvieron resultados parciales que fueron aplicados en la edificación de un espacio de usos múltiples de 50 m<sup>2</sup>, emplazado en terrenos pertenecientes a la universidad, en el barrio de Las Ánimas, Tulyehualco, al sur de la Ciudad de México (Guerrero et al, 2013).

A partir de dicha experiencia se inició una nueva etapa en la que se trabaja tanto en propuestas para un diseño contemporáneo sostenible como en la restauración patrimonial, por lo que se empezaron a realizar estudios experimentales de estabilización con cal adicionada con materiales con comportamientos puzolánicos para aplicarse en un sistema constructivo similar a la tierra vertida. La intención es conseguir componentes téreos resistentes a la humedad, con mayores capacidades de carga, con procesos de endurecimiento más veloces y que superaran los inconvenientes químicos y ambientales del uso del cemento (Guerrero, 2008).

A diferencia de los procedimientos de tierra vertida que se han desarrollado de manera convencional, en los que se llenan los moldes por completo con material en estado semilíquido, la técnica que se está experimentando, se sustenta en la aplicación y compactación del material dentro de los moldes, con un nivel de humedad aproximada de 20%, por capas ligeramente compactadas (Figura 2).

Se trata de un procedimiento parecido a la tapia pero con casi el doble del volumen de agua, con lo que la compactación se limita prácticamente a una distribución con pocos golpes del material en el molde, con una herramienta mucho más ligera que un pisón.

Además de probar la eficiencia de esta técnica se puso en práctica una serie de estudios en el laboratorio de Materiales de la UAM-Xochimilco, tendientes a comparar el comportamiento de la estabilización de suelos con cal a la que se agregaron tres diferentes materiales puzolánicos disponibles en el Valle de México: las zeolitas, ladrillo triturado y polvo de una roca ígnea conocida regionalmente como tezontle.

Para los ensayos se mantuvo constante el empleo del tipo de tierra local conocido como 'tepetate' cuya caracterización en laboratorio mostró que el 31% de sus partículas finas pasaron por el tamiz No. 200 (0,075 mm) de

las cuales se determinó un límite líquido de 42,1% y un límite plástico de 26,3% dando como resultado un índice de plasticidad de 15,8%. Este dato al ser superior al referente de 7%, permitió llegar a la conclusión de que el material corresponde al grupo 'SC', es decir, 'arenas arcillosas', dentro del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) (Juárez, 2010:160).

La cal empleada es de tipo aéreo marca Calidra con 82% de Ca(OH)<sub>2</sub>, la cual se dejó hidratando durante tres meses para ser adicionada en forma de pasta. Como se sabe, la pasta de cal no contiene una cantidad definida de agua sino que se conforma con la adición de este líquido hasta que el hidróxido queda totalmente cubierto dentro del recipiente. Además, sobre la pasta ha de dejarse un espejo de agua de aproximadamente 5 cm de espesor, a fin de evitar que la evaporación pueda generar el contacto con el aire, lo que detonaría el proceso de carbonatación. (Guerrero, 2007b)



Las dosificaciones de todas las probetas se realizaron en volumen, con proporciones 1:1:10 (pasta de cal: puzolana:tierra). Para la mezcla con 50 ml de pasta de cal, 50 ml de puzolana y 500 ml de tierra, se adicionaban en promedio 200 ml de agua con lo que se podían realizar conjuntos de tres cubos de prueba de 5 cm de lado, que sirvieron para la realización tanto de grupos de ensayos a la compresión simple como pruebas de absorción capilar. Se realizaron nueve probetas de cada dosificación destinándose seis a los ensayos de compresión simple, dos a los de absorción capilar y una a la inmersión total.

Los resultados obtenidos en las pruebas de compresión simple arrojaron incrementos con respecto a la tierra natural del orden del 20%. La resistencia promedio de las probetas de tierra sin estabilizar a 48 días fue de 15,42 kgf/cm<sup>2</sup>; las de cal y tezontle 18,36 kgf/cm<sup>2</sup>; las de cal y ladrillo triturado 18,55 kgf/cm<sup>2</sup> y finalmente, las de cal con zeolita 18,64 kgf/cm<sup>2</sup>.

Ante la falta de protocolos estandarizados nacionales específicos para los ensayos previstos, las pruebas de absorción capilar se realizaron a partir de una adaptación de la Norma Mexicana NMX-C-037-ONNCCE-2005 y la Norma Italiana conocida como Normal 11/85.

El procedimiento consistió en desecar totalmente las probetas y pesarlas, para posteriormente ir las colocando a intervalos de 30 segundos sobre el textil humedecido situado al fondo de una charola. Se pesaron consecutivamente las probetas y se repitió el procedimiento durante 15 minutos. Para documentar los resultados se consideró tanto el peso registrado cada 30 segundos, como el total con respecto al peso inicial de cada probeta.

Los resultados obtenidos de la absorción capilar se detallan en la Figura 3 y muestran que las probetas de tierra retuvieron en promedio 18,2 g (11,65%) de agua; las de cal con tezontle 23,4 g (13,76%); las de cal con ladrillo

18,4 g (11,03%) y finalmente las de cal con zeolita 39,2 g (26,88%). En las gráficas de los tres primeros ejemplares se mantuvieron en rangos muy similares. Sin embargo el mejor comportamiento fue el de las probetas con polvo de ladrillo que absorbieron menos agua que las de tierra sin estabilizar. En cambio, las muestras de zeolita retuvieron mucho más agua y a mayor velocidad.

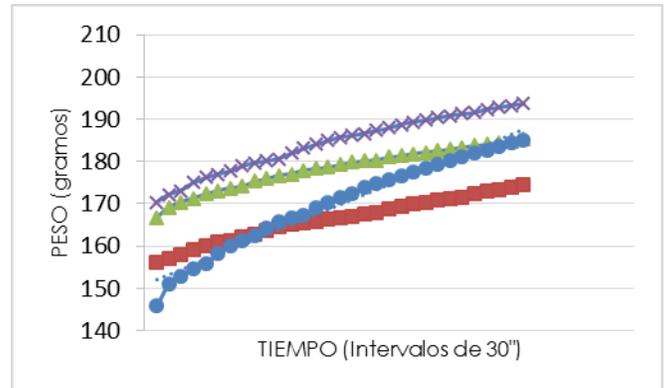


Figura 3. Incremento en peso por absorción capilar medida cada 30 segundos durante 15 minutos. (Tierra sin estabilizar ■—■, Tezontle x—x, Ladrillo ▲—▲, Zeolita ●—●).

Tabla 1. Síntesis de resultados de resistencia a la compresión simple y absorción capilar.

Composición de la mezcla	Dosificación en volumen	Resistencia a compresión simple (kgf/cm <sup>2</sup> )	Absorción capilar (g)	Absorción capilar (%)
Tierra sin estabilizar	-	15,42	18,2	11,65
Cal:tezontle:tierra	1:1:10	18,36	23,4	13,76
Cal:ladrillo:tierra	1:1:10	18,55	18,4	11,03
Cal:zeolita:tierra	1:1:10	18,64	39,2	26,88

En las pruebas de inmersión total en agua, el procedimiento consistió simplemente en colocar los bloques al fondo de vasos de precipitado, verter agua hasta que se llenaran por completo y tomar tiempo. Se cuidó que el llenado fuera uniforme y que el agua no golpeara directamente las probetas.

Las muestras de tierra sin estabilizar resistieron 17 minutos antes de desintegrarse mientras que las que contienen tezontle y ladrillo permanecen intactas bajo el agua después de más de cinco meses de haber iniciado los experimentos (7-8/abril/2014) (Figura 4). Llama la atención el hecho de que las probetas estabilizadas con cal y zeolita se desintegraron a los 47 minutos.

Es importante recalcar que se decidió trabajar con una cantidad de agua relativamente baja para la realización de las mezclas debido a que las dos vías de aplicación que se tienen previstas para esta modalidad de tierra vertida, estabilizada con cal y puzolanas, requieren que el material esté lo más seco posible.

Por una parte se ha empleado este componente como medio para la reparación de estructuras históricas de tierra que hayan perdido su unidad. Por otro lado, esta tierra en estado plástico es de gran utilidad para la elaboración de muros o componentes estructurales en los que se reduzca el tiempo necesario para desmoldar los elementos edificados.



Figura 4. Pruebas comparativas de inmersión total. (Foto: L. Guerrero)

Uno de los problemas que con mayor frecuencia se presentan en la restauración de edificios patrimoniales de tierra tiene que ver con el socavamiento de las bases de los muros de adobe, tapia o bajareque. La mezclas de tierra estabilizada con cal y puzolanas pueden verse por capas dentro de los componentes

estructurales con el apoyo de una placa externa que sirva como molde de contención al material.

Dada la velocidad de fraguado que se alcanza en este método, en menos de una hora es posible retirar los moldes y continuar las labores de restauración. Este proceso se ha empleado también para resanar faltantes derivados del escurrimiento del agua de lluvia en muros, así como en el relleno de grietas.

Este mismo beneficio se obtiene para la construcción de estructuras contemporáneas de nueva planta. La edificación de muros de tierra vertida, compactada, estabilizada con cal y puzolanas, puede ser desmoldada en poco tiempo y, aunque probablemente no alcanzará la resistencia a la compresión del suelo cemento por ejemplo, los beneficios ecológicos de su aplicación en estructuras sometidas a esfuerzos limitados justifican con creces su aplicación. Recientemente se edificó un prototipo de espacio habitable de forma cúbica con 2,4 m de lado y el trabajo para la ejecución de los muros se concluyó en sólo tres días.

Además se pudo constatar que es posible tener espesores de muros relativamente estrechos (14 cm) como los que se requieren para zonas urbanas en las que el costo del terreno suele condicionar la edificación con tierra (Figuras 5 y 6).

Este prototipo se hizo con el fin de estudiar el comportamiento higrotérmico del material y en verano se

iniciaron las mediciones respectivas, tomando como referencia los datos con los que ya se cuentan a partir de evaluaciones de módulos de dimensiones similares que fueron construidos en años anteriores en el mismo terreno y con las mismas orientaciones, pero con otros tipos de materiales.



Figura 5. Prototipo con muros de tierra vertida compactada por capas. (Foto: L. Guerrero)

#### 4. CONCLUSIONES

Entre los hallazgos más destacables de los estudios que están en proceso, resalta el hecho de que los resultados de las pruebas de compresión simple fueron notablemente semejantes con los tres tipos de puzolanas empleadas para la estabilización con cal. La incorporación de estos materiales incrementó la resistencia a la compresión simple de los especímenes de tierra en aproximadamente un 20%. Asimismo, las pruebas de inmersión total permitieron documentar la reversión de la vulnerabilidad de la tierra ante el agua, principal agente de deterioro de los sistemas constructivos de cualquier material, pero especialmente crítico para las estructuras téreas.

Las pruebas de absorción capilar tuvieron resultados muy semejantes entre los diferentes tipos de puzolanas en cuanto a las velocidades de captura de agua. Sin embargo, para el caso de la tierra sin estabilizar el ensayo se tuvo que interrumpir porque las probetas empezaron a perder material. El polvo de ladrillo tuvo un comportamiento moderadamente mejor pues en las pruebas de absorción capilar retuvo menos humedad que la tierra sin estabilizar. En cambio, la zeolita fue la puzolana que peores resultados presentó en este rubro debido que absorbió mucha agua en poco tiempo y en la prueba de inmersión total se desintegró del mismo modo que la tierra sin estabilizar, solamente con media hora de diferencia. Las probetas estabilizadas con polvo de ladrillo y con tezontle siguen bajo el agua y no evidencian efectos de deterioro.

Un aspecto no previsto en la experimentación y que da pie para futuros trabajos, se refiere a la evaluación de la

porosidad y permeabilidad al vapor de agua de los materiales estabilizados. Se sabe que ambos factores tienen una importante incidencia en la respuesta higrotérmica de la tierra utilizada como material constructivo, así como en la adherencia de morteros y enlucidos.

Al evaluar comparativamente el tiempo que tardaron en secar las probetas que habían sido humedecidas durante los ensayos de absorción capilar, se notó que los bloques estabilizados se secaron totalmente en un período aproximado de 8 horas a temperatura y humedad ambiental. En cambio, las probetas de tierra permanecieron húmedas por más tiempo. Sin embargo, la evaluación de estos parámetros requiere de procedimientos de análisis más profundos.

Es evidente que los resultados obtenidos ponen en evidencia el potencial que posee la estabilización de suelos con cal y puzolanas para mejorar tanto la resistencia mecánica como los efectos de la humedad en



Figura 6. Conclusión del prototipo de tierra vertida. (Foto: Luis E. Martínez Barrón)

componentes constructivos de tierra.

Conviene decir que desde el punto de vista económico este factor es importante puesto que en México la cal tiene un costo entre 40% y 50% menor que el del cemento, material que además resulta inconveniente para ser aplicado en la restauración del patrimonio edificado, por su elevada resistencia, impermeabilidad y generación de sales (Guerrero, 2008). Por otra parte, el ladrillo triturado es un material de desperdicio que se puede obtener fácilmente –a veces sin costo– en las fábricas o talleres artesanales de componentes cerámicos. El tezontle es un producto muy abundante en el Valle de México por lo que también su costo es muy bajo.

De este modo es posible poner al alcance de las comunidades de escasos recursos un material constructivo de fácil y económica transformación y que además puede ser mantenido y reparado por sus propios usuarios. Es fundamental difundir a la sociedad los conocimientos relacionados con el uso de la tierra, la cal y las puzolanas, pues no se trata de nociones que pertenezcan a los especialistas del diseño, la construcción y la restauración de monumentos. Se trata de una información que es parte integral de una sabiduría tradicional de origen atávico, que debería recuperar el lugar que siempre tuvo en la cultura popular.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Fernández, C. (1992). Mejoramiento y estabilización de suelos. México D.F.: Limusa.
- Fontaine, L. y Anger, R. (2009). *Bâtir en terre*. Cité des sciences et de l'industrie: Belin.
- Guerrero, L. (2007a). Tierra y cal. Anuario de Estudios de Arquitectura 2007, México D.F.: UAM -Azcapotzalco, p. 173-184.
- Guerrero, L. (2007b). Arquitectura en tierra. Hacia la recuperación de una cultura constructiva. Apuntes. Vol.20 No.2. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana, p. 182-201.
- Guerrero, L. (2008). La cal y el patrimonio edificado. La Gaceta del Instituto del Patrimonio Cultural, No. 12, Oaxaca: Instituto del Patrimonio Cultural, p. 18-29.
- Guerrero, L.; Roux R. y Soria, F. J. (2011). Ventajas constructivas del uso de tierra comprimida y estabilizada con cal en México. Revista Palapa. Vol. V-1 No.10. Colima: Universidad de Colima, p: 45-57.
- Guerrero, L.; Soria, F. J. y Larrondo, M. (2013). Muros y cubiertas experimentales de hormigón de tierra estabilizada en Xochimilco, México. Memorias del 13º SIACOT. Valparaíso: PROTERRA.
- Hoffmann, M. V. (2002). Efeito do argilo-mineral do solo na matéria prima dos sistemas construtivos com solocal. Tesis de Maestría. Salvador: Universidade Federal da Bahia.
- Juárez, E. y Rico, A. (2010). Mecánica de suelos, tomo I, fundamentos de la mecánica de suelos. México D.F.: Limusa.
- Monjo, J. (1998). La evolución histórica de la arquitectura de tierra en España. Arquitectura de tierra. Encuentros Internacionales. Madrid: Ministerio de Fomento, p. 31-44.
- Normal 11/85 (Assorbimento di acqua per capillarità. Coefficiente di assorbimento capillare). <http://apple.csgi.unifi.it/~restauro/chimfisappli2esp.pdf>
- Oliveira, M. M. de (2005). O solo-cal: uma visão histórica e documental. Memorias del IV SIACOT-IIIATP. Monsaraz: Escola Superior Gallaecia, p. 106-110.
- ONNCCE (2005). Norma Mexicana NMX-C-037-ONNCCE-2005. "Industria de la construcción –bloques, ladrillos o tabiques y tabicones– determinación de la absorción de agua y absorción inicial de agua".
- Quintana, E. (2005). Relación entre las propiedades geotécnicas y los componentes puzolánica de los sedimentos pampeanos. Tesis doctoral. Córdoba: Universidad Nacional de Córdoba.
- Sepulcre, A. (2005). Análisis comparativo de determinados aspectos sobre la hidraulicidad en los morteros de cal. Tratamientos y metodologías de conservación de pinturas murales. Palencia: Fundación Santa María la Real, p. 71-121.

## AUTORES

Luis Fernando Guerrero Baca. Arquitecto, Maestro en Restauración y Doctor en Diseño con especialidad en conservación del patrimonio edificado. 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.

Francisco Javier Soria López. Profesor de Tiempo Completo del Departamento de Tecnología y Producción, Arquitecto por la UAM -Xochimilco, Maestro en Restauración del Patrimonio Cultural Inmueble INAH-México, Doctor en Proyectos Arquitectónicos UPC-ETSAB en Barcelona, Coordinador del Cuerpo Académico en Conservación y Reutilización del Patrimonio Edificado, Miembro del Área interdepartamental de investigación Conservación y Reutilización del Patrimonio Edificado de UAM -Xochimilco.

Rubén Roux Gutiérrez. Arquitecto en la FADU de la UAT, Doctor en ETSA de la Universidad de Sevilla, miembro de la Red Iberoamericana PROTERRA. Actualmente es Jefe de Investigación de la Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo (FADU) de la Universidad Autónoma de Tamaulipas. Líder del Cuerpo Académico "Diseño y Edificación Sustentable"