

LA PROTECCIÓN DEL PATRIMONIO EDIFICADO CON TIERRA
INSTRUMENTOS DE GESTIÓN, DIFUSIÓN E INVESTIGACIÓN.
EL CENTRO DE INVESTIGACIÓN DE ARQUITECTURA TRADICIONAL (CIAT)

**Luis Maldonado Ramos (1); David Rivera Gámez (2);
Fernando Vela Cossío (3)**

- (1) Doctor Arquitecto, codirector del CIAT, catedrático de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid
(2) Historiador, Subdirector Científico del CIAT, profesor de la Universidad Alfonso X el Sabio
(3) Arqueólogo, codirector del CIAT, profesor de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid

RESUMEN

El presente texto ofrece una panorámica de las actividades del Centro de Investigación de Arquitectura Tradicional (CIAT) en el campo del estudio y la investigación de la construcción con tierra; el texto enmarca dichas actividades en el contexto de la restauración de la arquitectura tradicional con tierra y la preocupación existente hoy en día por este campo y otros afines.

INTRODUCCIÓN

Como bien afirma John Warren en un pertinente y metódico artículo¹, la conservación de la arquitectura de tierra plantea al restaurador una serie de problemas éticos y estéticos de gran magnitud que apenas afectan a los restauradores de edificios tradicionales de piedra o ladrillo. La mayor fragilidad del material, así como su especificidad de acuerdo con cada región, el carácter a menudo doméstico y fuertemente vernáculo de los edificios construidos con tierra, entre otras cosas, nos enfrentan a consideraciones de nuevo cuño, dado que la protección del patrimonio edificado con tierra sólo se ha planteado con seriedad de manera reciente y gracias a la iniciativa de grupos más o menos aislados.

En efecto, el patrimonio arquitectónico de tierra es de una magnitud similar o incluso superior (por su número) al construido principalmente en piedra, madera o ladrillo, y no sólo en el ámbito generalmente contemplado de lo popular, tal y como lo refleja Rudofsky en su clásico *Arquitectura sin arquitectos*, sino en el de la construcción monumental tal y como podemos encontrarla en Marruecos, Irán, Mali o Perú, por citar localizaciones dispares alrededor del mundo en las cuáles se dan cita un gran número de edificios históricos impresionantes cuya calidad no ha escapado a los especialistas en arquitecturas orientales, exóticas o “primitivas”.

En España, obras como los Reales Alcázares de Sevilla, las murallas de Niebla (Huelva), la fortificación de Badajoz, La Alhambra de Granada, los castillos de Toral de los Guzmanes (León), Alcaraz (Albacete) o Baños de la Encina (Jaén), las murallas islámicas de Sevilla, el Alcázar de Guadalajara, las alcazabas de Gibralfaro (Málaga), de Carmona (Sevilla) y de Málaga, las cercas viejas de Almería y de Granada o la torre de Écija (Sevilla), entre muchas otras, por no hablar del inmenso patrimonio vernáculo construido con tierra y cada día más revalorizado, se hallan negligidas por los técnicos al hallarse fuera de las líneas de investigación habituales a causa del empleo de la tierra como material predominante.

La investigación en torno a la construcción con tierra se ha ramificado tanto geográficamente como a causa de los planteamientos sociales, sin que haya llegado a encontrarse todavía un punto de acuerdo y equilibrio. En Europa, la investigación se ha centrado en los problemas de la recuperación del saber perdido, la revalorización académica de la arquitectura de tierra y la experimentación con prototipos y complejos demostrativos; los franceses y los alemanes llevan la iniciativa en este campo. El trabajo de investigación sobre las propiedades y la restauración de las fábricas de tierra se encuentra especialmente desarrollado en algunos lugares concretos de Europa como el laboratorio CRATerre de Grenoble (Francia) – que es la institución de referencia – con vistas básicamente a la participación en proyectos de restauración monumental en América o en Oriente Medio, o con la intención de extender el conocimiento y el uso de la tierra en la arquitectura². En los países del llamado “Tercer Mundo” la situación es completamente distinta, ya que aquí la arquitectura de tierra se plantea como la única

¹ John Warren (2001): “Forma, significado y propuesta: objetivos éticos y estéticos en la conservación de la arquitectura de tierra”, en *Loggia* 12, p. 10-19.

² Véase Luis Maldonado Ramos/Fernando Vela Cossío/David Rivera Gámez (2001): *Nuevas aplicaciones de la tierra como material de construcción*, Instituto Juan de Herrera, Madrid.

alternativa viable para la construcción de viviendas de bajo coste que puedan albergar a una población cada vez más desamparada. En este caso abundante y proveedor de soluciones de variadas calidades y naturalezas, nos hallamos frente a un uso “social” de la tierra en lugares donde aún no se han cortado de todo las relaciones con la tradición³. Por último, en los países ricos de la franja cálida que fueron las antiguas colonias europeas, se ha dado la curiosa situación de la aparición de una arquitectura moderna de tierra “para ricos” y de carácter institucional que constituye una de las ramas olvidadas del estudio de la arquitectura contemporánea; en Estados Unidos, Australia, Nueva Zelanda, Sudáfrica, etc., las empresas, las universidades y los clientes han generado un tipo de investigación práctica de alto nivel y que implica a los estudios de arquitectura.

Desde el punto de la compatibilidad con la arquitectura moderna, por otra parte, los estudios actuales sobre las propiedades de la tierra como material de construcción se centran básicamente en la determinación del rendimiento térmico y de las propiedades higrotérmicas, en aras al desarrollo de una arquitectura bioclimática para los climas templados o calurosos (aunque en lugares como el norte de Europa existe una explotación igualmente importante de la tierra como material actual de construcción). Desde el punto de vista de la actualización tecnológica, como desde el punto de vista de la conservación de su patrimonio monumental, los países occidentales comienzan a incorporarse a este interés no por difuso menos estimulante.

Ejemplos de los centros e instituciones relevantes en el campo de la construcción con tierra (aparte del mencionado CRATerre en Francia) son el *Earth Building Institute* de la University of Technology de Sydney (Australia), el *Building Research Institute* de la Universidad de Kassel (Alemania) o el *Earth Architecture Center* de la Universidad de Nuevo Mexico (Estados Unidos); una serie de empresas (*Adobe* en Estados Unidos, *Solid Earth* en Australia o *Buildgreen* en Escocia son buenos ejemplos de los cientos que existen) comercializa en esos países los productos para el tratamiento de la tierra que desarrollan los investigadores (revestimientos, material de construcción, aislantes, pinturas especiales, complementos varios, etc.) aunque más en el campo de la vivienda nueva que en el de la restauración, si bien algunos de los hallazgos para la edificación con adobe y bloque de tierra comprimida (BTC) pueden aplicarse al tratamiento del patrimonio arquitectónico tradicional.

De todo este panorama de propuestas e iniciativas, que necesariamente deberán confluir si se desea obtener resultados efectivos y globales, sólo parcialmente puede hablarse de avances en lo que respecta a la protección del patrimonio edificado. La concienciación del público acerca del valor de la arquitectura de tierra (popular y monumental), e incluso la información sobre su mera existencia, y el hallazgo de **métodos** y de **productos** adecuados para el correcto tratamiento de los edificios a proteger, son temas pendientes aún y de una importancia mayor de lo que habitualmente se piensa.

EL CENTRO DE INVESTIGACIÓN DE ARQUITECTURA TRADICIONAL EN BOCEGUILLAS (SEGOVIA, ESPAÑA)

Nuestra aportación concreta al disperso pero vasto panorama de la investigación en torno a la arquitectura de tierra se inscribe dentro del marco de la creación de un centro específico para el estudio y la difusión de los valores de la arquitectura tradicional, fundamentalmente la arquitectura de tierra, de la que tantas muestras características podemos encontrar en el contexto vernáculo de la Comarca Nordeste de Segovia.

El Centro de Investigación de Arquitectura Tradicional (CIAT) ha sido creado mediante convenio, suscrito en julio de 1996, entre la Universidad Politécnica de Madrid y el Ilmo. Ayuntamiento de Boceguillas (Segovia). La sede del Centro de Investigación de Arquitectura Tradicional se ha establecido en la antigua Casa Parroquial de Boceguillas, un edificio restaurado del siglo XVIII hoy de propiedad municipal que se encuentra en la Plaza Mayor de la localidad. La rehabilitación interior del edificio ha sido posible gracias a la subvención recibida de la Consejería de Fomento de la Junta de Castilla y León, que ha cofinanciado las obras de restauración del inmueble junto con el Programa Leader II de la Unión Europea (a través de CODINSE, la Coordinadora para el Desarrollo Integral del Nordeste de Segovia) y el propio Ayuntamiento de Boceguillas (Segovia). El amueblamiento y equipamiento interior del centro se ha llevado a cabo mediante el depósito de distinto material por parte de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de la Universidad Politécnica de Madrid y de la Fundación Diego de Sagredo, que deposita en el CIAT su fondo bibliográfico y documental. El centro dispone de Campo de Trabajo experimental, Laboratorio de Materiales, Laboratorio de Fotografía y Aula-Biblioteca, en planta baja, y de una Sala de Exposiciones en planta primera.

³ Véase Julián Salas Serrano (1992): *Contra el hambre de vivienda: soluciones tecnológicas latinoamericanas*, CYTED, Madrid.

El Centro de Investigación de Arquitectura Tradicional (CIAT) tiene como objetivo principal la realización de todas aquellas actividades encaminadas a la investigación, la formación, la difusión y la protección de la arquitectura tradicional en cualquiera de sus manifestaciones. Asimismo, el centro pretende convertirse en un punto de referencia para el estudio y el conocimiento del patrimonio arquitectónico castellano-leonés en general y segoviano en particular, facilitando el conocimiento del patrimonio histórico y artístico y la comprensión del paisaje cultural de la comarca nordeste de Segovia y del propio municipio de Boceguillas. Como objetivo complementario puede destacarse que el centro persigue la realización de actividades académicas y de extensión universitaria en el medio rural.

A partir de un programa como este, nos ha sorprendido comprobar que una parte significativa de nuestras actividades se encaminaba regularmente hacia **el estudio y el análisis de la arquitectura construida con tierra**, y no sólo en sus manifestaciones tradicionales, sino también en sus derivaciones modernas y en la definición de los distintos ámbitos en que ha sido tratada y reactivada en los últimos años.

Por un lado, el CIAT ha participado en la realización de acciones especiales del Plan Nacional de I+D, investigando acerca de la clasificación y el tratamiento de los muros de tapial en el patrimonio arquitectónico de la Comunidad de Madrid o determinando el rendimiento y el coste energético comparativo de los cerramientos tradicionales de adobe y tapial con respecto a los muros elaborados con bloque de tierra comprimida (BTC). Además, existe un proyecto en curso presentado a la CICYT que plantea la posibilidad de analizar sistemáticamente y mejorar los productos existentes en el mercado y utilizados habitualmente en la restauración: habiendo comprobado la carencia de productos específicos para el tratamiento (consolidación, restitución, sustitución) de las fábricas de tierra tradicionales, el CIAT plantea con este proyecto la creación experimental de productos apropiados.

Por otro lado, el centro posee ya un currículum en el campo de las actividades docentes y los cursos en torno a la construcción con tierra, es decir, en lo que respecta al estudio y difusión de la misma. Además de los cursillos, seminarios y prácticas que se realizan en el campo experimental del CIAT a petición de diversos cursos máster y profesores de la Universidad Politécnica, el CIAT ha instituido un curso anual de verano que has sido impartido ya en dos años consecutivos con la asistencia de alumnos de escuelas de arquitectura de toda España (Valladolid, Madrid, Barcelona, La Coruña) y de profesionales muy variados (se ha contado con constructores, arquitectos e incluso especialistas en el tema entre los alumnos, tanto latinoamericanos como españoles); estos cursos cuentan, entre sus docentes, con profesores y profesionales reconocidos en el campo de la arquitectura, la ingeniería y la cooperación internacional, y este año se publica la primera recopilación de ponencias en forma de libro.

Finalmente, el CIAT ha participado en proyectos de investigación subvencionados que tenían la arquitectura tradicional como objetivo de estudio esencial, como es el caso de los proyectos *Estudio histórico-arqueológico del patrimonio construido en tierra de las comarcas de Guadalajara* (financiado por la Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha entre julio y septiembre de 2001) y *Documentación y catalogación de estructuras subterráneas en el recinto medieval de la ciudad de Guadalajara* (financiado por la Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha en dos años consecutivos, 1999 y 2000).

Las labores previstas en el CIAT para los años siguientes, aparte de la continuación de los cursos y seminarios habituales, incluyen la celebración de encuentros internacionales y la construcción de prototipos experimentales arquitectónicos que puedan servir de base a futuras propuestas de diseño en arquitectura de tierra y permitan realizar los necesarios experimentos en el campo de la aplicación de nuevos productos industriales para la restauración.

LAS ACCIONES ESPECIALES REALIZADAS EN EL MARCO DEL PLAN NACIONAL DE I+D

Las dos Acciones Especiales levadas a cabo por el equipo del CIAT sirvieron para enfocar respectivamente los problemas básicos de la restauración del patrimonio arquitectónico de tierra y de la nueva construcción industrializada con tierra en comparación con la tradicional. Ofrecemos un somero resumen de cada una.

La técnica del tapial en la Comunidad Autónoma de Madrid. Aplicación de nuevos materiales para la consolidación de muros de tapia

La Comunidad Autónoma de Madrid, especialmente en su mitad meridional, conserva un amplio patrimonio de edificios construidos con tierra, con ejemplos de distintas técnicas como la tapia, adobe o los entramados de madera rellenos. La necesidad de conservación y mantenimiento de este patrimonio justifica la conveniencia de

investigaciones sobre nuevas técnicas y procedimientos constructivos aplicables en trabajos de restauración y rehabilitación.

El uso de la tierra como material de construcción se encuentra extendido en buena parte de la región, observándose diversas aplicaciones y sistemas constructivos. El área geográfica con mayor abundancia es la mitad meridional de la provincia de Madrid, correspondiente a los valles de los ríos Tajuña, Henares y Jarama. Mientras que en la zona occidental se encuentran mayoritariamente muros de entramado de madera y plentería de adobe, en la zona oriental se detectan principalmente sistemas constructivos de muros de tierra apisonada o tapia.

En una primera fase de la Acción se realizó un estudio cuyo objetivo era la documentación y el análisis del patrimonio arquitectónico construido con tierra en la Comunidad de Madrid para la transferencia de los resultados obtenidos a la Dirección General de Arquitectura y a la de Patrimonio Histórico Inmueble del gobierno regional.

Para las labores de toma de datos se confeccionaron unas fichas que permitieron recoger de manera sistematizada datos generales de edificios y de las distintas técnicas constructivas que en ellos se observaban. Nuestro estudio se ha centra en aquellos ejemplos en que predomina la técnica del tapial.

Básicamente se diferenció entre dos categorías de tapias o fábricas: tapias monolíticas, en las que el muro se construye de manera homogénea, existiendo variedades en función de la composición de la tierra y materiales apisonados o el tratamiento de las juntas, y tapias mixtas, en las que aparecen elementos verticales (machos o machones) compuestos por diferentes materiales no apisonados, embutidos en el muro como refuerzo.

Después de documentar los diferentes tipos de tapia detectados, se hizo un análisis de las soluciones constructivas más frecuentes en los puntos singulares de la edificación. Como parte final del estudio se hizo un análisis de los daños más frecuentes y característicos de esta clase de fábricas, contemplando el problema planteado por las grietas, erosiones, humedades y desprendimiento de revocos.

En efecto, debido a la retracción que sufren estas fábricas durante el periodo de secado es frecuente la separación de las juntas entre tapias en muros monolíticos o entre estas y los machones en muros mixtos. Los machones (especialmente los de albañilería) presentan secciones variables en su altura actuando como enjarje con la tapia y mejorando la cohesión entre ambos materiales. En la mayoría de los muros de tierra estudiados aparecen grietas alrededor de los huecos, bien siguiendo los bordes de estos, o formando arcos de descarga sobre el dintel, aunque es difícil precisar si su alcance estructural en el muro.

Por otro lado, la tierra es un material con baja resistencia superficial frente a impactos y erosiones. Por esto es muy importante un adecuado revestimiento que proteja el grueso de la fábrica, ya sea proporcionado por el mismo proceso constructivo (calicastro) o aplicado posteriormente. Cuando este revestimiento es poco resistente, o se pierde, los muros de tierra son muy erosionables por el viento, la lluvia y el ataque de insectos u otros organismos que anidan fácilmente en los mismos. Es corriente observar una erosión marcada en franjas horizontales cuando el espesor de las tongadas es excesivo (superior a 10cm) produciéndose una compactación defectuosa en la parte inferior.

En cuanto a las humedades, este es uno de los problemas más frecuentes de los muros de tierra, debido a la poca impermeabilidad de este material. Distinguiremos dos tipos fundamentalmente: las de capilaridad y las de filtración. Las primeras se manifiestan en las partes bajas del muro, formando una línea sensiblemente horizontal. La consecuencia más frecuente de estas humedades es el desprendimiento del revoco al debilitarse la adherencia a la fábrica. Con frecuencia se ha intentado solucionar el problema colocando una capa de mortero de cemento sobre la zona afectada, pero con esto lo que se consigue es que el agua ascienda aun más y las manchas aparecen por encima del mortero. Las humedades de filtración, ya sea por absorción de agua de lluvia a través del muro o por fallos en la cubierta, debida a roturas de los aleros, provoca la disgregación del muro.

Finalmente, el desprendimiento del revoco puede ser causado por problemas del mismo (falta de adherencia, excesiva rigidez, etc.), y otras veces es el reflejo de un problema del muro sobre el que está aplicado. El revoco suele agrietarse en las juntas de un tapial mixto, debido a que la tierra se dilata más con la absorción de agua que el resto del muro, dando lugar a movimientos diferenciales. Los morteros de cemento, mucho más rígidos que el soporte sobre el que se aplican, se desprenden con mayor facilidad si no se han aplicado varias capas aumentando progresivamente su dosificación.

Como objetivo principal de este proyecto se planteaba la realización de un estudio piloto encaminado al desarrollo de una metodología específica, cuyos resultados se pudiesen aplicar a un proyecto de investigación más amplio referente al Patrimonio Arquitectónico construido con tierra de todo el estado español. Como objetivo específico se planteaba el desarrollo de nuevas técnicas de intervención en proyectos de restauración del Patrimonio Arquitectónico construido con la técnica del tapial. Para ello se experimentan los nuevos sistemas y materiales a emplear con el fin de garantizar su perfecto funcionamiento cuando sean aplicados por las empresas constructoras.

La metodología presentaba un programa de ensayos que a continuación se describe y que pretendía alcanzar estos fines de dos maneras distintas:

- En primer lugar realizando un análisis comparativo del comportamiento del material tierra aditivado con distintos productos hidrofugantes existentes en el mercado, para determinar cual de ellos mostraba una mejor compatibilidad.
- En segundo lugar comparando el comportamiento del material en probetas sometidas a ensayos de laboratorio con el de muros experimentales, para determinar en que medida los resultados obtenidos en las primeras son extrapolables a las fábricas *in situ*.

La realización de ensayos de otra índole (resistencia o dureza) permitió contrastar si la aplicación de estos productos implica alteraciones importantes en la respuesta de las fábricas ante acciones mecánicas. Como se ha mencionado anteriormente, estos ensayos se realizaron paralelamente en probetas de laboratorio y en muros fabricados a la intemperie.

Los productos hidrofugantes elegidos pertenecían en su mayoría a la marca comercial Sika, por su gran difusión y accesibilidad, aunque también se ensayaron otros productos comerciales de menor aplicación en la construcción, como el azufre o el aceite de oliva y otros sustancias menos comerciales como el Dodigen o Estabiram, derivados del petróleo, así como los más tradicionales: cemento, cal y yeso. Se utilizaron un total de 16 mezclas con 3 dosificaciones distintas, una dosificación según las indicaciones del fabricante para el uso habitual de del producto y otras dos en mayor y menor proporción respectivamente, ensayando 3 probetas iguales por cada dosificación (lo que hace un total de 144 probetas por ensayo).

Debido a la inexistencia de una norma específica para este material las pruebas de absorción y heladicidad se han intentado ajustar a las normas ASTM (D-557, Wetting and Drying Test y D-560, Freezing and Thawing Test) para suelo-cemento compactado. Estos ensayos tienen por objeto determinar la pérdida de material, cambios de humedad y volumen producidos por repetidos y alternativos ciclos, que intentan reproducir de manera acelerada el comportamiento del material en condiciones extremas. Para el ensayo de goteo se dispusieron las baldosas en un soporte inclinado 45° sobre el suelo y a una altura de 2m colocó un recipiente lleno de agua con un grifo que regula la salida de la misma hasta obtener un gota por segundo, manteniendo el proceso durante 12 horas.

El ensayo de lluvia artificial se realizó disponiendo 22 muros en dos círculos de 5m de diámetro y colocando un aspersor en el centro de manera que el agua incidiera directamente a media altura de las caras interiores, midiendo la profundidad del surco originado por el agua. Para la fabricación de los muros se establecieron cuatro tipos de protección: en un primer grupo se consideraron estabilizantes que se incorporaban a la tierra en el proceso de preparación de la misma; en un segundo grupo se trataron estabilizantes que se incorporaban al agua con que esta se humedecía, en un tercer grupo se engloban los productos de aplicación superficial y en el cuarto la protección se proporcionaba a través del procedimiento constructivo tradicional (calicostrado).

Como conclusiones generales, del estudio documental realizado se colige que a pesar del vasto patrimonio existente en la península son escasos los textos específicos en lengua castellana y se echa en falta una red de información organizada a nivel nacional que permita el conocimiento de las actividades que se dan de modo disperso en el ámbito de la conservación del Patrimonio construido con tierra. La búsqueda de información en los países vecinos, Francia y Portugal, resultó algo más fructífera, consiguiéndose contactar con varias organizaciones que desarrollan programas regionales de recuperación y conservación de Patrimonio Arquitectónico construido con tierra de gran interés para el estudio que nos ocupa.

La información recogida en la mayoría de los textos sobre arquitectura popular es de carácter general y poco precisa en lo que a procesos constructivos se refiere. El abandono de la práctica de este sistema constructivo en nuestra región desde mediados de siglo ha conducido al desconocimiento absoluto hoy en día de muchas de las dificultades de su puesta en obra, por lo que resulta imprescindible el desarrollo de programas de formación específica de operarios en este tipo de técnicas, actualmente inexistentes.

Del estudio de campo y documental se desprende que la causa más común de los daños en fábricas de tierra (tapiales) es la presencia de agua mientras que la resistencia mecánica nunca es un problema, ya que tradicionalmente las dimensiones responden a criterios de estabilidad y sistema de ejecución, siendo muy escasa la presencia de daños debidos a exceso de sollicitación o falta de resistencia. En este sentido, resultan más significativos los resultados de los ensayos que estudian el comportamiento de la tierra ante el agua (humedad/sequedad, hielo/deshielo, goteo, lluvia artificial) que a aquellos referidos a resistencia o dureza superficial.

Por otra parte, es posible la aplicación de determinados productos comerciales existentes para mejorar el comportamiento de los muros de tapial, aunque estos productos no se fabricaran inicialmente para este fin puesto que se trata principalmente de aditivos para morteros y hormigones.

Para mejorar la resistencia mecánica de los muros de tapial es necesario mezclar estos productos con la tierra antes de su compactación. Sin embargo, para disminuir la erosión hídrica y la absorción de agua, en intervenciones sobre el Patrimonio construido con tierra la técnica más adecuada será la aplicación de tratamientos superficiales en sucesivas capas que garanticen la penetración adecuada. En los ensayos se observaron diferencias significativas entre muros tratados con un sola capa o varias.

Los resultados conseguidos con diferentes productos comerciales (en concreto los de la casa SIKA), son descritos a continuación. Debe advertirse, sin embargo, que estas mejoras deberían ser evaluadas a lo largo del tiempo antes de aplicarlas a la recuperación de fábricas de tierra pertenecientes al Patrimonio.

El producto que mejora en mayor grado los muros de tierra es el SIKALATEX, que añadido al agua utilizada para humedecer la tierra en proporción 1 parte de SIKALATEX por 15 partes de agua disminuye la absorción de agua y la erosión hídrica, a la vez que aumenta la resistencia a compresión y la dureza superficial. Aunque los resultados obtenidos en conjunto no superan a los que se dan con otros materiales tradicionales (cal o cemento), el comportamiento en muros y probetas presenta mayor homogeneidad.

El DODIGEN, mezclado de la misma manera que el anterior en proporción 1 parte de DODIGEN por 9 partes de agua, mejora la resistencia a compresión y la dureza superficial, pero su comportamiento frente al agua es algo peor que el del SIKALATEX.

Los demás productos ensayados: SIKACEM, SIKA 1, SIKALITE y ESTABIRAM, mejoran la resistencia a compresión, pero presentan en general una erosión hídrica muy acusada y no disminuyen la absorción de agua, por lo que se consideran poco adecuados para mejorar los muros de tapial.

De los productos tradicionales que se han ensayado para mejorar los muros de tierra, se han obtenido los siguientes resultados:

- La cal y el cemento, así como las mezclas de ambos, añadidas a la tierra antes de su compactación, mejoran la resistencia a compresión, la dureza superficial y la erosión hídrica en los muros, pero el grado absorción de agua en los ensayos de laboratorio ha sido muy variable. Se debe prestar especial atención a este factor en el proceso de preparación del material para obtener unos resultados satisfactorios, especialmente en aquellas zonas donde el agua se manifieste climatológicamente de forma relevante.
- Las mezclas de cal con otros productos (cal y azufre, cal y cenizas), dan como resultado un empeoramiento de la resistencia a compresión, además de aumentar la absorción de agua, por lo que los consideramos no adecuados para mejorar los muros de tierra.
- El yeso dispara los valores de absorción de agua, por lo que se considera un producto no adecuado.

La adición de aceites (de oliva, de linaza), disminuye algo la absorción de agua, pero no la erosión hídrica. No se aprecian cambios substanciales en la resistencia a compresión. Los efectos de estos productos no son muy acusados, considerándose que no son adecuados para mejorar el comportamiento de los muros de tapial.

De cara al futuro proponemos las siguientes líneas de trabajo como continuación de las investigaciones:

1. Construcción de modelos a escala real, para evaluar en ellos a validez de las conclusiones obtenidas de la experimentación con probetas y la evolución a lo largo del tiempo de los productos aplicados.

2. Desarrollo de una normativa específica sobre la tierra como material de construcción. Para la elaboración de esta normativa se propone desarrollar los siguientes aspectos:
 - Obtención de parámetros que determinen la idoneidad de los productos comerciales aplicados, desarrollando con más detalle alguno de los ensayos realizados;
 - Obtención de equivalencias entre los resultados de laboratorio y el comportamiento de modelos a escala real, como ya se ha indicado en el punto anterior.
3. Establecer líneas de cooperación con las casas comerciales cuyos productos se ha concluido que son adecuados para el desarrollo de técnicas de intervención sobre patrimonio arquitectónico construido con muros de tapial, con el fin de ajustar convenientemente dichos productos a su comercialización con este nuevo uso.

(Los resultados de este proyecto se publicaron más ampliamente en la revista Informes de la construcción, del instituto Eduardo Torroja; véase bibliografía.)

Rendimiento y coste energético en la construcción de cerramientos de fábrica de adobe y bloque de tierra comprimida

Nuestro trabajo de investigación, subvencionado como Acción Especial por el Plan Nacional de I+D (Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología – Programa Nacional de I+D en Medioambiente) se centró en la comarca Nordeste de Segovia, donde abunda la utilización de la tierra en la arquitectura tradicional y donde el Departamento de Construcción y Tecnología Arquitectónicas de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid viene realizando actividades de investigación en el marco del Convenio firmado entre la Universidad Politécnica de Madrid y el Ilmo. Ayuntamiento de Boceguillas para la creación del Centro de Investigación de Arquitectura Tradicional (C.I.A.T.).

Con este trabajo se pretendía demostrar la viabilidad de la utilización de este material y los sistemas constructivos que de su aprovechamiento se derivan considerando que es una forma económica de conseguir una construcción masiva y por tanto de características térmicas apropiadas para utilizar en los sistemas de acondicionamiento pasivos de la vivienda.

En una primera fase de investigación se ha realizado una toma de datos en un total de cuarenta y dos municipios, aldeas y pedanías de la comarca localizando aquellas construcciones en las que todavía perviven sistemas tradicionales de adobe y/o entramado de madera.

La arquitectura popular de la Comarca Nordeste de Segovia, tanto desde el punto de vista de las tipologías de edificación como de los materiales y sistemas constructivos, pone de manifiesto la adecuación de sus espacios domésticos y auxiliares a las características del medio natural y a las formas tradicionales de la vida social y económica. Su carácter es netamente ecológico, lo que se refleja cuando al producirse el abandono y posterior ruina de los edificios, los materiales empleados vuelven a integrarse armónicamente en la matriz del medio natural.

Como hemos podido comprobar, el adobe constituye uno de los sistemas de construcción más arraigados en la comarca. Los adobes se pueden fabricar con una amplia variedad de tierras. Según el contenido de arcilla, limo o arena de la tierra, las fibras vegetales utilizadas tradicionalmente pueden sustituirse por otro tipo de *estabilizantes* más adecuados como las emulsiones asfálticas. La fuente de tierra puede estar ubicada en el sitio mismo de la construcción, producto de las excavaciones de trabajos previos. Esta excavación puede servir igualmente de pozo de remojo y punto de mezcla dependiendo de la magnitud de la manufactura.

En la actualidad se cuenta con la posibilidad de mecanización de muchos de estos procesos según el nivel de producción deseado, desde una demanda muy pequeña que puede ser satisfecha *in situ* de modo manual (300-400 adobes diarios) hasta una producción en planta a gran escala donde se pueden conseguir hasta 25.000 adobes diarios. Con una mezcladora y un buen número de moldes la producción se puede duplicar respecto a la manual. Para esto se debe preparar un barro casi líquido que se “vierte” en los moldes, como la mezcla es muy fluida deberá secar en el molde antes de retirarlos. Se puede lograr una mayor mecanización utilizando un pozo de remojo permanente, una pala frontal y un mayor número de moldes.

El punto más vulnerable de los adobes es la desintegración con el agua, esta preocupación es la que hace surgir el concepto de estabilización; este término aparece con frecuencia para designar aquellos procedimientos mediante los que se pretende mejorar las características naturales (resistencia mecánica, conductividad térmica, impermeabilidad, etc.) de la tierra como material de construcción. A pesar de todo el adobe seco no estabilizado

no es tan vulnerable como pudiera parecer ya que la arcilla limita la penetración de la humedad hasta ciertos niveles. En la actualidad existen gran cantidad de agentes estabilizadores: cemento, cal, emulsión de asfalto, jugos y fibras vegetales y un gran número de compuestos químicos impermeabilizantes. La principal desventaja de estos procedimientos es el coste y su difícil proceso de reciclado.

Otra de las formas habituales de mejorar la calidad de la tierra para la construcción, sin aporte de otras sustancias o materiales, es la “compactación”. Este procedimiento persigue la reducción de los huecos entre las partículas de tierra, aumentando su densidad y disminuyendo la porosidad y por tanto las variaciones de volumen debidas a la presencia de agua. La primera máquina para comprimir bloques de tierra de la que se tienen referencias escritas fue ideada por François Cointeraux en Francia, en el siglo XVIII, a partir de una prensa de fabricación de vino. Los primeros diseños de prensas motorizadas no aparecen hasta principios del s. XX; éstos consistían en tapas muy pesadas que se deslizaban en un molde para realizar la compresión.

A partir de entonces y con el desarrollo de maquinaria para la industria del ladrillo cerámico aparecen nuevas ideas, pero el impulso definitivo a esta técnica se da en la década de los 50, cuando aparece la primera prensa verdaderamente específica para la construcción de bloques de tierra comprimida. La máquina, conocida como CINVA-Ram, fue ideada en Colombia por el Ingeniero Raúl Ramírez, del Centro Interamericano de Vivienda y Planeamiento. Las ventajas de esta máquina son su simplicidad mecánica, ligereza y sencillez de utilización, que la han hecho ideal para la producción de bloques *in situ*. Desde entonces múltiples variedades de este sistema se han desarrollado por toda la geografía mundial, adaptándose a los recursos y necesidades de cada situación local. Igualmente, con la necesidad de realizar proyectos de mayor escala, comenzaron a aparecer en el mercado máquinas hidráulicas y neumáticas que permiten un tratamiento mecanizado de casi todas las fases de la producción y una mejoría notable en la calidad de los bloques. No obstante, la mayoría de ellas necesitan de un aporte de energía eléctrica o combustibles para su funcionamiento. En algunos casos, se han llegado a crear auténticas plantas de producción industrial en las que esta técnica se aproxima más a la del ladrillo silico-calcáreo, del cual tiene mucho en común en sus orígenes.

El bloque de tierra comprimida es un producto similar en su materia prima al adobe (o bloque moldeado) pero diferente en su proceso de fabricación, lo que también le confiere unas propiedades distintas. La utilización de prensas mecánicas supone una mejoría en la calidad de las piezas obtenidas, desde el punto de vista formal y mecánico, lo que facilita su colocación en obra. La utilización de maquinaria “portátil” permite un aprovechamiento del terreno obtenido de la propia excavación de la obra. El escaso grado de humedad de la mezcla utilizada (en comparación con el barro usado para los adobes) hace que el proceso de curado se realice bajo cubierto. Por otro lado, los bloques tiene una consistencia inicial que permite un cierto grado de apilamiento, evitando la necesidad de grandes superficies de secado. Con maquinaria hidráulica motorizada se pueden conseguir bloques con resistencia inicial suficiente para ser colocados en obra inmediatamente a su fabricación. Finalmente, la técnica enlaza directamente con la tradición de empleo de piezas de albañilería en la zona de la comarca nordeste de Segovia que es el objeto de nuestro estudio.

Al igual que para el adobe, las tierras utilizadas para la fabricación de los bloques pueden ser muy variadas y sus características pueden mejorarse con la adición de estabilizantes. El cemento y la cal son los dos materiales utilizados mayoritariamente en la actualidad para la estabilización de bloques de tierra. Como generalidad se puede decir que el primero es más adecuado para suelos con mayor contenido de arenas y el segundo es apropiado para los suelos con un elevado contenido de arcillas. No obstante, una vez seleccionado un suelo y el tipo de estabilizante a utilizar, son muchos los factores que, durante las distintas fases de la producción, influyen en el resultado final del producto, desde las proporciones de la mezcla a las condiciones de curado.

La tierra no tiene tan buenas propiedades de “aislamiento” como legendariamente se le vienen atribuyendo; en realidad, su capacidad de aislamiento térmico está muy por debajo de la de otros materiales utilizados en la actualidad. La capacidad de aislamiento de los muros de tierra se debe en mayor grado al espesor con que estos se construyen que a la “resistividad” del material. No obstante la conductividad térmica de algunos elementos de tierra combinada con otros materiales, como es el caso del adobe (con fibras vegetales) puede ser dos o tres veces menor que la de otros elementos de albañilería o de materiales masivos como el hormigón, como se observa en la información recopilada. Muchas normas asumen que el aumento de aislamiento es suficiente para disminuir las pérdidas, pero esta no es la única manera ni la mejor de disminuir las necesidades de calefacción.

Los resultados de este estudio inciden en el hecho de que el cerramiento de un edificio es un elemento de calentamiento solar pasivo cuyo comportamiento, debido a la transitoriedad del régimen de temperaturas diario, depende de la capacidad de almacenamiento de calor y de absorción de radiación. Entre las conclusiones que se pueden obtener hay que destacar que el K-efectivo (coeficiente de transmisión térmica) disminuye cuando el

color de la superficie es más oscuro y en los muros con orientación sur, creciendo progresivamente en orientaciones este, oeste y norte. Estas diferencias son aún más significativas en muros con gran masa. En un muro de adobe, la mayor atenuación de la temperatura que se presenta en la superficie exterior ocurre en los primeros 30 cm de espesor. Los muros tienden a promediar las temperaturas exteriores en periodos más o menos definidos.

Uno de los aspectos que se contempló en este trabajo es la determinación de las características físicas del material, con el fin de obtener unos valores concretos comparables a los que se encuentran en la documentación técnica disponible para materiales de uso corriente en la construcción actual. Los valores de resistencia, conductividad térmica, calor específico, etc. encontrados en la bibliografía para el material tierra, en sus diferentes formas de aplicación, presentan grandes desigualdades, lo que dificulta la determinación de los mismos para realizar un estudio comparativo con otros materiales. Por ello se ha preferido realizar una serie de mediciones sobre elementos reales construidos con los materiales de la comarca. Los ensayos realizaron con dos tipos de piezas de albañilería: adobes y bloques de tierra comprimida. La fabricación de los bloques se ha llevado a cabo en las instalaciones del C.I.A.T. (Centro de Investigación de Arquitectura Tradicional) en Boceguillas (Segovia).

Para obtener un resultado sobre el comportamiento térmico de los elementos de tierra (adobe y bloque) se debe partir de un cerramiento con unas características determinadas del cual se medirá su coeficiente de transmisión térmica (k), mediante ensayo de laboratorio y a partir del mismo se deducirán matemáticamente los valores de conductividad para el elemento.

Estos ensayos se han realizado en los laboratorios del Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (CSIC) y se han practicado sobre dos muros de $\frac{1}{2}$ pie de espesor, aparejados a soga, uno de adobes y otro de bloques de tierra comprimida. Para ello se transportaron los bloques y adobes del lugar de fabricación y adquisición en Boceguillas (Segovia) a las instalaciones del ICCET. Igualmente se llevaron tierras del mismo tipo con las que fabricar un mortero de cemento (1:6) para recibir las piezas y levantar el muro. Con el mismo material, tamizado, y en las mismas proporciones se realizó un revoco por una de las caras de cada uno de los muros de entre 5mm y 1cm de espesor. Este revoco es necesario para proporcionar una superficie plana de adherencia para los termopares del ensayo (aunque para tal fin basta con revestir una zona central de unos 60x80cm).

Los valores máximos para el coeficiente de transmisión térmica para cada tipo de cerramiento, se establecen en la NBE CT-79 según la zona climática, determinada por los valores de las temperaturas mínimas medias del mes de enero. Estos valores reflejan simplemente la capacidad de aislamiento, pero no consideran la capacidad de acumulación de calor de los mismos, no obstante, existe una cierta consideración hacia los cerramientos de gran masa, pues el valor mínimo de k es superior para aquellos que presentan un peso $> 200\text{kgf/m}^2$. En nuestro caso particular, el valor máximo de K según la norma es de $1,40\text{ W/m}^2\cdot\text{°C}$; con un muro de 1 pie de bloques de tierra podríamos conseguir un $K = 1,74\text{ W/m}^2\cdot\text{°C}$, por lo que el valor requerido es fácilmente alcanzable con un revestimiento interior y exterior de 1,5cm de espesor de características similares al ensayado. Este es un valor bastante adecuado para las fábricas de tierra: coincide con las dimensiones habituales en la construcción tradicional, suministra suficiente resistencia para soportar hasta dos alturas con las cargas habituales en edificación residencial y ya hemos visto que a efectos de almacenamiento de calor es la sección más efectiva. Por encima de este espesor posiblemente estemos desperdiciando material y por debajo habría que buscar soluciones combinadas con algún tipo de aislamiento.

Por otra parte, el coste energético es un indicador ecológico cuyo principal aporte consiste en sintetizar en una única medida un conjunto muy diverso de impactos. Así, en el actual contexto industrial con un consumo mayoritario de fuentes energéticas “no-renovables”, para un mismo proceso de fabricación (o procesos similares que sean comparables) el coste energético es esencialmente proporcional a la contaminación mediante diversas sustancias (óxidos de carbono, de azufre, etc.). Igualmente, dicho coste es esencialmente proporcional al impacto sobre el territorio debido a movimientos de materiales. El coste energético de fabricación dependerá principalmente de la cantidad de material utilizado y de su naturaleza, así como de la durabilidad general de la construcción. Por el contrario, el coste energético de mantenimiento, a igualdad de cantidad y naturaleza de los materiales, dependerá significativamente del diseño particular con que se empleen.

Adoptar las formas adecuadas puede suponer un ahorro de energía considerable; la composición en detalle y la distribución de los espacios que son propios de la arquitectura bioclimática (es decir, aquella que utiliza como foco de energía pasiva los efectos de derivados de las condiciones climáticas) son un punto de partida

indispensable cuya observancia cada vez se halla más extendida en la arquitectura reciente de los países en vía de desarrollo y los países ricos de la franja cálida.

Como es sabido, la durabilidad es un segundo aspecto a tener en cuenta en este enfoque, ya que la correcta utilización y protección de los materiales empleados permitirá ahorrar grandes costes al constructor y al usuario. La relación entre los costes de fabricación y la eficiencia de la arquitectura para cobijar a las personas puede ser alterada de diversas maneras; la utilización de la tierra, con su gran inercia térmica, ofrece unas posibilidades inmejorables para disminuir los costes de la edificación.

En cuanto a la energía incorporada en los materiales de construcción, existe una definición aceptada que podemos emplear: la energía incorporada de un material incluye toda la que se precisa en los distintos procesos necesarios para llevar el material a su lugar en el edificio, desde la extracción de las materias primas hasta su manufactura y erección; incluye la energía asociada al transporte (y a la parte proporcional de la infraestructura necesaria para que éste sea posible) tanto como la parte proporcional de los equipos y maquinaria necesarios para todos esos procesos.

Otras ventajas apreciables desde el punto de vista del coste energético pueden ser consideradas desde el mirador de los excesos de la construcción industrializada. El interés de la construcción con tierra desde la premisa de la reducción de los impactos ambientales reside en la naturaleza polifacética del material y sus propiedades térmicas y mecánicas, unido al hecho de que su fabricación es totalmente viable sin un consumo de energía contaminante, debido a de que en todas las fases de fabricación del adobe o tapial tradicionales es posible utilizar fuentes renovables de energía, ya que nunca se requiere la presencia de altas temperaturas (lo que constituye la diferencia sustancial con el ladrillo cerámico común).

Pero aunque la energía incorporada en los materiales da una idea de su densidad energética, no permite todavía hacer comparaciones útiles al diseñador. En efecto, para cada función específica, la cantidad de material es muy distinta según sea el elegido, en justa correspondencia con las muy diversas propiedades físicas de cada material. Para proceder a una elección sensata no sólo es necesario considerar el material, sino que también debe tenerse presente la función que se supone que debe implementar.

Como conclusiones, en primer lugar, hemos podido comprobar la viabilidad de la construcción con tierra, combinada con técnicas actuales, como recurso de mejor aprovechamiento energético tanto en el proceso de construcción como en el acondicionamiento de la vivienda: se ha demostrado la importancia de la construcción con elementos masivos como alternativa de acondicionamiento pasivo en edificaciones situadas en climas con saltos térmicos importantes, estacionales y diarios. Por otro, la tierra y en concreto el sistema de bloques de tierra comprimida ofrece una solución barata, energética y económicamente, para la obtención de elementos masivos en la construcción.

Los valores de coste energético del aislamiento, capacidad de almacenamiento térmico y coste específico estructural de la compresión hacen que el sistema resulte especialmente ventajoso, en comparación con otros materiales como el hormigón, el acero o el ladrillo, en edificios de una o dos plantas de altura.

Aunque no se ha podido determinar con precisión el coste económico de producción y puesta en obra de los bloques, las estimaciones que se han hecho lo sitúan parejo a algunos materiales de densidad similar, como el bloque de cemento o el ladrillo de tejar.

Se han demostrado también, con valores reales, las ventajas que el sistema de B.T.C. ofrece respecto a una técnica tradicional como el adobe, y que ya se apuntaron anteriormente. Por un lado, se ha demostrado mediante prototipos reales ensayados en laboratorio, que el comportamiento climático: el coeficiente de transmisión térmica y la capacidad de almacenamiento de estos bloques es igual al de los adobes utilizados tradicionalmente, que tan buenos resultados dan para la refrigeración y el calentamiento pasivo. Si bien en el primer caso los resultados son más satisfactorios, puesto que las temperaturas medias en los meses de calor se aproximan más a las de confort que en los meses de invierno donde hace falta calefacción.

La utilización de prensas mecánicas supone una mejoría en la calidad de las piezas obtenidas, desde el punto de vista formal, lo que facilita su colocación en obra y junto con la adición de estabilizantes supone una mejoría en los valores de resistencia a compresión y absorción de agua de más del doble de los asumidos para el trabajo con adobes. La utilización de maquinaria “portátil” permite un aprovechamiento del terreno obtenido de la propia excavación de la obra, ahorrando costes y energía de transporte de material a vertedero gracias a la reutilización que se hace del mismo.

El escaso grado de humedad de la mezcla utilizada (en comparación con el barro usado para los adobes) hace que el proceso de curado se realice bajo cubierto. Por otro los bloques tienen una consistencia inicial que permite un cierto grado de apilamiento, evitando la necesidad de grandes superficies de secado, lo que los hace idóneos en lugares donde no se cuenta con mucho espacio de trabajo. Además, se ha comprobado que con las proporciones y el tipo de cemento y tierra utilizados, los bloques adquieren suficiente resistencia para ser utilizados en obra a la semana de su fabricación, sin necesidad de voltearlos para su secado. Se ha demostrado que el ahorro de energía convencional (combustibles líquidos) es posible utilizando maquinaria de accionamiento manual con la que se puede obtener un producto de características adecuadas para la construcción de edificaciones de hasta dos plantas de altura, con valores de resistencia y deformación seguros.

CONCLUSIONES

El Centro de Investigación de Arquitectura Tradicional (CIAT) se plantea como un instrumento alternativo de conocimiento, difusión y protección del patrimonio construido con tierra, así como de su estudio en función de la situación actual de la nueva arquitectura de tierra. Desde el nacimiento del CIAT en 1996 se han ido realizando una serie de actividades, cursos e investigaciones que han contribuido a asentar la institución y han proporcionado material suficiente para extraer las primeras consecuencias. El presente artículo ha ofrecido una panorámica de algunas de estas actividades y de la definida orientación teórica que se les ha querido dar, siempre en relación con los planteamientos internacionales y con las prioridades de investigación y difusión en el campo del patrimonio monumental y tradicional construido con tierra.

BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA

DE HOZ ONRUBIA, J.; MALDONADO RAMOS, L.; VELA COSSÍO, F.: *Diccionario tradicional de materiales de construcción con tierra*. Madrid, 2002. Editorial Nerea.

MALDONADO RAMOS, L.: *Arquitectura construida con tierra en al Comunidad de Madrid*. Madrid, 1999. Fundación Diego de Sagredo.

MALDONADO RAMOS, L.; MONJO CARRIÓ, J.; VELA COSSÍO, F.: “La conservación de la arquitectura construida con tierra.” En *Arquitectura Vernácula, un patrimonio en peligro*, Actas del Seminario Internacional. Madrid, 1996. Instituto de Conservación y Restauración de Bienes Culturales/ICRBC.

MALDONADO RAMOS, L.; RIVERA GÁMEZ, D.; VELA COSSÍO, F. (eds.): *Arquitectura y construcción con tierra. Tradición e innovación*. Madrid, 2002. Maira (En prensa).

MALDONADO RAMOS, L.; VELA COSSÍO, F.: “Recursos bioclimáticos en la arquitectura popular española.” En *Actas del I Congreso Nacional de Arquitectura Interior*. San Sebastián, 1998. Centro de Investigación Tecnológica (CIDEMCO).

MALDONADO RAMOS, L.; VELA COSSÍO, F.: *Curso de construcción con tierra (I). Técnicas y sistemas tradicionales*. Madrid, 1999. Instituto Juan de Herrera.

MALDONADO RAMOS, L.; VELA COSSÍO, F.: *Curso de construcción con tierra (II): Vocabulario tradicional de construcción con tierra*. Madrid, 1999. Instituto Juan de Herrera.

MALDONADO RAMOS, L.; VELA COSSÍO, F.; CASTILLA PASCUAL, F.: “La técnica del tapial en la comunidad autónoma de Madrid. Aplicación de nuevos materiales para la consolidación de muros de tapia.” En *Informes de la construcción*, vol. 49. Madrid, 1998. Instituto Eduardo Torroja de Ciencias de la Construcción (CSIC).

MALDONADO RAMOS, L.; VELA COSSÍO, F.; CASTILLA PASCUAL, F.: “Lehmbauforschung in der Region Madrid”. En *Modern bauen mit lehm (Lehmbau in Europa)*. Berlín, 1998. Overall Verlag.

MALDONADO RAMOS, L.; VELA COSSÍO, F.; CASTILLA PASCUAL, F.: “Rendimiento y coste energético en la construcción de cerramientos de fábrica de adobe y bloque de tierra comprimida”. En *Informes de la Construcción*, nº 473. Madrid, 2002. Instituto Eduardo Torroja de Ciencias de la Construcción (CSIC).

MALDONADO RAMOS, L.; VELA COSSÍO, F.; RIVERA GÁMEZ, D.: *Curso de construcción con tierra (III). Nuevas aplicaciones de la tierra como material de construcción*. Madrid, 2001. Instituto Juan de Herrera.