

OPTIMIZACIÓN GEOMÉTRICA DE TRAZADOS FUNICULARES EN EL DISEÑO DE BÓVEDAS DE BTC PARA FORJADOS

F. Javier Gómez Patrocinio¹; Adolfo Alonso Durà²; Camilla Mileto³; Fernando Vegas López-Manzanares⁴

Universitat Politècnica de València, España;

¹fragmepa@arq.upv.es; ²aalonso@mes.upv.es; ³cami2@cpa.upv.es; ⁴fvegas@cpa.upv.es

Palabras clave: bloque de tierra comprimida, sistemas abovedados, análisis por equilibrio, bóvedas funiculares

Resumen

El elevado peso propio del bloque de tierra comprimida (BTC) y su moderada resistencia a compresión en comparación con el ladrillo han limitado su empleo a la construcción de muros y elementos verticales de soporte. Sin embargo, la sencillez de su producción, la baja especialización que requiere su puesta en obra y su reducida huella ecológica, hacen interesante el estudio de alternativas para su aplicación en otros elementos constructivos, tales como los forjados. En este artículo se pretende estudiar las posibilidades del empleo del BTC para resolver elementos resistentes horizontales a través del trazado de bóvedas de cañón rebajadas. En los sistemas abovedados, los elementos constituyentes de la fábrica trabajan únicamente a compresión, y la adecuada disipación de las cargas depende fundamentalmente de la geometría de la bóveda y de la disposición de elementos capaces de absorber el empuje horizontal que ésta genera. Para desarrollar este planteamiento, se considerará un ámbito de dimensiones variables, pero habituales en arquitectura doméstica, que será cubierto mediante una bóveda de cañón rebajada sobre la que constituir el tablero del piso superior. Partiendo de esta premisa, se parametrizará el trazado funicular de la bóveda, obteniendo un rango de modelos de diferente aparejo, flecha y luz. Estos modelos serán comprobados siguiendo métodos gráficos de análisis por equilibrio y se estudiará la cantidad de elementos auxiliares necesarios para absorber el empuje horizontal transmitido. A modo de resultado, se presentarán valores de referencia para la cobertura de espacios domésticos con bóvedas de BTC cuyo trazado aporte una relación óptima entre economía estructural, ahorro de materiales industriales y consumo de espacio vertical.

1. INTRODUCCIÓN

El bloque de tierra comprimido (BTC o CEB, *Compressed Earth Block*, en inglés) es un material empleado para la construcción de elementos de fábrica que se produce mediante la compactación en una prensa de una masa de tierra estabilizada con una proporción de cemento que habitualmente oscila entre un 5% y un 8% (Amàco, 2015).

La pieza resultante es un elemento modular de pequeñas dimensiones y con un peso suficientemente reducido como para que un único operario lo pueda manejar con comodidad. En España, las dimensiones más habituales oscilan en torno a los 29x14x9 cm para pesos de 7-8 kg por pieza dependiendo del tipo de tierra empleado. Además, presenta un sistema de puesta en obra similar al del ladrillo, por lo que puede ser utilizado con facilidad por mano de obra poco especializada.

Por lo que respecta a sus propiedades, se trata de un producto con una buena capacidad de carga frente a la compresión. En España se exigen para su comercialización unos valores de resistencia normalizada de 1,3 MPa, 3 MPa y 5 MPa (dependiendo de la clase resistente de la pieza) en el momento de su suministro (UNE 41410, 2008). Gracias a que el prensado reduce notablemente su porosidad y a la estabilización mediante pequeñas cantidades de cemento, este tipo de elementos presentan una resistencia a la humedad mayor que la de la mayoría de sistemas de construcción con tierra.

Además, se trata de una técnica válida para un amplio espectro de tipos de tierra, resultando probable la presencia de materias primas válidas en el propio entorno de la intervención. La

sencillez de su producción, que puede ser realizada en la misma obra mediante la utilización de blocadoras manuales de tamaño muy reducido (Figura 1), hacen de éste un sistema óptimo para la construcción en zonas de difícil acceso o ubicadas en un entorno poco industrializado.



Figura 1. Blocadora manual para la producción de BTC en Les Grands Ateliers de Villefontaine (Fotografía: E. Blanco Tamayo)

En lo que respecta a la sostenibilidad de la técnica, no requiere la utilización de combustible en su producción y, gracias a su adaptabilidad a las materias primas locales, reduce el consumo energético por transporte de materiales. Por consiguiente, se trata de elementos con una huella ecológica muy reducida. Al mismo tiempo, es un producto másico que, gracias a su elevada densidad e inercia térmica, genera elementos arquitectónicos aislantes y transpirables que aportan un elevado nivel de confort higrotérmico a los espacios construidos con ellos (Barbeta, Navarrete, 2015).

El BTC constituye por tanto un elemento constructivo solvente y de gran interés, especialmente para áreas de edificación extensiva o media, donde la construcción de edificios de gran altura no obligue a recurrir a estructuras metálicas o de hormigón armado. Resulta a su vez una técnica idónea para la ejecución de construcciones en zonas de baja industrialización, gracias a su economía en medios técnicos y a que la sencillez de su fabricación y puesta en obra la convierte en asequible para mano de obra local sin ningún tipo de formación.

Por esta razón, la posibilidad de ejecutar sistemas edilicios completos empleando como elemento fundamental el BTC permitiría la construcción de edificios económicos, sostenibles, confortables y técnicamente viables, incluso en zonas de pocos recursos. Sin embargo, la nula resistencia de los elementos de fábrica a las tracciones y a los esfuerzos de flexión ha limitado el empleo de estos materiales a la construcción de elementos verticales solicitados a compresión simple, tales como muros y pilares. Resulta por lo tanto interesante el desarrollo de sistemas que permitan la construcción de elementos horizontales con BTC (tales como forjados y estructuras de cubierta) con el empleo de una cantidad reducida de piezas auxiliares de producción industrial.

2. OBJETIVO

Frente a la necesidad planteada en el apartado anterior, en este artículo se estudian las posibilidades del empleo del BTC para resolver elementos resistentes horizontales a través de la ejecución de bóvedas de cañón rebajadas que permitan la construcción de edificios de varias alturas sin generar un forjado de un espesor excesivo.

3. ANTECEDENTES Y LÓGICA ESTRUCTURAL DEL SISTEMA

Las bóvedas rebajadas ya fueron empleadas para la construcción de forjados de piso en edificios de vivienda social en el levante español en los años 40 y 50 (Chamorro, Llorens Sulivera, Llorens Sulivera, 2012). Tras la Guerra Civil Española (1936 – 1939), la necesidad de reponer el parque inmobiliario destruido durante la contienda, el aislamiento internacional de la dictadura y la carestía de acero, favorecieron la recuperación de la bóveda tabicada como una alternativa económica y fiable a la construcción de estructuras metálicas y de hormigón armado en arquitectura residencial.

En los sistemas abovedados, los elementos constituyentes de la fábrica trabajan únicamente a compresión, lo que posibilitaría el empleo del BTC en su construcción. En estos casos, la correcta disipación de las cargas no solo depende de la tensión de trabajo de las piezas, sino también de la geometría y el espesor del elemento.



Figura 2. Construcción de una bóveda de cañón de BTC con motivo de la preparación de la colaboración de la UPV en el pabellón “Beyond bending” de OBD (Ochsendorf, Block & DeJong) en la Bienal de Arquitectura de Venecia 2016 (Fotografía: S. Tomás Márquez)

Sin embargo, el aspecto crítico cuando se trabaja con sistemas abovedados suele ser el empuje horizontal que éstas generan en el muro sobre el que descansan. Este empuje, que es mayor cuanto más rebajada es la bóveda, debe ser absorbido mediante la introducción de armado que permita que el muro trabaje a flexión o mediante la disposición de elementos como contrafuertes o tirantes.

El armado de los muros de fábrica resulta complejo y requiere el consumo de una considerable cantidad de acero, por lo que entra en conflicto con las premisas desarrolladas en los párrafos iniciales. Por su parte, la introducción de contrafuertes implica el acodamiento de la construcción con elementos de gran masa e conlleva el gasto de una considerable cantidad de material y un incremento en el espacio ocupado por el edificio. Por el contrario, los tirantes actúan directamente en el punto en el que la bóveda entra en contacto con el muro, evitando la transmisión de esfuerzos horizontales a éste mediante la introducción de una cantidad muy limitada de elementos metálicos que apenas tienen impacto visual en el conjunto del espacio. Por consiguiente, el atirantamiento con cables metálicos se muestra como la solución más sencilla y la alternativa óptima estructuralmente para garantizar la absorción de los empujes.

4. METODOLOGÍA

El objetivo del trabajo recogido en este texto es el estudio de la cobertura de espacios de dimensión habitual en arquitectura doméstica mediante bóvedas rebajadas sobre las que generar una superficie transitable, a modo de forjado de piso.

4.1. Diseño, parametrización y trazado de los modelos

Partiendo de esta premisa, se analizará un total de 120 modelos de bóveda, que aportarán un amplio rango de alternativas en base a la combinación de tres variables: la luz del ámbito que salvan, el peralte del arco funicular que describen en su trazado y el modo en que se aparejan los BTC que las construyen.

De este modo, se trabajará con bóvedas que salven distancias de 2, 4, 6 y 8 metros, considerando éste el rango de las luces más habitual en arquitectura residencial. Para distancias comprendidas entre dos de estos valores, es posible aplicar los resultados obtenidos por la bóveda de dimensión inmediatamente superior, sin incurrir en un sobredimensionado remarcable. A su vez, para cada uno de estos ámbitos, se deberán trazar catenarias con cinco porcentajes diferentes de peralte con respecto a la luz (3%, 5%, 7%, 10% y 15%), obteniéndose alternativas con cinco proporciones diferentes entre transmisión de empujes y consumo de espacio vertical.

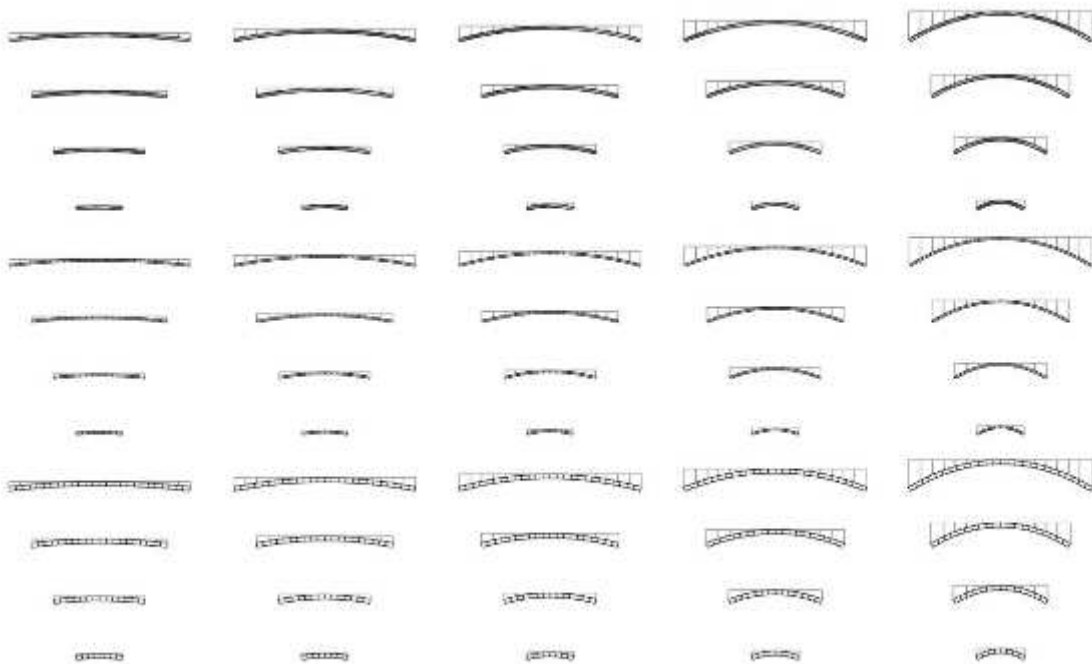


Figura 3. Modelos de bóveda con distinto aparejo, peralte y luz para el análisis por equilibrio

En lo que respecta la geometría de los modelos, éstos deberán ser trazados mediante arcos funiculares que salven la luz prevista con la flecha correspondiente a cada porcentaje de peralte. El arco funicular, o catenaria, es la curva óptima para la construcción de una bóveda que deba disipar cargas uniformes aplicadas a lo largo de sí misma o, dicho de otro modo, para la construcción de una bóveda que deba resistir únicamente su peso propio. Cuando se trate de estructuras que deban resistir una carga uniforme aplicada en un plano horizontal dispuesto sobre ellas, como es el objeto del estudio, el trazado óptimo de la curva que describen será una parábola.

Sin embargo, el recorrido de ambas secciones es muy similar, y la geometría de una catenaria se puede determinar de forma muy sencilla mediante el descuelgue de una

cadena desde dos puntos separados la distancia deseada. Por ello, resulta un tipo de curva muy apropiada para el trazado de cimbras directamente en obra, razón por la que se considera la opción más viable para este tipo de cálculos.

Para cada una de estas 20 curvas, se diseñarán soluciones con aparejos a rosca, tabicado de una única hoja y tabicado de dos hojas, que presentarán una sección de 14 cm, 9 cm y 19 cm respectivamente, de acuerdo con las dimensiones de BTC más habituales (Figura 2). Cada uno de estos aparejos dotará a la bóveda de un espesor y de unos pesos propios diferentes, lo que permitirá determinar en cada caso la fábrica de grosor más adecuado para transmitir los esfuerzos recogidos por el forjado sin introducir excesivas cargas gravitatorias que generen una sobrecarga innecesaria.

Por último, se considerará que los tabiquillos que se deben construir sobre las bóvedas para formar la superficie plana sobre la que descansará el tablero puedan trabajar como costillas colaborantes de BTC o ser simplemente elementos sin ningún papel estructural, calculándose ambas alternativas.

4.2. Evaluación de acciones

De forma previa al cálculo de la estabilidad de las bóvedas, se procederá a realizar una evaluación de acciones que determinará las cargas aplicadas sobre ellas. Dado que se trata de elementos dispuestos en el interior de un espacio de vivienda, se considerará que las cargas resistidas estarán limitadas a su propio peso, al de los elementos constructivos que gravitan sobre ella, y a una sobrecarga de uso correspondiente a la ocupación de la planta superior.

El peso propio de la fábrica de BTC puede resultar muy variable en función de la materia prima empleada y del grado de compactación inducido por la blocadora, dándose valores que suelen oscilar entre los 1900 y los 2200 kg/m³. Para el desarrollo de los cálculos recogidos en este texto, se va a aplicar un valor de 2000 kg/m³ al conjunto de la fábrica, considerando que en esta cifra queda englobada la densidad de los bloques de tierra y la del mortero que los une.

El resto de los valores serán extraídos del Código Técnico de la Edificación, publicado por el Ministerio de Fomento del Gobierno de España en 2009 (Tabla C.1. Peso específico aparente de materiales de construcción. CTE DB-SE AE), adquiriendo las siguientes magnitudes:

- Los tabiques que generan el plano sobre el que apoyar el tablero adquieren pesos específicos diferentes dependiendo de si están formados con elementos portantes o no estructurales. De este modo, a las costillas colaborantes de BTC se les aplicará un peso específico de 2000 kg/m³, mientras que para los tabiquillos no estructurales se considerará un valor de 1600 kg/m³.
- El efecto del pavimento y del tablero que lo soporta será tenido en consideración aplicando sobre el plano superior de los tabiquillos una carga horizontal de 1500 Pa (1,5 kN/m²).
- El efecto de la tabiquería que descansa sobre el forjado estimará en 1000 Pa (1 kN/m²).
- Sobre toda la superficie pisable estará aplicada una sobrecarga de uso de 2000 Pa (2 kN/m²) por efecto del peso de los ocupantes de la estancia superior y del mobiliario albergado en ella.

Sobre la evaluación de cargas se debe aplicar un coeficiente de mayoración de acciones que otorga un ligero sobredimensionado con el fin de absorber la eventual aparición de cargas inesperadas. El valor considerado por el Código Técnico de la Edificación es de $\gamma_f = 1,35$ para cargas permanentes y de $\gamma_f = 1,5$ para cargas variables (Tabla 4.1. Coeficientes parciales de seguridad (γ) para las acciones. CTE DB-SE). Sin embargo, en el cálculo desarrollado se aplicará un coeficiente único $\gamma_f = 1,5$ con el objeto de aumentar el margen de seguridad del predimensionado.

4.3. Análisis por equilibrio

El análisis de la estabilidad de las bóvedas frente a su propio peso y a las cargas que gravitan sobre ellas, se realizará a través del estudio de las secciones transversales de bóveda por métodos de estática gráfica plana. Mediante este tipo de procedimientos de cálculo, que se pueden llevar a cabo de forma manual o asistida mediante programas específicos, se obtienen dos datos de utilidad fundamental para determinar la solvencia de la solución: la línea de presiones, que representa el recorrido de las cargas aplicadas sobre la bóveda hasta los soportes en los que descansa, y las reacciones que genera en estos apoyos, con su magnitud y su valor (Figura 4). En este caso el análisis por equilibrio se va a realizar trabajando con Statical¹.

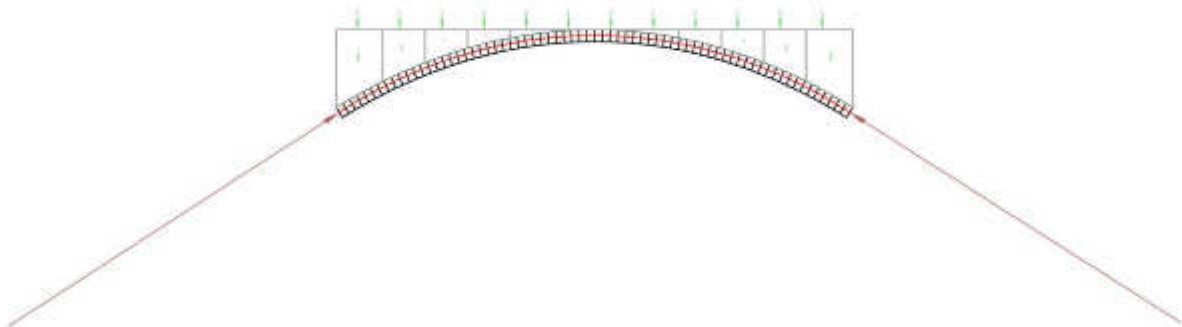


Figura 4. Análisis por equilibrio de una bóveda de BTC dispuesto a rosca, salvando una luz de 6 m con un peralte del 15%

Cuando una bóveda entra en carga, cada una de las dovelas (reales o virtuales) que la conforman sufre un empuje en su cara superior por efecto del tramo del elemento que apoya sobre ella. A este empuje se suma el peso de la propia dovela y el de las cargas que gravitan sobre ella, dando lugar a una nueva fuerza que debe ser resistida por la dovela siguiente (Alonso, Martínez, 2016). La línea definida por la unión de todos los puntos de paso de las fuerzas que actúan en las juntas de todas las dovelas es conocida como línea de presiones o de empujes.

Para que el trazado y el espesor de una bóveda sean adecuados para transmitir hasta los apoyos las cargas que soportan, debe ser posible determinar una línea de presiones que transcurra por el interior de la sección a lo largo de todo su recorrido.

La reacción que equilibra el apoyo de la bóveda en sus arranques se emplea para determinar la tensión de trabajo de la fábrica en su punto más solicitado y para obtener, mediante su descomposición en componentes perpendiculares, el empuje horizontal que introduce en el elemento en el que descansa.

La zona más solicitada de la bóveda por esfuerzo axial es el entorno del apoyo, donde las piezas deben transmitir las cargas generadas sobre todo el elemento. La tensión de compresión a la que trabajan estos elementos se obtiene dividiendo el valor de la reacción entre la superficie de la sección transversal en la zona considerada. Las bóvedas de cañón son sistemas prolongables indefinidamente en la dirección de su generatriz. Sin embargo, para la realización de los cálculos necesarios para determinar la estabilidad de las soluciones se considerará un tramo de bóveda de un metro de largo.

4.4. Absorción del empuje

Sobre las bóvedas que resulten ser estables y que demuestren trabajar a una tensión de compresión admitida por el material constitutivo de la fábrica, se estudiará la recogida del empuje horizontal generado por estos elementos sobre sus apoyos. De este modo, se

¹ Una aplicación para AutoCAD desarrollada por Adolfo Alonso Durá para la Universitat Politècnica de València

pretende evitar que transmitan una carga inclinada que pueda introducir esfuerzos de flexión en los muros portantes que soportan el forjado.

Para la absorción de este empuje se considerará la disposición de tirantes metálicos que conecten dos angulares dispuestos en el arranque de las bóvedas, evitando que éstas se abran y eliminando, al entrar en carga, el empuje horizontal en el muro (Figura 5).

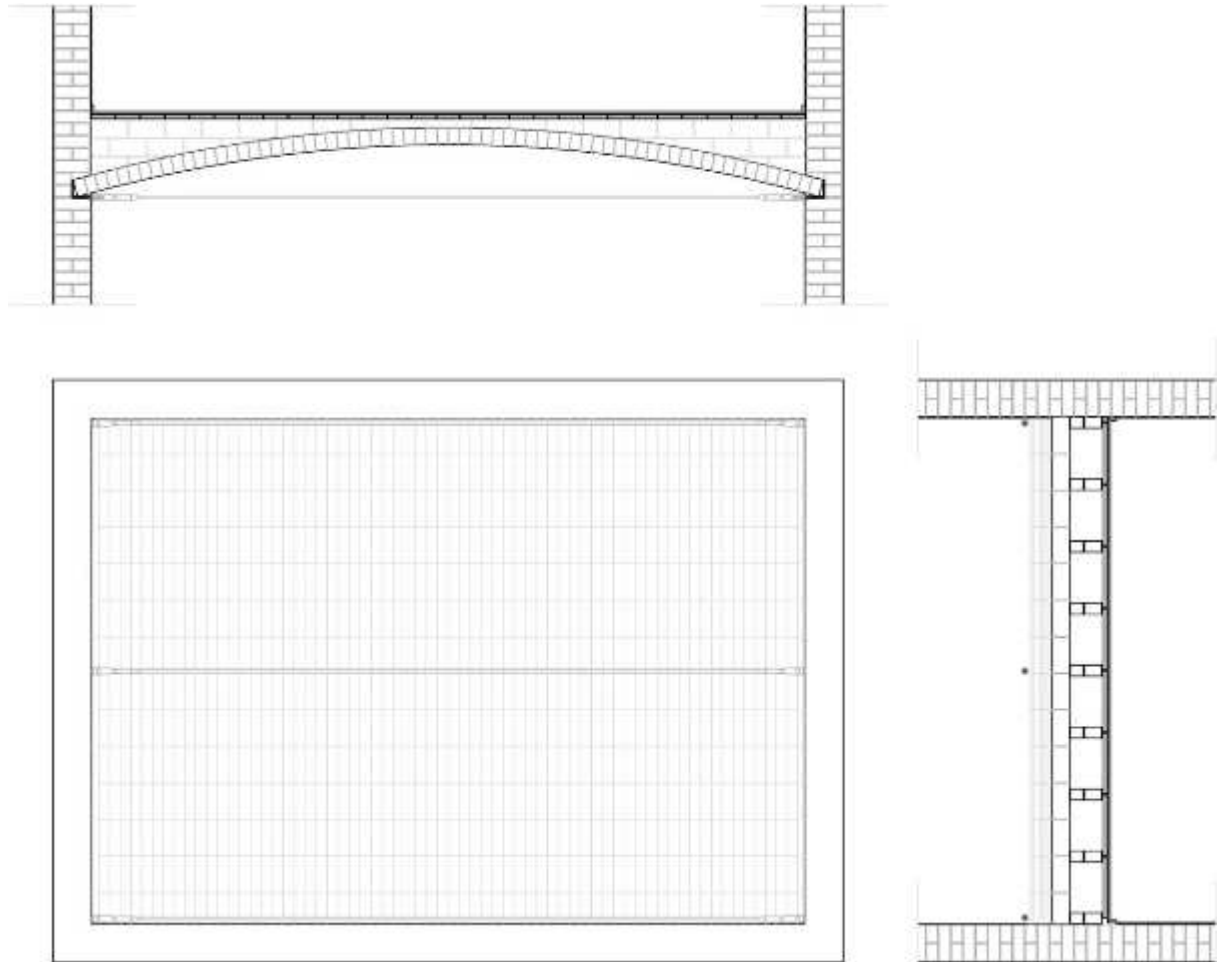


Figura 5. Detalle constructivo tipo de la solución calculada. Bóveda de BTC, formación de la superficie pisable, sistema de atirantado y encuentro con el muro

En el cálculo de las piezas metálicas se va a establecer como criterio de dimensionado que los tirantes son cables de acero dispuestos con una separación de dos metros, con el fin de limitar su impacto visual en el espacio interior. La separación escogida entre los tirantes determinará su ámbito de carga y, por lo tanto, el empuje absorbido y el diámetro de las piezas. Dado que se trata de elementos solicitados a tracción simple, para su dimensionado se dividirá el empuje horizontal que debe ser absorbido entre la tensión admisible del acero que los conforma, obteniendo así una sección mínima de cable que será asemejada al diámetro normalizado inmediatamente superior.

Más allá del propio cable, el aspecto que se verá más condicionado por la separación determinada para los tirantes, será el dimensionado de los perfiles que conectan. Estas piezas recogen de forma lineal el empuje generado por las bóvedas y trabajan a flexión simple, siguiendo el esquema de una viga continua con apoyos articulados en los puntos en los que la disposición de un cable les impide desplazarse. Para su cálculo, se determinará el momento máximo en el centro de vano y se obtendrá el módulo resistente mínimo necesario para absorberlo.

Como se puede observar en la Figura 5, sobre estos angulares descansará directamente el canto de la bóveda. En el caso de que las alas de los perfiles no tuvieran un tamaño suficiente para recoger todo el espesor del elemento, aparecería un esfuerzo de cizalladura

en el extremo del apoyo que podría provocar la fisuración de la fábrica en esta zona. Este riesgo resulta especialmente evidente en el caso de bóvedas de doble hoja, donde podría producirse el deslizamiento relativo de las capas que las conforman. Con el fin de eliminar este riesgo, se establecerá como condición de dimensionado que el tamaño del angular sea como mínimo el necesario para recoger la totalidad del canto de la bóveda.

En los casos en los que el empuje horizontal no se pueda absorber mediante la disposición de un perfil del mismo canto que la bóveda, se optará por doblar los perfiles formando una T invertida. Sólo cuando esta solución resulte también insuficiente, se emplearán perfiles con una longitud de ala mayor.

5. ANÁLISIS DE DATOS

Una vez realizado el trazado de todos los modelos, se procede a determinar el valor de los pesos propios y a aplicarles las cargas que deben transmitir. Sobre estas secciones se realizan las comprobaciones por equilibrio, obteniéndose las correspondientes líneas de presiones y vectores de empuje en los apoyos. En todos los casos estudiados, la línea de presiones generada por la disipación de las cargas discurre por el interior de la sección portante. Por tanto, todas las bóvedas analizadas resultan geoméricamente estables y podemos determinar que, en estos modelos, el espesor y el peralte no son factores condicionantes para la estabilidad. Estos elementos en ningún momento requerirían de la colaboración estructural de las costillas que sostienen el pavimento.

La tensión de trabajo que alcanzan las fábricas en el entorno de los arranques es siempre muy baja, incrementándose con la distancia salvada y reduciéndose cuando las bóvedas son más peraltadas o cuentan con un mayor espesor. El valor máximo obtenido, 0,36 MPa para bóvedas tabicadas de una hoja que salvan ocho metros de luz con un peralte del 3%, es resistido incluso por la clase menos resistente de BTC homologada en la UNE 41410. Para este mismo ancho, una bóveda tabicada de dos hojas con un 15% de peralte trabaja a una tensión de 0,06 MPa en el entorno de su apoyo.

Dado que todas las bóvedas han demostrado ser estables por sí mismas y presentan un nivel de tensiones que no pone en riesgo la resistencia de los materiales que las componen, se procede a dimensionar los elementos auxiliares necesarios para recoger los empujes y absorberlos sin introducir un esfuerzo horizontal en el muro. A la hora de calcular los tirantes, se considera un ámbito de carga de 2 m, correspondiente a la separación entre cables, y un acero de clase resistente S460N. Estos elementos deben absorber empujes horizontales que varían entre 33,15 y 844,17 kN, dependiendo de la luz, el canto y el peralte de las bóvedas. Los cables requeridos presentan diámetros que oscilan entre 12 y 27 mm para luces de 2 m, entre 16 y 42 mm para luces de 2 m, entre 20 y 48 mm para luces de 6 m y entre 24 y 56 mm para luces de 8 m.

Por último, se procede a dimensionar los angulares que recogen los empujes generados por las bóvedas y los transmiten a los tirantes que los deben absorber. Estos elementos, que funcionan como vigas flectadas en horizontal, se han dimensionado con perfiles angulares de acero S275 de ala igual al canto de la bóveda que deben confinar. Cuando el esfuerzo de flexión no se puede absorber modificando el grosor de las pletinas, se ha optado por duplicar el perfil formando una T invertida. Donde esta medida ha resultado insuficiente se ha aumentado el tamaño del perfil hasta cantos de 20 cm. En los casos en los que un perfil de este tamaño resultaba insuficiente, se ha rechazado la solución al considerar que el empuje generado requiere piezas auxiliares excesivamente grandes que entran en conflicto con la lógica del sistema.

De las 120 bóvedas estudiadas, 34 se han podido zunchar con perfiles de su mismo canto, 24 han requerido doblar los perfiles, 54 se han podido resolver con perfiles simples o dobles de mayor canto y 8 han sido rechazadas por requerir un canto excesivo. Estas últimas, que son las soluciones que más empuje generan, se han correspondido con los modelos peraltados al 3% con luces de 8 m y con los de mayor canto de 6 m de luz.

6. RESULTADOS

A partir de la observación de los resultados arrojados por el análisis de datos, se extraen las siguientes conclusiones. Todos los modelos han resultado ser estables geométrica y materialmente, por lo que se considera que la alternativa óptima es la formación de bóvedas con aparejo tabicado de una hoja. Estos elementos dan las suficientes garantías estructurales al mismo tiempo que reducen el consumo de material y limitan el peso propio del elemento, su empuje y el canto del forjado resultante.

Se ha comprobado que la colaboración de los tabiquillos de sustentación del tablero como costillas estructurales no resulta necesaria para la estabilidad del conjunto. Sin embargo, el incremento de peso que supone su ejecución con BTC con respecto a la disposición de elementos más ligeros prácticamente no modifica el estado tensional de las fábricas. Por el contrario, esta solución dota al forjado de unas características de coherencia material y de sostenibilidad socioeconómica que pueden verse limitadas si la ejecución de estos elementos se realiza con otros materiales como el ladrillo hueco.

Tabla 1. Resultado del predimensionado de los elementos auxiliares para los modelos de bóveda de cañón rebajada ejecutada con una hoja de BTC a panderete y tabiquillos colaborantes de BTC

PERALTE	LUZ	2 m	4 m	6 m	8 m
3%	Altura forjado	0,2 m	0,26 m	0,32 m	0,38 m
	σ (N/mm ²)	0,09	0,18	0,27	0,36
	Angulares	2 x 150,20	2 x 200,15	2 x 200,25	XXX
	Ø Cables (mm)	24	36	42	48
5%	Altura forjado	0,24 m	0,34 m	0,44 m	0,54 m
	σ (N/mm ²)	0,05	0,11	0,17	0,22
	Angulares	150,20	2 x 150,20	2 x 200,15	2 x 200,20
	Ø Cables (mm)	20	27	36	42
7%	Altura forjado	0,28 m	0,42 m	0,56 m	0,7 m
	σ (N/mm ²)	0,04	0,08	0,12	0,16
	Angulares	150,15	2 x 150,15	2 x 150,20	2 x 200,15
	Ø Cables (mm)	16	24	30	36
10%	Altura forjado	0,34 m	0,54 m	0,74 m	0,94 m
	σ (N/mm ²)	0,03	0,06	0,09	0,12
	Angulares	150,10	150,20	2 x 150,15	2 x 150,20
	Ø Cables (mm)	16	20	24	27
15%	Altura forjado	0,44 m	0,74 m	1,04 m	1,34 m
	σ (N/mm ²)	0,02	0,04	0,07	0,09
	Angulares	150,10	150,15	150,20	2 x 150,15
	Ø Cables (mm)	12	16	20	24

Para una misma luz, los trazados menos peraltados generan unos empujes mayores y, por tanto, exigen la disposición de un atirantamiento más potente. Sin embargo, para peraltes elevados, las bóvedas de mayor luz exigen un consumo de espacio vertical considerable en la zona de su arranque. En la tabla 1 se presentan los resultados del dimensionado de

cables y angulares para los modelos realizados con el aparejo indicado (tabicado de una hoja con costillas de BTC), en función de su peralte.

Como se puede observar, las soluciones más planas generan grandes empujes que requieren la colocación de gruesos tirantes y de zunchos de una sección considerable. Por ello, se considera que los elementos auxiliares necesarios para sostener las bóvedas peraltadas hasta un 5% son excesivos y reducen la coherencia del sistema.

Las alternativas que mejor concilian la ligereza de los elementos auxiliares con la reducción del espesor del forjado son las bóvedas peraltadas un 10%. Sin embargo, los peraltes del 7% y el 15% resultarán alternativas viables en el caso de que se opte por reducir el impacto de los elementos auxiliares o se desee reducir el consumo de espacio vertical.

7. CONCLUSIONES

Tal y como se ha comprobado en el presente artículo, la construcción de bóvedas de cañón rebajadas de BTC es una alternativa técnicamente viable para la construcción de forjados de piso.

De acuerdo con los cálculos realizados, todos los modelos de bóveda son estables geoméricamente por lo que se considera que la disposición de los BTC según aparejo tabicado de una hoja es la más recomendable al reducir al máximo el peso del elemento y limitar el empuje horizontal introducido sobre los elementos que lo recogen.

En cuanto al peralte de trazado de las curvas, se considera que una relación flecha-luz inferior al 5% introduce esfuerzos horizontales innecesarios en las cabezas de los apoyos, mientras que valores superiores al 15% implican un consumo excesivo de espacio vertical. Por ello, se concluye que la relación entre consumo de espacio vertical y empuje horizontal generado por las bóvedas alcanza valores óptimos cuando el peralte de las mismas presenta valores de entre un 7% y un 10%.

El sistema es estable desde un punto de vista estructural y puede ejecutarse de una forma sencilla con medios auxiliares muy reducidos. Además, la puesta en obra de los materiales es muy similar a la construcción de un muro de ladrillo, por lo que puede ser ejecutado de forma sencilla empleando mano de obra muy poco especializada.

La utilización del BTC como material fundamental para la construcción de las bóvedas y la cantidad de elementos auxiliares metálicos necesarios para la absorción de los empujes, que es muy reducida en relación a la superficie total del espacio cubierto, dotan al sistema de unos remarcables atributos de sostenibilidad ambiental y confort higrotérmico.

La economía de medios auxiliares se ve reforzada por el modo en que se produce el BTC, pues es un material que habitualmente puede fabricarse a pie de obra, empleando la tierra local y utilizando una blocadora de pequeñas dimensiones y fácil transporte.

Por estas razones, el sistema desarrollado resulta óptimo para la construcción en zonas de difícil acceso y para la reducción de la huella ecológica de las construcciones realizadas en zonas de edificación extensiva.

Sin embargo, una de las mayores potencialidades del diseño de espacios construidos íntegramente con BTC es su utilización en zonas de recursos muy limitados o en vías de desarrollo. En este caso, la adaptabilidad del sistema queda comprometida por la absorción de los empujes mediante elementos de acero que, a pesar de ser reducidos, requieren una infraestructura industrial de una mayor tecnificación para su producción. Para la construcción de este tipo de espacios en zonas en las que resulte complicado recurrir al empleo de tirantes metálicos, será conveniente estudiar la construcción de sistemas alternativos para la contención de empujes como el uso de contrafuertes o de encadenados de madera.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alonso Durà, A.; Martínez Boquera, A. (2016) Mecánica de arcos, bóvedas y cúpulas. In: Análisis estructural de sistemas abovedados. Máster Oficial en Conservación del Patrimonio Arquitectónico. Universitat Politècnica de València. 18 de junio de 2016. Valencia, España.

Amàco. Atelier Matière à Construire (2015) Atelier BTC. Fiches techniques. In: 14^º Festival Grains d'Isère. Autour des Architectures de Terre. CRAtterre. École Nationale Supérieure d'Architecture de Grenoble. 27 – 30 de mayo de 2015. Grands Ateliers, Villefontaine, Francia. Documento inédito.

Barbeta, G.; Navarrete, E. (2015). A pentagonal block home. In: Mileto, C.; Vegas López-Manzanares, F.; Garcías Soriano, L.; Cristini, V. (Eds.). Earthen architecture: past, present and future. Londres: CRC | Balkema | Taylor & Francis Group. p. 31-36.

Chamorro Trenado, M. A.; Llorens Sulivera, J.; Llorens Sulivera, M. (2012). Ignasi Bosch i Reigt (1910 – 1985): una patente para construir bóvedas tabicadas. In: Zaragoza Catalán, A.; Soler Verdú, R. y Marín Sánchez, R. (Eds.). Construyendo bóvedas tabicadas. Valencia: Universitat Politècnica de València. p. 238-247.

Ministerio de Fomento. Gobierno de España (2009) Código técnico de la edificación. Documento básico de seguridad estructural. Acciones en la edificación. Disponible en <<http://www.codigotecnico.org>>. Acceso en 06/06/2016.

UNE 41410 Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo. (2008). Madrid: Asociación Española de Normalización y Certificación

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la oportunidad ofrecida por el Profesor John Ochsendorf del Massachusetts Institute of Technology de colaborar en su pabellón “Beyond bending” de la Bienal de Arquitectura de Venecia 2016, cuyos entresijos han estimulado el inicio de la investigación reflejada en este artículo.

NOTA

Este trabajo se enmarca dentro del proyecto de investigación financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación “La restauración y rehabilitación de arquitectura tradicional de tierra en la Península Ibérica. Líneas guía y herramientas para una intervención sostenible” (Ref.: BIA2014-55924-R; investigadores principales: Camilla Mileto y Fernando Vegas López-Manzanares).

AUTORES

F. Javier Gómez Patrocinio, arquitecto por la Universitat Politècnica de València, es técnico superior de investigación en el Instituto de Restauración del Patrimonio de la UPV, y en la actualidad se encuentra desarrollando su tesis doctoral sobre caracterización estructural de la arquitectura de tierra. Desde 2014, ha colaborado en la edición de varias publicaciones relacionadas con el patrimonio vernáculo y en la organización de VERSUS 2014 International Conference on Vernacular Heritage, Sustainability and Earthen Architecture.

Adolfo Alonso, doctor en arquitectura por la Universitat Politècnica de València, es profesor titular de universidad, perteneciente al Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras de la misma institución. Ostenta el puesto de secretario del Instituto de Restauración del Patrimonio Arquitectónico de la UPV dentro del grupo de Arquitectura Monumental e Histórica y de director del Máster de Restauración del Patrimonio Arquitectónico de la UPV.

Camilla Mileto, arquitecta por la IUAV y doctora en arquitectura por la UPV, es profesora titular de universidad, adscrita al Departamento de Composición Arquitectónica de la Universitat Politècnica de València, donde imparte docencia sobre restauración arquitectónica y arquitectura histórica. Es subdirectora del Instituto de Restauración del Patrimonio Arquitectónico de la UPV. Su labor de investigación se centra en la restauración de la arquitectura histórica y en el conocimiento de las técnicas constructivas tradicionales.

Fernando Vegas López-Manzanares, arquitecto y doctor en arquitectura por la Universitat Politècnica de València, es profesor titular de universidad, perteneciente al Departamento de Composición Arquitectónica de esta universidad. Su trayectoria científica se ha concentrado en el estudio, restauración y puesta en valor del patrimonio tanto monumental como vernáculo en su diversa manifestación material, técnica, cultural e histórica.