

Diseño y Construcción de Bóvedas Tabicadas

Design and construction of tiled vaults

Projeto e construção de vaultas tabicadas

Carlos César Morales Guzmán.

Arquitecto, PhD. Arquitectura. Universidad Veracruzana, México.

dr.arqmorales@gmail.com

 <http://orcid.org/0000-0002-4499-6968>

Recibido: julio 21 de 2022

Aceptado: enero 12 de 2023

Publicado: abril 17 de 2023

RESUMEN

La siguiente investigación se llevó a cabo para demostrar la técnica geométrica y constructiva de las bóvedas tabicadas, con el fin de promover este sistema tecnificado que tiene propiedades de alta resistencia. Esto dependerá de la forma y de la técnica constructiva aplicada. Se tiene como objetivo desarrollar cubiertas escalas que enseñen la viabilidad de las cubiertas para los espacios arquitectónicos, debido a su bajo costo y facilidad de construcción, concluyendo con un resultado de una metodología de diseño que puede generar una variedad de formas y acabados excepcionales, que se le puede otorgar al espacio arquitectónico.

Palabras clave: Cubiertas Tabicadas, Análisis Geométrico, Proceso Constructivo.

ABSTRACT

The following investigation was carried out to demonstrate the geometric and constructive technique of the tiled vaults, in order to promote this technical system that has high resistance properties. This will depend on the shape and the construction technique applied. The objective is to develop scale roofs that teach the viability of roofs for architectural spaces, due to their low cost and ease of construction, concluding with a result of a design methodology that can generate a variety of shapes and exceptional finishes, which can be given to architectural space.

Keywords: Tiled Roofs, Geometric Analysis, Construction Process.

RESUMO

A seguinte investigação foi realizada para demonstrar a técnica geométrica e construtiva das abóbadas de telha, a fim de promover este sistema técnico que possui propriedades de alta resistência. Isso dependerá da forma e da técnica de construção aplicada. O objetivo é desenvolver coberturas em escala que ensinem a viabilidade de coberturas para espaços arquitetônicos, devido ao seu baixo custo e facilidade de construção, concluindo com um resultado de uma metodologia de projeto que pode gerar uma variedade de formas e acabamentos excepcionais, que podem ser dados ao espaço arquitetônico.

Palavras-chave: Telhados, Análise Geométrica, Processo Construtivo.

INTRODUCCIÓN

Esta investigación, pretende analizar el desarrollo de cubiertas tabicadas en una escalada reducida, y en una primera fase encontrar los elementos que determinan el diseño de este tipo de cubiertas, al igual verificar la capacidad portante de la bóveda tabicada y como es su forma, su luz, espesor (número de capas), la existencia de lengüetas rigidizadoras, relleno de enjutas, etc. Esta se abordará sobre la vertiente: analítica y experimental.

Históricamente, se conocen distintas técnicas constructivas y analíticas empleadas a lo largo de la historia, por lo que vale la pena reactivar dicho sistema constructivo en la zona Norte de Veracruz, donde tradicionalmente se ocupa mucho el tabique rojo recocido, por lo cual, se confeccionan modelos gráficos e informáticos de previsión de cómo realizar la adecuación o transición geométrica de estas bóvedas. Los procedimientos constructivos utilizados en esta disertación son métodos que se realizan en la zona y también en el ámbito de la construcción. Los resultados obtenidos en la experimentación serán para promover el diseño y la construcción de este tipo de cubiertas, evaluando así su grado de acierto e idoneidad como procedimiento constructivo para esta primera etapa de la investigación. (López, 2012) (Quintero & Morales, 2021)

Es bien conocido que hay avances que han permitido cálculos y diseños más precisos en el desarrollo de geometrías abovedadas que, por el momento, no se han aplicado en este estudio pues aquí se propone un método de construcción sencillo para potenciar la aplicabilidad de una técnica milenaria como esta. Lo que aquí se propone es, por una parte, verificar las principales características de la construcción y geometrización en el diseño constructivo de las bóvedas, y así potencializar la aplicabilidad de esta técnica constructiva en proyectos arquitectónicos de la zona.

Experimentalmente, se han construido cinco bóvedas, para contrastar los resultados obtenidos analíticamente en la experiencia práctica y, posteriormente, en otra fase, aplicar realizar en escala 1:1 y someterlas a pruebas de cargas y análisis estructurales de dichas formas. Posteriormente, se tiene contemplado desarrollar paramétricas orgánicas de este material.

“...eficaz invento constructivo que es la bóveda tabicada; porque, con rasillas y yeso o cemento rápido, un albañil avezado es capaz de hacer, en pocas horas, las más variadas formas resistentes, sin otro herramental que gaveta y paleta...” (Torroja, 2017)



Figura 1. Prueba de Carga de Rafael Guastavino para la construcción de la Boston Public Library. Fuente: Lopez, 2012.

HIPÓTESIS

El primer paso para entender cómo aplicar este sistema constructivo en la arquitectura es definir que este sistema constructivo es tecnificado; que, por sus características, tiene una resistencia muy buena para la construcción y que por mucho tiempo se venía aplicando en la zona. Con la entrada de materiales industrializados se dejó de utilizar este producto tanto en cubiertas como en soportes y muros, siendo que económicamente son más baratos y relativamente más sostenibles que otros materiales industriales que necesitan mayores procesos para su producción, por lo que en esta investigación nos centraremos en conocer el proceso y modelo de diseño constructivo de esta técnica de cubiertas tabicadas, pero con una escala a 1:20 para poder verificar su diseño en los espacios.

Sistema Constructivo

Primeramente, las bóvedas tabicadas son hechas con ladrillos y aglomerante (yeso, cemento, mortero); por lo regular se utilizan ladrillos finos, casi siempre puestas de plano,

configurándose en una o varias capas (la primera, dependiendo de la técnica, se recibe con yeso) unidas entre sí dos, tres o más capas, realizadas sin cimbra. En cuanto se cierran, la sujeción de los ladrillos se consigue por la adhesión del mortero de fraguado rápido con los arcos o anillos de ladrillo previos, ya terminados, que sirven de guías, o con una colocación previa de muros de borde, si es el caso.

Estas cubiertas se construyen con espesores muy pequeños. Lo común es que sean de dos hojas (unos 10 cm. en total, incluyendo la capa intermedia de mortero y los recubrimientos), pero también se encuentran de una hoja (unos 5 cm.). La esbeltes, con relación entre el radio de curvatura y la luz, con frecuencia andan sobre 100 unidades, pero puede realizarse con mucho más esbeltas (Huerta, 2006)

Las curvas que se realizar con esta técnica son varias, con directriz (de revolución, de intersección entre otras), superficies regladas, de catenaria, parábola, etc. Con ello, el proceso de construcción resulta sencillo y poco costoso en el marco de las técnicas pre-industriales: una bóveda sin cimbra y de rápida ejecución que podía levantarse fácilmente.

Por lo regular, la bóveda de ladrillo se ha utilizado para cubrir techos, cubiertas; para formar escaleras, etc. Es una técnica que encontramos tanto en la construcción popular como en grandes construcciones: casas de campo, viviendas, naves industriales, palacios, iglesias, bibliotecas, etc. (Almagro, 2001; Huerta, 2004)

METODOLOGÍA

Selección del Tipo de Bóveda para el Desarrollo del Modelo

Expuestos los parámetros y definiciones de la hipótesis anterior, el sistema constructivo de esta investigación se basará en construir bóvedas tabicadas a una escala 1:20. Esto, para incentivar el diseño de este tipo de cubiertas y la tecnificación del material en la zona norte de Veracruz, ya que en la región el uso de este material es continuo y se fabrica regularmente para las construcciones de diferentes tipos de edificaciones, por lo que es un material en el que se puede realizar diferentes formas para cubrir una espacio arquitectónico y llegar a tener un alcance de mejora en el diseño bioclimático, gracias a

su forma curva ya que las masas de aire caliente en formas cilíndricas tardan más en bajar ayudando al confort térmico del espacio. También, su forma genera estabilidad estructural mejorando las condiciones constructivas de este tipo de cubiertas sin cimbra, por lo que propondremos desarrollar modelos de bóvedas de arista, intersección, intersección por capas, esférico, esférico rebajado, sus procesos de guías geométricas y cómo será su proceso de construcción a una escala 1.20, con materiales reales escalados, para entender con esto sobre la tipología de este modelos de construcción.

Para comenzar, existen varios tipos de bóvedas tabicadas. El principal factor físico para su correcto funcionamiento es que actúe a compresión; esto es lo que permite que todos sus elementos funcionen correctamente, muy similar al funcionamiento de una superficie gaussiana positiva. Los esfuerzos de una bóveda se van convirtiendo en un empuje horizontal que debe ser contrarrestado para mantener la estructura en equilibrio. El elemento estructural suele ser un contrafuerte, estribo o una base sólida que delimite el área de la bóveda; también puede ser un punto de apoyo que por lo regular son los puntos de arranque de los arcos o de la curvatura de la bóveda (Aguirre, 2016) (Quintero & Morales 2021).

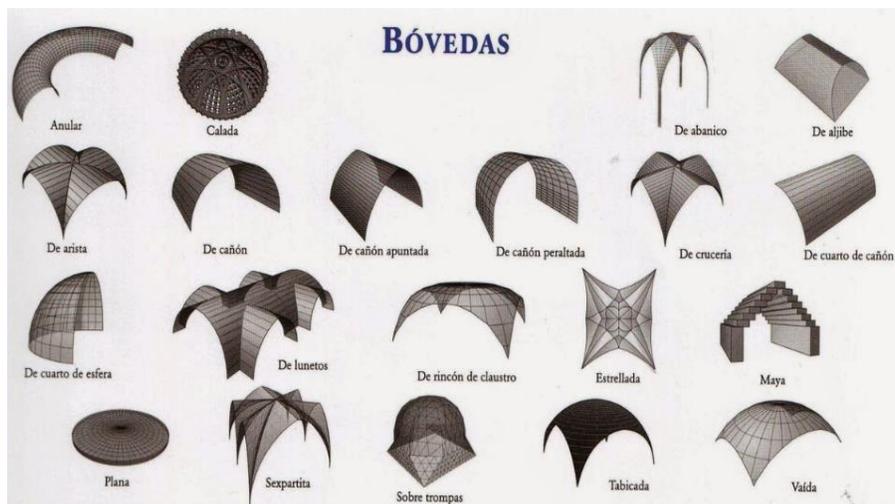


Figura 2. Clasificación de bóvedas, Fuente: Del Amo, 2017.

Partes de una Bóveda Tabicada

Para comprender los componentes de este tipo de sistema estructural definiremos sus partes básicas que la componen: una bóveda en esencia son las mismas que conciertan un arco, aunque la bóveda necesita de muros frontales o de contrafuertes que ayuden a soportar su empuje; pues es el que cierra la propia Figura abovedada, en sus partes abiertas o frentes, ni su luneto; la abertura practicada en la bóveda por otra similar es la interseccional, ya que con ella es que se puede formar muchas figuras cónicas.

Estos son las siguientes palabras claves para definir las partes de una bóveda:

Apoyos: Son las partes de los muros o pilares sobre los que descansa la bóveda.

Puntos de arranque: Son los de los arcos que componen la bóveda.

Dovelas: Son las piezas elementales que componen la bóveda.

Clave: Es la dovela central que cierra la bóveda.

Salmeres: Son las dovelas en las líneas de arranque de la bóveda.

Nervios: Son los arcos de dovelas independientes de los tímpanos en las aristas.

Luneto: Es la abertura practicada en la bóveda de otra bóveda que penetra en ella.

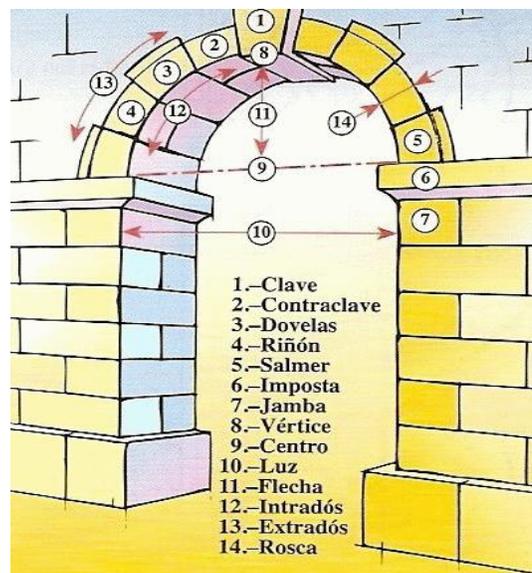


Figura 3. Tipos básicos de bóvedas. Fuente: Del Amo, 2017

La hipótesis histórica más reconocida sobre el origen de la bóveda tabicada se ubica en la labor de los constructores romanos que elaboraban las cubiertas, para reforzarlas, y sus cimbras permanentes de ladrillos que se extendían por debajo de las bóvedas de mortero y piedra de las grandes construcciones romanas para sostenerlas. Una segunda hipótesis es que proviene de las construcciones medievales populares; y, por último, la que encuentra su inicio en la cultura musulmana. Pero, aunque no podemos determinar los orígenes exactos de la bóveda a ciencia cierta, sí podemos asegurar que se realizan bóvedas tabicadas portantes a partir de 1400 (Huerta, 2005) (López, 2012).

Algunos también nombran a este tipo de cubiertas como “bóvedas catalanas”, esto, debido a la perspectiva constructiva que el Arq. Rafael Guastavino formula en una teoría basada en sus conocimientos sobre resistencia de materiales y estabilidad. Influenciado por los tratados franceses de Patte o de Rondelet parte de la base que las bóvedas eran monolíticas y no provocaban empujes. Este era el marco de pensamiento aceptado en España hasta mediados del siglo XIX. Sin embargo, es curioso observar que las construcciones de la época llevaban estribos o tirantes. En 1878 patentó en España, su sistema, para exportarlo tres años después a Estados Unidos. (López, 2012)

Posteriormente, se retoma con fuerza en América Latina y en Europa este tipo de sistemas que demuestran combinar sistemas de construcción con piedra, rosca de ladrillo y tabique común en cual se puede leer el libro de Mecánica de las bóvedas Tabicadas de Santiago Huerta.

Por lo que a continuación se mostrará un proceso experimental de este sistema constructivo tabicado y la selección previamente del tipo de bóveda que se quiere desarrollar, en este caso podremos apreciar el proceso de diseño y constructivo, el cual será de bóvedas de arista, de pañuelo esférico, esférico rebajado, semi esférico e intersección esférica. El cual podremos observar la viabilidad constructiva que puede llegar a tener este tipo de sistema constructivo dentro de la zona. (Huerta, 2005, 2006)

FABRICACION CONSTRUCTIVA EXPERIMENTAL

Elaboración del Material Primario (Ladrillos a escala 1:5)

Para esta experimentación constructivas, se procedió a realizar el material modular que se utilizaría para construir las bóvedas experimentales. Esta tendrá una escala 1:5 al real. Para este caso se seleccionó trabajar con un material lo más cercano posible a un ladrillo real para que tuviera la misma consistencia y adherencia al mortero, y que también posea casi las mismas propiedades físicas y características de este material, con el fin de aplicar las técnicas de construcción correctas. Con ello, podremos simular el modelo a escala que se realizara a 1:20 y así adquirir una forma constructiva controlada para desarrollar diferentes geometrías y pegados de tabique en las siguientes experimentaciones.

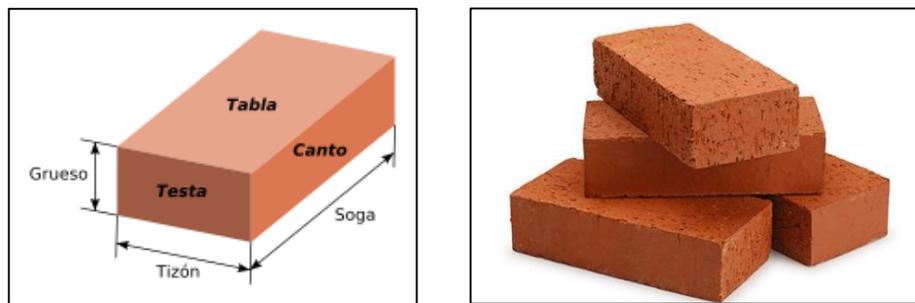


Figura 4. Partes de un ladrillo sin huecos, Geometrización de la bóveda de arista, Análisis y construcción de bóvedas tabicadas para la edificación de cubiertas sustentables. Fuente: Quinteros & Morales (2021)

Previamente, se escala el ladrillo a una dimensión de 2.5 x 2.5 x 5 cm sin huecos (Figura 4), ya que por la escala no se puede realizar el hueco machimbrado característico de la zona, y por la medida escalada se requiere una mayor superficie plana debido al tipo de mezcla aglutinante que se utiliza como adhesivo (cemento de secado rápido). Su proceso de fabricación utiliza las mismas materias primas que los ladrillos comerciales y el proceso de secado y cocción serán igual como lo hacen en la región. Esta fabricación se llevó a cabo en una ladrillera real llamada "Prezas", ubicada en la comunidad El Chote, Papantla, Ver, (Figura 5 – 7). Gracias a esto, se pudo optimizar el proceso de fabricación. (García & Morales, 2021)

Por último, se procedió a la obtención del material para trabajar con el modelado de las cubiertas, en este caso se utilizará el cemento de secado rápido, ya que debido a la escala es necesario que su secado sea pronto para no tener rupturas, por lo que es una buena alternativa, ya que los elementos son a escala y por sus medidas no deberían tardar tanto en secar; el resto de los materiales que se utilizaran son herramientas básicas de albañilería: segueta, cuchara y martillo.



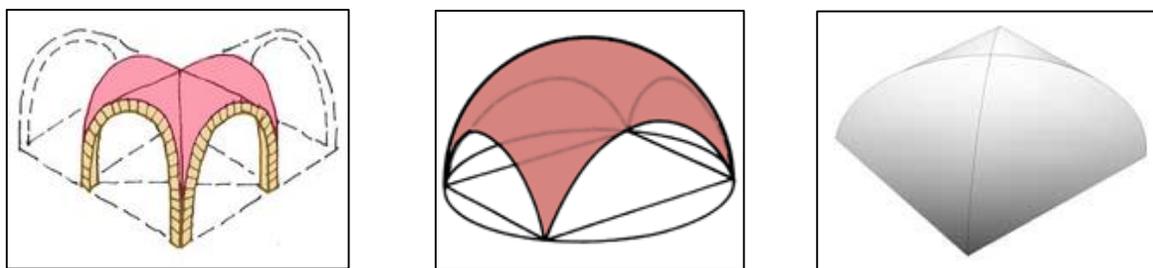
Figuras 5, 6 y 7. Proceso de elaboración de los ladrillos a escala (Finalizado del proceso del secado de 4 días para posteriormente meterlos al horno para el proceso de cocción. Fuente: Quinteros & Morales (2021).



Figuras 8 y 9. Ladrillo escalado de 2.5 x 2.5 x 5 cms y materiales básicos de albañilería. Fuente: Quinteros & Morales (2021).

En consecuencia, analizaremos primero el método de ejecución constructivas de tres modelos de bóvedas catalanas y, posteriormente, en los resultados se genera un esquema de anteproyecto que se pueden ejecutar en la arquitectura moderna. Por ello, definimos estos tipos de bóvedas: la bóveda catalana: de arista, esférica y de pañuelo (Figura 10, 11,12). Primeramente, la bóveda catalana de arista; la cual es aquella que se origina por la intersección de dos bóvedas perpendiculares de cañón de la misma flecha

y diámetro. Cada una contrarresta el empuje de la otra, cubriendo así el espacio de una planta cuadrada. La segunda variante es la bóveda catalana esférica; esta se desarrolla con la intersección, de 4 arcos, y su forma se cubre con una geometría esférica que descansa en los cuatro arcos, con una planta cuadrada. Posteriormente, se define la última experimentación que es la bóveda de pañuelo; su forma se desarrolla en una planta rectangular el cual se genera en todo el perímetro. Esta se encuentra en el centro generando la forma de un pañuelo invertido. Con estos primeros esquemas definidos realizaremos el diseño de las cubiertas a explorar en esta disertación (Fernández, 1959) (García, 2014).



Figuras 10, 11 y 12 . Esquemas de bóvedas catalanas; primera imagen bóveda de arista, segunda imagen bóveda esférica, tercera imagen bóveda de pañuelo. Fuente: Morales (2021).

Modelación Constructiva de la Bóveda Catalana de Arista

Las siguientes experimentaciones se realizaron en el taller de síntesis del diseño arquitectónico sustentable. El motivo es que el alumno desarrolle construcciones más sustentables, realizado con materiales de la región; para este caso, el ladrillo comúnmente manufacturado en la zona norte de Veracruz. Para ello, uno de los puntos que se abordó para realizar este tipo de ejercicios es la geometrización de las cubiertas y cómo sería el proceso de construcción de dichos modelos.

La primera modelación que se realizó fue la bóveda catalana de arista: primeramente, se desarrolló una geometrización simple, en donde se dibuja cuatro arcos principales de la bóveda de arista; estas sirven de arranque para generar la forma cilíndrica que se intercepta en medio de la cubierta. El dimensionamiento de esta depende enteramente de sus arcos. Una vez realizado este proceso, se determinó que la proporción de escala

es de 1:20, por lo que se construyó una base de 1.90 x 1.90 m y con una curva del 20% en relación con el claro (Figura 13 – 15). Ya creada la geometrización, se determina que su arranque se realice en cuatro puntos, con un soporte cuadrado realizado con ladrillos (Morales, 2021).



Figuras 13, 14 y 15. Geometrización de la bóveda de arista y sus soportes de arranque. Fuente: Morales (2021).

Proceso de Construcción

Posteriormente, se realiza el trazo geométrico y se construye una base en donde se cimbrada las columnas. Estas se consideraron con una altura de 15 cm. Luego se tomaron distancias para colocar las guías, y posteriormente se fue pegando el tabique recocado con un mortero de secado rápido. Antes de realizar el pegado del ladrillo, el tabique tiene que ser hidratado (mojado) para una mejor adherencia. Después de unos 30 minutos de hidratación, se realiza el pegado con el mortero o aglutinante (Figura 16 - 18).

La primera pieza para la construir en este tipo de bóvedas es la columna cuadrada de tabique, en donde se puede apreciar que su configuración es cuatropeada, el cual le dará la estabilidad estructura al soporte (Figura 19). Proseguimos a realizar la limpieza para obtener un acabado aparente, ya que si dejamos que el mortero se endurezca entonces la limpieza será más difícil.



Figuras 16 y 17. La hidratación del tabique se realiza para que el pegado con mortero se adhiera más rápido. Fuente: Morales (2021).



Figuras 18 y 19. Guías de triplay para el arranque de la cubierta y soporte de columna cuatropeada de tabique. Fuente: Morales (2021).

Continuando con la colocación de los ladrillos sobre las guías, estas se colocan para asegurarnos que la cantidad de ladrillos calculados sean las necesarias (Figura 20). Después, se prosigue con el pegado de los ladrillos con el mortero sobre la guía; se fueron cortando algunas piezas para su exacta colocación sobre las columnas, los cuales serán para los arranques de los arcos (Figura 21). Ya terminados los arcos con los ladrillos pegados con mortero (Figura 22), estos servirán como puntos de apoyo para las hiladas que formarán la bóveda.

Se inicia el arranque de las esquinas de la bóveda (Figura 23). Este se efectuó con una herramienta de corte en los tabiques (segueta), para que una de las testas obtuviera un ángulo de 45° y estas caras encajaran a la perfección. Además, su colocación se vuelve más sencilla. Una de las cualidades de las bóvedas tabicadas es que el pegado del ladrillo

es al aire (Figura 24), así que se fue pegando siguiendo el arco previamente realizado sobre las guías, deduciendo que el ladrillo se coloque en donde se encuentra una junta de ladrillo con ladrillo, esto para realizar un mejor entrelazado y sea más resistente. Conforme se avanzaba con el pegado de los tabiques, se limpiaba la superficie de los excesos de mortero con un atomizador y una esponja. Esto se tenía que hacer con sumo cuidado, ya que el mortero aún estaba fresco y podría colapsar la estructura, puesto que se estaban colocando las hiladas de tabiques hacia el centro sin cimbra (Figura 25).



Figuras 20, 21 y 22. Desarrollo de arcos guías que soportara a cubierta tabicada de arista. Fuente: Morales (2021)



Figuras 23, 24 y 25. Hiladas de la cubierta de arista sin cimbra. Fuente: Morales (2021).

Una vez llegado a la fase donde el proceso constructivo se sistematizó, el pegado del ladrillo fue más fácil en el resto de las hiladas, y así avanzar de forma constante. También, se fueron cortando los ladrillos que requerían de un ángulo preciso para su colocación en las esquinas de las hiladas. De este modo, se logró una mayor eficiencia en el periodo de ejecución del modelo (Figura 26, 27).

Para finalizar el modelo de la bóveda tabicada de arista, limpiamos la superficie superior para tener un acabado aparente; solo restaba esperar 4 días para quitar las guías donde estaban apoyados los arcos principales y así obtener la bóveda correctamente construida (Figura 28, 29). Al concluir el secado de 4 días, se retira la guía, sin la cimbra de apoyo; el resultado fue positivo y satisfactorio (Figura 30, 31) (Morales, 2021).



Figuras 26, 27, 28 y 29. Proceso de pegado de hiladas y terminación de la cubierta.

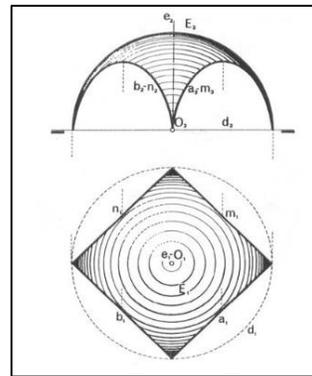
Fuente: Morales (2021).



Figuras 30 y 31. Bóveda de Arista Terminada. Fuente: Morales (2021).

Modelación Constructiva de la Bóveda Catalana Esférica

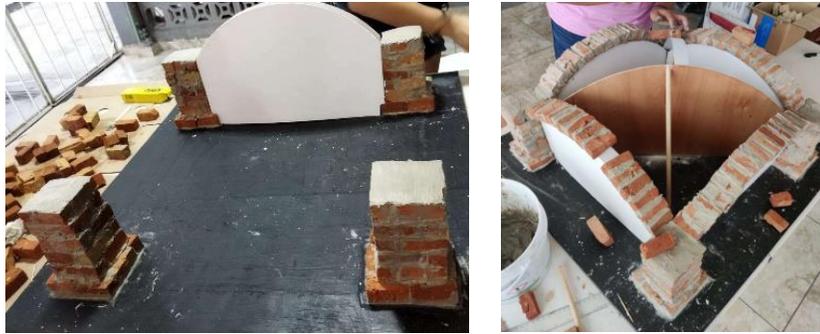
Una aplicación de la variante de la bóveda catalán es la esférica. Esta se realiza también con un arranque de cuatro arcos, como el ejercicio anterior, pero esta solo soportará una cúpula esférica rebajada. En cuanto a su forma, se realiza con la misma relación de 20% de claro en sus arcos principales de arranque de las esquinas, donde se desarrollará la cúpula esférica rebajada (Figura 31, 32).



Figuras 31 y 32. Geometrización de la bóveda de esférica rebajada y sus soportes de arranque. Fuente: Morales (2021).

Proceso de Construcción

Se realiza una base de 1.90 x 1.90 m, la cual soportará la bóveda con las cuatro columnas de ladrillo cuatropeado. Estos soportes tendrán que sostener los arcos principales. Posteriormente, se colocan las guías y se hace la distribución de los ladrillos con el mortero para formar los cuatro arcos. Ya secados los arcos se colocan las guías de la curva esférica en el arranque de las esquinas de los arcos. Estas ayudarán a que la bóveda se vaya haciendo esférica desde las esquinas de los arcos hasta en su centro. Ya teniendo dichas cimbras, se corta los ladrillos con segueta para el ángulo que requiera la pieza en las áreas perimetrales de la bóveda, ya que su hilada será pegada a 45° para formar la cubierta tabicada; su colocación ayuda a mantener y estabilizar la forma (Figura 33, 34). El rendimiento constructivo también fue rápido para este ejercicio (Morales, 2021).



Figuras 33 y 34. Guías de triplay para el arranque de la cubierta junto con guías centrales y soporte de columna cuatropeada de tabique. Fuente: Morales (2021).

Siguiendo con la distribución de los ladrillos sobre las guías, se prosigue con el pegado de los ladrillos con el mortero sobre la guía y, cortando los mismos para su exacta colocación sobre los arcos de arranque, se inicia el arranque de las esquinas de la bóveda (Figura 35). Esta se efectuó con una herramienta de corte en los tabiques (segueta), para que una de las testas obtuviera un ángulo de 45° y estas caras encajaran a los arcos principales. Esto, además, vuelve su colocación más sencilla. Una de las cualidades de esta bóveda tabicada es que el pegado del ladrillo es al aire (Figura 36), así que se fue pegando siguiendo el arco previamente realizado sobre las guías, deduciendo que el ladrillo se coloque en donde se encuentra la junta del ladrillo con ladrillo, esto para realizar un mejor entrelazado y sea más resistente. Conforme se avanzaba con el pegado de los tabiques, se limpiaba la superficie de los excesos de mortero con un atomizador y una esponja. Esto se tenía que hacer con sumo cuidado ya que el mortero aún estaba fresco y podría colapsar la estructura, puesto que se estaban colocando las hiladas de tabiques hacia el centro sin cimbra.



Figuras 35 y 36. Proceso de pegado de hiladas y terminación de la cubierta. Fuente: Morales (2021)

Para finalizar el modelo de la bóveda esférica, se rellenó algunas grietas en la superficie superior para evitar una grieta de colapso. Solo restaba esperar 4 días para quitar las guías donde estaban apoyados los arcos principales y así observar si la bóveda está correctamente construida (Figura 37, 38) (Morales, 2021).



Figuras 37 y 38. Bóveda Esférica Terminada. Fuente: Morales (2021).

Modelación Constructiva de la Bóveda de Pañuelo

El último ejercicio que realizaremos es la bóveda de pañuelo, que originalmente se desarrolla con una forma semiesférica. Esta cúpula se sitúa sobre cuatro planos verticales, los cuales poseen solo 4 puntos de apoyo en su base. Debido a su tipología constructiva, se especula que este tipo de bóvedas fueron creadas para cubrir espacios

de plantas rectangulares y cuadradas. Visto desde otra perspectiva, puede considerarse como un derivado de la cúpula esférica clásica, pero para nuestro caso de estudio tendrá una carga uniforme en las zonas de tracción, por debajo del paralelo situado a 45 grados, siendo el límite permisible de 51 grados, debido al funcionamiento geométrico y a las cargas puntuales sobre las columnas de apoyo o de arranque (Ignacio, 2011) (Romea, 2019) (Huerta, 1990).

Proceso de Construcción

Definido el tipo de bóveda que se realizará (bóveda de pañuelo; variante de ladrillo recargado) se generó el dimensionamiento del modelo a escala 1: 5, para este caso; no fue realizado el dibujo de la bóveda debido a que se hizo con la técnica tradicional de la zona. Este solo se utiliza cuando la dimensión del claro no excede los 5 metros, por lo que nos basamos en la escala del material primario: el ladrillo. Como se mostró en el primer ejercicio de la bóveda de arista, se precisó que la planta de la bóveda fuera un cuadrado de 80x80 cm (Figura 39) elaborado en cintas de madera de 2x1 pulgadas, creado un cuadro rígido que simulara las trabes o muros de base de la bóveda, en donde se desarrollara la bóveda de pañuelo con claro de 4x4 metros y con una flecha de 1 metro (siendo el 25% del claro a cubrir) (García, Morales 2021).

Una vez realizado el dimensionamiento de la base, se recortan los ladrillos para los módulos que se van a pegar en el arranque. Se procedió, primeramente, a darle la forma a los ladrillos, ya que en las esquinas deberán ser de un ángulo de 45 grados de inclinación. Al igual que todas las hiladas posteriores a su base, se realizaron cortes en ambos extremos de los ladrillos, con el fin de que encajaran perfectamente en las esquinas del cuadro (Figura 40, 41).

Sin embargo, la peculiaridad del inicio de esta técnica recae en que la guía inicial de las hiladas es el perímetro de la base. Por lo tanto, todas las hiladas requieren darle un ángulo de 45 grados al ladrillo inicial y al final, debido a la inclinación de la bóveda respecto a la base; además cuidando también la correcta colocación de los ladrillos para formar el característico aparejo tipo sogá que le permite a la bóveda funcionar de manera correcta (Figura 42, 43).



Figuras 39, 40 y 41. Primera imagen: Elaboración de marco rígido para la base de la bóveda a escala 1:5. Segunda imagen: Proceso de corte a los ladrillos esquineros. Tercera imagen: Inicio del pegado de ladrillos en las 4 esquinas del marco. Fuente: Quintero & Morales (2021).



Figuras 42 y 43. Colocación de hiladas de ladrillo en las esquinas y el perímetro. Fuente: Quintero & Morales (2021).

Continuando con la colocación de los ladrillos, las curvas iniciadas en las esquinas hacen contacto con las hiladas, y estas se colocaban alternadamente una sobre otra, de modo que los ladrillos tuvieran un amarre al momento del pegado. A partir de esto, se empezaba a cerrar la bóveda con cada hilada, cuidando la inclinación para que fuera uniforme en los 4 lados del perímetro donde se está sosteniendo la bóveda (Figura 44 - 46). Posteriormente, se llegó a una altura de 21centímetros, en donde se comenzó a cerrar la bóveda en forma horizontal para emparejar todas las hiladas de ladrillos, dejándonos una abertura para una linternilla sobre la cubierta (Figura 47). En esta etapa de construcción

se decide realizar la linternilla en la parte superior de la bóveda utilizando el método de hiladas circunferenciales, que es similar al método que estamos utilizando, el cual se realiza sobre los ladrillos superiores de la abertura y se utiliza la pedacería para cubrir los espacios pequeños (Figura 48, 49).



Figuras 44, 45 y 46. Primera imagen: pegado de hiladas en apoyo, al llegar a los centros laterales del marco comienzan las hiladas principales de la bóveda. Segunda y tercera imagen: Inicio de las juntas constructivas en las laterales del marco para cerrar progresivamente la bóveda. Fuente: Quintero & Morales (2021).



Figuras 47, 48 y 49. Término de la construcción de la bóveda principal, dejando una ranura para la linternilla/Inicio de construcción de la linternilla sobre la bóveda. Fuente: Quintero & Morales (2021).

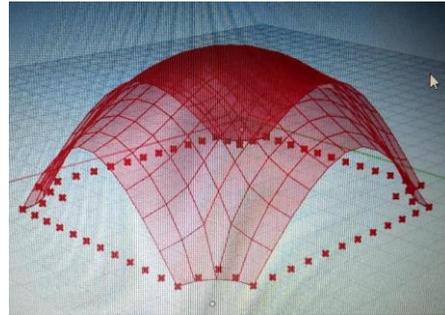
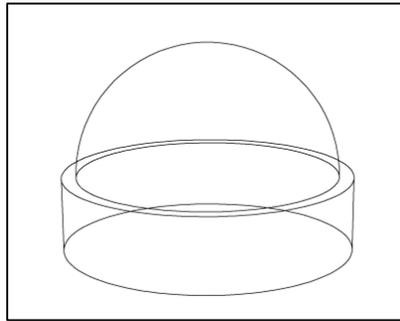
Por último, aplicamos una capa de mortero únicamente sobre la linternilla. Esto para que se fijaran los ladrillos y se cerraran las juntas con mortero para, posteriormente, darle un pulido a la bóveda y lograr un mejor acabado final. Con este último ejercicio, se generan las premisas de una metodología de diseño de cómo utilizar el sistema constructivo con tabiques sin cimbra, ya que solamente necesita guías para realizar la curva del modelo (Figura 50, 51) (Morales, 2021) (Quinteros & Morales, 2021).



Figuras 50 y 51. Bóveda de Pañuelo Terminada. Fuente: Quintero & Morales (2021).

RESULTADO

El desarrollo de las experimentaciones anteriores nos genera el conocimiento practico-teórico para formar una metodología del diseño de cómo se debe operar el sistema constructivo de las bóvedas sin cimbra, por lo cual se pueden desarrollar geometrías más complejas o con un mejor aporte de diseño estructural: un ejemplo de esto es la bóveda geodésica o de bóveda de cúpula esférica sinusoidal (Figura 52, 53). La primera, se desarrolla en una planta circular, la cual genera una geometría circular, que desde su arranque puede generar las guías y dónde interceptar los otros arcos que definirá su figura final. La segunda bóveda, se realiza en una base cuadrada, rectangular o sinusoidal, pero siempre guiadas por sus arcos principales que ayudarán a mantener la forma estable, por lo cual se puede generar formas más orgánicas dentro del pegado de hiladas de ladrillos (Ramírez, 2012) (Moya, 1987).



Figuras 52 y 53. Esquemas de bóveda geodésica, bóveda esférica sinusoidal. Fuente: Morales (2021).

Teniendo en cuenta que se debe tener primeramente la geometría para poder desarrollar nuestra cubierta, esto nos ayudó a generar la práctica técnica de nuestra investigación y nos da la premisa suficiente para desarrollar propuestas de anteproyectos para la comunidad para uno de los casos más solicitados en la Facultad de Arquitectura de la región Poza Rica: es el desarrollar templos y parroquias de claros de 10 a 15 m de largo, por lo que este tipo de sistema constructivo se adapta a este requerimiento, y satisface el gasto de mano de obra, ya que solo se tendría que tomar en cuenta el material y el personal para elaborarlo y no la cimbra, aunque la siguiente fase de la investigación será la etapa de pruebas de análisis estructural y de cargas a los modelos a una escala 1:1. En la zona ya hay vestigios de que se ha utilizado este tipo de sistemas, y por su configuración abovedada ayuda mucho a retardar la transferencia del calor al espacio arquitectónico, obligando de cierta manera a no utilizar equipos de enfriamiento costosos y altamente contaminantes.

Por último, definidos la geometría y el proceso de construcción del material, se puede pasar a generar propuestas, como por ejemplo de un modelo iconográfico de anteproyecto que se realizó para la parroquia católica del fracc. Kawatzin de Coatzintal, Veracruz (Figura 54), donde se pidió una cubierta tecnificada de ladrillo para envolver la nave central del recinto. Esta se manejó con el concepto de dos manos haciendo un rezo. La forma de la cubierta está constituida con varias superficies de tres tipos de altura para

dejar pasar la luz y la ventilación, y por ello la forma evita que la transferencia de calor haga estragos dentro del espacio arquitectónico sacro (Morales, 2021).



Figura 54. Propuesta de anteproyecto de Parroquia. Fuente: Morales (2021)

En nuestro país contamos con poco estudio específico sobre la metodología de construcción de bóvedas tabicadas, pero sí tenemos numerosos ejemplos y, aunque están dispersas, nos sirven de guías para realizar ensayos que determinen un proceso de medición constructiva, sobre todo para los diseñadores que generen una alternativa tradicional que proporcione características sustentables como equilibrio térmico, aprovechamiento de luz y viento natural y una estética interior excepcional (García, 2014).

Este elemento constructivo no solo nos sirve como una cubierta; puede ser utilizado en modulaciones a lo largo de toda la edificación, siempre y cuando estén aterrizados a los

puntos de apoyo correspondientes. En este sentido, dependerá mucho de la forma y de su análisis estructural para que se determine una composición óptima que salve claros importantes de más de 10 m. (Zaragoza, 2012)

Una característica más significativa que poseen estos sistemas constructivos es la utilización de un material común; el ladrillo, se caracteriza tradicionalmente porque se pueden utilizar para realizar una serie de formas variadas que integren texturas y figuras orgánicas variables, además de su versatilidad y flexibilidad para adaptarse a su entorno y su fiabilidad estructural. Actualmente, existe en México una problemática de construcción la cual está latente en todos los países de América Latina: construir espacios arquitectónicos baratos, por lo cual, las bóvedas de ladrillo constituyen una alternativa idónea a la solución de esta problemática que, además como arquitectos, es todo un reto lograr reeducar sobre los beneficios que trae este tipo de construcciones (Aguirre, s.f) (Redondo, 2013).

En cuanto a la formación académica y desarrollo de investigación sobre el tema de cubiertas tabicadas, se puede nombrar algunas universidades como la Universidad Nacional Autónoma de México, con el Arq. Ramón Aguirre Morales, que desarrolla profesionalmente este tipología constructiva en todo México y América Latina, donde se puede reflejar la numerosas ventajas de construir con ladrillos. También las investigaciones teóricas de análisis estructural del Dr. Santiago Huerta, en la Universidad Politécnica de Madrid, con los principios adecuados de cómo desarrollar un diseño estructural de un bóveda tabicada y sus diferencias constructivas. En cuanto al tema de la vivienda, en nuestro siglo es un problema que INEGI calcula que 7 de cada 10 viviendas que se construyen en México son autoconstruidas y el 18% de estas son del tipo emergente o temporal, por lo cual son construidas con materiales y estructuras de baja calidad, lo que añade otro motivo para incentivar y promover el sistema de bóvedas y cúpulas sin cimbra que permita la construcción económica y ecológica de una cubierta duradera y de buena calidad a fin de que sea asequible a poblaciones de escasos recursos (Martínez, 2010).

La comparativa con otros tipo de sistemas constructivos, como la losa de concreto armado, se puede verificar con el costo de mano de obra y accesorios como la cimbra.

El ahorro aproximado que daría una bóveda tabicada es el equivalente al 50% o 60% del costo total; sin embargo poseen un funcionamiento estructural similar. Este tipo de cubiertas tabicadas puede llegar a obtener propiedades bioclimáticas, dependerá de la forma y ubicación donde se construya (López, 2012).

El factor del costo es verdaderamente determinante y es la razón por la cual hoy en día aún está vigente el uso de bóvedas tabicadas. Sin embargo, en tiempos modernos se debate si la seguridad estructural de la forma realmente soportaría cargas accidentales como las de ondas sísmicas, por lo cual no es usual encontrarlo en academias de enseñanza profesional. Aunque sería una gran solución al problema de sobre costo en la cubierta de espacios habitacionales (Ramírez, 2012).

CONCLUSIÓN

El diseño y desarrollo de la bóveda tabicada es una alternativa para la construcción de cubiertas de uso habitacional y de otros giros arquitectónicos. Esto influye mucho por el método de construcción, ya que depende de la calidad de los materiales y la proporción de los aglomerantes, los cuales debe ser la adecuada para el secado rápido, por la adherencia de los ladrillos. Las diferentes tipologías de la bóveda no requieren de cimbra o plomada, más bien solo una guía para desarrollar su forma estructural, por lo que, al término de una obra real, la cubierta abovedada será necesario realizar un armado en la parte exterior de la bóveda. Esto, para evitar cuarteaduras en la superficie exterior. Esta se refuerza comúnmente con una malla electrosoldada 6-6/10-10, con una capa de compresión de 5cm de mortero. Posteriormente, se coloca el impermeabilizante para evitar goteras, generando el acabado final de la cubierta.

Observando los resultados de las prácticas anteriores, podemos ver que se justifica las pruebas de carga y teorías estructurales —que realizaba el Arq. Rafael Guastavino— solo con realizar la geometría adecuada. Aunque no está de todo resuelta la capacidad de carga y el análisis estructural en esta disertación, nos deja la línea de la comprobación estructural para los siguientes trabajos académicos prácticos. Lo que si podemos aplicar de estas prácticas experimentales es la metodología para generar propuestas

arquitectónicas en la zona, ya que una de las características del área es la materia prima que sobreabunda para realizar ladrillos. Por esas circunstancias, es una mejor opción que una losa de concreto tradicional.

Otro punto para destacar es la activación de la técnica constructiva en la región, ya que se ha ido perdiendo el conocimiento adquirido que se tenía de este tipo de metodologías para realizar las bóvedas. Podemos concluir que, así como existe equilibrio perfecto en una balanza, así debe construirse la arquitectura. Y, en este caso, la técnica de construcción de bóvedas tabicadas es un buen ejemplo de este principio sistemático, que refleja la adecuada colocación de peso, forma y equilibrio de los elementos constructivos; desde el material utilizado hasta la mano de obra y el proceso de diseño de la construcción.

REFERENCIAS

Aguirre Morales R. (s. f.). Bóvedas Mexicanas. Sitio. Consultado el 20 de junio de 2022. http://construccion3.weebly.com/uploads/5/3/6/3/536327/boveda_mexicana.pdf

Almagro, A. (2001). Un aspecto constructivo de las Bóvedas en Al-Andalus. *Revista al-qantara*, AQ. (22),147- 170. <https://al-qantara.revistas.csic.es/index.php/al-qantara/article/view/229/222>

Carles, R. (2019, 31 de julio). Introducción a la construcción de la bóveda catalana. Sitio. <https://www.e-zigurat.com/blog/es/boveda-catalana/>

Del Amo, C. (2017, 10 de febrero). Bóvedas y Cúpulas. Sitio. <https://chitiya.wordpress.com/2017/02/10/bovedas-y-cupulas/>

Fernández Alba, A. (1959). Bóvedas tabicadas de simple y doble curvatura. Sitio. <https://docplayer.es/11005927-Bove-das-tabicadas-de-simple-y-doble-curvatura.html>

García Muñoz, J. (2014). La prefabricación de bóvedas de ladrillo: una utopía latinoamericana. *Revista Rita* (2), 92-99. <http://ojs.redfundamentos.com/index.php/rita/article/download/9/1>

García Quintero T. & Morales Guzmán C.C. (2021). *Diseño y construcción de Bóvedas*

catalanas para edificación de viviendas sustentables [Ponencia].
Congreso Internacional de Investigación Academia Journals Chetumal

Huerta Fernández, S. (1990). *Diseño estructural de arcos, bóvedas y cúpulas en España, ca. 1500- ca. 1800*. [tesis doctoral, E.T.S. Arquitectura (UPM)].

<https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.549>

Huerta, S. (2004). *Arcos, Bóvedas y Cúpulas; Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica*. Editorial Instituto Juan Herrera.

Huerta, S. (2006). *La construcción tabicada y la teoría cohesiva de Guastavino*. Editorial CEHOPU, Instituto Juan Herrera.

Huerta, S. (2005). Mecánica de las bóvedas tabicadas. *Revista arquitectura* (339),102-111.

<http://www.coam.es/media/Default%20Files/fundacion/biblioteca/revista-arquitectura-100/2000-2008/docs/revista-articles/revista-arquitectura-2005-n339-pag102-111.pdf>

López López, D. (2012) *Análisis estructural de bóvedas tabicadas; Estudio Histórico analítico y experimental para la determinación de la influencia en la resistencia y estabilidad de bóvedas tabicadas de diferentes variables constructivas*. [tesis de maestría, Universitat Politècnica de Catalunya].

<https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/21689?show=full>

Martínez Fernández, R. (2010). Sistemas Económicos de techado con bóvedas de fábrica; Bóveda nubia y bóveda recargada mexicana, Congreso Internacional de Tierra en la Cuenca, Valladolid. Sitio. https://www5.uva.es/grupotierra/publicaciones/digital/libro2011/2011_9788469481073_p089-100_martinez.pdf

Morales Guzman, C.C. (2021), Taller de Diseño Arquitectónico: Detalles, Carrera de Arquitectura, Facultad de Arquitectura, Universidad Veracruzana.

Moya Blanco, L. (1987). Arquitecturas cupuliformes: el arco, la bóveda y la cúpula. En: *Curso de mecánica y tecnología de los edificios antiguos*. Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid, Madrid, pp. 97-119. <http://oa.upm.es/39014/>

Ramírez Ponce, A. (2012). Arquitectura propia: Cubiertas de ladrillo recargado. Sitio. <http://ramirezponcearquitecto.blogspot.com/2012/06/arquitectura-propia-cubiertas-de.html>

Redondo Martínez, E. (2013). *La Bóveda tabicada en España en el siglo XIX: La transformación de un sistema constructivo*. [tesis doctoral, Departamento de Estructuras

de Edificación, Universidad Politécnica de Madrid].
http://oa.upm.es/22064/2/ESTHER_REDONDO_MARTINEZ.pdf

Requena Ruiz, I. (2011). Análisis de tipologías estructurales; Bóveda, Lámina, Cúpula y paraboloides. Sitio.
https://www.academia.edu/20295513/Analisis_de_tipologias_estructurales_por_Ignacio_Requena_Ruiz

Torroja Miret, E. (2017). *Razón y ser de los tipos estructurales*. Editorial Consejo Superior de Investigaciones Científicas.

Zaragozá Catalán, A. (2012) *Construyendo Bóvedas Tabicadas*. [Ponencia]. Simposio Internacional de Valencia, Editorial Universidad Politécnica de Valencia.