

Construcción con Tierra Tecnología y arquitectura

Congresos de Arquitectura de Tierra en Cuenca de Campos
2010/2011.

Coordinadores: Félix Jové Sandoval, José Luis Sáinz Guerra.

ISBN: 978-84-694-8107-3

D.L.: VA673-2011

Impreso en España
Septiembre de 2011

Publicación online.

Para citar este artículo:

MARTÍNEZ FERNÁNDEZ, Raquel. "Sistemas económicos de techado con bóvedas de fábrica: bóveda nubia y bóveda recargada mexicana". En: *Construcción con tierra. Tecnología y Arquitectura. Congresos de arquitectura de tierra en Cuenca de Campos 2010/2011*. [online]. Valladolid: Cátedra Juan de Villanueva. Universidad de Valladolid. 2011. P. 89-100. Disponible en internet:

http://www5.uva.es/grupotierra/publicaciones/digital/libro2011/2011_9788469481073_p089-100_martinez.pdf

URL de la publicación: <http://www5.uva.es/grupotierra/publicaciones.html>

Este artículo sólo puede ser utilizado para la investigación, la docencia y para fines privados de estudio. Cualquier reproducción parcial o total, redistribución, reventa, préstamo o concesión de licencias, la oferta sistemática o distribución en cualquier otra forma a cualquier persona está expresamente prohibida sin previa autorización por escrito del autor. El editor no se hace responsable de ninguna pérdida, acciones, demandas, procedimientos, costes o daños cualesquiera, causados o surgidos directa o indirectamente del uso de este material.

This article may be used for research, teaching and private study purposes. Any substantial or systematic reproduction, re-distribution, re-selling, loan or sub-licensing, systematic supply or distribution in any form to anyone is expressly forbidden. The publisher shall not be liable for any loss, actions, claims, proceedings, demand or costs or damages whatsoever or howsoever caused arising directly or indirectly in connection with or arising out of the use of this material.

Copyright © Todos los derechos reservados

© de los textos: sus autores.

© de las imágenes: sus autores o sus referencias.

SISTEMAS ECONÓMICOS DE TECHADO CON BÓVEDAS DE FÁBRICA: BÓVEDA NUBIA Y BÓVEDA RECARGADA MEXICANA

VII Congreso de Tierra en Cuenca de Campos, Valladolid, 2010

Raquel Martínez Fernández Arquitecta*

PALABRAS CLAVE: bóveda nubia, bóveda recargadas, cúpula, sin cimbra

Resumen

A principios del tercer milenio, según UN-HABITAT, se calcula que tan sólo en las zonas urbanas, cerca de mil millones de personas en el planeta carecían de una vivienda adecuada. En los núcleos rurales hay una cifra mayor, que no se ha podido determinar. De cada 10 viviendas que se hacen en el mundo, 7 son autoconstruidas y un 18% de viviendas (125 millones) son de carácter no permanente y realizadas con estructuras de enorme fragilidad.

Alrededor del 30% de la población mundial vive en construcciones de tierra. Según el De-

partamento de Energía Americano, el 50% de la población mundial vive en una construcción de tierra cruda (Figura 1). “Aproximadamente el 50% de la población de los países en desarrollo, incluyendo la mayoría de la población rural y por lo menos el 20% de la población urbana y urbano marginal, viven en casas de tierra”. (Houben y Guillard, 1994).

En este contexto, estudiamos el sistema de bóvedas y cúpulas construidas sin cimbra, por ser un sistema que permite la construcción barata y ecológica de un techo duradero para las poblaciones más empobrecidas sin necesidad de utilizar madera para la construcción, en zonas donde ésta escasea.



Figura 1. Arquitectura de tierra en el mundo. (Fuente: CRAterre: Cultures Constructives et developpment durable, http://craterre.org/accueil:galerie-des-images/default/gallery/38/gallery_view/Gallery, fecha: 30-08-2011).

Definición

Una de las formas en las que F. Cassinello, clasifica los tipos de bóveda es según la ordenación de los ladrillos respecto al intradós. Podemos distinguir dos tipos de bóvedas: las “de rosca” (construidas con una o más roscas o fajas superpuestas; en éstas el ladrillo puede estar colocado de canto –bóvedas nubias y bóvedas recargadas mexicanas– o de cabeza); y las “tabicadas”, construidas con dos o más capas de ladrillos colocados de cara, plano o tabla, tradición constructiva procedente de Portugal y España (Figura 2).

Diremos que una bóveda es “de canto”, cuando el canto es la parte visible desde el interior del espacio que cubre.

Este estudio se centra en las bóvedas de rosca con los ladrillos colocados de canto.

Bóvedas sin cimbra: breve historia

El sistema más inmediato y más antiguo para construir bóvedas sin cimbra sería el de conformar la cimbra con un material de relleno, tierras adobes..., que posteriormente se retirarían, como al excavar una cueva.

Egipto

Levantán bóvedas sin cimbra al tener escasez de madera. La bóveda esférica es frecuente en silos de cereales y tumbas. El perfil es ojival. Se construye con anillos de ladrillo que disminuyen su diámetro con la altura. Este

ingenio es el que les permite construir sin cimbra. También construyen con bóvedas de cañón sin cimbras, ejecutadas mediante tajadas verticales. Los ladrillos se fijan con argamasa y se sostienen gracias a la adherencia y al escaso espesor del ladrillo. Conocen varios métodos para facilitar la ejecución: inclinan las capas de ladrillo, construyen con amplios salmeres el arranque del arco, utilizan secciones ojivales que reducen los empujes y a veces refuerzan la bóveda con una segunda rosca (Figura 3 y 4).

Caldea y Asiria

Desarrollan un sistema de construcción sin cimbra: bóvedas falsas construidas por tajadas verticales y por medio de ladrillos colocados apoyados sobre hiladas inclinadas. Los colocaban aún húmedos y sin argamasa, uniéndose por las fuerzas de tensión capilar debidas a la succión de la hilada seca. La generatriz resultante es bastante apuntada y perraltada (Figura 5).

Persia

La cultura persa recibe las influencias de la egipcia y la bajomesopotámica. Emplean bóvedas corridas de generatriz circular y con una gran similitud con las bóvedas egipcias. No utilizaban cimbras y trabajaban con materiales delgados para mejorar la adherencia. Transforman la planta cuadrada en octogonal por medio de trompas construidas por tajadas. Sobre esta planta van a levantar cúpulas sin encofrado volando las hiladas anulares. Como

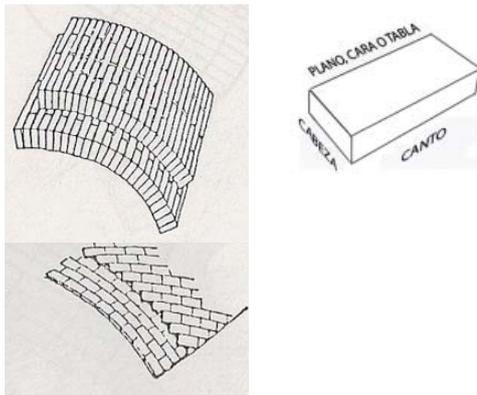


Figura 2. Bóveda de rosca y bóveda tabicada. (Fuente: Cassinello, F. *Bóvedas y Cúpulas de ladrillo*. Madrid, 1969. p21).



Figura 3. Bóvedas nubias de adobe en la zona de almacenes del Ramesseum, Luxor, Egipto. Datadas en el siglo XIII a. C. Se construyen varias capas o roscas. (Foto: C. Jiménez Pose)



Figura 4. Bóveda nubia. Aut. Alain Guilleux, 2005. Creative Commons. (Fuente: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Voute_nubienne_egypte.jpg)

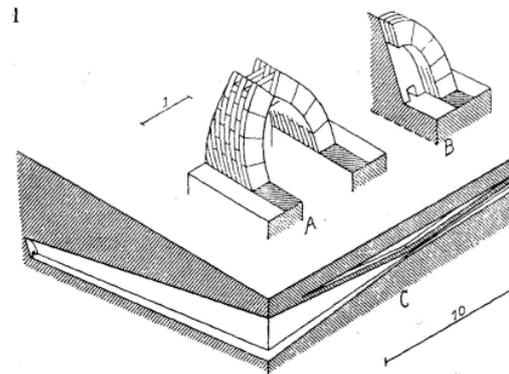


Figura 5. Bóvedas construidas sin cimbra de una galería subterránea de Khorsabad. (Fuente: Auguste Choisy, *Histoire de l'architecture*, t1. p.90. 1899).

ejemplos: los cañones corridos de Firuz-Abad; el palacio sasánida de Ctesifonte (con un arco parabólico de 26 m de luz y 32 m de altura).

Bizancio y los pueblos cristianos de oriente

Adoptan la bóveda sobre pechinas y el procedimiento de ejecución sin cimbras. El abovedado es de tres clases: la bóveda de cañón de generatriz semicircular, la bóveda esférica y la bóveda por aristas (nunca usada por los persas). Utilizan la bóveda de cañón levantando los cuatro muros hasta la línea de impostas, luego comienzan a construir simultáneamente por ambos lados, con hiladas radiales pero inclinadas. Una variante que aumenta la estabilidad consistía en inclinar las hiladas o en darles cierta conicidad (Figuras 6 y 7).

La bóveda tabicada: España, Portugal y Francia.

Lo primeros documentos de su uso son del siglo XIV. Se construyen con el ladrillo de plano formando una o varias hojas de espesor de no más de 10 cm y se ejecutan sin cimbra. Su menor peso permite reducir los muros y machones de contrarresto, pero no hay que olvidar que son obras de fábrica, no resisten bien la tracción. Han sido utilizadas en España y Portugal para cubrir naves de iglesias, hacer forjados, escaleras... A mediados del XIX se utilizaron en Francia y España para cubrir suelos y naves industriales. Fueron exportadas a EE.UU. a finales del s XIX por Guastavino, que las aplicó por ejemplo en la biblioteca de Nueva York sobre una estructura de hierro.

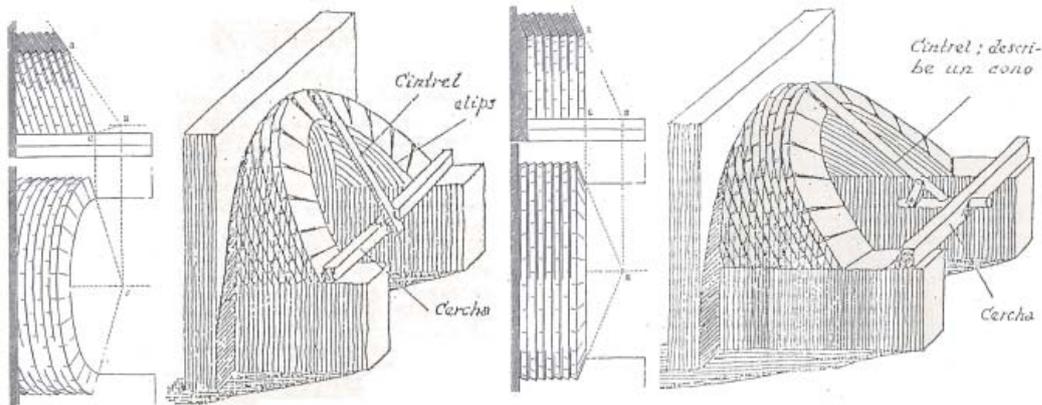


Figura 6. (Fuente: Auguste Choisy, *L'art de bâtir, chez les byzantines*. p.35. 1883).

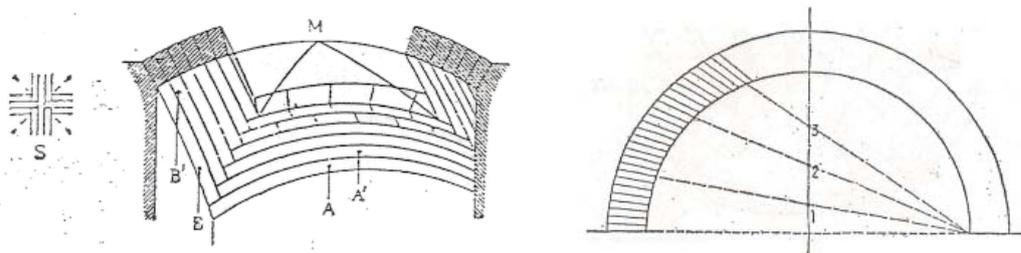


Figura 7. Ejecución de bóveda de aristas por tajadas. Aparejo bizantino anular para cúpula esférica. (Fuente: Auguste Choisy. *Histoire de l'Architecture*. Tome 2. p.9. 1899).

Relación de distintas experiencias en el mundo de construcción de bóvedas sin cimbra durante el siglo XX.

- **Hassan Fathy** (1900–1989) Arquitecto egipcio que consiguió rescatar de la oscuridad las técnicas de construcción de la bóveda nubia y de la construcción de cúpulas sin cimbra. Fue autor del proyecto del poblado New Gourna, de reubicación de 7000 habitantes de Luxor asentados en el valle de los Reyes, junto a Tebas, lugar de atracción turística mundial. Tardó en construirse cerca de seis décadas. Fathy trató de satisfacer las necesidades de cada familia individualmente, teniendo en cuenta que *"en la naturaleza, no hay dos hombres iguales"*. Este proyecto es muy conocido debido a su libro *"Arquitectura para los pobres"* que escribió veinte años después de comenzar la construcción del proyecto (Figuras 8 y 9).

- **Ramses Wissa Wasef** (1911–1974) Arquitecto y profesor egipcio interesado en revitalizar las artes tradicionales egipcias.

- **Abdel Wahid El Wakil** (1943-). Trabaja con Fathy durante 5 años. Construye ejemplos de bóvedas y cúpulas egipcias en prestigiosos proyectos: la casa Halawa, la mezquita de El-Walkil, 1981.

- **Development Workshop**, Construyen bóvedas y cúpulas con ladrillo y adobe no estabilizado. Contribuyen a la difusión de estas técnicas mediante diversas publicaciones. Las experiencias de Irán, Egipto y Túnez se constituyen como origen del Programa de Construcción sin Madera en el Sahel (Woodless Construction Programme).

- **ADUA** (Association pour le Développement d'une Architecture et d'un Urbanisme Africains). A finales de los 70 proyectan construcciones de bóvedas y cúpulas con ladrillo de adobe estabilizado comprimido. Proyecto "Popular Habitat" en Rosso, Mauritania. También construyen con domos de yeso en proyectos de vivienda en Nouakchott (1985).

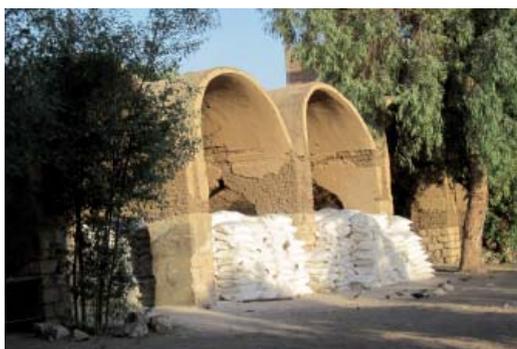


Figura 8. Mercado. New Gourna Village. New Gourna, 1945-48. (Foto: C. Jiménez Pose).



Figura 9. Plaza central. New Gourna Village. New Gourna, 1945-48. (Foto: C. Jiménez Pose).

- **AFVP** (Asociación de Voluntarios Franceses para el Progreso) desarrolla de los 70 en adelante bóvedas en el Sahel con ladrillos de tierra estabilizada.

- **Fabrizio Carola** (1931-) arquitecto italiano, construye cúpulas de doble piel con ladrillo en Mauritania y Mali.

- **Nader Khalili** (1936-2008). Arquitecto iranoestadounidense, es responsable del sistema *Geltaftan*, (*Gel*= arcilla. *Taftan*=fuego), conocido como Casas Cerámicas. Lo que hace es quemar el interior de la bóveda y el exterior para conseguir un acabado cerámico. Presenta el problema de la sostenibilidad, por el combustible necesario. También es el creador del sistema llamado Superadobe, que se construye con bolsas rellena de tierra y con alambre de fijación. Permite sistemas abovedados o rectilíneos. (Fundación Cal-Earth).

- **Dar al Islam Foundation** en Nuevo Mexico, también en EE. UU. Construyen su mezquita y escuela religiosa, diseñada por Hassan Fathy. Utilizan las técnicas egipcias.

- **CRATerre- EAG** en Grenoble, Francia (Centro Internacional para la Construcción con Tierra- Escuela de Arquitectura de Grenoble) ha contribuido incluyendo estas técnicas en sus construcciones y aportando diversas publicaciones (Figura 14).

- **Gernot Minke** (1937-). Ha realizado prototipos de viviendas antisísmicas en India con bóvedas reforzadas con bambú. También tiene otros proyectos de bóvedas antisísmicas en Argentina e Irán.

La bóveda Nubia.

Como ya se ha comentado, la bóveda Nubia es una técnica ancestral, cuyo origen se disputa entre el pueblo egipcio y el mesopotámico, que permite construir con herramientas básicas y materiales locales techados sólidos sin utilizar madera, esta particularidad la convierte en una tecnología apropiada para lugares donde este material escasea. Además de preservar el bosque, mejora el confort térmico y acústico, y permite la integración en la economía local favoreciendo la autonomía de las poblaciones.

Hassan Fathy la rescató del pasado para la construcción de muchos de sus edificios y difundió su uso por todo el mundo dándola a conocer mediante su libro "*Arquitectura para los pobres*" (Figuras 8 y 9).

Para construir una bóveda nubia con tierra, como con cualquier otro sistema, es necesario tener en cuenta la estructura completa del edificio de abajo a arriba y las condiciones del lugar en el que se va a ubicar la construcción, la disponibilidad de material, mano de obra...

Los muros y cimientos se construyen con grandes bloques de adobe, de unos 38x19x24 cm. El peso estimado de un ladrillo promedio de un muro será de unos 18 kg. Los muros y cimientos deben de ser consistentes para soportar el peso de la bóveda, del orden de unos 60 cm de anchura. Los ladrillos de la bóveda son más pequeños, de unos 20x15x6 cm (2'5 kg). El mortero se realizará con barro. Los ladrillos serán regulares y sin deformaciones. Podrán mejorarse con cemento. Se han lleva-

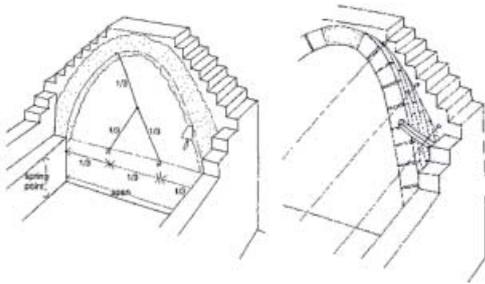


Figura 10. Alternativas al sistema de trazado y construcción de una bóveda nubia: trazado con cables y cables guía. (Fuente: JOHN NORTON, *Development Workshop. Woodless Construction. Unstabilised Earth Brick Vault and Dome Roofing without Formwork. Volume 9 · Number 2. p 21 y 22*).



Figura 11. Constructor africano ayudándose del cable de trazado. (Fuente: T. GRANIER, A. KAYE, J. RAVIER AND D. SILLOU. *The Nubian Vault: Earth roofs in the Sahel. P9*).

do a cabo construcciones con BTC y también con ladrillos comerciales.

La bóveda nubia se parece a una catenaria invertida. Funciona a compresión, no resiste bien las tracciones, al contrario que un cable. Cuanto más apuntada es, menos esfuerzos horizontales transmite en los apoyos. La curvatura de la bóveda, la inclinación con la que se construya cada arco y el espesor del mortero es lo que consigue que se pueda construir sin necesidad de apeos.

El muro frontal sobre el que descansa la bóveda ha de ser suficientemente ancho y sólido, para transmitir el empuje al suelo. Una manera de contrarrestar el empuje al que estará sometido es levantándolo con una ligera inclinación hacia la bóveda del orden de 1 cm cada metro de altura. Otra manera, es contrarrestar ese empuje con contrafuertes, o confiar en la forma de un tejado adyacente.

Una vez que se ha construido el muro frontal en el que se apoyará se comienza dibujando el perfil que tendrá la bóveda en el muro. Para ello podemos auxiliarnos de una plantilla dibujando el perfil con una cadena y luego invirtiendo el dibujo, o bien auxiliarnos de cuerdas que ayuden al trazado. También se pueden colocar cables guía para mantener la regularidad del trazado (Figuras 10 y 11).

Un cable auxiliar permite situar el eje de la bóveda y con otro cable que se irá desplazando a lo largo de este eje se puede obtener la localización exacta de cada ladrillo a colocar. Otra manera sería hacerlo con una barra y un cable

que se vaya desplazando sobre el arranque del arco. El ladrillo se fijará sobre las caras, es decir, quedará visto el canto desde el intradós de la bóveda. Es importante que los sucesivos arcos a construir queden ligeramente inclinados hacia el muro frontal. Primero se comienza por los laterales poniendo una capa con un ladrillo ligeramente inclinado (unos 60°), la siguiente ladrillo y medio, la siguiente 2, así hasta conseguir trazar un arco entero. Después es cuestión de seguir construyendo arcos hasta completar la bóveda. Colocar los ladrillos en la clave es más difícil porque hay que esperar a que el mortero seque, así que se alterna construyendo los laterales o los contrafuertes.

La bóveda nubia puede ser cubierta vista o aterrazada si se rellenan los riñones, también puede ser forjado. Si la bóveda va a servir como cubierta, se debe proteger de la humedad para hacerla estanca. Puede hacerse con una lona plástica y un enlucido que proteja a la misma de los rayos del sol, o bien con mortero de cemento o con alquitrán.

El intradós puede revestirse también con mortero de cemento o cal coloreada que lo proteja de los insectos.

En la actualidad asociaciones como “*La Voûte Nubienne*”, o *Development Workshop* (DW) hacen uso de esta tecnología y tratan de difundirla entre los habitantes más desfavorecidos de países de la zona sub-sahariana, como Burkina Faso, donde los problemas derivados de la desertificación y la explosión demográfica afectan a un gran número de población. También se ha difundido por otros países: Malí,

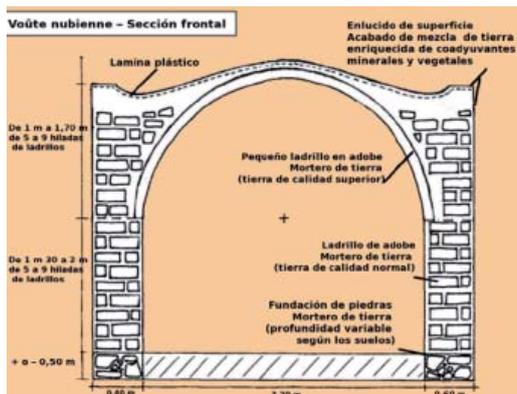


Figura 12. Sección constructiva para una bóveda nubia. (Fuente: T. GRANIER, A. KAYE, J. RAVIER AND D. SILLOU. *The Nubian Vault: Earth roofs in the Sahel*. p4).



Figura 13. Iglesia en Petit-Bale, Burkina Faso. Vigas y pilares de hormigón. (Fuente: T. GRANIER, A. KAYE, J. RAVIER AND D. SILLOU. *The Nubian Vault: Earth roofs in the Sahel*. p7).

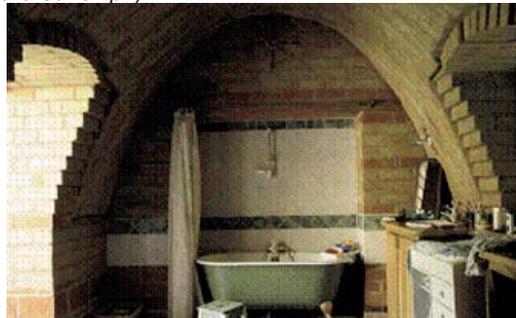


Figura 14. Casa de habitaciones en el sudoeste. Arquitecto Alain Klein. Construida con bóvedas nubias 4100 BTC 29,5x14x7,5 y bóvedas de aristas 14000 BTC 22x11x5. Francia. (Fuente: SAMUEL DUGELAY CRA-Terre-EAG. Francia © ECOBATIR, todos los derechos reservados, diciembre 2002. "Maison d'habitation dans le sud-ouest, construite en blocs de terre comprimée sous un bon chapeau". p2).



Figura 15. Bóveda nubia, taller de construcción. (Fuente: *The Swan House and Adobe Construction Lab Sales Presentation*. Presidio, Texas. Big Bend Country, reachable by scenic route only. Workshop Photos. Workshop Photo Archive 2005 - 2008).

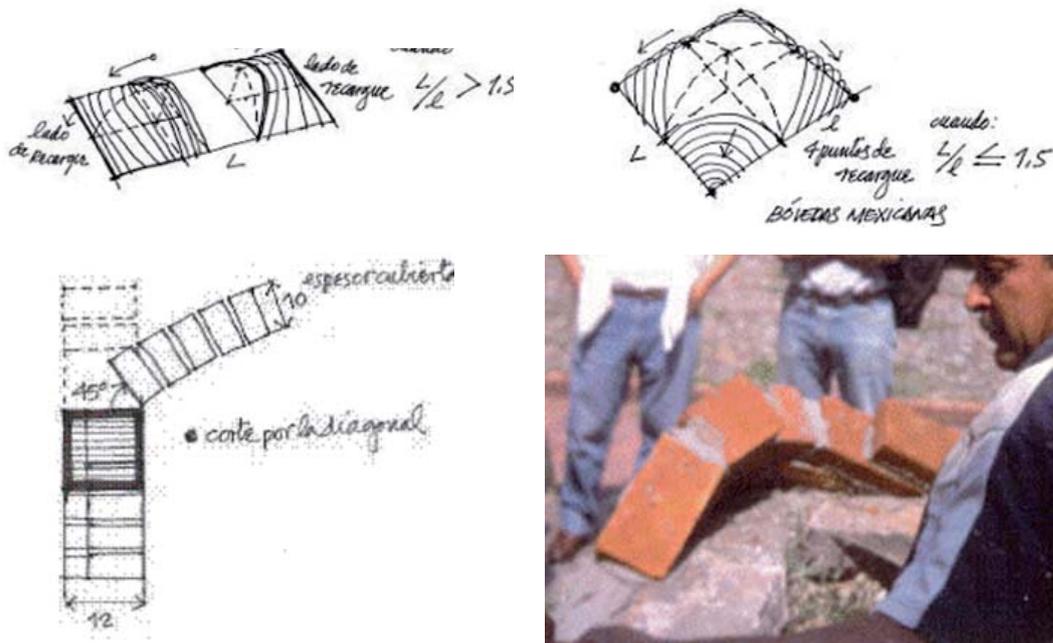
Madagascar, Togo... El objetivo de esta asociación es lograr que las poblaciones se apropien de la técnica, antes de retirarse paulatinamente según la hagan suya. (Plazo: 20 años, 10.000 albañiles formados y 500.000 viviendas con techos de tierra en la zona subsahariana).

Su página web consta de instrucciones detalladas de cómo construir una vivienda de una luz menor de 3,25 m con una bóveda nubia, proporcionando las dimensiones adecuadas para la cimentación y los muros. Se dan instrucciones precisas del sistema de construcción de la bóveda, con videos y fotografías, y de cómo acabar la superficie de las mismas. Además se indica la cantidad de material necesario para una construcción estándar de 52 m², la mano de obra necesaria y el tiempo aproximado de construcción (Figura 12).

También ha sido posible combinar estas técnicas con otro tipo de estructuras más modernas como el hormigón, para crear espacios más amplios (Figura 13).

Estas experiencias han sido probadas en otros lugares del mundo. Por ejemplo en Francia, el arquitecto Alain Klein ha construido bóvedas nubias con 4100 BTC 29,5x14x7,5. En este proyecto un problema que había con el ambiente sonoro se ha compensado con tapices murales (Figura 14).

Otra experiencia interesante es la que lleva a cabo Simone Swan, que colaboró y fue estudiante de Fathy. El grupo de Swan difunde esta técnica entre Estados Unidos y México. (Rio Grande Valley) (Figura 15).



.Figura 16. Bóveda experimental en Ciudad Universitaria. Facultad de Arquitectura, México D.F. 2002. El ángulo de inclinación en el arranque es de 45°. Curso teórico práctico "Curvas de suspiro y barro" Expositor A. R. Ponce. Artesano Ignacio Dorantes Espino. (Fuente: A. RAMÍREZ PONCE. *Arquitectura propia*. Cubiertas de ladrillo "recargado". Imágenes de p. 8 , 9 y 11).

La bóveda recargada mexicana

Aunque existen ciertas diferencias en cuanto a la manera de construcción, se relata aquí esta técnica por estar directamente relacionada, a nuestro entender, con la de la técnica de la bóveda nubia. Se resume a continuación en qué consiste dicha técnica. Para ello nos hemos basado en artículos de los arquitectos mexicanos Alfonso Ramírez Ponce y Ramón Aguirre Morales.

Esta tradición constructiva también se conoce como de las "bóvedas del bajo" y forma parte de la arquitectura autónoma mexicana. Se utiliza en la zona central y occidental de México. Hay dos poblaciones que se disputan su origen: San Juan del Río (Querétaro) y Lagos de Moreno (Jalisco), curiosamente en la misma latitud que el pueblo nubio.

Las cubiertas recargadas o con ladrillos a rosca son aquellas que se construyen con el la-

drillo de canto. La bóveda nubia (cilíndrica o cilíndroidal) y la bóveda recargada mexicana (esférica o esferoidal) son bóvedas recargadas y trabajan a compresión. Como sabemos, las bóvedas rebajadas se construyen por encima de los 51-52°. La zona por debajo de este ángulo se evita, porque es donde aparecen las tracciones, aunque bastaría con ejecutar un buen zuncho de hormigón para compensar estas fuerzas de tracción. Al igual que la bóveda nubia, esta bóveda o cubierta cupoidal no precisa de cimbra para su construcción, y posee un bajo costo lo cual la convierte en una tecnología apropiada para lugares donde escasea la madera y no hay demasiados recursos económicos.

El ladrillo utilizado puede ser de distintos tipos, de barro, BTC (mejorado con cemento: nueve partes de tierra y una de cemento) o el ladrillo común comercializado. Con el fin de que se aligere, las dimensiones aproximadas de un ladrillo para bóveda son de 20x10x5 cm



Figura 17. Construcción una cúpula recargada. México. (Fuente: A. RAMÍREZ PONCE, R. RAMÍREZ MELÉNDEZ. *Curves of Clay: Bóvedas del Bajío*. p.5).



Figura 19. Clínica Hospital Popular. La Villa, Mexico. D. F. Arq. A. Ramirez Ponce. (Fuente: A. RAMÍREZ PONCE. *Arquitectura propia. Cubiertas de ladrillo "recargado"* Imágenes de n. 14)

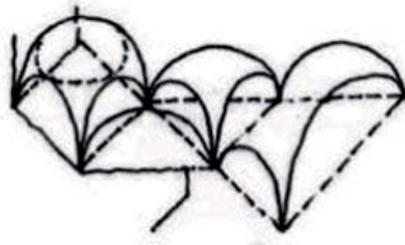


Figura 18. Clínica Hospital Popular. La Villa, Mexico. D. F. Arq. A. Ramirez Ponce. (Fuente: A. RAMÍREZ PONCE. *Arquitectura propia. Cubiertas de ladrillo "recargado"*. Imágenes de p. 10).

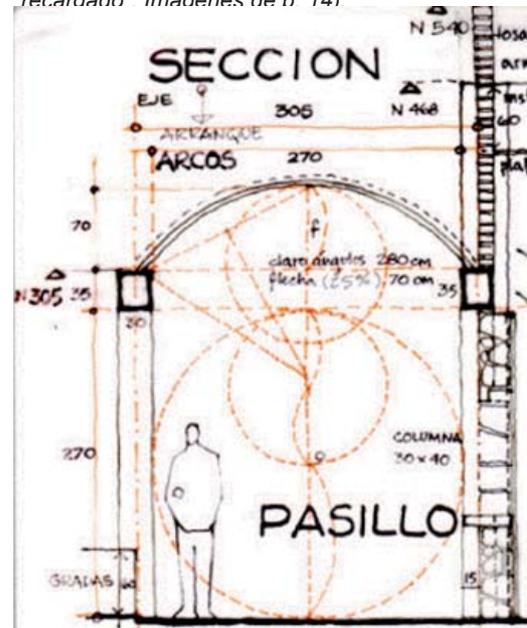


Figura 20. Sección constructiva. (Fuente: A. RAMÍREZ PONCE. *Arquitectura propia. Cubiertas de ladrillo "recargado"*. Imágenes de p. 11).

(1,5 kg), también se puede emplear el común de 24x12x6 (2,6 kg). El mortero deseable es una mezcla de cemento, cal y arena en una proporción 1:1:8. El ladrillo ha de pegarse en seco para aumentar la adherencia.

Generalmente, en una planta de forma cuadrada o rectangular la construcción se iniciará en las esquinas, con un ángulo de inclinación de unos 45° que luego se incrementará. En el caso que el lado mayor es más largo que vez y media el lado menor, se inicia desde ambos laterales (este caso sería el de la bóveda nubia). Estas cúpulas se asemejan a secciones esféricas pero no lo son, su perímetro son líneas rectas. La técnica consiste en caer o recargar el peso de cada ladrillo sobre el anterior. Su estabilidad se debe a ese recuste (45°). Es como una especie de dominó caído, cada pieza se sustenta en la anterior. (Figuras 16 y 17).

Esta técnica constructiva permite que el perímetro pueda ser irregular y cubrir espacios

de grandes luces sin refuerzos adicionales (hasta 10 m) (Figuras 18 y 19). A pesar de su aparente complejidad es una técnica sencilla y obliga a pensar tridimensionalmente los espacios (la altura ha de ser proporcional a las dimensiones de la planta). La flecha de la cubierta ha de ser directamente proporcional a la dimensión menor por cubrir (de un 20 a un 25% menor). Por ejemplo, si la luz menor a salvar es de 3 m, entre 60 y 75 cm. (Figura 20).

Ventajas e inconvenientes del uso de las técnicas sin cimbra.

Debido a su forma, las bóvedas sin cimbra son estructuralmente autoportantes y permiten salvar luces evitando el uso de forjados. Pueden servir como soporte de una superficie plana, rellenando los riñones hasta formar una superficie plana, techo o terraza o bien como cubierta, en este caso es necesaria una capa de estanqueidad, un mortero rico. Debe evitarse su uso si no se ha previsto como protegerlas en áreas inundables (el problema de las construcciones de tierra es el agua). Sin embargo funcionan bien en lugares ventosos.

Como ya se ha dicho, existen técnicas constructivas para evitar el soporte auxiliar o encofrado, la cimbra, que tradicionalmente se hacía de madera. En lugares donde escasea este material, estas técnicas resultan muy útiles, pues además de abaratar el costo final, su uso no requiere de la madera, ni para salvar las luces, ni para los cimbreados, ni para los apeos.

Los materiales con los que se construyen las bóvedas pueden ser diversos como ya hemos visto, la elección debería hacerse dependiendo de su escasez o su abundancia y del sistema de construcción elegido. El material que se propone en este estudio, teniendo en cuenta que una parte de la población más empobrecida vive en viviendas de adobe, es la fábrica de ladrillo crudo, aunque podría ser también un adobe estabilizado con cemento o un ladrillo comercial. La ventaja de construir las bóvedas con adobe, se debe en primer lugar a ser un material que no precisa de cochura, por tanto tampoco necesita de madera para la combustión, basta con secar los ladrillos al sol. Además es un buen aislante térmico y acústico, por lo que no precisa de aislamientos suplementarios. Por estas razones y por su fácil disponibilidad, se convierte en un material económico.

La mano de obra necesaria para su construcción tiene un alto grado de eficiencia, pues sólo se necesitan dos horas por hombre (3-4 veces menos que con hormigón), en promedio, para construir un metro cuadrado de cubierta. Una razón más para reducir su costo, que está entre el 50 y el 60 % de una losa común de concreto de menos de 4 m de luz. Por el contrario, necesitan cierta especialización, aunque la técnica es bastante sencilla. Son técnicas utilizadas en el hábitat tradicional,

no buscan hacer alardes técnicos, por eso se manejan luces pequeñas, (<4m) donde la experiencia les dice que la obra es estable. Introducir una nueva técnica y conseguir que los lugareños la hagan suya es costoso. Hay que saber adaptar la técnica al lugar y las capacidades de los aprendices.

Por otra parte, las bóvedas son menos calientes que los techos planos, la curvatura permite aumentar el movimiento del aire que pasa por encima. Para aprovechar esta pérdida natural de calor hay que colocar las bóvedas en dirección perpendicular a la del viento dominante. Un techo abovedado permite que el aire caliente ascienda más alto, lo cual proporciona un ambiente más fresco en regiones áridas. Resulta muy útil dejar una apertura en la parte superior para permitir que salga este aire.

Pueden producirse efectos acústicos no deseados, aunque pueden ser subsanados. Las bóvedas y cúpulas de tierra requieren mantenimiento y cuidados en la superficie exterior, para protegerlas del agua, en el caso de que sean cubiertas. Hay que asegurarse de que estos se realizarán. En definitiva, estas bóvedas sin cimbra de las que venimos hablando resultan ser un sistema de techo económico, ecológico, útil, firme y bello y por tanto recomendable para los empobrecidos y para los no tan empobrecidos.

Bibliografía

- BLANCO ARISTIN, Javier. *Bóvedas de Cañón: historia, evolución formal y construcción*. <http://www.arquired.es/users/revista/bovedas.htm>
- BORGES RAMOS, Juan. *Tecnologías de construcción con tierra*. UPM, Bocegillas, 2010
- CASSINELLO, Fernando. *Bóvedas y Cúpulas de ladrillo*. Madrid, 1969.
- CHOISY, Auguste. *L'Art de bâtir chez les Byzantins*. Paris, 1883. http://www.augustechoisy2009.net/fr/documentos.php?id_nav=5
- CHOISY, Auguste. *Histoire de l'architecture, t 1*. Gauthier – Villars. Paris, 1899. http://www.augustechoisy2009.net/fr/documentos.php?id_nav=5
- FATHY, Hassan. *Architecture for the poor: An Experiment in Rural Egypt*. University of Chicago Press, 1976. <http://www.hassanfathy.webs.com/books-e.html>
- FERNANDEZ HUIDOBRO, Rafael. *Apuntes de construcción*. 2º curso. Madrid, 1946-47.
- GALVEZ HUERTA, Miguel Angel. *Bioclimatismo y construcción con tierra en la obra de Hassan Fathy: el ejemplo de la Nueva Gourma*. *Arquitectura y construcción con tierra*. In: "Arquitectura y construcción con tierra: tradición e innovación". p. 33-51, Madrid, Mairea, 2002.
- GORDON, Claire. *Technical Notes. Unstabilised earth brick vaults and domes in the Sahel*. *Development in Practise*. Vol. 3. Nº 2. Junio, 1993. <http://www.jstor.org/pss/4028958>
- HUERTA, Santiago. *Arcos, bóvedas y cúpulas Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica*. UPM, Madrid, 2004. <http://oa.upm.es/1136/>
- HUERTA, Santiago. *Mecánica de las bóvedas de fábrica: el enfoque del equilibrio*. *Actas del II Congreso Internacional*. Consorcio de Santiago. http://oa.upm.es/565/1/X-1594_PDF._Huerta_2005._Enfoque_del_equilibrio.pdf
- HUERTA, Santiago. *Mecánica de las bóvedas tabicadas*. <http://oa.upm.es/567/>
- HUERTA, Santiago. *La mecánica de las bóvedas tabicadas en su contexto histórico: la aportación de los Guastavino*. En *Las bóvedas de Guastavino en América*. Instituto Juan de Herrera, Madrid, 2001. <http://oa.upm.es/538/>
- MINKE, Gernot. *Manual de construcción para viviendas antisísmicas de tierra*. Kassel, 2001. <http://www.gernotminke.de/veroeffentlichungen/veroeffentlichungen.html>
- NORTON, John. *Woodless Construction. Unstabilised Earth Brick Vault and Dome Roofing without Formwork*. *Development. Workshop. Building Issues*. Volume 9. Nº 2, 1997. <http://www.sheltercentre.org/library/Woodless+Construction+Unstabilised+Earth+Brick+Vault+and+Dome+Roofing+without+Formwork>
- RAMÍREZ PONCE, Alfonso. *Curvas de suspiro y barro. Una técnica milenaria y moderna*. CYTED Ciencia y Tecnología para el desarrollo. *Transferencia tecnológica para el hábitat popular*. <http://www.dtic.upf.edu/~rramirez/Arponce/CYTED.pdf>
- RAMÍREZ PONCE, Alfonso. *Arquitectura propia. Cubiertas de ladrillo "recargado"*. México. *Un techo para vivir: Tecnologías para viviendas de producción social en América Latina*. Proyecto XIV.5 con Techo. Programa 10x10. Pág. 480-486. Barcelona, 2005. <http://www.dtic.upf.edu/~rramirez/Arponce/trab1.pdf>
- ROTONDARO, R. *Arquitectura de tierra contem-*

- poránea: tendencias y desafíos. Apuntes. Vol 20, nº 2. 2007. <http://132.248.9.1:8991/hevila/ApuntesBogotá/2007/vol20/no2/13.pdf>
- SWAN, Simone. Hassan Fathy. Hassan Fathy 1900-1989: The Prophet of Mudbrick. Yale University, 1991
<http://www.adobealliance.org/storage/Hassan.pdf>
- TORROJA, E. Razón y ser de los tipos estructurales. Madrid CSIC. Madrid, 1984.
- VAN BEEK, G.W. Arcos y bóvedas del Próximo Oriente. Artículo de la Revista Investigación y Ciencia 132. Pág 76-84 1987.
- VAN LENGEN, Johan - Manual del arquitecto descalzo. Cómo construir casas y otros edificios. México D.F. 1982
- VV. AA, AGUIRRE MORALES, Ramón; CHÁVEZ R., Alma Angélica. Bóvedas mexicanas autoportantes. Manual de procedimientos.
- VV.AA. GRANIER, T. / KAYE, A./ RAVIER, J. / SILLOU, D. The Nubian Vault: Earth roofs in the Sahel. AVN. Ganges.
http://lavoutenubienne.org/IMG/pdf_AVN_paper_Ghardaia_vs2-lite.pdf
- VV.AA. PLACE, V. / THOMAS, F.: Ninive et l'Assyrie: avec des essais de restauration. 1867.
- VV.AA. RAMÍREZ PONCE, A. / RAMÍREZ MELÉNDEZ, R. Curves of Clay: Bóvedas del Bajío.
<http://www.dtic.upf.edu/~rramirez/Arponce/Nexus04.pdf>
- VV.AA. SÁNCHEZ ALONSO, Eduardo. Mesopotamia. Arcos y bóvedas del Próximo Oriente. <http://www.ite.educacion.es/w3/eos/MaterialesEducativos/bachillerato/arte/arte/x-antigu/mes-arco.htm>
- ARTIFEXBALEAR. Vínculos a artículos sobre bóvedas y cúpulas. <http://www.artifexbalear.org/etexts.htm>
- ASOCIACIÓN LA VOUTE NOUBIENNE Sobre la construcción de la bóveda Nubia.
<http://www.lavoutenubienne.org/>
- CAL-EARTH. The California Institute of Earth Art and Architecture. Sobre N. Khalili, y los sistemas Geltaftan y Superadobe (construcción con sacos de tierra). <http://calearth.org/>
- CRATERRE. Publicaciones. Centro Internacional para la Construcción con Tierra- E. de Arquitectura de Grenoble.
<http://terre.grenoble.archi.fr/livresPUBLI.php>
<http://www.eartharchitecture.org/index.php?/categories/4-Books-on-Earth-Architecture>
<http://www.maison-construction.com/la-terre/realisation-d-une-maison-en-blocs-de-terre-comprimee-associee-a-une-serre-ossature-bois.html>
- DEVELOPMENT WORKSHOP FRANCE. Construction sans bois. <http://www.dwf.org/index.php/en/downloads/>
- Edificios construidos con sacos de tierra.
<http://www.earthbagbuilding.com/articles.htm>
- S. SWAN Y HASSAN FATHY. Diversos artículos.
<http://www.adobealliance.org/>
- WOODLESS CONSTRUCTION PROGRAM. Librería digital de imágenes y publicaciones de arquitectura. <http://archnet.org/library/images/>
- El arte de construir: las técnicas y los hombres. De "Arquitectura tradicional mediterránea" Cap.3. Proyecto CORPUS, financiado por el programa MEDA de la Unión Europea.
http://www.meda-corpus.net/libros/pdf_livre_atm/atm_esp/03-atm_esp.pdf
- Autoconstrucción, bioconstrucción y ecología solidaria: diversos artículos
<http://www.sallavor.org/6.html>
- SAVE HASSAN FATHY'S NEW GOURNA.
<http://documentbook.com/fathy-pdf-4.html>

Notas

* **Raquel Martínez Fernández**, Arquitecta. Master y Especialista en Restauración Arquitectónica por la E.T.S. de Arquitectura. Universidad de Valladolid. Especialista en Cooperación para el Desarrollo de Asentamientos Humanos en el Tercer Mundo. por la Universidad Politécnica de Madrid. UPM. ICHab.

Cátedra UNESCO. Ha participado como ponente en los congresos de Arquitectura en Tierra de Cuenca de Campos del 2009 y 2010. Colaboró en el Proyecto BIPE. Bienes de Interés Patrimonial Etnográfico de Castilla y León, encargándose de la provincia de Segovia.. <raqmartinez@gmail.com>