

Construcción de prototipo de cúpula de adobe tecnificado

Prototype building adobe tech dome

MERCEDES RAMÍREZ-RODRÍGUEZ*, JESÚS AGUILUZ-LEÓN**, RAMÓN GUTIÉRREZ-MARTÍNEZ***

RESUMEN. Como una alternativa a la construcción de adobe, este artículo introduce un criterio constructivo de una cúpula a escala real, propuesto por los especialistas de la construcción y los profesores de la Facultad de Arquitectura y Diseño de la UAEM. Asimismo, se espera que el presente escrito constituya un referente que promueva una profunda reflexión sobre la construcción y utilización de una técnica mixta en el ámbito académico porque, en las unidades de aprendizaje referentes a la construcción, dicha técnica no tiene “carta de reconocimiento” en la academia, de ahí que su enseñanza sea prácticamente nula en la mayoría de las escuelas de arquitectura en México.

ABSTRACT. As an alternative to the construction of adobe, this article introduces a constructive approach to a dome-scale proposed by the construction specialists and teachers of the Faculty of Architecture and Design uaem. It is also expected that this letter constitutes a benchmark that promotes a deep reflection on the construction and use of mixed media in academia because in the learning units concerning the construction, this technique has “letter of recognition” in academia, hence their education is negligible in most architecture schools in Mexico.

Palabras clave: escala real, prototipo cúpula, técnica mixta.

Key words: full-size, prototype dome, mixed techniques.

Fecha de recibido:
4 septiembre 2015
Fecha de aceptado:
9 octubre 2015

* Universidad Autónoma del
Estado de México, México
merrramirez@yahoo.com.mx

** Universidad Autónoma del
Estado de México, México
fad_pydes@yahoo.com.mx

*** Universidad Autónoma del
Estado de México, México
dr.ramongutierrez@yahoo.com.mx



Fotografía 1. Edificación correcta de la cúpula con técnica mixta.
Fuente: Información propia.

Introducción

Las bóvedas son estructuras apropiadas para cubrir espacios arquitectónicos amplios mediante el empleo de piezas pequeñas (Bassegoda, 1979). Su geometría puede ser de simple o doble curvatura, un ejemplo de geometría simple se encuentra entre las bóvedas de cañón, y en las de curvatura más compleja las de arista (cruce de dos bóvedas de cañón). En ocasiones, las bóvedas poseen una planta cuadrada o rectangular y suelen construirse con soportes en su interior en forma de arcos formeros.

En edificaciones modernas, el término *bóveda* se ha extendido y por herencia el concepto de “bóveda de fábrica” se ha aplicado a estructuras construidas con cubiertas curvadas en donde el espesor es muy pequeño comparado con el ancho y el largo,

también denominadas *cáscaras* o *cascarnes* (Bassegoda, 1979). En las “bóvedas de fábrica”, las piezas trabajan a compresión, en estas modernas estructuras el trabajo es fundamentalmente por flexión.

La geometría catenaria empleada en las matemáticas y en la arquitectura para designar la curva cuyo trazo sigue la forma que adquiere de manera natural una cadena, sujeta por los extremos sometidos a las fuerzas de gravedad.

El arco catenario reproduce exactamente la morfología de una curva catenaria invertida. Todas las características matemáticas de la catenaria se conservan cuando su gráfica se invierte, por lo que se convierte en la forma ideal para el arco que se soporta a sí mismo. Del arco catenario se derivan los arcos funiculares que tienen también óptimas características constructivas y que se

pueden obtener con facilidad reproduciendo (invertidos) los efectos de cargas puntuales sobre una curva catenaria.

Uno de los mayores ejemplos de aplicación y funcionalidad de este sistema de arcos son las obras desarrolladas por Antonio Gaudí, quien desarrolló estos sistemas de forma exitosa en sus obras más conocidas.

El problema a resolver cuando se emplean bóvedas es dimensionar correctamente los apoyos de arranque para los permanentes empujes horizontales, que surgen desde la línea de unión entre la bóveda y el apoyo de arranque. Por ello, el diseño de las plantas de las bóvedas es necesario considerar el contrarresto, por una o varias formas de los empujes.

Las bóvedas se componen de diversas partes (figura 1), cuyos nombres tradicionales son:

- Apoyos: partes de los muros o pilares sobre los que descansa la bóveda.
- Puntos de arranque: arcos que componen la bóveda.
- Dovelas: piezas elementales que componen la bóveda.
- Clave: dovela central que cierra la bóveda.
- Salmeres: dovelas en las líneas de arranque de la bóveda.
- Nervaduras: arcos de dovelas independientes de los tímpanos en las aristas.
- Luneto: abertura practicada en la bóveda de otra bóveda que penetra en ella.

Objetivo y alcance

En este artículo se presenta el proceso de construcción de una cúpula a escala real mediante materiales sustentables para una gama de diseño de envolventes del espacio.

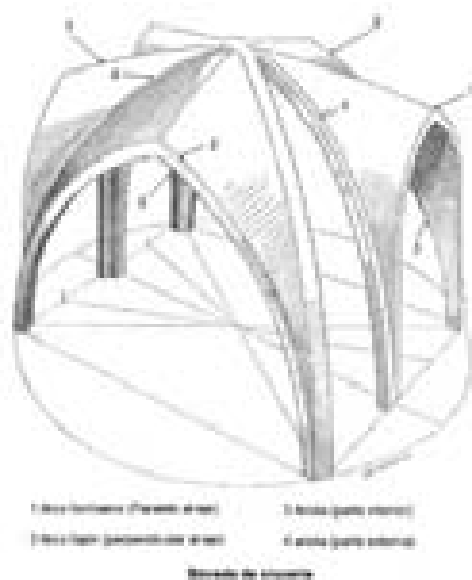


Figura 1. Elementos de la bóveda.
Fuente: Choisy, Auguste (1999).

Se asume que se utilizará una técnica mixta en su construcción y para compartir con los profesionales de la arquitectura.

Proceso de construcción del prototipo de la cúpula de abobe con técnica mixta

Para la construcción de una cúpula de adobe deben considerarse las siguientes etapas:

- Trabajos preliminares y cimentación
- Estructura
- Cimbrado
- Proceso de encofrado y cimbra
- Colado
- Proceso de colocación de capa de concreto ligero
- Proceso de fraguado

Dichas etapas justifican la utilización de un proceso para llevar a cabo la construcción de una cúpula de adobe.

Procedimientos constructivos de una cúpula de adobe

En esta sección se explican cómo se efectuaron los procedimientos constructivos de la cúpula. Es conveniente señalar las propiedades del adobe tecnificado, con dimensiones de 10 x 15 x 30 cm. Al ser una pieza prensada tiene alta capacidad de carga a la compresión de 110 kg/cm² y un peso de 10 kg por pieza; sin embargo, es baja la resistencia a la tensión. Presenta baja permeabilidad, por lo que el agua puede dañar de manera directa a la edificación.

Las características del suelo seleccionado para extraer la tierra se determinan mediante una sencilla prueba de campo que consiste en colocar la arcilla húmeda en un molde, la cual una vez seca permite observar de manera directa el grado de expansión o contracción, dado que hay arcillas que se expanden con el agua o la humedad y otras son inertes.

Se realizó también la valoración de la construcción de un sistema de cúpulas, las cuales se encontraron en la experimentación geométrica y constructiva, lo anterior tuvo como objetivo llevar a cabo la construcción de la cúpula con utilidad práctica como diseño de un espacio polivalente.

El prototipo realizado corresponde a la *geometría catenaria* empleada en las matemáticas y en la arquitectura para designar la curva, cuyo trazo sigue la forma que adquiere de manera natural una cadena, sujeta por los extremos sometidos a la fuerza de gravedad.

El arco catenariforme transcribe exactamente la morfología de una curva catenariforme inver-

tida. Todas las características matemáticas de la catenaria se conservan cuando su gráfica se invierte, por lo que se convierte en la forma ideal para el arco que se soporta a sí mismo. Del arco catenariforme se derivan los arcos funiculares que tienen también óptimas características constructivas y que se pueden obtener con facilidad reproduciendo (invertidos) los efectos de cargas puntuales sobre una curva catenariforme

Trabajos preliminares y cimentación

Para calcular la cimentación se analizaron las cargas y esfuerzos en la bóveda, el peso unitario se estimó en 350kg/m². La bóveda se apoya en cuatro soportes, cada uno con una carga de 7 500 kg que transmiten al terreno mediante zapatas de 90 x 90 cm con capacidad de carga de 9.26 ton/m² cada una. La resistencia del terreno y en la profundidad de desplante se consideró en forma conservadora de 12 ton/m², la fuerza de coceo máxima en la base se estima de 3 750 kg, la dala diagonal con refuerzo máximo de 6.0 cm² (Ramírez de Alba, 2015).

Las cargas por peso propio transmiten sus fuerzas con poca excentricidad dado que los adobes tecnificados por sí solos pueden resistir los esfuerzos. En los efectos sísmicos, el coeficiente recomendado fue de 0.3 para la zona, se presentan excentricidades importantes que generan esfuerzos de tensión en algunas zonas, por lo que se justificó reforzar la bóveda de adobe con nervaduras de concreto armado y una capa superior de concreto y armex. Con estos criterios estructurales se considera que la bóveda de adobe tecnificado presenta un nivel de seguridad satisfactorio.

Se llevó a cabo la limpieza del terreno y se realizó el trazo de la geometría en planta, con ayuda de herramientas y materiales como estacas, hilos y cal.

La profundidad de las oquedades hechas en el terreno fueron de 0.80 cm aproximadamente para colocar las zapatas de cimentación y situar encima de ellas las cuatro columnas inclinadas de concreto armado que soportan la cúpula.

La fotografía 2 exhibe el armado de esta cimentación en forma de cruz, que se realizó con varilla y armex, la cual se le vertió concreto y se modeló con cimbra de madera para un encofrado de varias cajas. Con base en la cimentación de zapatas de concreto armado, se continuó el armado de las cuatro columnas de forma inclinada para dar geometría a los bordes de la cúpula. También se utilizó cimbra de madera para modelar las columnas, mismas que en su núcleo son de concreto armado.

Estructura

Una vez construidas las columnas, se cubrieron con ladrillo de adobe tecnificado para dar una apariencia de la arquitectura de la tierra de manera continua, que más adelante se une con la cúpula cuatrípartita con los mismos materiales; de adobe tecnificado y una capa de concreto armado.

Las fotografías 3 y 4 muestran de manera detallada cómo se articula la geometría de la cúpula con los adobes perimetrales, que hasta entonces estaban sostenidos por una cimbra. Consecutivamente se procedió a colocar un prisma triangular a una altura de 0.40 m a partir de la primera base, con el objeto de ensamblar las caras interiores de los adobes tecnificados. También se observa que se en-



Fotografía 2. Dalas de cruz cuya función es impedir que los soportes de la cúpula se abran.
Fuente: Información propia.



Fotografía 3 y 4. Adobe tecnificado cuyo trabajo estructural es de manera conjunta con el concreto armado.
Fuente: Información propia.

cuentran dos estructuras importantes, las nervaduras que le dan rigidez a la bóveda y la estructura en forma de parábola que conforman las cuatro caras externas de la cúpula.

En la fase de construcción de la columna se integró una estructura de armex y concreto ligero donde se dejaron preparaciones metálicas para insertar el adobe tecnificado, tanto en la parte exterior como en el interior de la cúpula. Esta estructura soporta tanto el adobe tecnificado del cascarón en su manto interno como en el externo.

Cimbrado

Uno de los procedimientos más importantes en la construcción de la cúpula fue el armado de la cimbra. Se construyeron dos cúpulas: una con cimbra y la otra con los materiales de tierra y concreto armado. El trabajo de la cimbra de madera fue realizado por una especialista.

En las fotografías 5 y 6 se observa que la cimbra de madera en la cúpula se apo-

yó en puntales de diferentes dimensiones atendiendo la geometría en un orden creciente y decreciente, dando la impresión técnica de una fábrica compacta de elementos ortogonales en su verticalidad, de una fábrica de elementos alabeados en la cubierta y en su despliegue. Se enfatizó la forma cuatrípartita de la cúpula, además de bosquejar perfectamente en madera los arcos parabólicos. Se construyeron pies derechos al interior de la cúpula de cimbra y armaduras en forma de arco para las formas alabeadas de la cúpula, a la que posteriormente se le colocaron tablones para dar el giro a la forma.

Proceso de encofrado y cimbra

En la fotografía 7 se aprecia que las directrices de madera (duela) y sobre ellas las piezas de adobe tecnificado, se le incorporaron alambres para amarrarlo al núcleo de la estructura de la cúpula, que se realizó en Armex y concreto; a la primera capa de adobe estabilizado se le colocó un material endurecedor.



Fotografía 5 y 6. Colocación del procedimiento de cimbrado.
Fuente: Información propia.



Fotografía 7. Proceso de encofrado y cimbra.
Fuente: Información propia.



Fotografía 8. Nervaduras de refuerzo.
Fuente: Información propia.

Colado

En la fotografía 8 se muestra que una vez puesto todo el adobe estabilizado sobre la cúpula, se procedió a colocar como amarre una estructura de Armex (malla electro soldada) con concreto armado; en el mismo proceso se incluyeron las cuatro nervaduras de la cúpula cuatripartita, de la misma forma realizadas en concreto armado; es por ello que la estructura del núcleo así como las nervaduras conforman un mismo cascaron que se apoya en los cuatro soportes inclinados. En el centro de la cúpula se dejó una cavidad en donde tiene lugar el anillo de compresión.

Proceso de colocación de capa de concreto ligero

Las fotografías 9 y 10 muestran el vaciado de la capa de concreto aligerado, así como también el control del revenimiento en las partes descendentes.

Proceso de fraguado

En la fotografía 11 se exhibe el proceso de secado del concreto, dicho proceso duro aproximadamente 20 días, periodo en el

cual se fraguó de manera correcta. Posteriormente se retiró la cimbra.

Resultados, construcción de un prototipo a escala real de una cúpula de adobe con una técnica mixta

En la fotografía 12 se observa el uso de la cúpula por los estudiantes en un evento de música. Resultado del diseño del prototipo de la cúpula a escala real.

En las fotografías 15 y 16 se aprecia que en el prototipo de la cúpula se diseñó una abertura (luneto) por donde penetra la luz. Dicho luneto permite la recopilación de información del recorrido del sol durante todo el año.

Conclusiones

La ciudad de Toluca está situada a 2 600 msnm, siendo la ciudad capital más alta de México y de Norteamérica, lo que la hace templada durante todo el año con temperaturas que oscilan en promedio de 6 a 25 °C durante la primavera y el verano, y de -5 a 20 °C en invierno. Su clima es templado, subhúmedo



Fotografía 9 y 10. Colocación de capa de concreto ligero.
Fuente: Información propia.



Fotografía 11. Fraguado.
Fuente: Información propia.



Fotografía 12. Usos polivalentes de la cúpula.
Fuente: Información propia.



Fotografía 13. Perspectiva del anillo de compresión, utilizado como elemento de diseño.
Fuente: Información propia.



Fotografías 14. Perspectivas de la cúpula.
Fuente: Información propia.



Fotografías 15. Perspectivas de la cúpula.
Fuente: Información propia.

con lluvias en verano cuyo promedio anual de 807.5 mm de lluvia. En los últimos días de primavera se alcanzan las temperaturas más altas, que en algunas ocasiones superan los 27 °C, mientras que las más frías se dan entre diciembre y febrero, presentándose heladas en la zona urbana durante el invierno y en las primeras semanas de primavera. Las heladas son en promedio 80 en la época invernal, son raras las temperaturas mínimas por debajo de -3 °C.

La cúpula se construyó aproximadamente en dos meses, durante la edificación se coincidió con el periodo de lluvias (en los meses de agosto y septiembre); las condiciones del medio ambiente eran altamente húmedas. El adobe tecnificado en condiciones de humedad y la exposición a la lluvia resultan contraproducentes para dicho material. Es por ello que se tomó la decisión de utilizar una técnica mixta, que consistió en estructuras de concreto armado adheridas a las piezas de adobe tecnificado con el objeto de que la estructura trabajara correctamente a la tensión y a la compresión.

En este artículo se describe el proceso de construcción de una cúpula a escala real. Se construyó con una técnica mixta, es decir, el prototipo de la cúpula maneja tecnologías de concreto armado alternas y las sustentables por rescatar la tierra con ventajas ambientales del adobe tecnificado al producirse en frío no consume los combustibles fósiles, por lo tanto no emite gases contaminantes.¹

Existen ventajas en la construcción del prototipo: a) Están a la vista los procesos constructivos con sus materiales, b) el costo de construcción de la cúpula por metro cuadrado es del 50 al 60% menor en comparación con una losa común de concreto armado en claros pequeños, en la Zona Metropolitana de Toluca, c) la estética del adobe es muy apreciada, d) denota confort y calidez, e) gran maniobrabilidad de los recursos materiales para la elaboración del adobe, porque al fabricarse en el sitio de la

¹ La tecnología en la producción de los adobes tecnificados no se empleó combustible fósil dado que se fabrica en frío.

obra se abaten los costos de transporte de los materiales y el tiempo de ejecución, y f) se considera de gran importancia el incentivar el empleo de materiales sustentables.

En contraparte, existen dos desventajas particulares: la cúpula no puede soportar cargas por encima de ella, dado que se emplea básicamente como envolvente del espacio. La otra, al tratarse de una técnica mixta, este sistema de construcción no tiene “carta de reconocimiento” en la academia, de ahí que su enseñanza sea prácticamente nula en la mayoría de las escuelas de arquitectura en México.

Agradecimientos

El soporte de los fundamentos teóricos justificó el financiamiento económico por parte de la UAEM para llevar a cabo la construcción de la cúpula. Es conveniente señalar que un antecedente del financiamiento de la cúpula es la realización de un proyecto de una vivienda de adobe, cuya clave de registro es 3244/2012U.²

Para llevar a cabo la construcción de la cúpula a escala real, se estableció el argumento de la supervisión de la obra de manera directa, es por ello que se gestionó la autorización de la construcción en el campus universitario.

Fuentes de consulta

Aguilar Prieto, Berenice (2008), *Construir con adobe. Fundamentos, reparación de daños y diseño contemporáneo*, Trillas, México.

Bassegoda Musté, Buenaventura (1979), *Atlas de técnica edificatoria*, Ediciones Jover, Barcelona.

Blackwell, William (2006), *La Geometría en la Arquitectura*, Trillas, México.

Choisy, Auguste (1999), CEHOU, ed. *El arte de construir en Roma* (primera (en español) edición). Madrid: Instituto Juan de Herrera. [En línea] <https://es.wikipedia.org/wiki/B%C3%B3veda>, consultado el 29 de octubre de 2015.

Deffis Caso, Armando (1987), *La casa ecológica autosuficiente para climas templado y frío*, Concepto, México.

Fathy, Hassan (1975), *Arquitectura para los pobres*, Textos Extemporáneos, México.

Graham, McHenry (2008), *Adobe, cómo construir fácilmente*, Trillas, México.

Kubler, George (1982), *Arquitectura mexicana del siglo XVI*, Fondo de Cultura, México.

Lampérez y Romea, Vicente (1904), *Historia de la Arquitectura Cristiana*, Juan Gili Editor, Barcelona.

Mas-Guindal Lafarga, Antonio (2011), *Mecánica de las estructuras antiguas ó cuando las estructuras no se calculaban*, Editorial Munillalera, Madrid.

Ramírez de Alba, Horacio (2015), “Capítulo VI. Análisis numérico relacionado con la bóveda de adobe tecnificado. Propuesta de investigadores de la Facultad de Arquitectura y Diseño de la UAEM” en Gutiérrez Martínez, Ramón *et al.* (2015), *Construcción de una cúpula de adobe tecnificado para su utilidad espacial en la Facultad de Arquitectura y Diseño de la UAEM*, Innovación Editorial Lagares de México, S. A. de C. V., México.

Reeve, Agnesa (2001), *The small adobe house*, Gibbs Smith, Publisher, Layton UT, USA.

Salvadori, Mario y Heller, Robert (1998), *Estructuras para Arquitectos*, Kliczkowski Publisher, Buenos Aires.

Serra, Rafael (1999), *Arquitectura y climas*, Gustavo Gili, Barcelona.

Serra, Rafael y Coch, Helena (2005), *Arquitectura y energía natural*, Ediciones UPS, Alfaomega, México.

Truño, Ángel (2004), *Construcción de bóvedas tabicadas*, Instituto Juan de Herrera/ETSAM, México.

² Vivienda ecológica modular transportable: como una propuesta de intervención para reubicar los asentamientos irregulares del área natural protegida del parque nacional del Nevado de Toluca. Dicho proyecto refiere a un prototipo de vivienda de adobe y sus sistemas constructivos responden a regiones con climas templados y húmedos, con rangos de precipitación pluvial importante que obligan a diseñar techos inclinados para desalojar rápidamente el agua de la lluvia que se presenta en dichas regiones.