

## CATENOIDES EN ESTRUCTURAS ABOVEDADAS DE ADOBE Y LADRILLO

ARESTA, Marco; MENDES, Fábio

[marco.aresta@gmail.com](mailto:marco.aresta@gmail.com)

Tecnología en relación proyectual

### Resumen

Tradicionalmente, las estructuras abovedadas de fábrica han sido evaluadas estructuralmente a partir de métodos geométricos, muchas veces con aproximaciones por experimentación y error. Es con los mismos métodos gráficos que dibujamos, construimos y analizamos las superficies abovedadas.

El comportamiento estructural de las superficies abovedadas asociado a su delineamiento geométrico no permite un análisis elástico dada su constitución estática. Esta particularidad viene porque las estructuras abovedadas se arman con materiales inertes de comportamiento estático con mínimos módulos de elasticidad, como son el adobe o el ladrillo. Como tal, es crucial el conocimiento de la geometría deformada de estas superficies dada paulatinamente por el ajuste y acomodamiento de la forma al transcurso y vida útil de la construcción. Nuestra comprensión y estudio de la forma es dado por métodos gráficos basados en la línea de fuerzas o línea funicular. A partir de los métodos gráficos podemos seguir la evolución de las deformaciones y estas mismas deformaciones son detectadas y comunicadas por fisuras. Es en base a la fisura que se evidencia el cambio inicial de la geometría por naturales movimientos de la estructura. Es, como tal, normal y hasta obligatorio la fisuración en cualquier estructura de fábrica que esté trabajando y por eso resistiendo al colapso.

Nos centraremos específicamente en las superficies catenoides, originadas por el cumulo de líneas curvas naturales de fuerza, las catenarias. Así siendo, la investigación presenta un análisis desde el punto de vista: 1) físico, adonde analizamos la eficacia estructural de la forma del catenoide en las superficies abovedadas de adobe y de ladrillo; 2) simbólico, adonde nos encontramos con la construcción del espacio desde una mirada ancestral y con un vinculo a significados permanentes; 3) imaginativo: adonde reconocemos en nuestro entorno natural y en nosotros mismos el acople perfecto a geometrías de la naturaleza. Sin embargo, en este artículo nos detenemos solamente en el primer punto de la investigación.

### 1. Nivel físico de los catenoides

#### 1.1 La catenaria

La catenaria es la elegante curva que naturalmente adopta una cadena bajo una carga uniformemente distribuida, como lo es su propio peso. Cada eslabón (punto de la curva) representa un determinado trío de fuerzas, dos ejercidas en un ángulo obtuso a tracción por los dos eslabones adyacentes y la tercera ejercida hacia abajo por el peso del propio eslabón. Todo el tiempo en nuestro entorno encontramos esta curva: cuando nos acostamos en una hamaca, cuando miramos una liana en el bosque o un cable eléctrico de alta tensión, etc.



Fig. 1(izquierda). Cadena colgada que define el arco funicular de fuerzas.

Fig. 2(derecha) Cadena dibujando arco de catenaria. Evaluación de la construcción de una cúpula catenoide.

Invertiendo esta curva obtenemos el arco de catenaria, el cual trabaja estructuralmente a compresión, transmitiendo verticalmente su peso propio y sus cargas aplicadas sobre sus puntos de apoyo. Los puntos pertenecientes a la superficie generada por estos arcos trabajan igualmente en equilibrio de compresión.

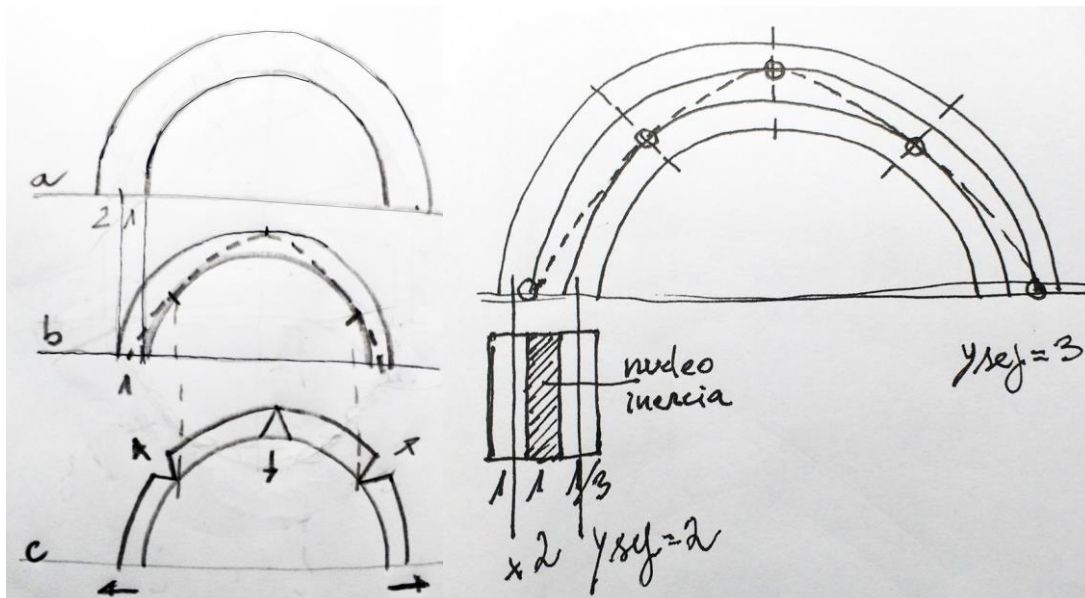
La curva de la cadena que define el arco de catenaria puede cambiar su diseño en función del peso que tenga que soportar como carga puntual. De la misma manera el arco que se diseñe a nivel arquitectónico no necesariamente tiene que tener la forma exacta del arco naturalmente definido (la catenaria). Sin embargo, en su espesor debe contener el arco de catenaria garantizando la eficiencia a nivel de resistencia a las cargas aplicadas.

El matemático Robert Hooke contestó en 1676 a su propia pregunta planteada pocos años atrás en la Royal Society de Londres sobre cuál sería la forma ideal de un arco, señalando que el arco ideal es el que tiene forma de catenaria invertida. En 1697 Gregory amplió: "si arcos de otras formas se sostienen es porque hay un arco de catenaria en su interior".

Esto es absolutamente maravilloso a nivel de diseño proyectual dado que podemos hacer las curvas que queremos en los techos con la única y estimada preocupación de que en su interior esté el arco funicular de cargas perteneciente a la curva de catenaria. El diseño del espacio y su morfología acompaña el propio diseño estructural y van de manos dadas en su conquista de la espacialidad. Por este dato es que nos centramos en el diseño, construcción y estudio de los catenoides, las superficies que derivan del movimiento simétrico de traslación o rotación aplicados a las generatrices, arcos de catenaria.

Se entiende así que el espesor de un arco, cúpula o bóveda no puede ser tan delgado como una cadena puesto que son elementos rígidos y además no podrían adaptarse a cargas puntuales. Al estar a compresión, una cúpula o bóveda con cualquier sección puede colapsar a causa de su doblamiento, a menos que contenga un arco de catenaria inscrito en su sección. Los agrietamientos o articulaciones aparecen cuando la línea de empujes toca el borde del arco. Sin embargo estas fisuras pueden aparecer por las pequeñas variaciones del contorno del arco o de la compatibilidad interna de las piezas como son el contacto entre dovelas o el asentamiento de los morteros. También se puede dar una alteración brusca de la línea de esfuerzos contenida en el arco por alteración de la línea de empujes en los apoyos o por cargas puntuales en el caso de sobrecargas por uso de una terraza por ejemplo. En ningún de los casos las fisuras son sinónimo de colapso, mas bien al revés es normal su aparición y el arco continua siendo seguro. Aunque su estado real a nivel de trayectoria de fuerzas y de sistema de cargas sea casi imposible de conocer dado el carácter efímero de los cambios que provocaran las fisuras.

Para el cálculo de nuestras estructuras hemos aplicado el método de Heyman (1969) empleando su *coeficiente geométrico de seguridad* para determinar el espesor de los arcos de sección de las superficies curvas. Este coeficiente de seguridad determina el espesor del arco y es el resultado de dividir el espesor del arco real por el del arco límite. Como se puede ver en la figura 3, el arco propuesto tiene un coeficiente de seguridad de 2, pues su espesor es el doble del arco límite. No obstante este factor puede no ser suficiente para garantizar la seguridad de un arco, por lo cual, para los arcos que determinan la sección de las superficies orgánicas construidas hemos sumado otros arcos de catenaria que determinan esfuerzos variables en el interior de la estructura, provenientes de sobrecargas distintas.



**Fig. 3. Definición del coeficiente geométrico de seguridad:** a) arco de medio punto estable; b) arco con el mínimo de espesor con la línea de empujes tangente al perímetro del arco; c) colapso de arco límite en los puntos de tangencia o intercepción de la línea de empujes.

Así siendo los arcos que arman las generatrices de las superficies abovedadas son arcos de catenaria y la forma de armar el coeficiente geométrico de seguridad del arco fue multiplicando su espesor por el del arco límite. Este arco límite fue determinado por 2 catenarias sometidas a esfuerzos distintos: por un lado su peso propio y por otro lado una sobrecarga homogénea que a nivel de caso real puede ser un techo vivo o acumulación

de nieve. En otro caso el espesor fue determinado por una sobrecarga puntual proveniente de la simulación de una terraza accesible.



**Fig. 4. Construcción de una bóveda de forma orgánica teniendo como referencia el arco tímpano de catenaria**

A nivel de diseño de cimbras, el arco de catenaria se dibuja dejando colgar una cadena de dos puntos fijos que previamente determinan el ancho (arco o vano) de la abertura. La altura (flecha) de la abertura es dada por la suma de eslabones a la cuerda y se va ajustando en función de lo requerido por el diseño. Cuanto mayor es la longitud de la cuerda mayor es la altura del arco. Conviene hacer esto sobre un tablón de madera de manera a poder dibujar con rigor la curva que describe la cadena. (Fig.1) Una vez dibujada la curva se corta la madera por la línea dibujada y tenemos directamente la cimbra para poder construir el arco. En el caso del arco de catenaria ser muy grande, dada la escala de la abertura o vano que queremos vencer, se puede dibujar de la misma manera pero aplicando un factor de escala.

Como tal, una bóveda puede empezar por ser primeramente construido algún arco de generatriz de la misma en base a una cimbra que funciona de arco de apoyo o arco tímpano. Este arco no es solamente adonde se apoya las primeras hiladas de la bóveda sino también el que sirve de guía para todas las demás hiladas.

En el caso de las bóvedas de cañón corrido esto es muy eficiente, aunque después pueda variar los métodos de construcción y la técnica. En nuestro caso usamos este primer arco solamente como una orientación inicial y luego es el mismo cuerpo (el brazo y la mano) que va dando forma a toda la estructura. El mismo cuerpo sirve de guía con referencias tal como nuestra altura, la altura del ombligo, la trayectoria de la mano y el brazo, etcétera. Con esto llegamos a una forma más orgánica y directamente vinculada a nuestro cuerpo y nuestras proporciones. Sin embargo es muy importante nunca perder de vista los arcos tímpanos que nos sirven de referencia. (Fig. 4)

## 1.2 El catenoide

Los catenoides no son más que superficies de revolución originadas por la rotación de una catenaria como generatriz alrededor de un eje; o también por la traslación de una catenaria como generatriz en una o más directrices. Desde siempre se construyo con estas superficies y con distintas técnicas constructivas. En el medio Oriente existen de las más antiguas construcciones que se han encontrado aplicadas a distintas tipologías arquitectónicas. Estas se hacían con distintas técnicas, tal como la bóveda radial, la bóveda montada y la bóveda de dovelas vertical, todas bóvedas de cañón corrido como habitualmente se llaman. Este tipo de bóvedas fueran importadas de Mesopotamia y difundidas por Roma en todo su imperio en distintas construcciones (puentes, palacios, viviendas, basílicas, termas, acueductos, etcétera). Por este facto se de las formas constructivas más vistas por ser el recurso mecánico más actualizado desde siempre.

Estas bóvedas de cañón pueden cambiar en forma y en técnica constructiva. A nivel de forma dependen de las directrices y generatrices que asumen desde su diseño. Por ejemplo: pueden ser bóvedas circulares si la generatrices son arcos de medio punto; parabólicas si tiene parábolas de generatrices; elípticas; carpanel; conopial, poligonal y catenaria dependiendo del tipo de arco que las genera. A nivel de técnica constructiva dependen de la tradición constructiva del lugar y también del tipo de traba y diseño de traba que se quiere obtener como resultado final de la bóveda a la vista.

Tenemos que tener en cuenta que una estructura abovedada transmite, como cualquier estructura, las cargas al suelo y que lo hace según el empuje que tenga el arco cuando descarga en su base. Cuanto más vertical y con menor ángulo de tangencia tenga la curva del arco en relación a su base menor será el empuje y más esbelta puede ser la pared y sin necesidad de refuerzos (contrafuertes). El comportamiento estructural de la

bóveda es similar a del arco que le sirve de generatriz y el análisis y planificación lo podemos hacer en relación al primer arco que le llamamos arco tímpano o arco generatriz. Son bóvedas que en principio tienen menos probabilidades al apareamiento de fisuras dado que su forma final no difiere tanto de la línea de fuerzas (catenaria, funicular de fuerzas).

Los catenoides de doble curvatura que se originan por procesos de rotación de un arco catenaria, respecto a un eje central axial, le llamamos de cúpulas. Su eficiencia estructural es mayor que las bóvedas por el simple hecho de que las cargas puntuales se disipan por un mayor número de puntos de la misma superficie. Como tal, una cúpula es sumamente resistente en relación a una bóveda dado que tiene una infinidad de doble trabajo hiperestático que lo hace más firme. Las tensiones y esfuerzos en la superficie de las cúpulas se distribuye uniformemente en 4 o más direcciones, al contrario de las bóvedas adonde una carga puntual se distribuye en 2 direcciones correspondiente a su eje transversal. El comportamiento de una cúpula no es muy distinto al de un arco generatriz, sin embargo, a la diferencia de un arco, una cúpula puede continuar estable con inúmeras grietas. Esto lo hemos verificado por el análisis empírico de la estática funicular o de la cadena. Suelo decir que cuantos más son los puntos de una estructura involucrados en su trabajo de resistencia más difícil que todos se pongan de acuerdo para colapsaren.

### 1.3 Experiencias practicas

Hablemos ahora de nuestra experiencia practica y de los resultados obtenidos por métodos de experimentación/observación centrados en las estructuras abovedadas de catenoides y técnicas constructivas sin cimbra.

Para efecto de la construcción y para mantener las **generatrices lo más fidedignas** a la forma de una catenaria se pueden usar tanzas o hilos de albañil que hagan de directrices a medida que se avanza con una bóveda de cañón. El caso de las cúpulas se pueden usar también hilos desde el centro de la cúpula con nudos como referencias, aunque en este caso ya es menos riguroso el método. El hilo lo que pretende es hacer de guía y, en el caso de la cúpula nos da la posición y el grado de inclinación de los adobes en relación al eje de la forma catenoide. Cada hilada funciona como anillo de compresión y esto evita que mientras no se cierra toda la estructura esta no tenga ningún peligro de colapso. Es muy importante que cada hilada sea un arco.

La característica de **no usar una cimbra** nos hace ahorrar recursos a nivel material y de tiempo, aunque el peligro de deformaciones se hace mayor. A su vez, la propiedad física de las cúpulas catenoides con su línea de fuerza naturalmente inscrita en su morfología nos permiten desarrollar técnicas constructivas que usan la distribución de fuerzas a compresión a su favor permitiendo la rapidez y la economía de recursos. En el caso de que se suba demasiado rápido esto tiene el peligro de deslizamiento de alguna de las hiladas por su peso propio. Para evitar este efecto se aconseja a subir una bóveda con las hiladas inclinadas en relación a su arco tímpano como el caso de las bóveda montada.

En el caso de las cúpulas, la peligrosidad de subir muy rápido adviene de los fenómenos de asentamiento y contracción del mortero que pueden provocar deformaciones iniciales por deslizamiento de algunas hiladas hasta su máxima compresión. Si la compresión es muy grande puede llevar a la fisuración de los adobes por no **resistir a la fuerza de compresión** ejercida en ellos. Para tal, y para subir de forma rápida, se aconseja mezclar con los adobes ladrillos cocidos con mayor capacidad de resistencia a compresión. Podemos pasar de utilizar un adobe de 6cm x 12cm x 25cm o de 5cm x 10cm x 20cm que en media puede resistir a 35kg/cm<sup>2</sup> a un ladrillo que resiste hasta 80kg/cm<sup>2</sup>. Fuera usados adobes ejecutados en la misma obra con una mezcla de aserrín, estiércol de caballo y arcilla con un peso aproximado de 2kg y con un volumen de 1800cm<sup>3</sup> (6cm x 12cm x 25cm) y ladrillos de 1,5kg y con un volumen de 1500cm<sup>3</sup> (5cm x 11cm x 23cm), Esta mezcla de dos materiales tuvo que ver con una cuestión estética pero también con el menor peso y mayor resistencia de los ladrillos a la compresión.

Otra característica estructural con que nos encontramos a la hora de proyectar con estos arcos son sus cargas transmitidas al final de la línea de fuerzas, es decir, en sus apoyos. Cuanto más rebajado es el arco (con poca flecha), mayor es el empuje horizontal de la catenaria sobre sus bases. Con lo cual es importante prever que haya un cinturón de compresión (trabe) y/o un volumen (estribo) que permitan absorber los empujes laterales del arco.

Para garantizar el correcto dimensionado de los **trabes**, es importante que su espesor contenga la línea de empujes y que ésta se aleje del borde de la estructura o, en nuestro caso, que contenga un cinturón resistente a fuerzas de tracción, o sea, una viga de sauce o directamente de Hormigón Armado. En conclusión, el trabe de las bóvedas, es una pared y viga de solera que hace de base o capitel de las estructuras abovedadas y que debe de estar hechas con materiales resistentes a tracción y con grande capacidad elástica como son el hierro, la caña o varejones de sauce, etcétera.

A nivel de **estribos** entre bóvedas se puede hacer unos nervios que evitan los desplazamientos de la dovelas intermedias hacia arriba por fuerzas de tracción. Entre los nervios de los estribos se rellena de material liviano y al mismo tiempo con resistencia a la tracción como son sauces, canas y fibras largas con mortero de arcilla. Esto permite no solo funcionar de estribo como también reforzar la cubierta expuesta a sobrecargas verticales, dado que funciona como una segunda viga.

A nivel de **tiempo**, 8m<sup>2</sup> de la bóveda, nos lleva 10horas con un oficial y su ayudante. Para que quede revocada y terminada lleva más tiempo, terminando por ser prácticamente 2horas por m<sup>2</sup> de cubierta terminada. Dependiendo de la terminación interna (pintura, revoque, junta tomada con adobe a la vista, etcetera) y de su terminación externa puede llegar a 4horas por m<sup>2</sup>. Aún así y según las referencias disponibles estos tiempos son

menores a una losa de Hormigón y similares a un techo de madera. Si a esto le juntamos el ahorro en los materiales podemos llegar a ahorrar entre un 20% a 30% entre materiales y mano de obra.

Esta facilidad y rapidez constructiva no solamente tiene que ver con los costos pero también con la disponibilidad que da a la construcción de que se haga de **manera participativa y auto-constructiva** sin descuidar a asesoramiento profesional. Obviamente que también hablamos de otras ventajas como son el uso de materiales naturales, locales y sanos como el adobe, que bajan el costo económico y ambiental.

Como mortero para todas las estructuras se usó una **mezcla** de arcilla y arena tamizada con una proporción de 1:1. Al pegar el adobe es importante que haya un deslizamiento sobre la hilada anterior provocando así un efecto de succión y vacío que aumenta la capacidad inicial de pegar los adobes. Es también importante que cada arista quede haciendo tope sin mezcla para garantizar su capacidad de resistencia a la compresión y evitar los deslizamientos iniciales y deformaciones de la bóveda por contracción de la mezcla. Para esto, la mezcla debe ser bastante plástica y *chirla* para que no tenga volumen con posibilidad de contracción. En el caso de que a nivel de clima haga calor los adobes se pueden mojar para mejor adherencia y evitar desplegarse por la contracción demasiado rápida del mortero de arcilla. Pero en general, en el caso tanto de adobes como de ladrillos es conveniente que se pegue en seco, así disminuimos el peso inicial.

Otro detalle que aumenta la capacidad de la estructura de funcionar a la compresión por cada anillo y en la totalidad es en la parte de trasdós ir rellenando con **cuñas secas** las aristas que quedan abiertas fruto de la abertura de la forma. Por fin, cuando el mortero este seco, se revoca toda la estructura por su trasdós con una mezcla de arcilla y fibra larga aumentando su capacidad de resistencia a fuerzas de tracción y aumentando el volumen de la catenaria con un refuerzo del coeficiente o espesor de seguridad para las líneas de fuerza. Como son estructuras sin cimbra y adonde el cuerpo marca la morfología de la estructura es importante subir cada hilada con extrema atención y conectado a su tridimensionalidad. Sin embargo es normal el apareamiento de ajustes a la forma, dados fácilmente por el escalonado de algunas hiladas. Este escalado debe ser sutil de manera a no disminuir su resistencia en determinado punto.

Al ejemplo de las otras bóvedas el **espesor** de cada bóveda es originalmente de 12cm al que se suma un primer revestimiento de paja y arcilla de 3cm y luego una carpeta final de cal/arena/arcilla que recibe la membrana hidrófuga. Para la determinación del espesor óptimo se puede aplicar un factor de seguridad de 2 en relación al arco determinado por la línea de funicular de fuerzas. Por otro lado también se puede aplicar un factor de seguridad, adonde se divide la mitad de la flecha de la bóveda por 10, o sea un factor de 1/10. Si una cúpula o bóveda tiene 2m de mitad de su flecha entonces dividido por 10 tendríamos un espesor de 20cm.

En el caso de las bóvedas de cañón corrido la proporción entre la **flecha y el vano** del arco es importante. Se aconseja a que la flecha tenga entre el 20% a 25% de la dimensión del lado corto de la bóveda. O sea, para una bóveda de 3m de vano, tendrá una flecha de 0,6m.

Para obtener estos y otros datos, hasta ahora hemos hecho estructuras abovedadas con las técnicas constructivas ya enumeradas y ahora ampliadas, la construcción de catenoides sin cimbra. Para tal, describiremos 6 experiencias muy distintas en cuanto a la forma encontrada.

En el centro de formación de "Susurros del Viento" hemos construido 6 tipologías de estructura abovedada: 1ª: bóveda montada de cañón corrido de doble directriz (recta y sección de círculo); 2ª: cúpula de directriz sección de espiral (gota); 3ª bóveda montada de cañón corrido (directriz recta); 4ª bóveda tabicada de cañón corrido; 5ª bóveda de espina de pez de cañón corrido nervurada; 6ª bóveda de doveta vertical.

Por último, en un taller de formación en un terreno privado hemos construido una cúpula de directriz circular.

Veamos cada una a continuación:

1- Para construir las **bóvedas montadas de doble directriz** se estipuló un máximo de altura verificada pelo propio cuerpo arriba del andamio. La referencia fue la frente, ligeramente arriba de las cejas. El catenoide es de doble curvatura delineando de forma *biológica* generatrices de arcos de catenaria en el sentido longitudinal y transversal de la estructura, verificado posteriormente por métodos analógicos (colgar la cadena). Fueran usados solamente adobes ejecutados en la misma obra de los descritos anteriormente.

2- Para construir la **cúpula de directriz sección de espiral (gota)**, primero se trazo el arco de catenaria con una cadena y definiendo la altura pretendida. Esta misma cadena fue la referencia por el intradós en la sección transversal para cada hilada que se sucedía en el transcurso de la edificación. De seguida se empezó por el vértice de la bóveda que va dibujando una aproximada pechina, hasta que su geometría se intercepta con la forma circular de la planta. La intercepción de cada hilada se hizo con la técnica de espina de pez. La cúpula se cierra con una clave en triángulo o ladrillo cimero. Se utilizaron ladrillos y adobes en un juego formal con un propósito estético y estructural. (fig.2)

3- La tercera estructura elaborada en el centro fue una **bóveda montada de cañón corrido**. Su elaboración es simple. Se elabora un primer arco de catenaria con una cimbra. A este arco se apoyan los adobes delineando hilada a hilada sin cimbra. Cada hilada tiene una pequeña inclinación hacia el arco tímpano. Esta inclinación se ha dado de manera intuitiva y orgánica pero se puede determinar una proporción de 1:3 para el triángulo que determina la inclinación. Esta bóveda tiene como característica que se puede hacer con rapidez dado que hay menos peligro de desplazamiento de cada hilada en relación a la anterior. (fig.3)

4- En la continuidad de la bóveda explicada anteriormente se hizo una pequeña **bóveda tabicada de cañón corrido**. La mayor característica y destaque de esta estructura es su trabamiento y colocación de los adobes. Por un lado la traba se hace a mitad de la longitud de el anterior adobe armando un diseño con un patrón simétrico y por otro lado los adobes se colocan como un tabique, o sea acostados definiendo la bóveda con un

espesor de 6cm iniciales sin cubrimiento. Si bien el espesor de la bóveda es chico, el tipo de traba es más eficiente que las demás bóvedas que se probaran. A los esfuerzos sometidos de compresión, los adobes y ladrillos resisten mejor dado que su trabamiento es menos homogéneo lo que hace descomponer la fuerza en más direcciones de la superficie.

5- La **bóveda de espina de pez de cañón corrido nervurada** está compuesta de arcos diagonales al corte transversal de la bóveda. Estos arcos son de ladrillo y sirven de nervaduras y arcos tímpano que sustentan las hiladas de adobe de la bóveda. Los arcos de ladrillo fueran construidos con una cimbra de forma catenaria y los triángulos de la bóveda que están entre los arcos de ladrillo son de adobe y se subió cada paño triangular sin cimbra con un trabamiento en espina de pez. La flecha de esta bóveda es de 30cm por un arco de 3m con una longitud de 7m, lo que hace que su empuje lateral dado por la fuerza a la tracción en la base sea muy grande. Este dato sumado a una sobrecarga excesiva de aproximadamente 600kg/m<sup>2</sup> derivó en el desplazamiento de los apoyos (la pared de contención y la viga de apoyo). En consecuencia, la bóveda presentó numerosas fisuras sin peligro de colapso, hasta el momento que presentó una fisura continua a lo largo de toda su superficie. Esta fisura se agrandó, dado que la estructura presentaba cada vez más deformaciones con la disminución de su flecha, hasta el punto de perder en uno de los puntos la forma de arco cóncavo y presentar a lo último la forma de un arco convexo. En esta etapa se siguió cargando la estructura teniendo apuntalado y reforzados los apoyos. Esto hizo que al final la estructura colapsara por una altísima deformación de la superficie y por estar trabajando con una gran carga propia, haciendo que los mismo adobes no resistiesen a las cargas de compresión. La fisura central longitudinal se agrandó hasta el colapso de uno de los paños triangulares.

6- La **bóveda de dovela vertical** fue construida de manera convencional, teniendo el cuerpo como referencia para su flecha. Es una bóveda de directriz recta con un arco de 3m y una longitud de 5m. La forma de su superficie es cambiante dada su naturaleza orgánica del proceso constructivo, sin embargo la línea de fuerzas se mantiene en su espesor. La flecha es aproximadamente 50 a 60cm.

7- Por fin hemos hecho una **cúpula de directriz circular** como tipología de un espacio de música-terapia. La planta es una circunferencia de aproximadamente 7m de diámetro. La estructura abovedada es una cúpula hemisférica construida sin cimbra, pero con la ayuda de un hilo que determinaba el radio. Para este tipo de estructuras el hilo de albañil, sujeto a un piolín que rota en el centro del espacio, es de gran ayuda en las primeras hiladas, dado que determina el arranque más riguroso y con eso hay menos probabilidades de luego cometer errores a nivel de forma. Cada hilada arma un cinturón a compresión y los adobes son colocados de manera a que siempre se trabe la junta. Tal como los ejemplos anteriores el uso de ladrillos aumenta la capacidad de resistencia a compresión de esas hiladas, frenando el posible apareamiento de fisuras. En esta estructura se hizo un revoque exterior con paja larga y arcilla como refuerzo estructural y en la parte de la base y a los 52° de la superficie medidos del eje central se reforzó con un cinturón de cañas revestidas de paja y arcilla. Esto tiene como objetivo aumentar la capacidad de resistir a fuerzas de tracción en esos dos puntos de la estructura. Dada su dimensión se hizo una viga de Hormigón armado en forma de "L" con hierros de 8mm y estribos de 6mm. Esta viga de solera se llama trabe y como ya hemos visto es de extrema importancia para la base y el patín de las estructuras abovedadas.

## 1.4 Método geométrico de análisis

Como ya hemos visto en el anteriormente, las fisuras son solamente un detonador que la estructura esta trabajando de manera distinta al que fue construida inicialmente. Una vez que las fuerzas se estabilicen y la estructura se acomode, las fisuras se pueden mantener en el tiempo sin peligro de colapso. Sin embargo y obviamente que si se siguen ampliando y provocan un abultado cambio en la forma, el colapso puede ser inevitable.

Hemos analizado dos tipos de catenoides con distinto comportamiento estructural, la **cúpula de directriz sección de espiral (gota)**, y la **bóveda de espina de pez de cañón corrido nervurada**.

Una vez terminada la construcción hemos analizado las distintas curvaturas en diversos cortes, tanto transversales como longitudinales para verificar la continuidad o el cambio de su geometría de fuerzas internas. Este método de colgar las cadenas permitió verificar con exactitud si la estructura estaba trabajando como inicialmente fue prevista o si en algún momento la línea funicular de fuerzas estaba al límite o saliendo del contorno de la bóveda. Para hacer las mediciones se paso un hilo tensado entre las dovelas base de la bóveda de manera a dejarlo a nivel. Este hilo marca la sección que se pretende medir dado que determina el vano del arco a medir. De seguida se ubica el centro del hilo y varios puntos que o dividen en partes iguales. Desde el centro y de cada punto se mide la distancia del hilo a la superficie del catenoide. Luego se colgó una cadena con base en los mismo puntos del hilo y que su distancia al hilo en el centro es la misma que del hilo al catenoide. Este proceso determinaba un punto en común y la dimensión máxima de la curvatura de la línea de esfuerzos (la catenaria de la cadena colgada). Posteriormente se optó por medir de 10 en 10cm o de 20 en 20cm en cada punto del eje adonde se media la altura en relación al catenoide y luego en relación a la cadena. De esta manera hemos podido observar el comportamiento de la estructura y determinar si las variables de algunos cm en algunos puntos tenían o no relevancia a nivel de su estabilidad.

Es importante referir que las medidas obtenidas por este método tienen como referencia la superficie interior de la estructura, el intradós de la bóveda, superficie esta que se representa por una línea. Esto nos da una idea aproximada de cómo la demás estructura estará trabajando en todo su espesor. Teniendo en cuenta este dato es admisible una mayor variación en la línea de fuerzas, la catenaria. Para tal es importante garantizar

coeficientes de seguridad en relación a su espesor permitiendo que la línea de fuerzas este contenida en el espesor de la estructura catenoide.

En el caso de la **bóveda de espina de pez de cañón corrido nervurada** hemos verificado elevadas deformaciones, fisuras y la hemos sometido a continuos esfuerzos hasta su rotura y colapso. Siempre que una alteración se daba a la forma expectable la reforzábamos dándole mayor espesor por el contradós de la bóveda. Estas alteraciones tenían que ver con el peso propio de la estructura dado por la excesiva humedad acumulada por lluvias. Como ultima acción con el intento de retener el avance de su deformación la hemos reforzado por el intradós con un revestimiento de arcilla y fibra larga. De esta manera hemos reintroducido la línea de fuerzas adentro de la estructura y evitando por un momento el colapso. Estos refuerzos siempre son hechos con una mezcla de arcilla y fibra larga. Las mezclas de revestimientos de las bóvedas son inicialmente muy pesadas por su elevado contenido de agua en la arcilla con lo cual tiene si o si que ser colocada con tiempo seco y sin lluvia para que su secado sea rápido. Cuanto más la cargábamos de peso, mayores eran las deformaciones dadas por el desplazamiento de su estructura de apoyos. Sin embargo su capacidad de adaptarse a la nueva morfología era increíblemente amplia lo que nos llevo a cuestionar de cómo estaría a trabajar a nivel de resistencia a los esfuerzos. Una vez estabilizados los apoyos, hemos hecho un análisis para averiguar su estabilidad, dado que la flecha de la bóveda en algunos puntos era ya nula. Como tal hemos podido observar que la curvatura de la superficie catenoide, inicialmente perpendicular a su base y eje central, ahora ya no era determinada por arcos de catenaria transversales pero si en diagonal. Esto hizo desplazar las geometría del catenoide a nivel de línea de fuerza de su eje central para asumieren una dirección diagonal. El análisis empírico confirmó que algunas catenarias ya no existían dado la flecha nula de la bóveda por su asentamiento y la compresión de toda la estructura, pero las catenarias estaban ahora dibujadas en un sentido diagonal a la base, lo que hacia que continuase resistiendo a los esfuerzos. (Fig.5) Esto tiene su justificación por los arcos de nervadura hechos en ladrillo. Estos arcos por mayor resistencia a la compresión no tuvieron la misma deformación y llevaban a que toda la estructura acompañase su geometría de manera a resistir como totalidad.

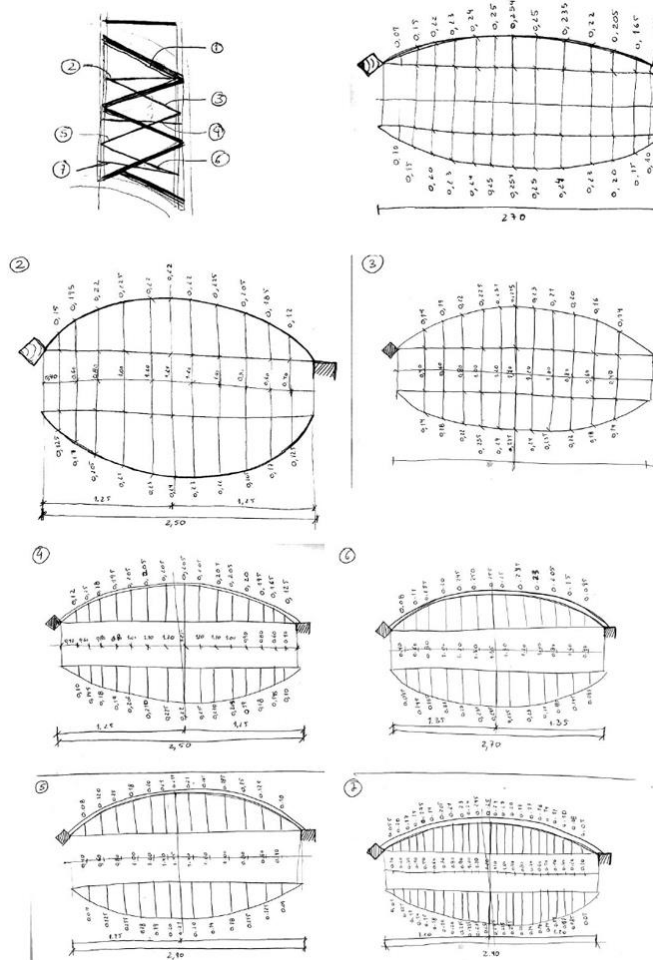


Fig. 5. Gráficos de verificación geométrica de la curva de catenaria existente en la bóveda de espina de pez de cañón corrido

Además de la información obtenida era visible por observación que el eje central de la bóveda ya no era una recta sino una sinusoide y que en la arista correspondiente a la base de la bóveda ahora teníamos una curva simétrica a lo largo de la base de la bóveda. Estos indicadores nos llevaron a concluir que la bóveda no corría peligro de colapso pero que simplemente estaba trabajando de manera muy distinta a la proyectada inicialmente. Sin embargo su posterior colapso tubo que ver con la imposibilidad de estabilizar a tiempo sus apoyos.

La deformación en la bóveda citada tubo su origen en un detalle de diseño inicial. Los arcos de nervadura hechos con ladrillo no fueran hechos totalmente a plomo y esto sumado a su gran diferencia a nivel de comportamiento estático y mecánico para los paños de adobe llevo a que las deformaciones se ampliasen en las uniones entre los dos materiales. En conclusión es importante que a la hora de interceptar el ladrillo con el adobe se pueda hacer en hiladas lo más horizontales posibles como el caso de la cúpula y así evitar el deslizamiento de los materiales por el distinto trabajo a nivel de contracción del mortero. De otra forma se aconseja a que las hiladas se suban de manera más lenta y dejando el proceso de secado entre las hiladas de adobe y ladrillo ser completo antes de forzar con más hiladas.

En síntesis, la base de las estructuras abovedadas, adonde descarga su peso, es la mayor dificultad que encontramos a la hora de diseñar estructuras abovedadas y como tal la mayor condicionante del diseño. Se puede dimensionar los traveses y los estribos mediante un método de cálculo en base a leyes mecánicas y resistencia de materiales, y/o por geometría que contemple la eficiencia formal. Este último es el método que utilizamos y cuenta con un rigor empírico que solo se puede resolver por experiencia y por el estudio y observación de estructuras construidas. Para ello contamos con milenios de historia de construcciones de fábrica y también con nuestra experiencia acumulada. Entiéndase que los modelos de cálculo aritmético son excelentes herramientas de descripción y análisis de fenómenos ya existentes, pero que su poder de creación es limitado, pudiendo solamente servir de comparación a modelos ya creados, llevando a la aceptación o negación de algo ya concebido. Los modelos matemáticos son posteriores al acto creativo, para el cual es importante conocer los fenómenos de equilibrio y estabilidad de una estructura a nivel geométrico, actuando como herramienta del proyecto creativo.

## Conclusión:

Como experiencia de formación hemos verificado que la construcción de este tipo de estructuras es posible sin un elevado conocimiento previo, teniendo un asesoramiento profesional. Se demostró que es posible la construcción de este tipo de estructuras en un formato de taller de formación dado que los alumnos asimilaban de manera rápida y fácil los conocimientos tanto a nivel de técnica como a nivel teórico, adonde personas sin experiencia previa en la construcción han logrado ejecutar el proceso de manera casi inmediata y de acuerdo a lo pretendido. Después de esta experiencia constructiva asociada al diseño de formas, nos da la seguridad para proponer sistemas que puedan ser adaptados y aplicados a distintas tipologías, pero con especial interés en la resolución de problemas de vivienda. Su versatilidad, economía y ahorro energético y ambiental hace que este tipo de estructuras sean eximias en la resolución de techos, dada la manipulación de la catenaria y la obtención de las posteriores superficies de catenoides. Su mayor punto débil son los apoyos y eso es de especial importancia en la resolución del detalle constructivo y de la morfología que condiciona el proyecto arquitectónico.

Con la necesidad de optar por usos prioritarios, nos motiva la urgente demanda del sector de vivienda. Aplicar este sistema constructivo a la vivienda social y a módulos que puedan ser fácilmente replicados es factible dada su economía de recursos a nivel de materiales, además de la reducción de tiempos. Si el factor de capital por sí solo no es un aliciente, tenemos su carácter humanizado dado por la forma y su posibilidad de generar espacios edificadas de manera participativa y con identidad, esa arquitectura materna que nos cobija y nos protege. Usando el sistema constructivo sin cimbra, la catenaria como base del diseño y el cuerpo como referencia de la morfología global es posible construir estructuras abovedadas con pocas referencias y con diminuta infraestructura. Este proceso admite la construcción de techos y la creación de espacios orgánicos y humanizados y de accesible ejecución. Son espacios a nuestra escala, originales e individualizados, lugares maternos que nos cobijan y nos impelen a permanecer.

Se verificó también, a nivel de análisis subjetivo, el inequívoco deslumbramiento relativamente a los espacios construidos por intermedio de quien participaba de su construcción o se aproximaba como curioso. En todas las experiencias constructivas se observó que cuando el espacio todavía estaba por terminar ya las personas tendían a habitarlo y a permanecer en el lugar. Esta tendencia se debe al "poder de la forma" dado por la capacidad de comunicación e identificación de la forma con el sujeto. Es evidente que aquél que entra a una estructura abovedada, el cuerpo se le paraliza aguzando sus sentidos y, particularmente la mirada, se detiene en la más absoluta contemplación y disfrute del espacio. El espacio abraza nuestro cuerpo y nos transporta al profundo y ancestral de nuestra concepción de lo espacial, de lo objetual y de lo comunicacional. Es algo que nos conecta con el útero materno, con la copa del árbol, con la caverna y con los primeros espacios de cobijo y vivienda popular elaborados por el ser humano.

## Bibliografía:

- [1] Aguirre, Ramón (2016); *Bóvedas Mexicanas de Adobe y ladrillo*; Oaxaca: Carteles editores
- [2] Fernandez, Santiago Huerta; (2004); *Arcos, Bóvedas y cúpulas. Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica*; Madrid: ed. Instituto Juan de Herrera; I.S.B.N.: 84-9728-129-2
- [3] Lafarga, Antonio José Mas-Guindal; (2011); *Mecánica de las Estructuras Antiguas – ó cuando las estructuras no se calculaban*; Madrid: ed. Munilla-Lería; I.S.B.N.: 978-84-89150-90-4
- [4] Lefebre, Henri; (2001); *O Direito à Cidade*; Sao Paulo: Centauro Editora (2ªed)
- [5] Ponce, Alfonso Ramirez; (2002); *Curvas de suspiro y Barro. El ladrillo recargado: una técnica milenar y moderna*; recuperado el 22/03/17 de: [www.vitruvius.com.br/revistas/read/arquitextos/](http://www.vitruvius.com.br/revistas/read/arquitextos/)



[6] Thunnissen, Henri J. W.; (2012); *Bóvedas: su construcción y empleo en la arquitectura*; Madrid: ed. Instituto Juan de Herrera; I.S.B.N.: 978-84-9728-425-7