

CONSTRUYENDO BÓVEDAS TABICADAS II BUILDING TILE VAULTS II

EDITORES | EDITORS

F. VEGAS, R. MARÍN, L. GARCÍA-SORIANO, C. MILETO



edUPV

Universitat Politècnica de València

Construyendo Bóvedas Tabicadas II

Building Tile Vaults II

Edición a cargo de | Edited by:
Fernando Vegas López-Manzanares
Rafael Marín Sánchez
Lidia García-Soriano
Camilla Mileto

Colaboradores | Collaborators:
Santiago Tormo Esteve
Arturo Zaragoza Catalán

Entidades colaboradoras | Collaborating entities

Generalitat Valenciana. Conselleria d'Educació, Investigació, Cultura i Esport
Ajuntament de València
CTAV. Colegio Territorial de Arquitectos de València
CAATIE Valencia.
Colegio Oficial de Aparejadores, Arquitectos Técnicos e Ingenieros de Edificación de València.
EMR. Estudio Métodos de la Restauración SL.
Cátedra Unesco. Arquitectura de Tierra, Culturas Constructivas y Desarrollo Sostenible

Citar como / Cite as:

Vegas López-Manzanares, F., Marín Sánchez, R., García-Soriano, L., Mileto, C. (eds.) (2022).
Building Tile Vaults II. Valencia: Editorial Universitat Politècnica de València.

Primera edición / First edition, 2022

© editores / editors:

Fernando Vegas López-Manzanares
Rafael Marín Sánchez
Lidia García-Soriano
Camilla Mileto

© de los textos y fotografías: sus autores / of texts and photographs: their authors

© de la presente edición / of this edition:

edUPV
www.lalibreria.upv.es
Ref.: 555_03_01_01

Diseño y maquetación / Design and layout:

Lidia García-Soriano
Enrique Mateo

ISBN: 978-84-904-8827-0

Depósito Legal / Legal deposit: V-782-2022

<https://doi.org/10.4995/2021.602801>



Bajo licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional
Licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International license.

Cubierta: Imagen de la construcción del Panteón de la Familia Soriano Manzanet en Villarreal. Agosto 2015.
Vegas-Mileto / Cover: Image of the construction of the Soriano Manzanet Family Pantheon in Villarreal.
August 2015. Vegas-Mileto.

Índice | Index

Prólogo	vii
Prologue	ix

I. HISTORIA Y CONSTRUCCIÓN | HISTORY AND CONSTRUCTION

Bóvedas sin cimbra: ladrillo autoportante por hojas o recargado	2
<i>Enrique Rabasa Díaz</i>	
Bóvedas de ladrillo sin cimbra en las fortalezas de las órdenes militares en el Campo de Montiel y el Campo de Calatrava (Ciudad Real).....	16
<i>Jesús Manuel Molero García, Ignacio Javier Gil Crespo, David Gallego Valle</i>	
Tile vaulting and its oriental pedigree.....	36
<i>Paolo Vitti</i>	
Bóvedas tabicadas en Al-Ándalus y el Magreb	52
<i>Antonio Almagro</i>	
Tabiques, enjutas, costillas y callejones: otra forma de ver las bóvedas tabicadas.....	66
<i>Arturo Zaragozá Catalán, Rafael Marín Sánchez</i>	
A brief history of masonry shells in India, 1786 to present	84
<i>Aftab A. Jalia</i>	
Guastavino in India	104
<i>Fernando Vegas, Camilla Mileto</i>	
Masonry vaults in vice-royal Naples. Construction persistences and discontinuities between the 16th and the 17th centuries	126
<i>Valentina Russo</i>	
Tile vaulting in Naples: first experimentations in the early 19th century	138
<i>Lia Romano</i>	
La bóveda tabicada en el futuro próximo	150
<i>Manuel Fortea Luna</i>	

II. NUEVOS USOS | NEW USES

Versatilidad de la bóveda tabicada en la arquitectura contemporánea.....	166
<i>Camilla Mileto, Fernando Vegas, Lidia García-Soriano</i>	
Escuchando a las bóvedas tabicadas	180
<i>Julio Jesús Palomino Anguí</i>	

A timbrel vaulting journey of learning from nature.....	192
<i>Peter Rich</i>	
Bóvedas tabicadas de tierra. Una alternativa para entornos poco industrializados	206
<i>F. Javier Gómez-Patrocínio, Lidia García-Soriano, Fernando Vegas, Camilla Mileto</i>	
La bóveda tabicada en Andorra.....	218
<i>Enric Dilmé Bejarano</i>	
III. INTERVENCIÓN ESTRUCTURAL STRUCTURAL INTERVENTION	
Los ensayos sobre bóvedas tabicadas de Rafael Guastavino en Estados Unidos: la necesidad de validar un sistema.....	232
<i>Esther Redondo Martínez</i>	
Las bóvedas de Guastavino en los Estados Unidos. Métodos de diagnóstico	248
<i>Berta de Miguel Alcalá, Gabriel Pardo Redondo</i>	
El mortero de cemento en la obra de Guastavino	262
<i>Fernando Vegas, Camilla Mileto</i>	
Comportamiento estructural de las cúpulas tabicadas	280
<i>René Machado</i>	
Comportamiento estructural de las bóvedas tabicadas ante los terremotos. Observaciones tras los terremotos recientes de Italia.....	288
<i>Francesco Doglioni</i>	
Las cúpulas azules. Intervenciones de conservación	300
<i>Rafael Soler Verdú, Alba Soler Estrela</i>	
Las cúpulas tabicadas armadas de Domènech i Montaner, entre el colapso y la restauración: ¿Pudieron tener otro diseño?.....	314
<i>José Luis González Moreno-Navarro</i>	
Influences and analogies between masonry arch and cross vault: from construction to seismic response.....	328
<i>Angelo Gaetani, Paulo B. Lourenço</i>	
Las Escuelas Nacional de Artes de La Habana, Cuba: uso, degradación, consolidación y restauración.....	340
<i>Michele Paradiso</i>	



Bóvedas tabicadas de BTC construidas en uno de los cursos impartidos en Burkina Faso en enero de 2018

Bóvedas tabicadas de tierra. Una alternativa para entornos poco industrializados

F. Javier Gómez-Patrocinio, Lidia García-Soriano, Fernando Vegas, Camilla Mileto
PEGASO Centro de Investigación Arquitectura, Patrimonio y Gestión para el Desarrollo Sostenible,
Universitat Politècnica de Valencia

Abstract

Considerable weight of compressed earth blocks (CEB) and their moderate compressive strength have frequently restricted their use to the construction of vertical bearing elements. However, the simplicity of their production, the low specialisation that is required to use them, and their low environmental footprint highlight the benefits of their application to other built elements. This paper gathers the technical results of two projects developed by the research group “Research, Preservation and Dissemination of Architectural Heritage” that aimed to study the possibility of using CEB to build plain tile vaults. The first of these projects was developed within the frame of the Venice Architecture Biennale 2016. The second work issues from an international cooperation project and aims to reduce the necessity of industrialised materials in the construction of CEB tile vaults. As a conclusion, this article reflects on the prospects of this technique and foresees future lines of research.

Keywords: *Compressed earth blocks (CEB), out tile vaults, international cooperation project.*

Resumen

El elevado peso propio del Bloque de Tierra Comprimida (BTC) y su moderada resistencia a la compresión han limitado en muchos casos su empleo a la construcción de muros y soportes verticales. Sin embargo, la sencillez de su producción, la baja especialización que requiere su puesta en obra y su reducida huella ecológica, hacen interesante el estudio de alternativas para su aplicación a otros elementos constructivos. En este artículo se recogen los resultados técnicos de dos proyectos desarrollados por el grupo “Investigación, Restauración y Difusión del Patrimonio Arquitectónico” con el objetivo de estudiar las posibilidades de empleo del BTC para la construcción de bóvedas tabicadas. El primero de estos proyectos se desarrolló en el marco de la Bienal de Arquitectura de Venecia de 2016. El segundo trabajo surge de un proyecto de cooperación al desarrollo y pretende reducir las necesidades de materiales industrializados en la construcción de estos elementos. A modo de conclusión, se reflexiona sobre las perspectivas de esta técnica y se anticipan las líneas de investigación que se abren tras los trabajos desarrollados.

Palabras clave: *Bloque de Tierra Comprimida (BTC), bóvedas tabicadas, cooperación al desarrollo.*

Los bloques de tierra comprimida (BTC o CEB, compressed earth blocks, en inglés) son elementos modulares y de pequeñas dimensiones que se emplean para la construcción de elementos de fábrica. Se producen por compactación en una prensa de una masa de tierra en estado húmedo. La mezcla utilizada se dosifica habitualmente con una pequeña cantidad de cemento, entre un 5% y un 8% en la mayor parte de los casos (Amáco 2015), pero también puede ser estabilizado con otros materiales como cal (Nagaraj et al. 2014), cenizas volantes o residuos vegetales (Niño Villamizar, y otros 2012). El sistema de puesta en obra de los BTC es similar al del ladrillo, y el peso de las piezas es suficientemente reducido como para que un único operario las pueda manejar con comodidad. Las dimensiones más habituales oscilan en torno a los 29 x 14 x 9 cm, para pesos de 7-8 kg por pieza, dependiendo del grado de compactación

y del tipo de tierra empleado. Por lo que respecta a sus propiedades mecánicas, se trata de uno de los sistemas de construcción con tierra con una resistencia a compresión más elevada. La normativa española de bloques de tierra comprimida recoge tres clases resistentes, con valores normalizados de 1'3 MPa, 3 MPa y 5 MPa respectivamente (AENOR 2008). Sin embargo, es habitual que las piezas cuenten con resistencias superiores a los 7 MPa.

Gracias a que el prensado reduce notablemente su porosidad, y a que estas piezas suelen ser estabilizadas con pequeñas cantidades de conglomerante, los bloques de tierra comprimida presentan una resistencia a la humedad mayor que la de la mayoría de los sistemas de construcción con tierra. Además, se trata de una técnica que acepta un amplio espectro de granulometrías, resultando probable la presencia de suelos válidos en el propio entorno de la intervención.



Figura 1. Blocadora manual para la producción de BTC en Ouagadougou.

La sencillez de su producción, que puede ser realizada a pie de obra utilizando blocadoras manuales de tamaño muy reducido (fig. 1), hacen de este un sistema óptimo para la construcción en zonas de difícil acceso o ubicadas en entornos poco industrializados. La producción de BTC no requiere del uso de combustible y, gracias a su adaptabilidad a los materiales disponibles en el entorno inmediato, permite minimizar el consumo energético debido al transporte. Se trata por tanto de materiales con una huella ecológica muy reducida que, gracias a su elevada densidad e inercia térmica, generan ambientes aislados y transpirables con un elevado nivel de confort higrotérmico (Barbeta y Navarrete 2015).

El BTC constituye un elemento constructivo solvente y de gran interés, especialmente para áreas de edificación extensiva o media, donde la construcción de edificios de gran altura no oblige a recurrir a estructuras metálicas o de hormigón armado. Resulta a su vez una técnica idónea para la ejecución de construcciones en zonas de baja industrialización, gracias a su economía en medios técnicos y a que la sencillez de su fabricación y puesta en obra la convierte en asequible para mano de obra local sin formación especializada. Por esta razón, la posibilidad de ejecutar sistemas edilicios completos empleando como elemento fundamental el BTC permitiría la construcción de edificios económicos, sostenibles, confortables y técnicamente viables, incluso en zonas de pocos recursos.

Ante la reducida resistencia a la flexión de los elementos de fábrica, el modo más natural de construir estructuras horizontales empleando BTC es el empleo de bóvedas. Sin embargo, los bloques de tierra comprimida cuentan con un peso propio elevado y resultan difíciles de aligerar debido al proceso de prensado. Como consecuencia, el empleo de las piezas en su formato habitual da lugar a pesadas bóvedas de rosca que requieren cimbras importantes para su construcción. Este es un gasto adicional que se vuelve especialmente condicionante en los entornos áridos en los que muchas veces se desarrollan los proyectos de cooperación al desarrollo –que son uno de los principales contextos en los que en la actualidad se utilizan los bloques de tierra comprimida– y que puede

llegar a comprometer la viabilidad de un sistema apropiado en todos los demás aspectos.

La adaptación de estas piezas para su empleo en la construcción de cáscaras ligeras permite reforzar este sistema precisamente en su punto débil y abre todo un abanico de posibilidades para el desarrollo de una técnica económica, sostenible y fácilmente extrapolable a entornos aislados y poco industrializados. La solvencia de las bóvedas tabicadas tradicionales en estos contextos no es desconocida, pues vivieron un periodo de recuperación tras la Guerra Civil Española (Chamorro, M. A., Llorens y Llorens 2012). Durante los años 40 y 50, la necesidad de reponer el parque inmobiliario destruido en la contienda, el aislamiento internacional de la dictadura y la carestía de acero favorecieron la recuperación de la bóveda tabicada como una alternativa económica y fiable a las estructuras metálicas y de hormigón armado para la construcción de forjados de piso en arquitectura residencial.

En este artículo se recogen los resultados de dos experiencias prácticas desarrolladas entre 2015 y 2018 por el grupo “Investigación, Restauración y Difusión del Patrimonio Arquitectónico” del Instituto de Restauración al Patrimonio de la UPV, con el objetivo de estudiar la viabilidad del empleo de plaquetas de tierra comprimida para la construcción de bóvedas tabicadas de tierra.

Optimización del trazado funicular¹

La posibilidad de emplear el BTC para la construcción de bóvedas de cañón rebajadas se abordó en primer lugar desde un punto de vista mecánico mediante un trabajo que pretendía estudiar la posibilidad de cubrir espacios de dimensión habitual en arquitectura doméstica mediante bóvedas rebajadas ejecutadas con bloques de tierra comprimida.

Los sistemas abovedados trabajan únicamente a compresión –lo que permite su construcción empleando elementos de fábrica– y acostumbran a hacerlo a unas tensiones muy bajas. Por esta razón, la resistencia de los materiales que las constituyen suele no suele ser

crítica de cara a la estabilidad de las bóvedas. Sin embargo, sus apoyos generan una serie de empujes horizontales en las cabezas de los muros en los que descansan que pueden introducir en ellos importantes esfuerzos de flexión. Este empuje horizontal puede limitarse durante el diseño de la bóveda –reduciendo su peso o peraltando su trazado– o puede ser absorbido por los elementos que la recogen.

Al plantearse el cálculo desde un material determinado, en este caso sólo era posible reducir el peso de las bóvedas menguando su sección. Sin embargo, estos sistemas resisten a causa de su forma, por lo que una sección menor requiere un trazado más preciso que evite la aparición de esfuerzos de tracción en las fábricas. De igual modo, una sección más peraltada genera una resultante más inclinada y reduce la componente horizontal del empuje; al mismo tiempo, implica un mayor consumo de espacio vertical por parte de los forjados y va en contra de la economía de la obra.

Partiendo de estas premisas, se analizaron un total de 120 modelos de bóveda, que aportaban un amplio rango de alternativas mediante la combinación de tres variables: su luz, el peralte del arco funicular que describían en su trazado y el espesor de la hoja resistente. De este modo, se trabajó con bóvedas que salvaban distancias habituales en arquitectura residencial (2, 4, 6 y 8 m) y que estaban trazadas siguiendo catenarias rebajadas con distintos porcentajes de peralte respecto a su luz (3%, 5%, 7%, 10% y 15%), obteniéndose alternativas con cinco proporciones diferentes entre transmisión horizontal de empujes y consumo de espacio vertical. Para cada uno de estos trazados, se consideraron tres espesores diferentes (9, 14 y 19 cm) y la posibilidad de que los tabiquillos –dispuestos sobre la bóveda para generar una superficie horizontal pisable– se comportaran como costillas colaborantes de BTC o fueran elementos sin papel estructural.

La estabilidad de cada uno de estos modelos se analizó por métodos de estática gráfica plana, considerando una evaluación de acciones habitual en vivienda. En todos los casos, el cálculo demostró que el espesor y el trazado de la bóveda eran capaces de albergar la línea de presiones

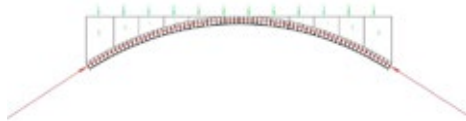


Figura 2. Análisis por equilibrio de una bóveda de BTC dispuesta a rosca, salvando una luz de 6m con un peralte del 15%.

producida por la disipación de las cargas y que las secciones eran estables sin la necesidad de emplear costillas colaborantes (fig. 2). Por tanto, se determinó que el menor de los espesores considerados sería suficiente para cubrir este tipo de bóvedas. Dado que todos los trazados resultaron ser estables, se determinó que la sección optimizada sería aquella que presentara una relación más equilibrada entre el espesor del forjado resultante y la dimensión de los elementos necesarios para absorber los empujes.

El empuje horizontal de una bóveda puede ser absorbido mediante la introducción de un armado que permita que el muro trabaje a flexocompresión o mediante la disposición de elementos que absorban la componente horizontal, como contrafuertes, tirantes o encadenados. El armado de los muros de fábrica requiere del consumo de una cantidad considerable de acero, por lo que entra en conflicto con las premisas

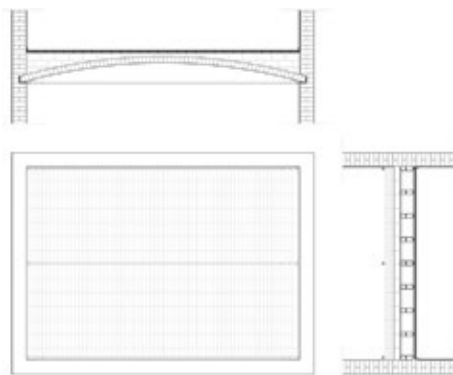


Figura 3. Detalle constructivo tipo de la solución calculada. Bóveda de BTC, formación de la superficie pisable, sistema de atirantado y encuentro con el muro.

del estudio. Por su parte, la introducción de contrafuertes implica el acodamiento de la construcción con elementos de gran masa y supone un importante aumento del material y el espacio consumidos. Por el contrario, los atirantamientos y encadenados actúan directamente en el punto en el que la bóveda entra en contacto con el muro y absorben los empujes antes de que estos sean transmitidos al soporte, requiriendo una cantidad de material mucho más reducida. Estos elementos se consideraron externos a la solución de la bóveda y se diseñaron en metal para agilizar el cálculo.

La solución planteada constaba de dos angulares alojados en el muro que recogían los apoyos de las bóvedas y tirantes dispuestos para dos metros para absorber la componente horizontal del empuje (fig. 3).

A partir de los datos obtenidos en el estudio, se determinó que los tabiquillos colaborantes no eran necesarios para garantizar la estabilidad de la bóveda. Sin embargo, su ejecución no

modificaba sustancialmente el estado tensional de las fábricas con respecto a elementos más ligeros y dotaban al forjado de una coherencia material y socioeconómica que justificaba su uso. Por último, se concluyó que los trazados con peraltes del 10% eran las alternativas que mejor conciliaban la ligereza de los elementos de absorción de los empujes con la reducción del espesor del forjado. Por ello, se estableció una horquilla de entre el 7% y el 15% como valores razonables, en función de las características de cada proyecto.

Primeras experiencias de construcción

Las primeras experiencias prácticas se desarrollaron a partir de 2015, durante una colaboración con el Massachusetts Institute of Technology en el marco de su pabellón “Beyond Bending” de la Bienal de Arquitectura de Venecia de 2016. Este trabajo implicó el diseño y construcción de una pequeña bóveda de cañón, tabicada y ejecutada en BTC (fig. 4).

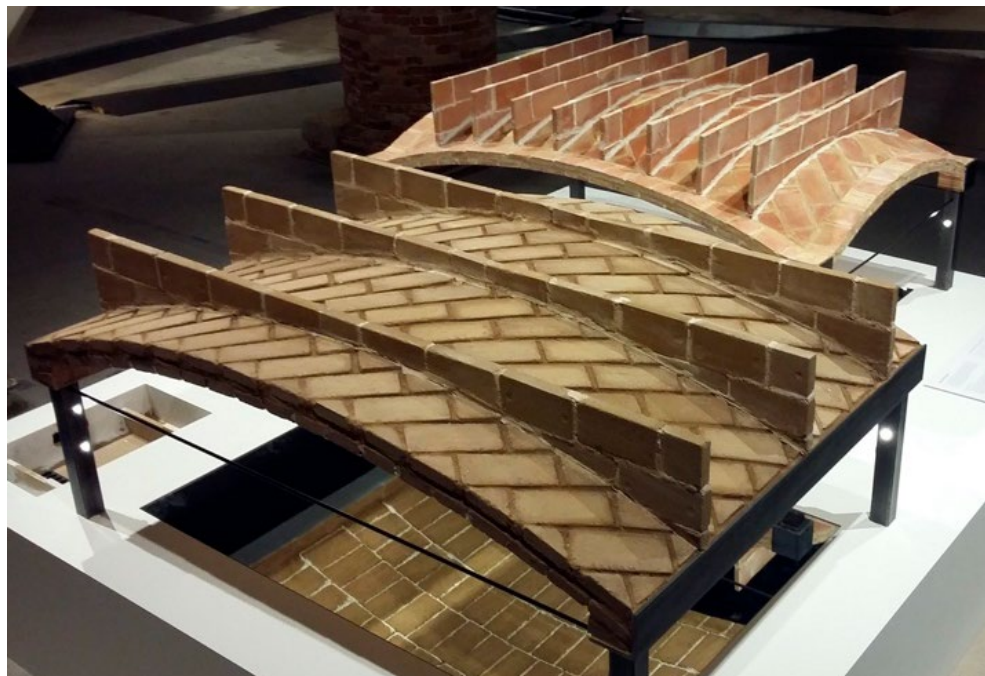


Figura 4. Bóveda tabicada de BTC expuesta en la Bienal de Arquitectura de Venecia de 2016 (Fotografía: S. Gomis).

Este elemento había de ocupar un espacio de 1'40 x 2'00 m y se trazó siguiendo una curva catenaria con un peralte del 10% en su lado mayor. Esta bóveda se había de construir sobre un bastidor metálico que la elevaría del suelo y haría de encadenado, absorbiendo los empujes horizontales. En la parte inferior del bastidor iba colocado un espejo que permitiría observar el intradós de la bóveda, razón por la que el trabajo debía ser muy limpio. Este proyecto se desarrolló en varias fases e implicó la construcción de dos bóvedas de tierra: un prototipo inicial en las instalaciones de la UPV y el modelo definitivo en el Arsenal de Venecia.

Se optó por construir bóvedas tabicadas de dos hojas y un espesor total de 7 cm, que arrojaron resultados positivos en el cálculo por estática gráfica. La primera de estas hojas iría recibida con yeso rápido y la segunda con un mortero entonado con tierra.

Bloques de tierra comprimida

Los bloques de tierra comprimida empleados en esta experiencia fueron suministrados por una empresa comercial y se ajustaban a las características establecidas en la UNE 41410:2008 (AENOR 2008). El formato de estas piezas se determinó en el proyecto y se fijó en 200 x 95 x 33 mm, dando lugar a unas plaquetas con unas características más adecuadas para la construcción de bóvedas tabicadas que las unidades de formato estándar.

El suelo utilizado para la producción de estos bloques mostraba un contenido elevado de arena gruesa (aproximadamente un 65% de su masa estaba constituido por partículas de entre 2 y 0,5 mm) y contaba con aproximadamente un 12% de finos (fig. 5). Tras ser estabilizada con un 5% de cal y un 2% de cemento, esta tierra fue prensada para dar lugar a piezas con una densidad de 2140 kg/m³. Para determinar la resistencia a compresión de estas piezas, se realizaron ensayos de compresión directa, según el procedimiento descrito en la UNE-EN 772-1:2002 (AENOR 2002). En este tipo de ensayo, el esfuerzo de compresión creciente produce una progresiva deformación lateral de las probetas, que continua hasta su fallo. Esta deformación se ve distorsionada por el rozamiento entre el espécimen y los platos de ensayo, de manera que la resistencia aparente del material es mayor cuanto menor es la distancia entre los platos (Morel, Pkka y Walker 2007). Con tal de compensar este efecto, en la Tabla A.1 de la UNE-EN 772-1:2002 se establece un factor de forma *d* que minorra la resistencia obtenida. Los cuatro ensayos, realizados a una velocidad de 0,3 MPa/s sobre probetas de 3 años, arrojaron una resistencia corregida de 8,68 kN.

Construcción de las bóvedas

La sustitución de las piezas cerámicas por plaquetas de tierra comprimida hizo necesaria la introducción de ciertos ajustes en el proceso

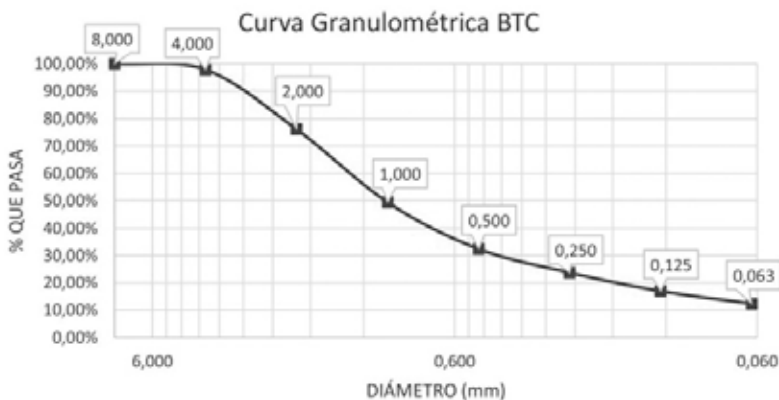


Figura 5. Resultados del análisis granulométrico de los BTC utilizados.

constructivo con respecto al sistema tradicional. En las bóvedas tabicadas cerámicas, la ligereza de las rasillas y la rapidez de fraguado del yeso permiten que las piezas sean autoportantes a los pocos segundos de ser colocadas. Gracias a esto, estos sistemas pueden ser levantados sin cimbra cuando cuentan con, al menos, una pared lateral a la que fijar las primeras piezas. Sin embargo, cuando estas bóvedas se construyen de forma completamente exenta, es habitual que se emplee una pequeña guía, un tablero colocado a plomo o un tabique provisional para sostener el primer arco de ladrillo. Tras cerrar este primer arco, el elemento auxiliar puede ser desmontado y el resto de las piezas colocadas sin necesitar más cimbrado. Sin embargo, las plaquetas de tierra comprimida resultan más pesadas que las rasillas cerámicas –las piezas utilizadas en esta experiencia pesaban aproximadamente 1,5 kg– y era necesario que el yeso fraguara aproximadamente medio minuto antes de que fueran autoportantes. Por esta razón, se optó por utilizar la guía inicial para sustentar en cada momento el arco que se encontraba en construcción. En cuanto este arco estaba completo, la guía era inmediatamente desplazada para construir el siguiente (fig. 6). Una vez completada la primera hoja, la segunda podía ser ejecutada directamente sobre ella. Esta capa de doblado aumentaba la sección resistente al tiempo que dotaba de continuidad mecánica al elemento, que dejaba de trabajar como una sucesión de arcos y pasaba a comportarse como una cáscara estructural.



Figura 6. Construcción de la primera hoja de una bóveda tabicada de BTC.

Conclusiones

A raíz de esta primera experiencia, se pudo comprobar que es viable reducir el espesor de los BTC hasta formar plaquetas, sin necesidad de incrementar el contenido de conglomerante. Esto permite ajustar el espesor mejor de la bóveda a las necesidades establecidas por el cálculo estructural, disminuyendo el consumo de material, el peso propio del elemento y reduciendo el empuje horizontal. Además, la producción de plaquetas de entorno a 3 cm de espesor permite la construcción de bóvedas tabicadas de tierra comprimida.

El mayor peso propio de los BTC hace que estos sistemas no sean tan autoportantes durante su construcción como las bóvedas tabicadas tradicionales, pero prescinden de las cimbras y permiten una notable reducción de la inversión en medios auxiliares con respecto a las bóvedas de BTC a rosca (fig. 7). El empleo de plaquetas delgadas y de una guía ligera facilita el manejo de los elementos, aumentando la velocidad de ejecución.

Bóvedas tabicadas con mortero de tierra

Entre 2016 y 2018, se sigue profundizando en esta línea de trabajo de la mano de un trabajo de apoyo a la ONG Algemesi Solidari en la construcción de una escuela en Burkina Faso (Maravilla y Ferragud 2018). El poblado de Baasneeré, donde se está construyendo la escuela, se encuentra situado en la zona predesértica del Sahel. En este entorno, los únicos materiales



Figura 7. Medios auxiliares necesarios para construir una misma bóveda de BTC, empleando un sistema tabicado (superior) o a rosca (inferior).

de construcción tradicional son la tierra, las fibras y pequeñas secciones de madera, que es un material escaso y caro. Sin embargo, a lo largo de las últimas décadas, la influencia de los modelos occidentales ha propiciado la introducción de materiales importados –como el cemento o la chapa metálica– que no responden al entorno ni a las condiciones climáticas locales. En este contexto, la escuela proyectada por la ONG Algemesi Solidari utiliza el BTC como material fundamental. Con ello pretende integrarse en el entorno y ofrecer un modelo arquitectónico alternativo que satisfaga las aspiraciones de progreso de los pobladores, sin renunciar al uso de materiales locales.

El proyecto desarrollado desde el grupo de investigación, ConBurkina², pretendía dar apoyo científico-técnico a Algemesi Solidari, mediante la investigación de posibles alternativas para la construcción de las bóvedas de la escuela y mediante la formación técnica de albañiles y jóvenes locales para la ejecución de bóvedas tabicadas de BTC. En su aplicación inmediata, ConBurkina implicó la puesta en práctica de la técnica y experiencias desarrolladas durante la Bienal de Venecia de 2016. Sin embargo, también incluyó una serie de experiencias de investigación que pretendían explorar la posibilidad de construir bóvedas tabicadas de BTC con mortero de tierra. Con ello, se pretendía mejorar la sostenibilidad de la técnica en zonas

como Baasneeré, en las que el yeso no está presente de forma tradicional.

En estas experiencias se trabajó con bóvedas tabicadas de cañón de 1,40m de luz y 66 cm de flecha, medidas establecidas en base a criterios arquitectónicos durante el diseño de la escuela. Se emplearon plaquetas de tierra comprimida de procedencia y dimensiones análogas a las utilizadas para la Bienal de Venecia. La tierra y el cemento utilizados para la fabricación de los morteros se escogieron por su similitud a los materiales disponibles en Baasneeré. Para ello, fue necesario analizar una serie de muestras de tierra procedentes de la localidad burkinesa, recogidas por los cooperantes de la asociación, y localizar un material accesible con características asemejables.

Estudio de morteros

Para la construcción de la primera hoja de las bóvedas tabicadas de tierra se planteó la utilización de un mortero de barro con un elevado contenido de arcilla. De esta manera, se esperaba conseguir una elevada adherencia inicial que permitiera minimizar las necesidades de cimbrado. Por su parte, la segunda hoja se recibiría con un mortero de tierra-cemento, capaz de aportar a la bóveda una mayor resistencia a medio y largo plazo.

Los ensayos granulométricos realizados sobre muestras de suelo de Baasneeré desvelaron un

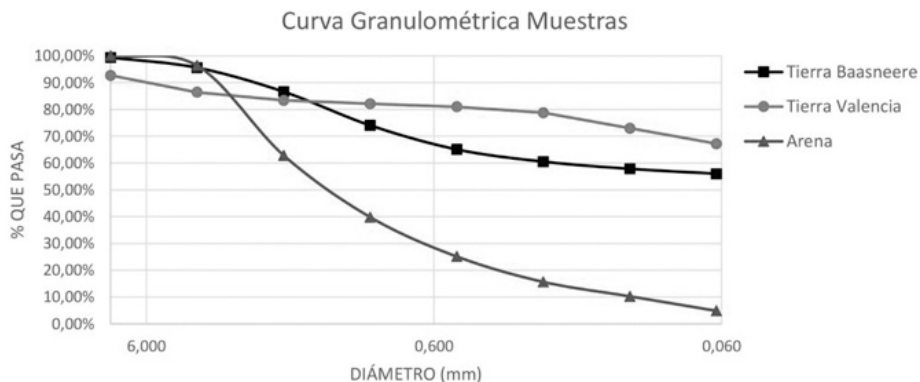


Figura 8. Granulometría comparativa de las muestras de tierra de Baasneeré y Alacuás, y de la arena utilizada para corregir esta última.



Figura 9. *Bóveda tabicada de BTC con mortero de tierra construida en la Universitat Politècnica de Valencia.*

contenido elevado de finos (aproximadamente un 56% en masa) y una proporción considerable de arena gruesa, con un 21% de la masa distribuido en partículas de entre 0,5 y 2 mm. Por esta razón, se optó por trabajar con un material local muy arcilloso que, en caso de ser necesario, pudiera ser corregido con arena para obtener una granulometría similar a la de la muestra de la población burkinesa. Después de analizar distintas tierras de diferente origen, se optó por emplear una tierra procedente de una excavación en la localidad de Alacuás (Valencia), que arrojó un contenido de finos de aproximadamente un 67% (fig. 8).

En la dosificación de los morteros mixtos se empleó un cemento CEM / 7B-M (S-L) / 42,5R. Para la realización de eventuales correcciones en la mezcla, se ha trabajado con una arena gruesa con aproximadamente un 71% de su masa distribuida en partículas de entre 4 y 0,5 mm. La dosificación precisa del mortero se ha desarrollado mediante una prueba de control de fisuras basada en la establecida en el Anexo n. 4 de la norma peruana de construcción con tierra E-80 (MVCS 2017). En este proceso se prepararon diferentes morteros de tierra (con un contenido de arena cada vez mayor) que fueron empleados para recibir, en cada caso, tres parejas de BTC. Los tres especímenes de cada mezcla fueron separados al cabo de 6, 24 y 48 horas, para observar el agrietamiento del mortero. Esta prueba se llevó a cabo inicialmente uniendo

las piezas por la tabla, tal y como establece la norma citada. Sin embargo, el mortero de tierra escogido debía ser empleado para recibir las piezas de la hoja inferior de la bóveda, que se unen a panderete. Por esta razón, las dosificaciones que dieron mejor resultado en este ensayo se volvieron a testar, uniéndolas esta vez por el canto. Con esta segunda comprobación se pretendía incrementar la proporción de mortero que se secaba en contacto directo con el aire a través de la junta y observar si se modificaba el resultado. En la primera comprobación, los mejores resultados se obtuvieron al emplear un mortero con una proporción 3:1 de tierra y arena. Sin embargo, al incrementarse la exposición al aire durante la segunda prueba, el secado era demasiado rápido y daba problemas de adherencia. Por esta razón, se optó por trabajar directamente con un mortero de tierra sin corregir. En este caso, la elevada concentración de arcilla permite que la junta conserve la humedad durante más tiempo y le aporta una buena adherencia durante el tiempo que las hojas exteriores necesitan para adquirir resistencia.

Para determinar la dosificación exacta de mortero de tierra y cemento también se desarrolló el procedimiento de ensayo recogido en la Norma E.80, trabajando esta vez con diferentes proporciones de tierra y cemento. En este caso, se optó por escoger la dosificación más pobre en cemento que, al cabo de 48 horas, no presentaba fisuras. La mezcla seleccionada se comprobó por segunda vez, añadiendo diferentes proporciones de arena gruesa. Finalmente, se decidió emplear un mortero con una proporción 3:1 de tierra y cemento, que no fue corregido con arena gruesa.

Construcción de las bóvedas

Una vez seleccionadas las dosificaciones de los morteros, se construyeron una serie de bóvedas – primero, de 90 cm de luz y 70 cm de flecha; más tarde, de las dimensiones indicadas en proyecto – para comprobar la viabilidad de la técnica. El punto de partida para la construcción de estos prototipos fue el sistema probado durante la construcción de las bóvedas tabicadas de BTC recibidas con yeso. Sin

embargo, el nuevo cambio de material volvió a requerir el reajuste del proceso constructivo. El mortero de tierra endurece más lentamente de lo que fragua el yeso. Por esta razón, se optó por incorporar una segunda guía durante la construcción de la hoja interior de la bóveda. La primera de estas guías es empleada para la ejecución del primer arco. Una vez completado, se coloca la segunda guía para levantar un segundo arco junto a él. De esta forma, la guía inicial sólo necesita ser recuperada para la construcción del tercer arco.

En este tiempo, el mortero del primer elemento ha tenido tiempo de endurecer lo suficiente como para ser resistente y se encuentra arriostrado lateralmente por el segundo arco, que todavía no ha sido descimbrado.

La construcción de la hoja inferior se puede prolongar, alternando únicamente dos guías, hasta alcanzar la longitud necesaria. La hoja de doblado, recibida con mortero de tierra y cemento se forma directamente sobre la hoja inferior y dota al elemento de continuidad estructural y de una mayor resistencia a medio y largo plazo (fig. 9).

Conclusiones

El empleo de tierra con un elevado contenido de arcilla ha favorecido un buen comportamiento del mortero de la hoja inferior de la bóveda, mostrando una adherencia superior a las pruebas realizadas con muestras más arenosas. A la hora de sondear la dosificación de los morteros, se ha observado que la cantidad de material que seca en contacto con el aire a través de la junta tiene una influencia significativa en su capacidad de agarre. Por esta razón, el ensayo habitual para el estudio de la dosificación, a partir de emparedados de piezas (MVCS 2017), no resulta suficiente por sí mismo y ha debido ser complementado con pruebas de adherencia realizadas con piezas unidas por su canto. Los resultados obtenidos hasta la fecha resultan prometedores y, tras dos años de exposición a la intemperie, los prototipos iniciales son estables y no muestran indicios remarcables de degradación. Sin embargo, este trabajo sólo puede

considerarse una aproximación preliminar y es necesario profundizar en esta técnica mediante pruebas de carga y estudios de envejecimiento. En cualquier caso, la experiencia abre vías de estudio interesantes para el perfeccionamiento de esta técnica, como la posibilidad de emplear morteros de tierra con fibras naturales, de utilizar estabilizantes alternativos al cemento o de producir plaquetas aligeradas en masa.

Agradecimientos

Las experiencias recogidas en esta comunicación han implicado a diferentes personas y entidades. Sirvan estas líneas de reconocimiento al equipo del profesor John Ochsendorf del MIT, al Block Research Group y a ODB por la oportunidad de colaborar en su pabellón “Beyond Bending”; a Salvador Tomás Márquez y Salvador Gomis Aviñó por su trabajo en la construcción de los prototipos expuestos en la Bienal de Arquitectura de Venecia de 2016; a las asociaciones Algemesi Solidari y A3B por la posibilidad de formar parte del proyecto de l’Escola de Baasneeré; y al CCD-UPV por el apoyo al proyecto ConBurkina.

Notas

- ¹ Los contenidos de este apartado se desarrollan de forma pormenorizada en el artículo “Optimización geométrica de trazados funiculares en el diseño de bóvedas de BTC para forjados” (Gomez-Patrocínio et al. 2016).
- ² Es posible encontrar más información sobre el proyecto ConBurkina en los artículos “Research experiences in cooperation and sustainable development. The case of Baasneeré (Burkina Faso)” (Mileto, Vegas, y otros, Research experiences in cooperation and sustainable development. The case of Baasneeré (Burkina Faso) 2018) y “Building workshops for empowerment and sustainable development. A training experience in Burkina Faso” (Mileto et al. 2018).

Nota: Salvo indicación contraria, las imágenes de este artículo pertenecen a los autores.

Referencias

- AENOR. (2002). *Métodos de ensayo de piezas para fábrica de albañilería. Parte I: Determinación de la resistencia a compresión*. Documento normativo, Madrid: Agencia Española de Normalización y Certificación.
- AENOR. UNE 41410. (2008). *Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo*. Documento normativo, Madrid: Asociación Española de Normalización y Certificación.
- AMÀCO. ATELIER BTC. (2015). *Fiches techniques*. Grenoble: CraTerre - ENSAG.
- BARBETA, G. y E. NAVARRETE (2015). "A pentagonal block home." *Earthen architecture: past, present and future*. Londres: Taylor & Francis Group, 31 - 36.
- CHAMORRO TRENADO, M.Á.; J. LLORENS SULIVERA y M. LLORENS SULIVERA. (2012). "Ignasi Bosch i Reitg (1910-1985): una patente para construir bóvedas tabicadas" *Construyendo bóvedas tabicadas*. Valencia: Universitat Politècnica de València, 239 - 247.
- GÓMEZ-PATROCINIO, F. J.; A. ALONSO DURÀ, C. MILETO y F. VEGAS LÓPEZ-MANZANARES (2016) "Optimización geométrica de trazados funiculares en el diseño de bóvedas de BTC para forjados." *Tierra y agua, selva y ciudad. 16º SIACOT Seminario Iberoamericano de Arquitectura y Construcción con Tierra*. Asunción: Universidad Nacional de Asunción / PROTERRA.
- MARAVILLA, J. V., y X. FERRAGUD (2018) "The school of Baasneere, the process of international cooperation." *Vernacular and earthen architecture. Conservation and sustainability*. Londres: Taylor and Francis Group, 389 - 392.
- MILETO, C.; F. VEGAS, L. GARCÍA-SORIANO y F.J. GÓMEZ-PATROCINIO (2018). "Building workshops for empowerment and sustainable development. A training experience in Burkina Faso" *EDULEARN18. 10th International Conference on Education and New Learning Technologies*. Palma de Mallorca: IATED Academy, 3993 - 3998.
- . "Research experiences in cooperation and sustainable development. The case of Baasneeré (Burkina Faso)." *VIBRArch. Valencia International Biennial of Research in Architecture*. Valencia: Universitat Politècnica de Valencia, 2018.
- MOREL, J. C., A. PKLA y P. WALKER. (2007). "Compressive strength testing of compressed earth blocks." *Construction and Building Materials*, 303 - 309.
- MVCS (2017). *Norma E.80 Diseño y construcción con tierra reforzada*. Documento normativo, Lima: Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento.
- NAGARAJ, S. B., M. V. SRAVAN, T. G. ARUN y K. S. JAGADISH (2014). "Role of lime with cement in long-term strength of Compressed Stabilized Earth Blocks" *International Journal of Sustainable Built Environment* 3, 54 - 61.
- NIÑO VILLAMIZAR, M. C., V. SPINOSI, C. A. RÍOS y R. SANDOVAL (2012). "Effect of the addition of coal-ash and cassava peels on the engineering properties of compressed earth blocks" *Construction and Building Materials* 36, 276 - 286.