

ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON CAL Y PUZOLANAS

Luis Fernando Guerrero Baca y Francisco Javier Soria López

RESUMEN.

La mayoría de los procesos constructivos que utilizan tierra moldeada en estado plástico (tierra vertida, suelo-cemento, *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. 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, adobón 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 auto-constructores. 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 un 25 a 30 % 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 se ha incrementado la resistencia a la humedad y la compresión simple en más de 40 % con respecto a la tierra sin estabilizar.

Palabras clave: arcillas, cal, tierra vertida, puzolanas, compresión y humedad.

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 natural para proteger sus superficies del viento y de lluvias con bajas y 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.

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. Este material permitió que complejos sistemas constructivos de tierra subsistieran hasta nuestros días, manteniendo en gran medida sus cualidades estáticas, estéticas, físicas y químicas. 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 y 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, ha sido escasamente estudiada la aplicación de la cal como material estabilizante en la arquitectura de tierra. 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 barro 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. 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. En años recientes, a partir del auge que presenta la arquitectura sostenible, el uso de la cal y la tierra paulatinamente va adquiriendo una nueva dimensión al ponerse en evidencia sus calidades económicas, ecológicas y sanitarias.



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



Figura 2. Proceso de edificación en el terreno de las Ánimas, Tulyehualco. (Foto: L. Guerrero)

ESTABILIZACIÓN DE TIERRA CON CAL.

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, 1992:129). 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 mucílagos, el estiércol, las grasas animales, los aceites vegetales y, desde luego, la cal.

Aunque existen documentos antiguos que hablan de su aplicación en estructuras de tierra en textos tales como Los Prolegómenos de Ibn Jaldun, escritos aproximadamente en el siglo XIV (Monjo, 1998: 33), 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 comprimidos (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 (Hoffman, 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 neo-silicatos y aluminatos hidratados de calcio, que son muy adecuadas para mejorar las propiedades de los suelo, además de la contribución derivada de la propia carbonatación del hidróxido de calcio. (De Oliveira et Al., 1990)

Con estos antecedentes en la Universidad Autónoma Metropolitana Xochimilco, durante casi cinco años se ha venido desarrollando una serie de investigaciones tendientes a recuperar el uso de la cal como estabilizante de la tierra. (Guerrero, Roux & Soria, 2011). Estos trabajos tuvieron resultados parciales que fueron aplicados en la edificación de un espacio de usos múltiples de 50 m², emplazado en terrenos pertenecientes a la universidad, en el barrio de Las Ánimas, Tulyehualco, al sur de la Ciudad de México. En esta construcción se contó con la participación de estudiantes de servicio social del último año de la carrera de arquitectura y sirvió como una experiencia demostrativa del empleo de muros de BTC en combinación con componentes de tapia.

El edificio se realizó con un tipo de tierra local que se comercializa bajo aceptables estándares de calidad y que se denomina “tepetate”. Se trata del producto de la excavación para el desarrollo de infraestructura urbana en las montañas de origen volcánico que rodean al Valle de México. La tierra para los BTC y tapias se estabilizó con 10 % de cal aérea en polvo marca Calidra, con 87 % de pureza. Los datos de laboratorio de Mecánica de Suelos mostraron que el 31 % de las partículas finas de la tierra pasaron por el tamiz No. 200 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).

En la fase final del proyecto se decidió experimentar la implementación de muros de tierra vertida con el mismo tipo de suelo y estabilización con cal. Sin embargo, la empresa constructora del Arquitecto Mario Larrondo que apoyaba el proyecto, por su propia experiencia con esta técnica consideró necesario bajar la dosificación de la cal aérea a 5 % pero incorporar 10 % cemento. Durante el proceso de construcción se hicieron probetas que posteriormente fueron evaluadas en el Laboratorio de Materiales, UAM-Xochimilco, obteniéndose como resultado resistencias a la compresión de especímenes cúbicos de 10 cm de lado de 29.35 kgf/cm² después de 7 días y 45.85 kgf/cm² a los 14 días.

Además del cemento y la cal como estabilizantes, la mezcla se enriqueció con fibras comerciales de polipropileno virgen (Sika-fiber) en una dosificación de 600g por metro cúbico. Este componente facilitaba el proceso de mezclado y daba mayor plasticidad a la tierra haciendo más eficiente el llenado de los encofrados (Soria, Guerrero y Roux, 2013).

Como culminación del proyecto se incorporó una singular cubierta diseñada a partir de una propuesta ya probada por el Arquitecto Larrondo y “que es el producto de la intersección en el eje vertical de una pirámide rectangular y un prisma rectangular cuadrado de menor dimensión, que al girarlo 45° sobre el eje longitudinal de ambos cuerpos desarrolla cuatro superficies regladas continuas” (Guerrero, Soria y Larrondo, 2013: 6).

En el diseño de este sistema de techo, se buscó la reducción de los refuerzos de acero y la eliminación de los encofrados. Esto se logró gracias al empleo de una malla de metal desplegado calibre 26 con aberturas en forma de rombos de 5mm x 11mm.



Figura 3. La primera capa de tierra vertida sobre la malla metálica. (Foto: L. Guerrero)



Figura 4. La cubierta del salón de usos múltiples ya concluida. (Foto: L. Guerrero)

Para su colocación se requirió de un andamio de la altura final de la pirámide truncada, sobre el cual se sujetó un marco de planta cuadrada que conforma un anillo de refuerzo de compresión de la parte alta. El sistema es cargado por una dala de arrioste perimetral que confina los muros, desde cuyos vértices se tiende la estructura de acero que arma las cuatro ligeras nervaduras que forman las aristas de la pirámide truncada. A las nervaduras se atan perpendicularmente varillas de acero Ø#2 como directrices que posteriormente son reforzadas por varillas similares que corren perpendicularmente a las primeras siguiendo las generatrices de las superficies regladas y conformando una retícula de aproximadamente 60 cm de apertura. Sobre esta superficie finalmente se amarra la malla de metal desplegado con alambre recocado.

Una vez armado este ligero refuerzo metálico se vertió la tierra estabilizada, la cual fue extendida sobre la malla con una cuchara de albañil, como si se tratara de un revoco de aproximadamente tres centímetros de espesor que ahoga toda la estructura metálica, de manera que la cubierta de forma piramidal semi girada, se comporta como una sola pieza.

Habiéndose cubierto todo el techo, se humedeció la superficie y se colocaron dos capas consecutivas sobre la primera pero de grosor decreciente. Así, en el área que corresponde a la unión con la solera de arriostre sobre los muros, el espesor final de la capa de tierra vertida alcanzó los 15 cm pero fue disminuyendo hasta 9 cm en la parte más alta, en el área en la que se une con el anillo de compresión superior, el cual desde un principio fue relleno con la misma mezcla para trabajar de forma monolítica. Debido a las condiciones climatológicas del sur de la Ciudad de México en donde se localiza este edificio experimental, se decidió cubrir este techo con una capa de ladrillo de barro cocido, asentado sobre mortero de cal y arena e impermeabilizado finalmente con jabón y alumbre. El hueco del anillo de compresión localizado en la parte alta del techo fue cubierto con un domo de vidrio en forma de pirámide de base cuadrada, estructurada con marcos metálicos, en cuyos paños laterales se incorporaron secciones verticales que sirven como ventilación.

CAL Y PUZOLANAS.

La substitución del uso de la cal por cemento portland en los morteros y revocos que se ha extendido de manera creciente a lo largo del siglo XX, también impactó el campo de la estabilización de suelos. El desarrollo de las bases científicas de este proceso se originó desde la primera guerra mundial, y en 1917 H. E. Brooke-Bradley, construyó en Salisbury Plain los primeros pavimentos urbanos de tierra estabilizada.

Pero, la aplicación extensiva del cemento como consolidante de suelos en obras de ingeniería tuvo lugar hasta los años 70. (Cement and Concrete Association, 1953:2), En aquellos años esta práctica también alcanzó a la disciplina de la construcción con tierra especialmente en el naciente dominio de la producción de bloques de tierra comprimida que en diversas partes del mundo incorporó a sus protocolos de ejecución el uso de cemento como estabilizante en dosificaciones del orden del 10 %, “receta” que hasta nuestros días sigue siendo frecuente, con muy dispares niveles de éxito.

Sin embargo, como es sabido, la producción del cemento tiene un fuerte impacto ambiental derivado de las altas temperaturas a las que se calcina su materia prima, proceso que incrementa el consumo de combustibles y la emisión de gases de efecto invernadero. Por estos motivos, a nivel mundial desde hace casi veinte años se han estado buscando alternativas en el campo de la edificación con concreto para disminuir las cantidades de cemento requeridas y por tanto la huella ecológica de su aplicación. Cada vez se empieza a generalizar más la inclusión de sílico aluminatos en las mezclas de cemento con lo que se ha podido reducir su dosificación relativa.

Por otra parte, en el campo de la conservación del patrimonio edificado con tierra se cuenta con evidencia creciente de que el uso del cemento está vinculado con el desarrollo de una serie de patologías que afectan drásticamente a los inmuebles tradicionales. Existe una creciente bibliografía que documenta los graves daños derivados de la incorporación de refuerzos de concreto y del nocivo recubrimiento con revoques de cemento en edificios históricos (Guerrero, 2008: 24).

Pero además, se cuenta con datos que demuestran que tanto los sulfatos presentes en el cemento como aquellos que actúan como consecuencia de infiltraciones, con el paso del tiempo van generando sales expansivas al momento de entrar en contacto en estado húmedo con la fase de aluminato tricálcico presente en este material, debilitan su estructura interna y los degradan hasta hacerlos polvo. (Warren, 1999).

Con estos antecedentes, en la siguiente etapa del proceso de investigación que se realiza en la UAM-Xochimilco, en la que se trabaja tanto en propuestas para un diseño contemporáneo sostenible como en la restauración patrimonial, se empezaron a realizar estudios experimentales de estabilización con cal adicionada con materiales con comportamientos puzolánicos. La intención era conseguir componentes térreos 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.

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, polvo de ladrillo, cenizas volantes, cenizas de cascarilla de arroz o de caña de azúcar.

Se conoce con el nombre de “actividad puzolánica” o “puzolanicidad” 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, 2005:71).

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. No obstante, 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 a largo plazo (Sepulcre, 2005:95).

A partir de estas premisas 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 cinco diferentes materiales puzolánicos disponibles en el Valle de México: las zeolitas, las diatomeas, piedra pómez, ladrillo triturado y polvo de una roca ígnea conocida regionalmente como tezontle.

La experimentación tiene varias etapas algunas de las cuales ya han concluido y otras se encuentran en proceso de evaluación. Para los ensayos se mantuvo constante el empleo de tepetate cuya caracterización como suelo "SC" (arena arcillosa) brindaba cualidades adecuadas para trabajarse con un bajo nivel de humedad. La cal empleada es de tipo aéreo marca Calidra con 82 % de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ disponible, la cual se dejó hidratando durante tres meses para ser adicionada en forma de pasta. Las dosificaciones de todas las probetas se realizaron en volumen, manteniendo 500 ml de tierra, 50 ml de pasta de cal, 50 ml de puzolana tamizada por malla #100, y aproximadamente 200 ml de agua. Estos volúmenes permitían 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. Todas las probetas se dejaron fraguar durante 28 días en áreas con temperatura y humedad controladas.



Figura 5. Pruebas comparativas de inmersión total. (Foto: L. Guerrero)



Figura 6. Nuevo prototipo de tierra vertida con muros de 14 cm de espesor. (Foto: Luis E. Martínez Barrón)

Los resultados obtenidos en las pruebas de compresión simple resultaron muy prometedores. La resistencia promedio de las probetas de tierra sin estabilizar fue de 15.4 kg/cm^2 , las que tenían pasta cal resistieron 19.1 kg/cm^2 , las de cal con zeolita 19.4 kg/cm^2 , cal y tezontle 21.2 kg/cm^2 y finalmente las de cal y ladrillo triturado 21.7 kg/cm^2 . En las pruebas de inmersión total en agua, las probetas 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 tres meses de haber iniciado los experimentos. En este sentido llama la atención el hecho de que las probetas realizadas con suelo natural y las que habían sido estabilizadas solamente con cal, se desintegraron a los 26 y a los 47 minutos respectivamente.

La investigación continúa con el fin de realizar comparaciones ahora con cal agregada en polvo en proporciones similares a las ya verificadas, además de series de pruebas con cantidades crecientes de cemento para contar con datos de referencia comparativa.

CONCLUSIONES.

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 el uso de la tierra vertida, estabilizada con cal y puzolanas requieren que este material esté lo más seco posible. Por una parte se espera poder emplear este componente como medio para la reparación de estructuras históricas de tierra que hayan perdido su unidad. Por otra parte se considera que esta tierra en estado plástico puede ser de gran utilidad para la elaboración de muros o componentes estructurales de barro vertido en los que se reduzca el tiempo necesario para desmoldar los elementos edificados.

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 en estado plástico 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 el proceso, en menos de una hora es posible retirar los moldes y continuar las labores de restauración.

Este mismo proceso se puede emplear para resanar faltantes derivados del escurrimiento del agua de lluvia en muros, así como en el relleno de grietas. Similar beneficio se obtiene en estructuras contemporáneas diseñadas a partir de nuevas plantas. La edificación de muros de tierra vertida estabilizada con cal y puzolanas en lugar de cemento, puede ser desmoldado en poco tiempo y, aunque probablemente no alcanzará la resistencia a la compresión del suelo cemento, 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 2.40m 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 (14cm) como los que se requieren para zonas urbanas en las que el costo del terreno suele condicionar la edificación con tierra. Este prototipo se hizo con el fin de estudiar el comportamiento higrotérmico del material y en verano se iniciarán 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 el mismo terreno y con las mismas orientaciones, pero con otros tipos de materiales.

Entre los hallazgos más destacables de los estudios que están en proceso, destaca el hecho de que los mejores resultados de las puzolanas empleadas para la estabilización con cal se obtuvieron con el polvo de ladrillo triturado. La incorporación de este material incrementó la resistencia a la compresión simple de los especímenes de tierra en más del 40 %. Asimismo, se revirtió drásticamente su vulnerabilidad ante el agua sin que el material pierda su porosidad y permeabilidad al vapor de agua, factores que tanta incidencia tienen en su respuesta higrotérmica y en la adherencia de morteros y enlucidos.

Finalmente, desde el punto de vista económico es posible agregar que en México la cal tiene un costo entre 40 % y 50 % menor que el del cemento. Asimismo, el ladrillo triturado es un material de desperdicio que se puede obtener fácilmente en las fábricas o talleres artesanales de componentes cerámicos. 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 propio 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, sino que es una parte integral de la sabiduría popular que debería recuperar su lugar en la cultura.

BIBLIOGRAFÍA.

- ANCADE (1997), *Manual de estabilización de suelos con cal*, Asociación Nacional de Fabricantes de Cales y Derivados de España, Madrid.
- Cement and Concrete Association (1953), *Soil-cement stabilization*, Concrete Quarterly 20: 2-9, October-December, London. Consultado 22/03/2014 en http://www.concretecentre.com/pdf/cq_020.pdf
- De Oliveira, M. (2005), *O solo-cal: uma visão histórica e documental*, en Memorias del IV SIACOT-IIIATP: 106-110, Escola Superior Gallaecia, Monsaraz.
- Fernández, C. (1992), *Mejoramiento y estabilización de suelos*, Limusa, México D.F.
- Gilisagasti, N., y Elorza, E. (2000), *Cemento*, Universidad del País Vasco, Gipuzkoa.
- Eades, J.L. y Grim, R.E., (1966), *A quick test to determine lime requirements for lime stabilization*, Highway Res. Rec. Bull, No. 139.
- Guerrero, L. (2006), *Aplicación de la cal en estructuras tradicionales de tierra*, en Anuario de Investigación sobre Diseño Sustentable, Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo, Universidad Autónoma de Tamaulipas, Tampico.
- Guerrero, L. (2007a), *Tierra y cal*, en Anuario de Estudios de Arquitectura 2007, UAM-Azcapotzalco, México D.F.
- Guerrero, L. (2007b), *Arquitectura en tierra. Hacia la recuperación de una cultura constructiva*, en Apuntes 20 (2): 182-201, Bogotá.
- Guerrero, L. y Uviña, F. (2007c), *The use of Lime in the Conservation of Earth Structures*, en Mitchell T. & Wilson Q. (eds.) Proceedings-Fourth International Adobe Conference of the Adobe Association of the Southwest, Adobe USA 2007, Northern New Mexico College, El Rito, N.M.
- Guerrero, L. (2008), *La cal y el patrimonio edificado*, en La Gaceta del Instituto del Patrimonio Cultural, No. 12, Abril, Oaxaca.
- Guerrero, L.; Roux R. y Soria, F. J. (2011), *Ventajas constructivas del uso de tierra comprimida y estabilizada con cal en México*, en Palapa Vol. V-1 (10): 45-57, Universidad de Colima, Colima.
- Guerrero, L.; Soria, F. J. y Larrondo, M. (2013), *Muros y cubiertas experimentales de hormigón de tierra estabilizada en Xochimilco, México*, en Memorias del 13º SIACOT, PROTERRA, Valparaiso.
- Hoffmann, M. (2002), *Efeito dos argilo-minerail do solo na matéria prima dos sistemas construtivos com solo cal*, Tesis de Maestría, Universidade Federal da Bahia, Salvador.
- Juárez, E. y; Rico, A. (2010), *Mecánica de suelos, tomo I, fundamentos de la mecánica de suelos*, Limusa, México D.F.
- Monjo, J. (1998), *La evolución histórica de la arquitectura de tierra en España*, en Arquitectura de tierra. Encuentros Internacionales: 31-44, Ministerio de Fomento, Madrid.
- Quintana, E. (2005), *Relación entre las propiedades geotécnicas y los componentes puzolánica de los sedimentos pampeanos*, Tesis doctoral, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba.
- Roux, R. (2010), *Los Bloques de Tierra Comprimida en Zonas Húmedas*, Plaza y Valdés, México.
- Sampedro, Á., (2005), *Tratamientos de suelos con cal*, ANCADE, Madrid.
- 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: 71-121, Fundación Santa María la Real, Palencia.

- Soria, F.; Guerrero, L. y Roux, R. (2013). *Alternative earth building techniques and their experimental applications*, en Theimer C. y Wilson, Q. (eds.), *Proceedings-EARTH USA 2013*: 406-410, Adobe in action, Santa Fe, N.M.
- Warren, J. (1999). *Conservation of Earth Structures. Series in Conservation and Museology*. Elsevier Butterworth-Heinemann, Oxford, U.K.