

Configuración constructiva de las bóvedas «convexas» de la iglesia de la Colonia Güell, obra de Antonio Gaudí

José Luis González Moreno-Navarro

La propuesta contenida en la ponencia sobre la Casa de los Botines de León presentada en el 1º Congreso de Historia de la Construcción,¹ afirmaba que la restauración de los edificios históricos es una ocasión irremplazable para aumentar el conocimiento constructivo de ellos. La presente ponencia asume la citada propuesta y aporta las conclusiones sobre las bóvedas citadas en el título teniendo como base las investigaciones desarrolladas bajo la dirección y financiación del SPAL,² con ocasión de los estudios necesarios para restaurar el edificio, operación que está en marcha en estos momentos.³

Estos estudios se iniciaron hace diez años y ya dieron lugar a diversas presentaciones públicas y artículos,⁴ uno de ellos dedicado a las bóvedas objeto de esta ponencia.⁵ En el se exponía que, a pesar que nada se podía afirmar todavía sobre su configuración constructiva (tabicada, de hormigón o de otro tipo) sus valores formales eran suficientes como para concluir que son un hito en la arquitectura abovedada. La definitiva resolución de la incógnita constructiva aumenta ese valor. Se prometió que cuando hubiera datos concluyentes se daría cuenta de ello. Ninguna ocasión mejor para hacerlo que el presente Congreso.

La primera parte de este texto retoma datos ya contenidos en la citada ponencia con tal de poder ofrecer al lector la información imprescindible para la comprensión de las aportaciones propias de esta ponencia.

LA INACABADA IGLESIA DE LA COLONIA GÜELL

El Conde de Güell encargó a Antoni Gaudí en 1898 la realización de la iglesia de la colonia textil situada en Santa Coloma de Cervelló, cerca de Barcelona. Las obras dieron comienzo en 1908 y se suspendieron en 1914 dejando sólo construida la Iglesia baja y el pórtico de acceso a la Iglesia alta.

El método que Gaudí utilizó para imaginar la doble iglesia, la maqueta de hilos colgantes, está basado en las propiedades de los polígonos funiculares y les confiere una gran singularidad en el panorama de la historia de la arquitectura. La utilización de las líneas funiculares como sistema de determinación de formas intrínsecamente estables ya era conocido desde épocas anteriores. Sin embargo, ningún edificio relevante había sido generado siguiendo ese principio y menos todavía como conjunto de líneas funiculares trenzado en tres dimensiones. Pero para Gaudí la maqueta no pasa de ser un mero instrumento, ya que «pretender que las funículas den las formas de la Arquitectura es pueril, porque constituyen sólo un método de verificación o de comprobar la estabilidad (...) antes de la estabilidad hay otras cosas a satisfacer, capacidad, iluminación, relación ordenada de los servicios, etc...» y, aunque no lo explicita, después de la estabilidad, una decidida plasticidad extraordinariamente expresiva.

Esto último se comprueba fácilmente con la comparación entre la maqueta funicular y la realidad construida (figuras 1 y 2). Si singular es el método de



Figura 1

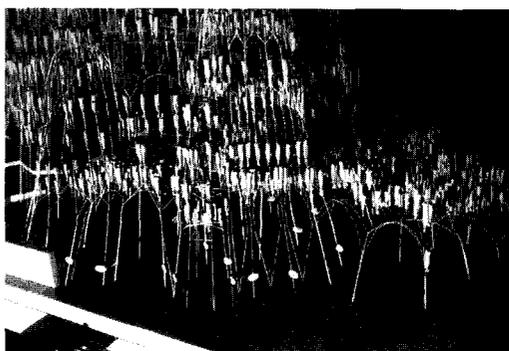


Figura 2

definición básica de las formas estables, mucho más lo es el acto creativo con el que se pasa de la escueta definición funicular a la extraordinaria plasticidad de los arcos, las columnas, los pilares y los muros. Pero, tal como se comprueba líneas más adelante, es en las bóvedas construidas del pórtico donde, precisamente por no estar claramente definidas en la maqueta funicular, se puede encontrar con mayor fuerza la prodigiosa manera de hacer del arquitecto catalán: la funcionalidad, la constructibilidad, la estabilidad y la plasticidad se conjugan en una unidad indisoluble que se alcanza por medio de una extraordinaria sensibilidad guiada por un profundo y experimentado conocimiento.

Un desarrollo semejante aplicado a las bóvedas de la iglesia inacabada habría conseguido, sin duda, un hito inigualable más importante que el de la Sagrada Familia. Y aquí se encuentra una cuestión clave: ¿es

suficiente la observación de las fotos de la maqueta o las que Gaudí repintó para darnos una idea de lo que pudo haber sido la iglesia acabada?. Es razonable negarlo ya que la creatividad de Gaudí en la fase de proyecto sólo estaba latente y cuando se concretaba con toda su intensidad era en la fase de la construcción. El análisis de la obra realizada puede corroborarlo.

La obra se suspendió cuando los muros de la iglesia se elevaban unos dos metros por encima del nivel de lo que debería haber sido el pavimento.

Lastimosamente, la maqueta todavía conservada y gran cantidad de documentos sobre su materialización desaparecieron en 1936, pero gracias a la entusiasta iniciativa de un grupo de holandeses y alemanes admiradores de lo gaudiniano, en 1983 se finalizó la ingente tarea de reconstruir el modelo colgante (figura 2), el cual, junto con la publicación que relata detalladamente el proceso, es una aportación inestimable para una mayor comprensión de lo pudo ser y no fue. Sus interpretaciones a partir de nuevas fotos sobre el modelo de hilos nos ayudan a concretar las ideas que Gaudí pudo haber dibujado sobre otras fotos quizá desaparecidas. Pero su mayor interés reside en que permite comparar con mucho más detalle del que nos permitían las fotos originales de Gaudí la realidad construida y la maqueta y así conocer mejor el inmenso salto creativo que va desde el hilo al pilar o arco, o desde la trama de hilos a las fachadas o las bóvedas.

EL PORCHE DE ACCESO A LA IGLESIA BAJA

Sobre este extraordinario porche (figura 2), única parte realmente terminada de toda la obra, se han dado ya gran cantidad de argumentos que no repetiremos en este escrito orientado hacia el estudio de las bóvedas. Y es precisamente desde este punto de vista cuando se puede decir que, sin duda, y a pesar de sus reducidas dimensiones, el pórtico soporte de la escalinata de acceso a la iglesia es un hito real en la particular historia de la arquitectura abovedada. Las razones son variadas. La más importante, la de ser la primera vez en la historia que se construyen bóvedas con «intradases convexas» en lugar de los cóncavos, cilíndricos o esféricos con los que se ha construido la totalidad de las bóvedas anteriormente. Otra razón, no menos importante, es que todo ello se hace, como ya se ha indicado líneas más arriba, de una manera

en la que la funcionalidad, la constructibilidad, la estabilidad y la plasticidad se conjugan en una unidad indisoluble.

Los arcos

El pórtico también se configura mediante el sistema antifunicular por medio de arcos que descansan sobre pilares inclinados o sobre los muros de la iglesia o de contención de tierras.

Los arcos están dispuestos en planta según una malla triangular en dos zonas y formando figuras similares a trapezoides en una tercera, siguiendo lo definido por la maqueta funicular. Pero el análisis de su configuración constructiva permite observar la creatividad de Gaudí. En lugar de adoptar el perfil parabólico a la manera seguida en la capilla, se construyen mediante consolas-salmer de ladrillo con hiladas horizontales en saledizo sobre las que se asientan arcos rectos resueltos con un sardinel aparejado de dos roscas, con lo que la parábola se materializa en un trapecio (figura 3). La razón de haberlo hecho así no está explicitada en ninguna de las publicaciones que recogen las ideas de Gaudí.

Una vez construidas las bóvedas, los arcos fueron sometidos a un tratamiento de esculpido y revoco con el que, ahora sí, adquirieron su perfil general antifunicular pero con una riqueza formal y decorativa extraordinaria mucho más allá de una simple línea curva. Es razonable hipotetizar un simple alarde demostrativo de Gaudí sobre la puerilidad de considerar la maqueta como determinante de las formas.

Veámos ya las bóvedas «convexas».



Figura 3

LAS BÓVEDAS

La estructura de arcos en malla triangular, organizada para dar soporte a las superficies de acceso de los fieles a la iglesia superior, obviamente, está incompleta si no se macizan los triángulos que quedan vacíos. Las bóvedas responden a esta necesidad. La pregunta nos la podemos hacer nosotros de manera parecida a como se la pudo hacer Gaudí: qué tipo de bóveda se adapta a un triángulo de lados coplanares. La primera respuesta se puede encontrar en los papeles de seda que se añadieron a la maqueta para darle corporeidad: unas bóvedas de doble curvatura, baídas o de traslación, comunes en la manera de hacer de los constructores catalanes de la época. Pero, por la razón que fuere, aunque fácil de suponer cuando se imagina los huecos cóncavos entre los arcos triangulados, Gaudí escogió otra solución totalmente nueva en la historia de la arquitectura abovedada: el paraboloides hiperbólico. Las razones por las que lo hizo no se han documentado, aunque Gaudí ya había dado muestras de conocer y utilizar las notables propiedades formales, mecánicas y constructivas de las superficies regladas en otros edificios, incluidas las fachadas de la propia Cripta aunque sin el protagonismo del pórtico. Sus opiniones sobre ellas están recogidas por sus discípulos, y algunas de ellas están más cercanas a la mística que a la arquitectura.

Si de rellenar un espacio triangular más o menos plano se trata y se busca una forma novedosa pero construible, el paraboloides presenta notables ventajas. Es preciso recordar que se puede generar a partir de un tetraedro, haciendo resbalar una línea recta, la generatriz, por dos de las aristas opuestas del tetraedro que actúan de directrices. La adaptación formal de la mitad del paraboloides es perfecta ya que en planta es un triángulo y las intersecciones con dos de los lados son rectas.

El comportamiento mecánico es inmejorable por ser una bóveda de doble curvatura y porque además siempre contiene en el intradós, además de una parábola convexa que le da su aspecto «panzudo», una parábola cóncava que es la encargada de transmitir las cargas a las líneas de apoyo, ya que el paraboloides también se puede generar mediante una parábola con la concavidad hacia abajo que resbala sobre otra con la concavidad hacia arriba.

Pero el tercer lado es una parábola convexa de gran flecha. Este rasgo morfológico comporta que sólo sea una solución útil cuando el tercer lado es

uno de los muros de contención como ocurre en cinco de las bóvedas del nivel inferior (figuras 4 y 3).

Para las otras dos bóvedas de este nivel y para las del tramo en desnivel es preciso buscar otra solución y Gaudí también la encuentra en el paraboloides que se obtiene con la intersección de un prisma triangular, los lados de los arcos, con la parte central del tetraedro antes citado (figura 5). Las líneas de intersección pasan a ser tres parábolas, dos convexas y una cóncava, mucho más rebajadas y que se alojan fácilmente sobre las superficies laterales de los arcos de apoyo. Las cualidades formales y mecánicas se mantienen, pero la constructibilidad se complica extraordinariamente. Sin embargo, ahí están aunque nadie haya explicado cómo se hicieron.

El tercer tipo de bóveda de contorno trapezoidal no añade nuevas dificultades ya que se genera por la

intersección de ese polígono con el paraboloides dando lugar a cuatro parábolas rebajadas, dos cóncavas y dos convexas.

Para completar la descripción de todas las bóvedas falta la cuarta característica indisolublemente asociada a las tres anteriores: funcionalidad, estabilidad y constructibilidad, es decir, la plasticidad. La maestría y la calidad de auténtico arquitecto integrador de Gaudí se acaba de admirar cuando se comprueba que toda su propuesta plástica para las bóvedas está basada en las mismas propiedades ya citadas del paraboloides que de esta manera queda remarcada su presencia. La superficie de las bóvedas están acabadas con compleja textura obtenida a partir de un revoco grueso de mortero sobre el que se embuten retales triangulares de rasilla. En el centro, en la mayoría de los casos, o a un lado en lo menos, la decoración se completa con un tema muy querido por Gaudí: la cruz. Pues bien, todos estos motivos decorativos están regidos por las propiedades reguladas de los paraboloides.

Los dos brazos de la cruz son dos tramos de dos generatrices, y toda la malla que organiza la textura descrita anteriormente se basa en las generatrices y en parábolas a ellas asociadas. Su estudio nos permite descubrir nuevos datos.

Las bóvedas que se obtienen a partir de medio tetraedro tienen sus generatrices formando una malla de rectas que se cruzan formando ángulos de 60° y 120° . Las parábolas de la trama, en este caso convexas, son las que se obtienen con intersecciones de planos que acaban de completar la malla triangular formando así una textura de triángulos equiláteros (figura 6).

En las otras bóvedas, las obtenidas del centro del tetraedro descubrimos un nuevo tipo. La mayoría sigue la ley generadora anterior con la salvedad que las

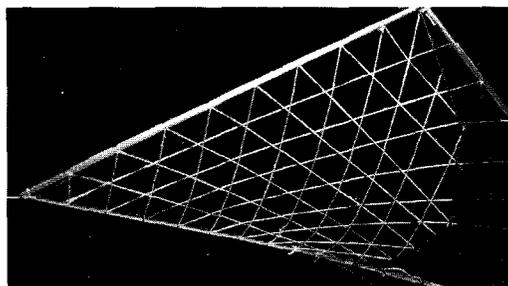


Figura 4

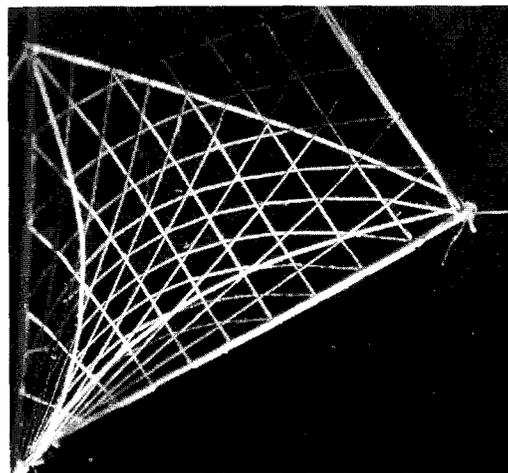


Figura 5



Figura 6

parábolas de la malla son cóncavas. El nuevo tipo es el que cuyas generatrices se cortan a 90°. El dibujo pasa a ser otro muy distinto y añade todavía más riqueza a todo el conjunto.

Como los albañiles dirigidos por Gaudí pudieron realizar toda esta extraordinaria textura decorativa es bastante más difícil de imaginar que incluso la realización de las bóvedas soporte.

La construcción de las bóvedas

De las cuatro características relevantes ya citadas: funcionalidad, estabilidad, plasticidad y constructibilidad, falta dar solución a la cuarta: no que sea construible o no, porque obviamente ahí están, sino a como fueron construidas y, en consecuencia, cuál es su configuración constructiva actual.

Dado que no se conocen documentos directos, gráficos o escritos, de cómo se realizaron, a lo largo de estos años de estudio han aparecido varias hipótesis explicativas, ya que con todos los colegas que visitaban la Cripta, se discutía cual había podido ser el procedimiento. Las dos con mayor número de defensores eran el de la bóveda tabicada y el de la bóveda prefabricada.

Sobre la primera, es bueno recordar las extraordinarias posibilidades morfológicas de su técnica.⁶ Es fácil imaginar un albañil, desde luego experimentado colocando una primera hilada de rasillas apoyada en la recta intersección de la bóveda con uno de los arcos, y tocando en su otro extremo el tendel, dispuesto según la generatriz, girado en el espacio en relación con la primera directriz, conformando ya así la superficie alabeada. Es fácil imaginar pero especialmente muy difícil de realizar, especialmente la colocación exacta de los tendeles. La opción sobre la prefabricación se basaba en facilidad de realizar un molde dispuesto sobre el suelo; pero difícilmente podía explicar el izado de la bóveda realizada a su lugar definitivo.

La única referencia escrita que existe es la que se contiene en el libro de Isidre Puig Boada y se atribuye a un testimonio verbal de J. Matamala escultor que trabajó directamente con Gaudí. Según él, la bóveda había sido hecha con hormigón y Gaudí, en un alarde típico en muchos arquitectos en la historia de la construcción, ante el miedo de sus operarios a la hora de retirar el encofrado y su apuntalamiento, se puso debajo de la bóveda para tranquilizar a sus operarios en esta operación. Esta tercera hipótesis, la

más verosímil, dada esa referencia directa por un colaborador de Gaudí, era también realmente difícilmente explicable sobre todo cuando además era necesario explicar simultáneamente la extraordinaria decoración de la superficie alabeada.

Pues bien, gracias a las pequeñas catas que se han podido realizar por motivo del inicio de los trabajos de restauración del edificio, finalmente podemos pasar de las hipótesis a las tesis defendibles, parciales a pesar de todo, que nos pueden informar sobre su configuración constructiva, cuando menos.

El desperfecto que creó una salida de humos de una cocina militar de campaña situada bajo las bóvedas con ocasión de nuestra Guerra Civil, ha permitido realizar una cata de la sección de la bóveda. En ella se puede observar, de arriba hacia abajo, un conglomerado con estructura difícilmente reconocible, en el que se mezclan piedras, ladrillos y mortero, una capa de rasillas y después, el grueso del revoco visible desde abajo. El repicado de la parte de éste que también estaba en mal estado, ha permitido ver que esta primera capa de rasillas inferior corresponde claramente a una disposición muy regular.

Hechas estas catas se hace participar en las observaciones al grupo de investigación de la Universidad de Barcelona sobre la configuración petrográfica de los materiales; sus conclusiones han sido claras. El revoco inferior de las rasillas se compone de tres capas: en la segunda se embuten los retales de rasilla, y la tercera, sólo perceptible con las técnicas microscópicas, de cal, que es la que facilita la adherencia de la arena del acabado final de la superficie sobre el revestimiento.

Una explicación razonable de esta disposición puede ser la siguiente: la primera capa puede considerarse como un enfoscado que regulariza la superficie de rasillas; la segunda es la que, una vez dispuesta sobre la anterior, permite embutir en ella las rasillas siguiendo las directrices y generatrices del parabolide; la tercera capa de cal es la definitiva que, lanzando la arena sobre ella en estado fresco, permite acabar definitivamente la superficie con una textura que impide advertir por completo ese proceso de ejecución. En consecuencia, la capa de rasillas ya tiene su configuración estática final cuando se realiza el revoco. Pero, ¿cómo se hizo la capa de rasillas, y lo que sobre ella hay? y ¿quien actúa como elemento portante?. Veamos si es posible formular una nueva hipótesis.

Una explicación puede venir de la comparación de las catas realizadas con las figuras con las que

Choisy explicaba la construcción de lo que, en principio, se ha considerado siempre como un antecedente de las bóvedas tabicadas catalanas: las bóvedas delgadas que actuaban como encofrado perdido de las auténticas bóvedas que eran de hormigón romano (figura 7) Pues bien, la tesis que se defiende aquí es que en el pórtico de la Iglesia Baja de la Colonia Güell nos encontramos con unas bóvedas construidas a la manera romana.

Sobre si Gaudí conocía este libro parece que no es lógico dudarlo. Sobre la aplicabilidad del sistema, las fotos permiten advertir que es el más razonable.

Mediante la colocación de unos tablonos, que son

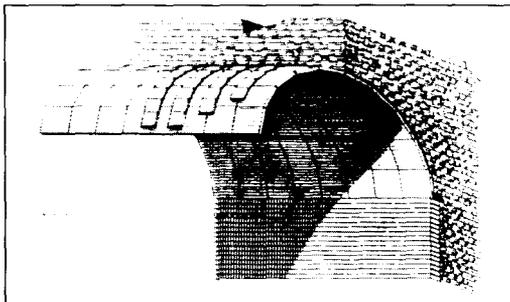


Figura 7

el haz de directrices, apoyados, no sabemos exactamente cómo, sobre dos generatrices se consigue perfectamente una base para el paraboloide. Sobre estos se sitúan las rasillas que actúan como encofrado perdido y sobre ellas se sitúa definitivamente el hormigón que dada la configuración morfológica antedicha, transmitirá su peso y las sobrecargas de uso, mediante la sección abovedada cóncava, sobre los bordes apoyados en los arcos (figura 8).

No parece lógica la hipótesis que basaba la ejecución en un encofrado al estilo de los de Candela para hacer los paraboloides de hormigón. Si Gaudí disponía de operarios que ya habían sido capaces de realizar buena parte de la Iglesia y todas las columnas del pórtico, lo lógico era aprovechar su extraordinaria habilidad para con el mínimo de elementos ajenos al oficio de albañil se resolvieran definitivamente todas estas bóvedas. Es posible incluso pensar que no apareciera ningún elemento de madera y todo se hiciera sobre tabiquillos o de cualquier obra del albañil, pero no tenemos ningún dato que nos lo confirme. Parece lógico

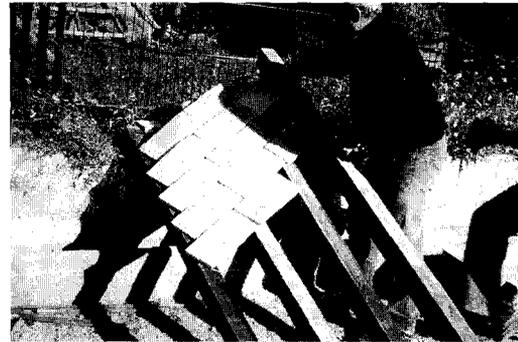


Figura 8

considerar como la más apropiada la utilización de tablonos y cabios de madera como soporte del encofrado perdido hecho de rasilla que recibe definitivamente un hormigón que, desde este punto de vista, podríamos considerar romano, aunque su configuración es de cemento portland como era lógico ya en esta obra.

NOTAS

- * El equipo de trabajo que ha realizado este estudio está formado, además de por el titular de la ponencia, por los siguientes profesores de la Universidad Politécnica de Cataluña: Albert Casals, Dr. Arquitecto; Alejandro Falcones, Arquitecto, y Justo Hernanz, Arquitecto técnico.
- 1. Casals, A., González, J.L.: *Nuevos datos sobre la construcción de Antoni Gaudí: la sorprendente estructura constructiva de la Casa Botines de León*, en «Actas del Primer Congreso Nacional de Historia de la Construcción», Madrid, 1996.
- 2. Servei de Patrimoni Arquitectònic Local de la Diputació de Barcelona.
- 3. González, J.L., González, A., Casals, A.: «De cómo acabar la iglesia de la Colònia Güell, obra de Antoni Gaudí», Revista *Loggia*.
- 4. González, J.L., Casals, A., Roca, P.: *La comprensión de la realidad del monumento: el caso de la Cripta de la Colonia Güell*, en «Informes de la Construcción», nº 427, 1993.
- 5. González, J.L.: «Las bóvedas convexas de la Cripta de la Colonia Güell», en *Apuntes del Curso sobre Las Grandes Bóvedas Hispanas*, Colegio de Aparejadores y A.T. de Madrid y CEHOPU, Madrid, 1998.
- 6. González, J.L.: «La bóveda tabicada. Su historia. Su futuro», en *Tratado de Rehabilitación*, Tomo 1, *Teoría e Historia de la Restauración*, Madrid, 1999.

Configuración constructiva y comportamiento mecánico de las bóvedas tabicadas. Estudio de dos edificios abovedados del siglo XIX en el Baix Llobregat (Barcelona)

José Luis González Moreno-Navarro

Siguiendo la propuesta contenida en la ponencia sobre La Casa Botines de León presentada en el Primer Congreso de Historia de la Construcción,¹ la restauración de edificios es una ocasión irremplazable para aumentar el conocimiento de nuestros edificios históricos. La presente ponencia aporta las conclusiones sobre lo indicado en el título teniendo como base las investigaciones desarrolladas bajo la dirección y financiación del SPAL² con ocasión de los estudios necesarios para restaurar el edificio.

En la reutilización de un edificio histórico, la bóveda tabicada presenta un grave inconveniente si se desea conservar: no existen modelos de cálculo para determinar su capacidad portante. Son muchos los casos en los que, por esa razón, se han destruido o perdido la autenticidad de su comportamiento mecánico. El camino es conocer mejor el comportamiento y dar publicidad a su rica historia con tal de incrementar su aprecio.³ Esto es lo que se ha intentado con ocasión de los estudios realizados sobre las bóvedas. Se ha partido, como premisa, de que las bóvedas se han de conservar actuando como tales. El modelo de cálculo se ha suplido con el procedimiento más eficaz, la prueba de carga y el resultado no ha podido ser mejor: las bóvedas (con tres modos de estructura constructiva, alguno contradictorio) aguantan sobradamente.

Dos de las bóvedas se encuentran en la masía denominada Can'Arús de Hospitalet de Llobregat, y la tercera se encontraba en el Palacete denominado Can Mercader de Cornellà de Llobregat.

Ca n'Arús es una masía que responde al tipo bási-

co de esta construcción rural catalana y se organiza mediante tres crujeas principales perpendiculares a la fachada principal y dos añadidas (figuras 1 y 2). La

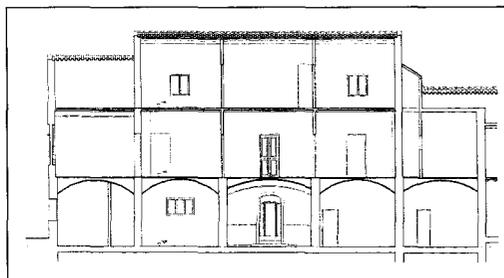


Figura 1

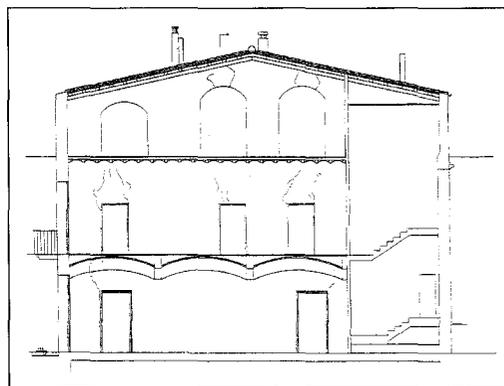


Figura 2

crujía central en el esquema tipo corresponde al acceso al edificio en el plan terreno, y en su planta piso al salón principal. En nuestro caso, la separación de ambos espacios está resuelta de una forma poco común, mediante tres bóvedas de pañuelo (o de bohemía) apoyadas en los cuatro muros perimetrales y en dos arcos rebajados a modo de arcos fajones que dividen virtualmente el espacio en tres zonas.

Las crujías laterales, las que se sitúan o bien dormitorios en la planta superior, o bien despachos en la inferior, resuelven la separación de las plantas mediante la solución más habitual en las masías, la bóveda de cañón rebajada.

El estudio del edificio surge como consecuencia de la voluntad por parte de la autoridad municipal de reconvertirlo en edificio de uso público; en consecuencia, es imprescindible averiguar la capacidad portante de estas bóvedas que recibirán en la planta superior una sobrecarga normativa de 300 Kg/m^2 .

El primer paso a desarrollar es averiguar la configuración interna de estas bóvedas. El estudio se hizo abriendo las catas correspondientes por la parte superior ya que los pavimentos eran perfectamente desmontables y reponibles. Su observación permitió llegar a concluir que las bóvedas de cañón que se sitúan en las crujías laterales están resueltas mediante la técnica tabicada, con dos hojas de rasilla superpuestas sobre las cuales se sitúan tabiquillos transversales, denominados según la terminología histórica «lenguetas», sobre las cuales a su vez se sitúan en un segundo rango de bóvedas tabicadas de menor luz, perpendiculares. Los tabiquillos se detienen antes de llegar al espinazo de la bóveda principal y el relleno se hace con escombros hasta alcanzar el nivel definitivo del pavimento (figura 3).

El aspecto que presentaban las bóvedas resueltas mediante esta configuración era el normal, con unas fisuras que el análisis completo del edificio pudo atribuir sin lugar a dudas a fallos en la cimentación dado que el terreno de aluvión del Llobregat era de escasísima capacidad portante.

La bóveda de la crujía central es algo más compleja; las tres bóvedas de bohemía, también resueltas mediante el procedimiento tabicado, se apoyan en los muros perimetrales en los arcos centrales, también resueltos mediante el procedimiento tabicado. La configuración constructiva de los elementos que rellenan los senos y determinan el plano del solado, es muy diferente a la citada anteriormente. En la tradi-

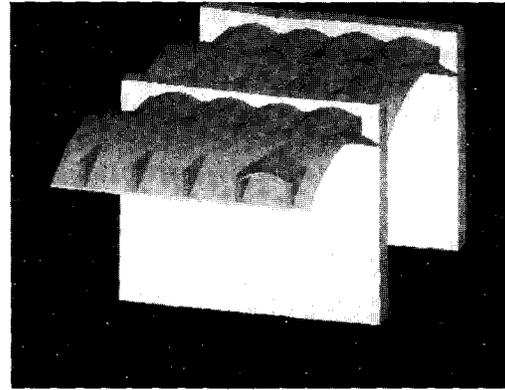


Figura 3

ción constructiva catalana, las bóvedas de bohemía se resolvían habitualmente mediante la superposición de nuevas bóvedas tabicadas en las cuatro esquinas que a modo de pechinas cubrían el espacio profundo de los senos. En nuestro caso tenemos las bóvedas que se entregan a las cuatro esquinas del espacio general. Pero las que resuelven el volteo en la entrega con los dos arcos centrales, se unen formando una única pechina, no apoyándose en consecuencia en los arranques de las bóvedas que se apoyan en el arco rebajado (figura 4). El aspecto que presentaban estas bóvedas era bastante inquietante, ya que los dos arcos estaban claramente rotos en su clave (figura 5).

La interpretación que, en una primera aproximación, se dió fue la siguiente: el arco rebajado se descarga por completo en sus senos y sólo recibe cargas en su clave dado que su tangencia con el solado, in-

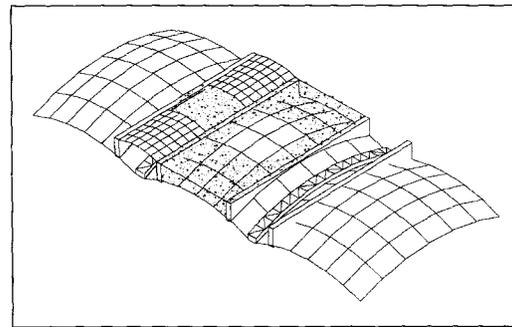


Figura 4

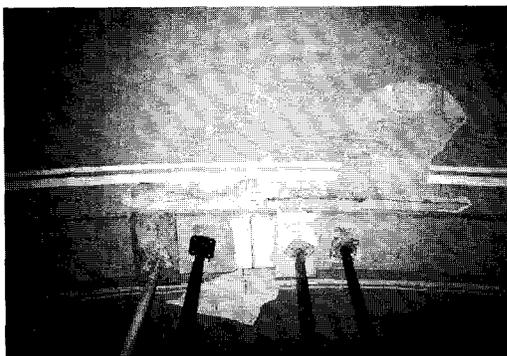


Figura 5

defectivamente, no tiene más remedio que romperse, dado el poco grueso en su parte central. Ahora bien, esas grietas que afectaban al arco, cuando se adentraban en las bóvedas desaparecían por completo. La interpretación no podía ser otra que las bóvedas en realidad no descargaban en estos arcos fajones sino que, las de los extremos cargan en sus tres entregas con los muros y la bóveda central carga en las dos paredes laterales, pero no en el arco. Éste, en consecuencia, queda sin ningún tipo de misión mecánica, más que aguantar las cargas que se producen por la circulación superior en su clave. Ese error del constructor llevó a esa rotura.

Una vez averiguada esta configuración constructiva, se pasó a hacer una aproximación a su comportamiento mecánico. El sistema utilizado en la bóveda de cañón podía seguir las teorías de Heyman y intentar buscar si la bóveda podía contener en su interior algún polígono funicular que asegurara su estabilidad.

La hipótesis de carga más desfavorable de una bóveda de cañón es sin duda la de una carga totalmente asimétrica. Los dibujos (figs. 6 y 7) corresponden a los posibles polígonos funiculares que dan respuesta a esta asimetría; como se ve, es totalmente imposible que, no solamente por su delgadez, sino por su trazado, la bóveda pueda incluir ninguno de ellos. De manera que, según esta teoría, está sometida a tracciones que evidentemente no puede soportar, con lo cual la hipótesis de cálculo es errónea, a no ser que consideremos que las lengüetas forman parte del conjunto.

Si consideramos el conjunto bóveda-lengüetas-bovedillas como una unidad estructural mecánicamente continua, el hecho de que el polígono funicular se

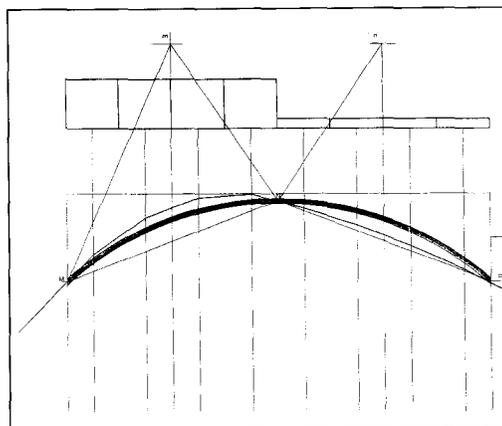


Figura 6

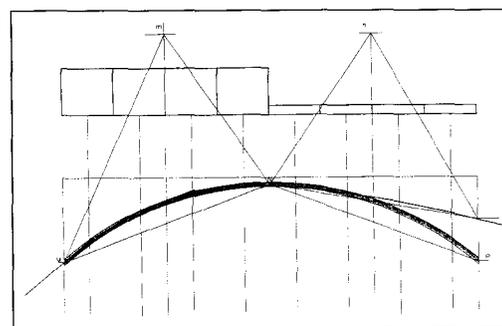


Figura 7

encuentre entre las lengüetas, lo único a lo que las obliga es a asumir un esfuerzos axiles de compresión que, dado su grosor y su poca tendencia al pandeo por su pequeña longitud, son perfectamente asumibles. De manera que sólo puede considerarse que el sistema aguanta si las lengüetas forman esa unidad con la bóveda. Ahora bien, es prácticamente imposible averiguar si realmente es así.

Mayor dificultad presenta el aplicar la teoría de polígono funicular al sistema de tres bóvedas de bohemia. Las dificultades previsibles ya llevaron a no intentar su aplicación; pero, evidentemente, la diagnosis sobre el edificio exigía de una manera incuestionable el poder asegurar su capacidad portante.

La única solución, en consecuencia, fue hacer la prueba de carga. Esta se organizó mediante bidones

con los que se consiguió la carga de 400 Kg/m² situada asimétricamente en relación al eje principal de la bóveda, tal como aparece en la figura (figura 8). Se cargaron la zona A, B y C, y se colocaron los flexímetros que analizaban la deformación de las paredes y de la propia bóveda en los puntos indicados. Sometidas a la prueba de cargas siguiendo las especificaciones de la norma UNE 7-457-86, las conclusiones fueron que los resultados obtenidos permiten validar el comportamiento de los tramos de bóveda ensayados para una sobrecarga de 400 Kg/m². Las deformaciones máximas medidas en todos los casos han sido inferiores a 1,5 mm, las deformaciones horizontales de las paredes de carga han estado inferiores a 0,2 mm y la grieta del arco, instrumentada se ha movido menos de 0,07 mm. Durante los ensayos no se detectó ninguna aparición de nuevas fisuras.

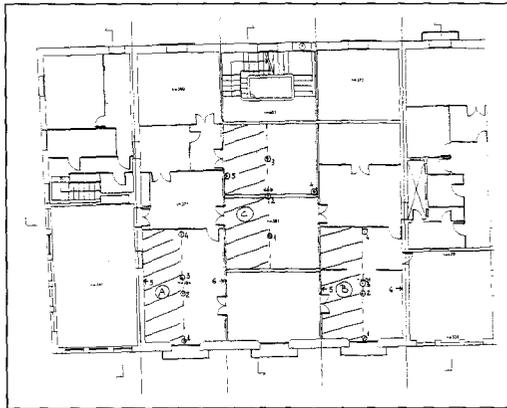


Figura 8

Queda claro en consecuencia que son bóvedas que como mínimo soportan la carga de uso público en la peor hipótesis de carga, con un incremento del 33% de su acción.

El tercer tipo de bóveda considerado, la de Can Mercader, responde a una situación de estudio y análisis diferente. Formaba parte de una escalera de servicio, que, en función del modo de actuar sobre el edificio para su reconversión en uso público, se decidió desmontarla, dada la necesidad de situar en el mismo hueco un sistema de ascensores y una escalera de trazado diferente.

Esta disposición indujo a aprovechar la ocasión de su desmontaje, para, mediante una prueba de carga, averiguar la carga real de rotura de una bóveda típica de escalera de la infinidad de ellas construidas en Catalunya. Se dispuso una prueba de carga mediante sacos de arena (figura 9) y un conjunto de flexímetros verticales y horizontales analizando la deformación del tramo cargado, del tramo inferior en el cual cargaba en su borde y las paredes que podían recibir algún empuje del conjunto.

La carga llegó a una cantidad total de 6000 Kg, que dividido entre los m² que podían asumir la carga, daba una cantidad de 2500 Kg/m². No se observó ninguna deformación apreciable ni en la bóveda cargada directamente ni en la bóveda que recibía la carga de la anterior. La prueba no llegó a la rotura porque los flexímetros que auscultaban la deformación de las paredes, sí que detectaron que éstas estaban sufriendo un movimiento debido al empuje de las bóvedas, que empezaba a sobrepasar valores recomendables.



Figura 9

La conclusión no puede ser otra que las bóvedas tienen una capacidad portante que en realidad sólo viene limitada por la deformación de los muros en los que están apoyados, y que son siempre superiores a las cargas reales de servicio a las que están sometidas. Quede, en consecuencia, esta ponencia como una comprobación de la inutilidad de los muchos refuerzos que se hacen en bóvedas precisamente por el hecho de conocer su capacidad portante real. Sin duda, la prueba de carga controlada mediante flexímetros tanto en la bóveda como en los muros que reciben sus empujes, pasa a ser sin duda el método más eficaz para averiguar no sólo carga de rotura sino si realmente pueden asumir con suficiente margen de seguridad las cargas de un nuevo o un cambio de uso que les pueden afectar.

El objetivo final, que no es otro que el de facilitar la total conservación de estos bellos ejemplos de la historia de la construcción con toda su autenticidad, se verá así cada vez más cerca.

NOTAS

- * El equipo de trabajo que ha realizado este estudio está formado, además de por el titular de la ponencia, por diversos profesores de la Universidad Politécnica de Cataluña Albert Casals, Dr. Arquitecto; Alejandro Falcones, Arquitecto; y Justo Hernanz. Arquitecto técnico.
1. Casals, A., González, J. L.: «Nuevos datos sobre la construcción de Antoni Gaudí: la sorprendente estructura constructiva de la Casa Botines de León», en *Actas del Primer Congreso Nacional de Historia de la Construcción*, Madrid, 1996.
 2. Servei de Patrimoni Arquitectònic Local de la Diputació de Barcelona.
 3. González, J. L.: «La bóveda tabicada. Su historia. Su futuro», en *Tratado de Rehabilitación*, Tomo 1, *Teoría e Historia de la Restauración*, Madrid, 1999.