

Estructuras antisísmicas: las bóvedas encamonadas en el virreinato del Perú

Pedro Hurtado Valdez

Desde los albores de la ocupación hispana del Perú en el siglo XVI muros, arcos y bóvedas se levantaron con proporciones similares a los realizados en la península Ibérica, pero el nuevo territorio colonizado era sacudido periódicamente por sismos, provocando el colapso de la mayoría de las edificaciones, las cuales hasta entonces no estaban preparadas para hacer frente a estos fenómenos.

Durante las pruebas de ensayo y error los maestros constructores observaron los sencillos entramados de madera rolliza, caña y tierra de las viviendas de los nativos, los cuales por su flexibilidad resistían mejor a los terremotos. Inicialmente la rusticidad de esta técnica la hacía poco adecuada para la ejecución de templos y palacios, pero la incorporación de madera escuadrada y el arte del yeso español remediaron el inconveniente, simulando obras de fábrica sobre los nacientes telares hispanoamericanos conocidos como «quincha». Esta tecnología permitió dotar de mayor seguridad a las estructuras y edificar palacios con sus altos miradores, cuerpos superiores de claustros de conventos y torres de iglesias.

Solucionado la forma de construir en altura aún quedaba por definir el modo de cubrir los templos, condicionados por exigencias espaciales muy dadas a la edificación de bóvedas, principalmente por sugerencias del concilio tridentino. Para el siglo XVII ya se habían experimentado diversas posibilidades de ejecutarlas con fábrica sin haberse encontrado una respuesta razonable en términos de tiempo, economía y estabilidad frente a los sismos. En la constante in-

dagación de propuestas para garantizar la seguridad de las cubiertas se volvieron a construir bóvedas de crucería, al asumirse podían resistir a los terremotos mejor que las existentes vaídas o de cañón, sin conseguir la confirmación en la práctica del desempeño estructural deseado.¹ Dentro de este panorama comenzaron a hacer su aparición a mediados del siglo XVII en el Virreinato del Perú las bóvedas encamonadas, correspondiendo más a una necesidad de protección que a carencias económicas.

LA LITERATURA SOBRE BÓVEDAS DE MADERA HASTA EL SIGLO XVII

En lo que toca a la definición estructural de arcos de madera se puede decir que Leonardo da Vinci había esbozado ya la posibilidad de salvar grandes distancias con piezas curvas colocadas en rosca una sobre otra. Las uniones se solucionaban con múltiples empalmes en rayo de Júpiter y pernos metálicos que atravesaban el conjunto de las piezas. Sin embargo este planteamiento no sería conocido sino hasta su publicación siglos después en el *Codex Atlanticus*.

Fue Philibert De L'Orme en el siglo XVI, quién planteó por vez primera y de manera clara la cubrición de espacios con bóvedas realizadas a partir de piezas cortas y delgadas de madera solapados unos con otros por el canto para dar forma a los arcos, los cuales eran arriostrados con espigas pasantes y suje-

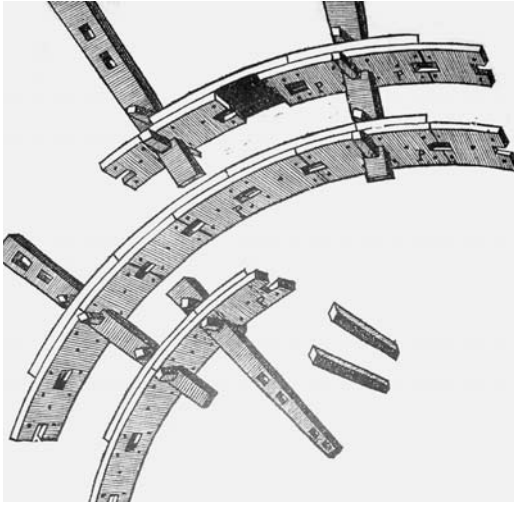


Figura 1
Detalle de las piezas y uniones en la propuesta de De L'Orme para sus bóvedas de madera (De L'Orme 1561)

tadas por clavijas para dotarlos de estabilidad lateral (fig. 1). No se puede relacionar su propuesta con la construcción de cuadernas en la arquitectura naval, que para entonces se obtenía del curvado de largas piezas de madera con la aplicación de calor. Más bien la experiencia del arquitecto francés sobre arcos de fábrica, que se evidencia en el resto de su tratado, pudo servir para idear estos arcos de madera, considerándolos de mayor ventaja que los de fábrica por la disminución de los empujes (De L'Orme [1561] 1988).

Conviene aclarar la poca influencia de este planteamiento en Sudamérica, porque las características constructivas de De L'Orme no se ajustan exactamente a las bóvedas de este continente, no obstante la presencia de una solución parecida en la cubierta de la iglesia jesuita de Córdoba (Argentina) realizada por Philippe Lemer en 1667. Pero la propuesta de Lemer logra mayor alcance técnico al definir un elemento estructural que actúa más como una viga reticular curva que como un arco, en el sentido que los empujes son absorbidos por el mismo sistema generando pre compresiones en las uniones con el uso de cuñas y el curvado de las tablas de cerramiento que presionan contra los arcos (Laner 2001, 14). Por otro lado los principales tratados españoles e italianos de

la época consultados en Hispanoamérica no hacen mención a la propuesta de De L'Orme, quien provenía de un ambiente más inclinado a las tendencias góticas del norte europeo que al de los pueblos mediterráneos influenciados por las ideas renacentistas del momento.²

A principios del siglo XVII se publican diversas traducciones del tratado de Sebastiano Serlio, donde se muestra el dibujo de una bóveda ejecutada con piezas de madera solapada, pero sin profundizar en las características estructurales de la propuesta. Las uniones no se realizan con camón y contracamón por el lado del canto como indicaría la lógica constructiva sino a nivel de tres roscas superpuestas y que difícilmente hubiesen dado estabilidad a la estructura sin elementos de enganche común a los arcos, cosa que hará en el siglo XIX Armad Emy en la construcción de cubiertas abovedadas para salvar las luces de instalaciones industriales y estaciones ferroviarias. El mismo Serlio menciona que con esta armadura «... se podría hacer una bella y fuerte pérgola en un jardín...» (Serlio [1600] 1986, f. 199). Es decir, en ningún momento se planteaba la posibilidad de cubrir la nave de una iglesia, estando dirigida a ambientes más domésticos.

En el ámbito de la carpintería de lo blanco español los tres tratadistas fundamentales del siglo XVII fueron Diego López de Arenas, Andrés de San Miguel y Rodrigo Alvarez. De éstos solo ha quedado registrado el uso del texto de López de Arenas en el Virreinato peruano, a pesar de la presencia de San Miguel en México.³

La descripción de López de Arenas sobre el modo de ejecutar una media naranja en madera es algo extraña, tanto igual como el dibujo que adjunta, por no corresponder en ningún caso al sistema constructivo encamonado encontrado en las iglesias virreinales peruanas o en sus equivalentes españolas.⁴ Incluso el ensamble con un rayo de Júpiter de dos largos camones hace pensar más en la tipología noreuropea del curvado de la madera que en las bóvedas encamonadas (fig. 2), procurando una junta que obedece principalmente a un trabajo a tracción.⁵ Igualmente la mención del camaneo de las «medias cañas» aplicadas a los arcos de la bóveda resulta una complicada labor sin justificación, solo acostumbrada a ejecutarlas en las armaduras con limas moamares, para acompañar la curvatura y el paralelismo de los maderos de las esquinas.⁶

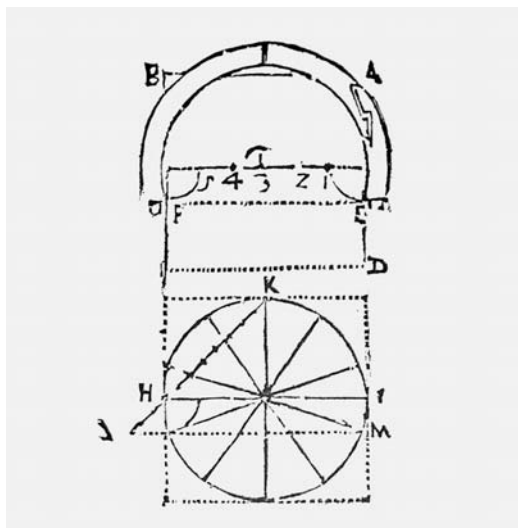


Figura 2
Lamina de López de Arenas, con el tipo de cerchas que obtiene y una unión en rayo de Júpiter de los camones (López, 1633)

Otro tratado importante en el ámbito hispano es el de Fray Lorenzo de San Nicolás, quien en la primera parte de su obra explica brevemente la manera de realizar una bóveda encamonada:

... Demas de lo dicho se puede ofrecer en algun salon hazer alguna bobeda rebasada, y esta unas vezes se haze encamonada, haziendo camones de madera, que son unos pedaços de viguetas, ò tablones, y fixanse en el asiento de la bobeda, y rematan en el un tercio de su lado, y de unos a otros se tabican, y queda la bobeda con menos peso. . . . Es bobeda segura de poco peso, por ser tabicada de sencillo, y yo la tengo hecha de quarenta pies de largo, diez y ocho de ancho, con solos tres pies de buelta. Si fuere encamonada, sentaràs los camones en el lugar que estàn las çancas, ò tornapuntas, con la parte de buelta que les toca (San Nicolás [1639] 1989, 1: f.92–92v).

Fuera de este párrafo no vuelve a hacer mención a las bóvedas encamonadas no obstante que en la segunda parte habla del modo de cubrir capillas de planta circular con madera (San Nicolás [1639] 1989, 2:f.189). Aquí San Nicolás refiere en realidad la armadura de un chapitel con una sección interior curva, como se observa en la lámina que acompaña

al tratado, siendo un error tratar de asemejarlo a una cúpula encamonada. A reafirmar esta apreciación está el tratado de Rodrigo Alvarez, quien muestra un dibujo exactamente similar al de San Nicolás donde expresa que se trata de un chapitel (Nuere 2000). Como quiera que fuere, la descripción inicial ofrecida por San Nicolás se ajusta parcialmente a las características de las primeras bóvedas encamonadas construidas en el Virreinato peruano pero que una vez asentado el sistema en estas tierras lograría un desarrollo estructural no encontrado en España.

LAS BÓVEDAS ENCAMONADAS EN EL VIRREINATO DEL PERÚ

A pesar que entre los años 1550 y 1555 De L'Orme inventó su sistema de bóvedas de madera, utilizándolo en la cubierta del castillo de Limours y en el proyecto de una cúpula en el monasterio de Montmartre, no se tienen referencias si influyó directamente en la arquitectura hispana de entonces. Es San Nicolás quien informará del inicio de la construcción de bóvedas encamonadas en Castilla a principios del siglo XVII por el jesuita Francisco Bautista, sin mencionar a De L'Orme.⁷ Algunas de estas estructuras todavía sobreviven, pudiéndose observarlas en la capilla de los Caracciolos en Alcalá de Henares o en la iglesia parroquial de Torrija en Guadalajara, ambas del siglo XVIII. Estos dos ejemplos castellanos no solo son tardíos en comparación con las bóvedas encamonadas en el Virreinato del Perú sino que no son autoportantes pues se sujetan de una estructura superior, generalmente del tirante de la cubierta, quedando relegados los arcos únicamente a un nivel de conformación espacial.

Discurso aparte merecen las bóvedas de madera elaboradas en regiones vascas y gallegas, correspondientes notoriamente a una tipología estructural más de acuerdo con tradiciones medievales del norte europeo (Ayerza et al. 1996). Aquí no se usaban los camones para dar forma a los arcos de las bóvedas sino que se curvaban las vigas de madera para obtener pares curvos que sostenían una hilera o para realizar los arcos diagonales de las bóvedas de crucería, unidos con ensambles a pico de flauta o rayo de Júpiter (Courtenay 2004).

Inicialmente en el Virreinato del Perú se consideraba poco decente el empleo de la madera para cubrir

los templos, siendo normal su cerramiento con piedra o ladrillo. La constatación de los efectos negativos que producían los sismos en las bóvedas de fábrica impulsó la adaptación de los telares de «quincha» en forma de bóvedas encamionadas en la capilla de la Inquisición en 1665 y en la iglesia de Santo Domingo de Lima en 1666. De esta forma Fray Diego Maroto inspirado en la tradición española realiza unas armaduras de madera con tablas curvas y tejido de caña, sujetas de las vigas horizontales que se apoyaban en los muros de los templos.

Cuando el Cabildo Eclesiástico pide a Maroto su opinión sobre la reconstrucción de las bóvedas de la catedral de Lima después del terremoto de 1687 éste comenta:

... y por el consiguiente no se molesta la dicha fachada mayormente cuando las bóvedas inmediatas se hacen de cedro y yeso contrahaciendo y remendando a las demás de crucería, terceletes mayores y menores y sus lazos relevando con las mismas molduras que tienen las de ladrillo sin que se pueda reconocer si lo son o no porque estas y la nueva forma se ha reconocido por experiencia ser fábrica más segura en tan repetidos temblores mayormente cuando las que hizo de esta manera este declarante en la Iglesia de su Convento siendo así que era de pocos fundamentos en lo tocante a la albañilería las bóvedas que hizo encima de los pilares y arcos que han padecido y no las bóvedas por haberlas hecho de cedro y yeso . . . (San Cristobal 1996, 98).

Habrà que esperar hasta 1675, durante la reconstrucción de la iglesia de San Francisco, cuando Manuel de Escobar y el arquitecto portugués Constantino de Vasconcelos, perfeccionan este sistema haciendo las bóvedas autoportantes al incorporar un murete de adobe de contrarresto de empujes y uniones flexibles, logrando además definir la cúpula sobre el crucero con el mismo criterio.⁸ A partir de este momento esta técnica se generalizará por todo el Virreinato del Perú, especialmente después de la evaluación de su comportamiento durante el sismo de 1687, hasta convertirse en norma obligatoria luego del terremoto de 1746.

TIPOLOGÍA CONSTRUCTIVA DE LAS BÓVEDAS ENCAMONADAS

Básicamente las categorías constructivas de estas bóvedas dependen de su carácter estructural. La prime-



Figura 3
Características de la bóveda encamionada de la capilla de la Virgen de Loreto de Lima, correspondiente a la tipología adintelada (Hurtado Valdez et al. 1995)

ra corresponde al sistema adintelado, donde el intradós de la nave está formado por arcos sujetos a una armadura superior, mayormente vigas horizontales. Estos arcos no colaboran en la descarga del peso de la estructura y son utilizados únicamente para definir el espacio a cubrir, sin generar empujes laterales al formar parte de una estructura mayor que descarga el peso de la cubierta en forma vertical hacia los muros o pies derechos (fig. 3).

El segundo tipo constituye el sistema autoportante, donde el intradós y el extradós de la bóveda están definidos por arcos que se sostienen en conjunto y forman la estructura. En este caso no solamente interesa definir un espacio interior sino también mostrar la volumetría exterior que adquiere la edificación con la curvatura del extradós. Aquí se generan empujes laterales que serán recibidos por el encadenado y los semi diafragmas verticales de adobe incluidos en la armadura, antes de transmitir dichos esfuerzos a los muros (fig. 4).

Elementos de confinación al muro

Encadenado: Eran piezas que recorrían horizontalmente todo el perímetro de la armadura y marcaban el



Figura 4
Bóvedas encamonadas autoportantes de la catedral de Lima a imitación de crucería (Hurtado Valdez 2006b)

inicio de ella, estando empotrados en el muro, generalmente de adobe. Debían de servir a la nivelación del muro otorgando una superficie horizontal apta para el apoyo de los arcos. Era raro utilizar otros elementos de nivelación como eran los nudillos en España. Cumplían además la función de recibir y repartir los empujes generados por las cerchas hacia los muros.

Estructura portante

Cerchas: Se construían a partir de camones y contracamones de cedro o roble, colocados en forma alternada por su canto y unidos mediante clavos hasta dar forma al arco que se necesitaba. A veces también se aplicaban cintas de cuero, colocándose húmedas y al secar producían una mayor presión por retracción del material. Este sistema otorgaba una alta racionalización del proceso constructivo evitando el excesivo desperdicio de madera al asignarse un módulo de corte que podía repetirse según las necesidades.

Estos arcos se realizaban siguiendo el trazo a escala natural realizada sobre un andamio ubicado a la altura de los arranques de la bóveda para luego proceder a su colocación definitiva por el giro de la armadura. Sus extremos se encastraban en el encadena-

do por medio de una larga espiga para evitar los desplazamientos horizontales que podrían ocasionar los empujes. En estas armaduras las testas de los camones podían estar colocadas a tope o con ensambles a media caja, en este último caso realizado a 45° en su canto y con inclinación radial de la testa hacia el centro de la curva.

Cuando se trataba de realizar lunetos en las bóvedas o dar la forma a la cúpula, se efectuaban sectores de arco de menores dimensiones que partían del encadenado y terminaban en el tercio o el cuarto superior de las cerchas principales, introducidos en un rebaje que aumentaba la superficie de contacto entre ambas. Estos sectores de arco permitían además disminuir las distancias entre los puntos de apoyo de las cañas, de manera que el peso del recubrimiento de tierra no producía flechas excesivas en ellas.

Riostras: Eran piezas de madera colocadas en forma horizontal y alternada entre las cerchas para unir las en todo su recorrido, estando separadas por una distancia variable, que oscilaba entre 60 y 120 cm. Su función era transmitir y redistribuir las cargas de la cubierta, otorgando estabilidad lateral a los arcos además de mantener la separación entre ellos y evitar en la fase constructiva su volteo.

Relleno de adobe: En la zona de arranque de la armadura junto al muro, entre el encadenado y la primera riostra se solían colocar tornapuntas, rellenándose este espacio con adobe, con el fin de formar un diafragma parcial que ayudara a evitar el desplazamiento lateral de las cerchas y verticalizar la resultante del empuje.

Anillo de unión (en las cúpulas): Tenía forma octogonal y servía para la conexión de las diferentes cerchas en la parte alta de la semiesfera y contribuir al anclaje de la linterna. Se armaba con piezas enteras mediante el uso de ensambles a cola de milano. Las cerchas principales se fijaban al encadenado y al anillo central, mediante ranuras que se realizaban en éstos últimos.

Elementos de cierre

Tejido de caña: Formada por cañas unidas entre sí con cintas de cuero y conectadas a las cerchas por clavos colocados en dichas cintas.⁹ Generalmente en el extradós se colocaban enteras y hacia el intradós partidas longitudinalmente y extendidas.

Recubrimiento de tierra: Era una capa de barro con un espesor exterior mínimo de 5 cm, realizado con una proporción de 15% de arcilla, 10% de limo, 55% de arena y 20% de agua, incorporándose además paja y pelo animal para evitar una excesiva retracción por secado. La colocación del recubrimiento de tierra permitía aislar y proteger del medio ambiente a los diversos componentes de la armadura, manteniendo secos los elementos de madera debido a su bajo equilibrio de humedad de 0,4 a 6% en peso y a su alta capilaridad. Los insectos y hongos no pueden destruir la madera y caña en estas condiciones, ya que los insectos necesitan de 14 a 18% y lo hongos más de 20% de humedad para vivir.

Este estrato de tierra era estabilizado mediante la adición de cal y en algunos casos se cubría con una película de jugo de cactus con el fin de otorgar mayor impermeabilización a la cubierta. En el intradós de la bóveda se realizaba un recubrimiento final de yeso procurando un efecto visual de una bóveda de fábrica.

TRANSMISIÓN DE CARGAS Y EMPUJES

La primera evaluación científica del comportamiento de los arcos encamionados no se dará hasta 1797 por David Gilly, considerando erróneamente que estas estructuras seguían la misma lógica de los arcos de fábrica al interpretar sus juntas como conexiones rígidas. En general los ingenieros europeos de esta época asumían que la transmisión de los esfuerzos en compresión en los arcos de madera eran igual a los de fábrica, con discursos basados en la forma ideal y las resultantes de las reacciones.¹⁰ Solo a partir del siglo XIX, después de observarse el comportamiento de estructuras reales en Europa se consideró, especialmente en el ambiente académico alemán, la importancia de la elasticidad y la diferencia de los esfuerzos con los de fábrica. Para esta fecha ya se habían construido la mayoría de las bóvedas encamionadas en el Virreinato del Perú, habiendo los arquitectos dimensionado los elementos constructivos según dictaba la experiencia.

A los arcos de las bóvedas encamionadas se incorpora un cerramiento de tejido de cañas y revoco de tierra, concentrando menores empujes en los muros en comparación con las originales de fábrica, al tener menos peso.¹¹ Este empuje además de verse reducido

por el material usado, venía verticalizado por el empleo de un relleno de adobe en el cuarto inferior de las bóvedas, consiguiéndose transmitir con más seguridad las cargas dentro del tercio central del muro de adobe y evitar excentricidades riesgosas. La colocación de riostras transversales a los arcos, a los cuales se fijaba el tejido de cañas recubiertas con tierra y cal formaban en conjunto una retícula continua que garantizaba la distribución homogénea de las cargas y esfuerzos en la superficie de la bóveda, hasta llevarlos al encadenado apoyado sobre el muro. Además una bóveda encamionada por su flexibilidad facilitaba el ajuste de la estructura, con menor riesgo a su estabilidad, a los asientos y cambios geométricos que originaba la consolidación del terreno bajo las fundaciones.

COMPORTAMIENTO DINÁMICO DURANTE SISMOS

Las antiguas directivas de diseño de arcos y bóvedas de fábrica se basaban en leyes de proporción más que en criterios de resistencia o rigidez, buscando que la geometría de la estructura asegurase la transmisión adecuada de los esfuerzos dentro del material, generalmente trabajando a compresión, siendo normal la aparición de fisuras.¹² A pesar que estos signos muestran la adaptación de una estructura a su entorno y posterior estabilización en el tiempo, en un medio sísmico resultan relevantes porque cambian la frecuencia inicial de la construcción, pudiendo producir una resonancia dinámica durante un sismo si la nueva frecuencia resulta similar a la del terreno sobre la que se levanta, con el consiguiente daño estructural (Hurtado Valdez 2006a).

Si bien este tipo de construcciones en tierras sudamericanas eran estáticamente estables, tenían un desempeño dinámico riesgoso, pues los constructores hispanos no las habían preparado para enfrentarse o disipar energía sísmica. Los arcos y bóvedas de fábrica se mantienen estables mientras las condiciones geométricas no cambian sustancialmente, es decir la forma de la estructura garantiza el paso de la línea de empujes dentro de ella, con los límites fijados por los bordes del mismo material. Sin embargo ante un sismo, independientemente de la forma del arco o bóveda, la respuesta dinámica será elástica si la estructura ha sufrido fisuras limitadas. Pero si aumenta la aceleración horizontal se manifestará otra fase con distinta

frecuencia de vibración, donde los elementos de la bóveda chocan entre sí y pueden separarse, produciendo un desajuste en la geometría inicial con la posible aparición de un mecanismo de colapso.

Frente a las estructuras abovedadas aplicadas en Europa, en el Virreinato peruano se optó por la incorporación de la técnica constructiva desarrollada, es decir, realizar la planta baja de los edificios en adobe, dejando para la cubierta el uso de las bóvedas encamonadas. Dado que la fuerza de actuación de un sismo es proporcional al peso de la estructura, la utilización de una armadura ligera y realizada con materiales de elevada resistencia a esfuerzos tensionales permitió edificar en altura sin menoscabar la estabilidad de los muros de base, contribuyendo a este fin las uniones adoptadas para el encuentro entre la estructura flexible de madera y la rígida de adobe del piso inferior (fig. 5).

La unión entre ambas estructuras estaba dada por una viga perimetral de madera, que actuaba como encadenado de la parte superior del muro y base de las bóvedas encamonadas, ayudando a arriostar a los muros de adobe e impidiendo su natural separación durante un sismo. Así trataban de brindar un efecto diafragma para responder solidariamente al movi-

miento, ya que como los techos pesaban poco y eran flexibles, la parte superior de los muros hubiese vibrado como un borde libre con una fuerza inercial actuando dentro y fuera del plano, en este último caso podía ocasionar la separación de los muros y su posterior vuelco si el momento positivo se hacía grande en la parte central, cuando existía un gran distanciamiento entre contrafuertes o muros de arriostre.

AUMENTO DE LA DUCTILIDAD DEL SISTEMA

Un gran trabajo dinámico lo realizaba el tejido de cañas que actuaba como una armadura interna con amplia posibilidad de resistir tensiones, mientras el revestimiento de barro con cal no sólo protegía de la intemperie a los diferentes elementos de la estructura sino contribuía junto con las cañas a definir una superficie continua a modo de una membrana asegurando un trabajo solidario de toda la estructura no sólo a nivel estático sino principalmente dinámico.¹³ Además estas bóvedas no estaban rígidamente conectadas al encadenado ubicado sobre el muro sino mediante una espiga sumamente larga y trabada por un murete de adobe. Durante un temblor los arcos que formaban la bóveda podían moverse dentro del cajado realizado, asegurando la dimensión de la espiga el mantenimiento en su posición. De igual manera el uso de cintas de cuero para las uniones permitió cierto grado de libertad al movimiento sin que se perdiera la forma geométrica inicial, siendo lo suficientemente flexibles para disipar energía sísmica sin llegar a colapsar y cuyas tolerancias de deformación eran ya tomadas en cuenta (fig. 6).

Por otro lado se considera erróneamente que el relleno de adobe en la parte baja de una bóveda encamonada busca el descenso de su centro de gravedad. Una rápida observación de la estructura mostrará que la armadura abovedada no está hueca, sino llena con un tupido tejido de caña y recubrimiento de barro, por lo que el peso específico de esta parte no puede estar demasiado alejado del peso específico del relleno de adobe en la base, ambos de igual espesor.

En una bóveda de cañón de materiales homogéneos la coordenada «y» del centroide se ubica aproximadamente a $4R / 3\pi$, medido desde la base, pero en una bóveda encamonada la posición en «y» es igual a $0,95 (4R / 3\pi)$, que no es significativo para mejorar su eficacia sismorresistente.¹⁴ Por tanto la razón para



Figura 5
Bóveda y cúpula encamonadas autoportantes de la iglesia La Compañía de Pisco (Hurtado Valdez 2006b)



Figura 6
Utilización de cintas de cuero en la capilla de la Virgen de Loreto de Lima (Hurtado Valdez et al. 1995)

rellenar estos cuartos inferiores con adobe está más relacionado con formar una guía que impidiese a la espiga de los camones escapar del encadenado en los movimientos sísmicos y de asegurar durante su construcción, cuando se posaba el arco sobre el encadenado, el actuar como peso muerto que ayudara a verticalizar los empujes hasta que se completara la edificación de este tramo. Finalmente creaba un semi diafragma dentro del plano impidiendo el desplazamiento de los arcos en el sentido lateral y absorbiendo fuerzas sísmicas en esta dirección.

NOTAS

1. El hundimiento de las bóvedas de cañón realizadas con ladrillo en la iglesia de Pacasmayo y con piedra en la catedral de Cuzco produjeron su cambio por bóvedas de crucería. Las bóvedas de la catedral de Lima se rehicieron después del terremoto de 1609 bajo el sistema de crucería, pero volvieron a colapsar en el terremoto de 1687 y fueron reconstruidas en tipo encamonado.
2. «To demonstrate that de l'Orme's treatise had no immediate success, it must be said that Vincenzo Scamozzi in his L'idea dell'architettura universale doesn't mention it, even though he writes at length about Italian and fo-

reign architecture of the time. Scamozzi's work was the result of his long journeys around Europe noting architecture, and of his studies about different building techniques. The French treatise wasn't rediscovered until the nineteenth century, during the renewed interest in the gothic when illustrious people, such as Jean Baptiste Rondelet and Armand Rose Emy, referred to it in their works» (Campa 2006, 531).

3. Se evidencia en el inventario realizado a la biblioteca de uno de los más importantes alarifes de Lima: Santiago Rosales (1681–1759). Los principales volúmenes encontrados fueron «Arquitectura» de Pietro Catáneo (1554), «Tercer y cuarto libros de Arquitectura» de Serlio (1565), «Perspectiva y Espectacularidad» de Euclides (1585), «Breve Compendio de Carpintería de lo Blanco y Tratado de Alarifes» de López de Arenas (1633), «Breve tratado de bóvedas regulares e irregulares» de Juan de Torrija (1661), «Arquitecto Perfecto» de Sebastián Fernández de Medrano (siglo XVIII), «Tratado Nuevo de las Cosas Maravillosas de Roma», «Arquitectura Militar» de Matías Dogac, «Fortificaciones de Plazas» y «Elementos Militares» de Diego Enriquez de Villegas (Marussi 1981, 122). Por su parte el tratado de San Miguel sólo hace referencia a la traza geométrica de una cúpula encamonada sin mencionar las características de su construcción. Mirar en Nuere (1990) lámina f.88.
4. «Si la quisieres hazer en diez cascos, la demostraré aquí toda enteramente, por la mucha similitud que tiene con la esfera, sea la quadra y buelta redonda de su estribo A.B.C.D. haz su anchura seis partes la línea que la corta por el centro y de ella básate con una sexta parte, como lo dize E.F. y pon el punto del compas en el centro del quadrado, y punto G. y describe alrededor una parte de círculo, empeçando en el punto E. y acabando en el punto F. acrecientale agora los peraltes en esta parte del círculo, y quedarán inclusos los dos camones, y en la planta sacarás los campaneos que tiene cada camon, dándoselos por la orden que se da a la campana de la lima de la media caña» (López [1633] 1982, f.32v).
5. Toajas (1997, 197) ha dado cuenta de la falta de precisión de López de Arenas: «las explicaciones de Arenas sobre la estructura cupular resulta incompleta, tal vez por la dificultad de fundamentar razonadamente lo que conoce por transmisión práctica de taller, y los dibujos y plantillas heredados; no aclara cómo determina los centros de los sectores de círculo que determinan los triángulos curvos de la montea».
6. Se designaban como «medias cañas» a las bóvedas de madera en rincón de claustro. Cuando se realizaban con limas moamares (dos limas paralelas que partían de la esquina correspondiente a cada muro y concurrían en lo alto) era necesario ejecutar una corrección geométrica

- denominado «campaneó» consistente en la torsión de los maderos para producir la curvatura sin perder el paralelismo de las caras verticales de las piezas.
7. «En España, particularmente en esta Corte se van introduciendo el cubrir las Capillas con cimborrio de madera, y es obra muy segura, y muy fuerte, y que imita en lo exterior a las de cantería, esta se ha usado dello en edificios, ó que tienen pocos gruesos de paredes, ó que lo caro de la piedra es causa de que se hagan con materia mas ligera, y menos costosa. En Madrid mi patria, Corte del Rey de España, hizo la primera un famoso Arquitecto de la Compañía de Jesus, por nombre el Padre Francisco Bautista, en el Colegio Imperial de su Religión, en su gran fábrica de su iglesia, que por los malos materiales de esta Corte, fue necesario echarla de madera. Yo hice la segunda en mi Convento de Agustinos Descalços, en esta Villa de Madrid, en la Capilla del Desamparo de Christo; la tercera hize en Talavera en la Hermita de Nuestra Señora del Prado, con el resto de su Capilla mayor; y la quarta que traçé, se executó en Salamanca, tambien en mi Convento de Agustinos Descalços, y la executó un famoso Arquitecto, Religioso de mi Religión, que fue discípulo mio, llamado Fray Pedro de San Nicolas» (San Nicolás [1639] 1989, 2:f.189).
 8. Constanino de Vasconcelos falleció en 1668, años después de que Maroto introdujera las bóvedas encamonadas y aunque al principio era partidario de cubrir el templo de San Francisco con bóvedas de ladrillo es de suponer que finalmente debió plantear junto a Escobar la estructura a base de madera.
 9. Se trata de la especie *gunerium sagittatum*, con un diámetro aproximado de una pulgada. Es de consistencia compacta y flexible, llena de fibras internas muy resistentes a la tensión. También soporta al ataque de hongos e insectos.
 10. Basta recordar que la primera aplicación de la estática en la solución de problemas de arcos de fábrica la realiza Lahire (1695) utilizando el polígono funicular en sus análisis. Aún en 1825 el Consejero de construcciones de Bavaria Johan Michael Voit hacía referencia a las precedentes estructuras de fábrica para referirse a los arcos encamonados, mientras Panzer (1835) como Real Oficial de construcciones de Bavaria y Johann Andreas Romberg (1850) recomendaban construir arcos encamonados siguiendo la forma de una catenaria invertida. Franz Joseph Ritter von Gerstner trabajó sobre el análisis de la capacidad de carga de estas estructuras aplicadas a puentes tratando de seguir una imaginaria línea de empujes (Hahmann 2006, 1506).
 11. El espesor de una bóveda de fábrica era parecido al realizado en madera, caña y tierra. Pero el peso específico de una bóveda encamonada y rellena con estos materiales es 900 Kg/m³, mientras que el del granito bordea los 2700 Kg/m³ y el ladrillo los 1800 Kg/m³.
 12. Los tres criterios estructurales fundamentales son resistencia, rigidez y estabilidad. Sin embargo para un constructor antiguo los conceptos de resistencia y rigidez eran secundarios al momento de proyectar una edificación. Las tensiones medias de una estructura normal de fábrica son bajas y las deformaciones generalmente despreciables por lo que la estabilidad que otorgaba su geometría devenía en clave importante para el diseño (Heyman 1995).
 13. En ensayos realizados sobre módulos de «quincha» se observó que cuando al recubrimiento de barro y paja se incorporaba un delgado estrato de arena, cemento y yeso, éstos se incrustaban en las fisuras del revoco de tierra formando un elemento monolítico. El recubrimiento controlaba la curva esfuerzo deformación horizontal del conjunto, resistiendo su propio peso en dirección horizontal, es decir 1g sin colapsar (Kuroiwa 2002, 141). La «quincha» puede considerarse como un sistema estructural mixto que sigue la lógica del diseño de los materiales compuestos incorporando fibras en una matriz más blanda para conseguir una combinación de propiedades que no es posible obtener en los materiales de manera independiente, logrando mejoras de resistencia y flexibilidad.
 14. Se realizó un cálculo de los momentos estáticos de la bóveda con relleno de adobe y de aquella con barro y caña. El momento estático de un área respecto a un eje dado es igual al área multiplicada por la distancia normal del centroide del área al eje. Si se divide un área en un número de partes, la suma de los momentos estáticos de las partes es igual al momento estático del área completa. Para el cálculo se han considerado un peso específico del adobe de 1,400 Kg/m³ y de la «quincha» de 900 Kg/m³. El resultado arrojó un descenso del centro de gravedad de su posición en 5%. El descenso será aún menor si se considera el mayor peso específico de la «quincha» de 1,200 Kg/m³.

LISTA DE REFERENCIAS

- Ayerza, Ramón; Barrio, José Ángel; Javier Gómez y Alberto Santana. 1996. *Ars Lignea. Las iglesias de madera en el País Vasco*. Madrid: S. E. Electa España S.A.
- Campa, María Rita. 2006. Le Nouvelles Inventiones pour Bien Bastir et a Petits Fraiz by Philibert de l'Orme: a New Way to Conceive Wood Roof Covering. En *Proceedings of the Second International Congress on Construction History*. Editado por Malcom Dunkeld, James Campbell, Hentie Louw, Michael Tutton, Bill Addis y Robert Thorne, Vol. 1: 525-541. Cambridge.

- Courtenay, Lynn T. 2004. Medieval Roof Carpentry: charpente lambrissée. En *Timber Framing 72: 8–15*. Becket: The Timber Frame Guild.
- De L'Orme, Philibert. 1561. *Traité d'architecture: Nouvelles Inventions pour bien bastir et à petits fraiz. Premier Tome de l'Architecture*. Paris: (facs. Ed. Paris: Léonce Laget, Libraire-Éditeur, 1988).
- Hahmann, Lydia. 2006. How stiff is a curved timber plank? Historical discussions about curved-plank structures. En *Proceedings of the Second International Congress on Construction History*. Editado por Malcom Dunkeld, James Campbell, Hentie Louw, Michael Tutton, Bill Addis y Robert Thorne, Vol. 2: 1501–1516. Cambridge.
- Heyman, Jacques. 1999. *El esqueleto de piedra, mecánica de la arquitectura de fábrica*. Madrid: Instituto Juan de Herrera.
- Hurtado Valdez, Pedro; Paliza, Violeta; Bernardo Roeleved y María Zúñiga. 1995. Análisis del comportamiento estructural de la bóveda de la capilla de Nuestra Señora de Loreto. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Arquitectura Urbanismo y Artes, Sección de Postgrado y Segunda Especialidad.
- Hurtado Valdez, Pedro. 2006a. La restauración de edificios de tierra en zonas sísmicas. En *Atti del Convegno Internazionale «Costruire con terra cruda oggi»*. Roma: Edicomeditazione.
- Hurtado Valdez, Pedro. 2006b. Estructuras abovedadas de quincha en el Virreinato del Perú. En *Actas del V Seminario Iberoamericano de Construcción con Tierra y I Seminario Argentino de Arquitectura y Construcción con Tierra*. Mendoza: Cricyt.
- Kuroiwa, Julio. 2002. *Reducción de desastres. Viviendo en armonía con la naturaleza*. Lima: Julio Kuroiwa.
- Laner, Franco. 2001. Mettere in forza, la chiesa della Compagnia di Gesù a Cordoba. En *Adrastea 18: 4–17*. Edolo: Habitat legno s.p.a.
- Lopez de Arenas, D. 1633. *Breve compendio de la carpintería de lo blanco y tratado de alarife*. Editada por Luis Espinan (facs. Ed. Valencia: Albatros, 1982).
- Marussi Castellan, Ferruccio. 1981. *La quincha en las edificaciones monumentales del Virreinato del Perú*. Tesis doctoral. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Arquitectura.
- Nuere Matauco, Enrique. 1990. *La carpintería de lo blanco, lectura dibujada del manuscrito de Fray Andrés de San Miguel*. Málaga: Colegio Oficial de Arquitectos de Andalucía Oriental.
- Nuere Matauco, Enrique. 2000. *La carpintería de armar española*. Madrid: Editorial Munilla - Lería.
- San Cristobal, Antonio. 1996. *La catedral de Lima: Estudios y documentos*. Lima: Museo de Arte Religioso de la Catedral de Lima.
- San Nicolás, Fray Laurencio de. 1639. *Arte y Uso de Arquitectura. Primera y Segunda Parte*. Madrid: s.i. (facs. Ed. Madrid: Albatros, 1989).
- Serlio, Sebastiano. 1600. *Tutte l'opere d'architettura, et prospetiva, di Sebastiano Serlio bolognese, dove si mettono in disegno tutte le maniere di edifici, e si trattano di quelle cose, che sono più necessarie a sapere gli Architetti . . . Diviso in sette libri. Seconda parte. Venezia* (facs. Ed. Oviedo: Colegio de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Asturias, 1986).
- Toajas Roger, María Angeles. 1997. *Diego López de Arenas, breve compendio de la carpintería de lo blanco y tratado de alarifes*. Madrid: Visor Libros S.L.