Bóvedas encamonadas

❑ *Un recorrido por la evolución, en el Virreinato del Perú, de las estructuras abovedadas europeas y su progresiva utilización en medios sísmicos*

Por Pedro HURTADO VALDEZ *

Consideraciones iniciales

El conocimiento de la arquitectura virreinal peruana ha estado basado mayormente en el tratamiento de la variable histórico estilística, a partir de la cual se ha pretendido obtener conclusiones de carácter constructivo y estructural, sin el correspondiente análisis propio de este campo. Las bóvedas encamonadas que aparecieron en el Virreinato del Perú no escapan a esta realidad, aceptándose hasta el momento las iniciales conjeturas sobre estas cubiertas. Ideas que van desde su utilización por únicamente criterios estilísticos[1] hasta la explicación de su comportamiento estructural en función exclusiva de la disminución del peso en comparación con las originales bóvedas de fábrica que tuvieron los edificios de aquella época[2].

Desde los albores de la ocupación hispana del Perú en el siglo XVI, los muros se levantaban con proporciones similares a los realizados en la península Ibérica, mientras arcos, bóvedas y cúpulas se hacían bajo las normas de cantería estipulados por los gremios de constructores. Pronto se observaría que las nuevas tierras colonizadas eran sacudidas periódicamente por sismos, produciendo el colapso de la mayoría de las edificaciones, las cuales no estaban preparadas para hacer frente a estos fenómenos.

Durante las pruebas de ensayo y error, los maestros constructores observaron que las viviendas de los nativos realizadas con sencillos telares de madera rolliza, caña y tierra, por su flexibilidad resistían mejor a los terremotos. La utilización de la tierra no era ajena a los castellanos, siendo un material con presencia importante en las construcciones hispanas, mayormente en forma de tapia. Sin embargo, la rusticidad de la técnica indígena motivó su inicial consideración como inadecuada para la ejecución de templos y palacios, pero la yesería española remedió este inconveniente logrando dar un aspecto final de acuerdo a la magnificencia buscada para las obras. Esta tecnología no sólo brindó seguridad a la construcción en altura en un medio sísmico, sino que permitió edificar diversos tipos arquitectónicos, como palacios con sus altos miradores, cuerpos superiores de claustros de conventos y torres de iglesias.

Solucionada la forma de construir en altura, aún quedaba por definir el modo de cubrir los templos, los cuales estaban condicionados por exigencias espaciales muy dadas a la edificación de bóvedas, especialmente bajo las sugerencias del

* Arquitecto por la Universidad Ricardo Palma de Lima-Perú. Maestría en restauración de monumentos por la Universidad Nacional de Ingeniería a de Lima-Perú, y Especialización en restauración de monumentos por la Universidad La Sapienza de Roma-Italia. Master en Restauración y Rehabilitación del Patrimonio (MRRP) por la Universidad de Alcalá-España. Doctorando en la Universidad Politécnica de Madrid en el programa de mecánica de las estructuras antiguas. Miembro de Icomos Perú en el Comité nacional de conservación de arquitectura en tierra y en el Comité científico internacional para el análisis y restauración de las estructuras del patrimonio arquitectónico.

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 principalmente de seguridad frente a los sismos. Además, en la constante indagación de soluciones para garantizar la estabilidad de las cubiertas, se volvieron a utilizar las arcaicas bóvedas góticas de crucería[3], al asumirse que podían resistir a los terremotos, sin conseguir la confirmación en la práctica del desempeño estructural deseado. Dentro de este panorama comenzaran a hacer su aparición las bóvedas encamonadas, a mediados del siglo XVII.

Los tratados sobre bóvedas de madera

Para comprender la relevancia de la propuesta estructural de las bóvedas encamonadas, tendremos que remitirnos a los tratados existentes en la época, indagando en ellos con ojos más de constructor que de historiador del arte, para determinar hasta qué punto pudieron condicionar su presencia y desarrollo dentro del territorio sudamericano. En el ámbito de la carpintería de lo blanco, los tres tratadistas fundamentales del siglo XVII español fueron el carpintero y alarife de Sevilla Diego López de Arenas, el fraile agustino Andrés de San Miguel y el maestro de obras de Salamanca Rodrigo Álvarez. No obstante, está registrada la influencia en el Virreinato peruano sólo del primero, quedando el resto aún en una etapa oscura, a pesar de la presencia de San Miguel en México[4]. A evidenciar lo mencionado está el inventario realizado a la biblioteca de uno de los más importantes alarifes de Lima, el maestro Santiago Rosales (1681-1759)[5].

a) Diego López de Arenas: De los tratados encontrados en la biblioteca de Santiago Rosales, únicamente el de López de Arenas correspondía a la carpintería de lo blanco. Es interesante la descripción que hace sobre el modo de ejecutar una media naranja en madera: "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

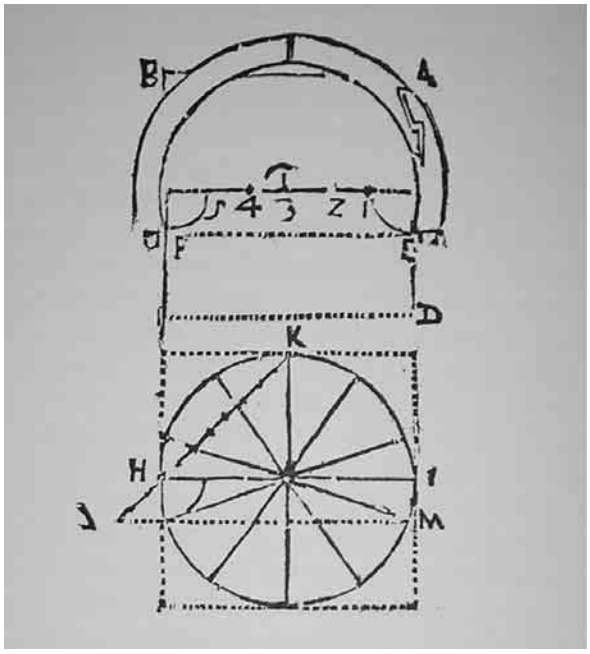


Figura 1. Lamina de López de Arenas, con el tipo de cerchas que obtiene y una unión en rayo de Júpiter (LOPEZ, 1633).

parte, como lo dize E. F. y pon el punto del compas en el centro del quadrado, y punto G. y descrive alrededor una parte de circulo, empeçando en el punto E. y acabando en el punto F. acrecientale agora los peraltes en esta parte del circulo, 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"[6].

Son de extrañar la descripción y el dibujo que adjunta (figura 1), por no corresponder en ningún caso al sistema constructivo encontrado en las iglesias virreinales peruanas o en sus equivalentes españolas. Incluso la formación de las juntas de la armadura con un rayo de Júpiter muestra un aparente desconocimiento de la técnica real, al procurar una junta que obedece principalmente a un trabajo a tracción y no a compresión como sería el caso.

Por su parte, Toajas Roger parece también haberse dado cuenta de la falta de precisión de López de Arenas cuando refiriéndose a las cúpulas señala que *"las explicaciones de Arenas sobre la estructura cupular resulta incompleta, tal vez por la dificultad de fundamentar razonadamente lo*

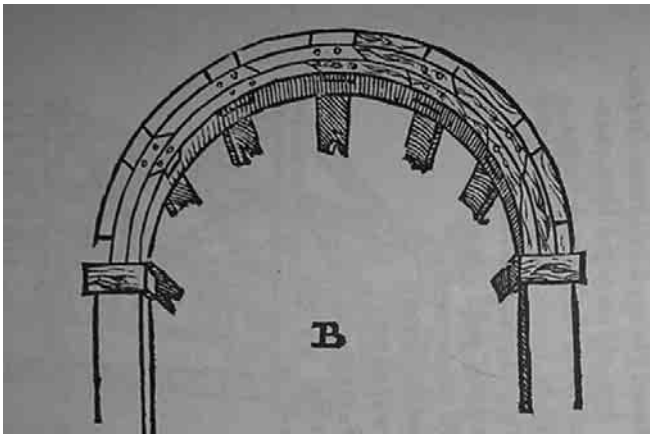


Figura 2. Tipo de arco de madera graficado por Serlio en su tratado (SERLIO, 1600).

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 cuivos de la montea" [7]. Igualmente, la mención del campaneo de las "medias cañas" aplicadas a las cerchas que forman los arcos de la bóveda resulta una complicada labor sin justificación aparente, sólo acostumbradas a hacerlas en las armaduras con limas moamares, para acompañar la curvatura y el paralelismo de los maderos de las esquinas[8].

b) Sebastiano Serlio: Este tratado también se encontró en la biblioteca de Santiago Rosales, y al parecer era conocido en la esfera del virreinato del Perú. Aunque en una de sus láminas muestra el dibujo de una bóveda ejecutada con arcos de madera (figura 2), no define la unión de los camones (piezas cortas y curvas de madera) para la formación de la cercha. Además no se realiza con camón y contracamón por el lado del canto, como indicaría la lógica constructiva, sino a nivel de tres roscas superpuestas, que difícilmente hubiesen dado estabilidad a la estructura sin un elemento de enganche común a los tres arcos, cosa que hará en el siglo XIX Armad Emy en su propuesta de cubiertas abovedadas para cubrir grandes 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, o en otro sitio todavía ..."[9]. Es decir, en ningún momento se planteaba la posibilidad de cubrir la nave de una iglesia, estando dirigida a ambientes más domésticos, como el caso de la pérgola a la que hace referencia.

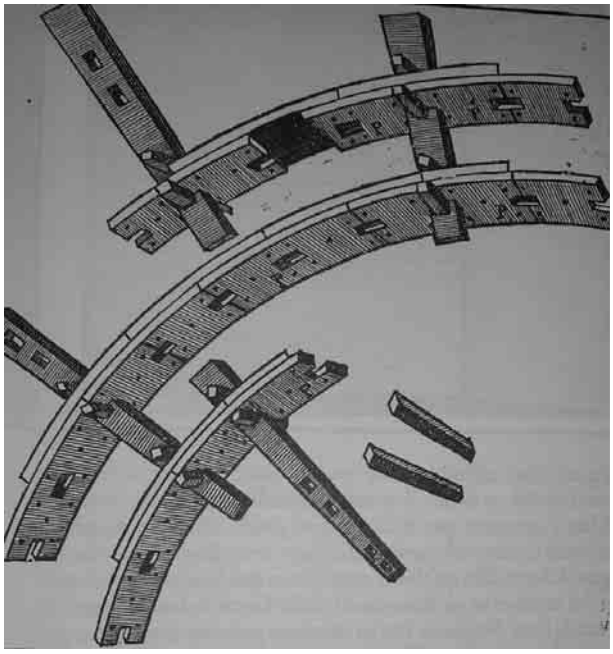


Figura 3. Detalle de las uniones en la propuesta de De L'Orme (DE L'ORME, 1561).

c) Philibert De l'Orme: Un poco lejano en el tiempo, se encuentra su tratado, donde elaboró una manera de cubrir espacios con bóvedas y cúpulas realizadas a partir de piezas cortas y delgadas de madera, solapadas en forma de arco, como si se tratase de la cuaderna de una nave, con riostras a manera de espigas que pasaban en las cajuelas realizadas en las piezas principales y sujetadas por clavijas también de madera (figura 3). No se tiene noticias de si los carpinteros virreinales tuvieron a disposición este tratado para consultas, a pesar de la presencia de una solución parecida en las bóvedas y cúpula de la iglesia jesuita de Córdoba (Argentina) realizada por Philipe Lemer. Aun en este caso, la propuesta de Lemer es de mayor alcance técnico, al lograr un elemento estructural que actúa más como una viga reticular curva que como un arco, en el sentido de que los empujes son absorbidos por el mismo sistema cerrado, logrando pre compresiones en las uniones a través del uso de cuñas, y el

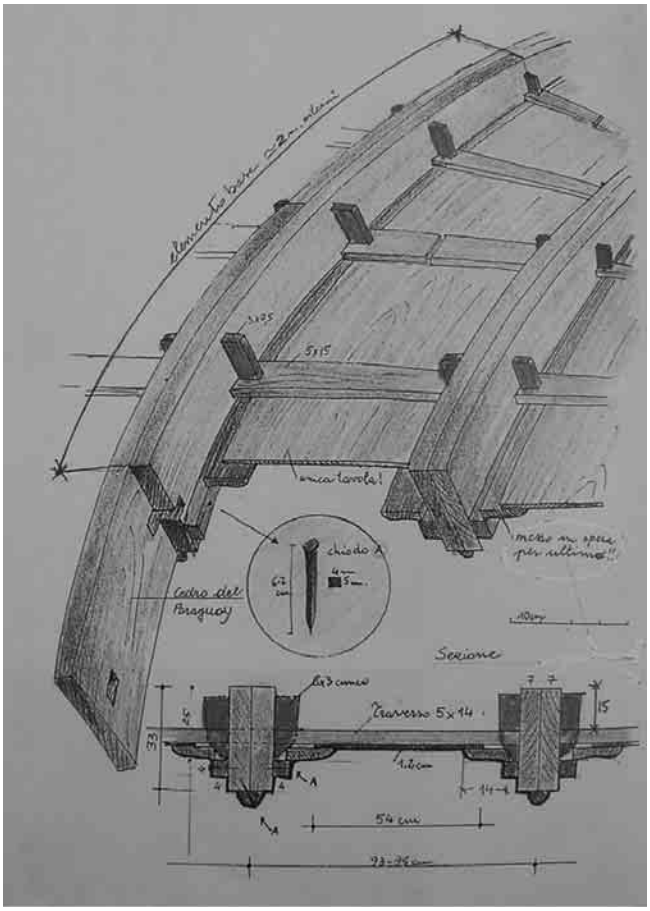


Figura 4. Detalle de las uniones en la bóveda de Lemer (LANER, 2001)

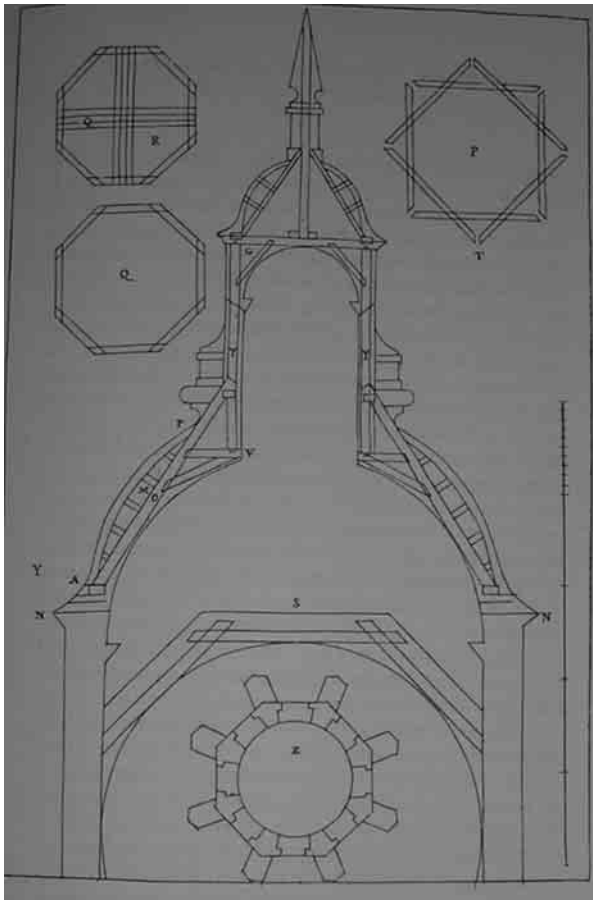


Figura 5. Lámina de Fray Lorenzo de San Nicolás mostrando la armadura de un chapitel que muchos confunden con una cúpula encamonada (SAN NICOLAS, 1639).

curvado de las tablas de cerramiento que presionaban contra los arcos[11] (figura 4).

Por otro lado, los tratados españoles e italianos de la época mayormente consultados en Hispanoamérica no hacen mención al planteamiento de De L'Orme, quien provenía de un ambiente más inclinado a las tendencias góticas del norte europeo que al de los pueblos mediterráneos, más influenciados por las ideas renacentistas, y en consecuencia su difusión sería también rara[12]. Asimismo, las bóvedas de madera realizadas en España no muestran la influencia del arquitecto francés, siendo generalmente armaduras ocultas exteriormente; por tanto no interesaba definir la curvatura externa de las piezas de madera, además de estar colgadas de los pares de la cubierta o suspendidas de una viga apoyada en los muros.

d) Fray Lorenzo de San Nicolás: Otro tratado importante en España es el de Fray Lorenzo de San Nicolás, quien en el capítulo LII de la primera parte de su obra habla de la manera de realizar una bóveda encamonada y de una tabicada: *"... 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, ó 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, sentarás los camones en el lugar que están las çancas, 6 tornapuntas, con la parte de buelta que les toca"* [13].

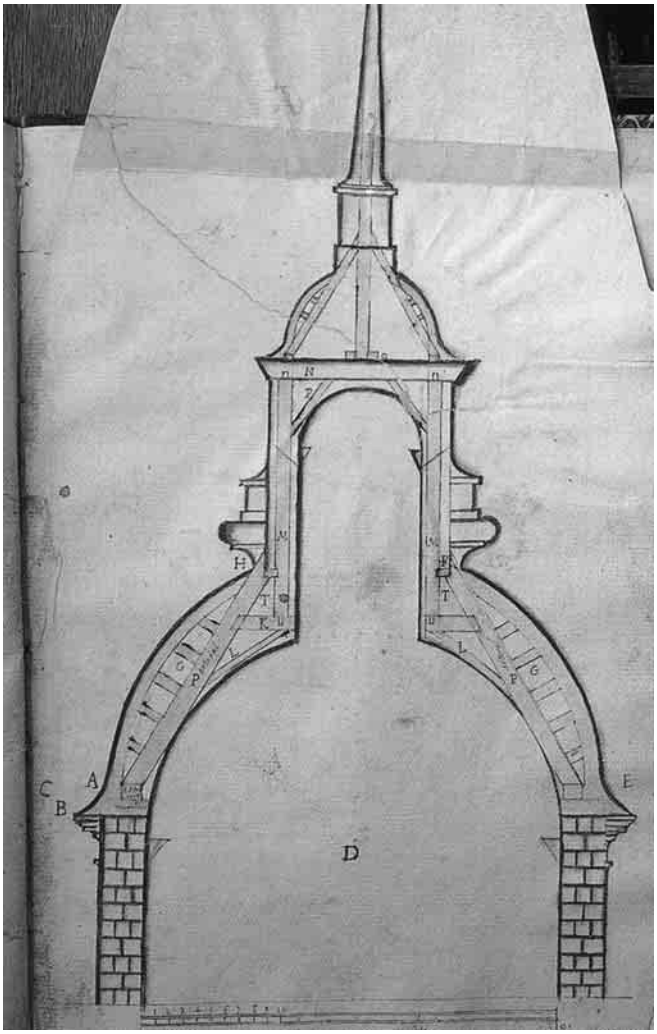


Figura 6. Armadura de un chapitel según Rodigo Alvarez (NUERE, 2000).

Asimismo, en el capítulo LI de la segunda parte refiere el modo de cubrir capillas de planta circular con madera: *"...su planta es como la passada, redondo por adentro, y ochavada por fuera las paredes, excepto que no llevan tirantes, y así la planta no la pongo entera, sino parte della, y/o bastante para su inteligencia, que de lo demostrado se vendrá en su conocimiento; y así sobre el enrasamiento de paredes sentarás nudillos a trechos, y sobre ellos los estrivos en una caxa ochavada, que guarde el vigo de la parte mas delgada de la parte de adentro, que vayan encasados a media madera con sus cabeças, y siempre estos estribos será bien que sean gruesos, respectivamente del hueco de la Capilla..."* [14].
Sin embargo, aquí surge un gran error de muchos estudios consultados[15], el de tratar de asemejar una cúpula encamonada con la armadura de un chapitel con una sección interior curva, como se observa en la lámina que San Nicolás acompaña a su tratado (figura 5). A reafirmar esta apreciación está el tratado de Rodrigo Alvarez (figura 6),

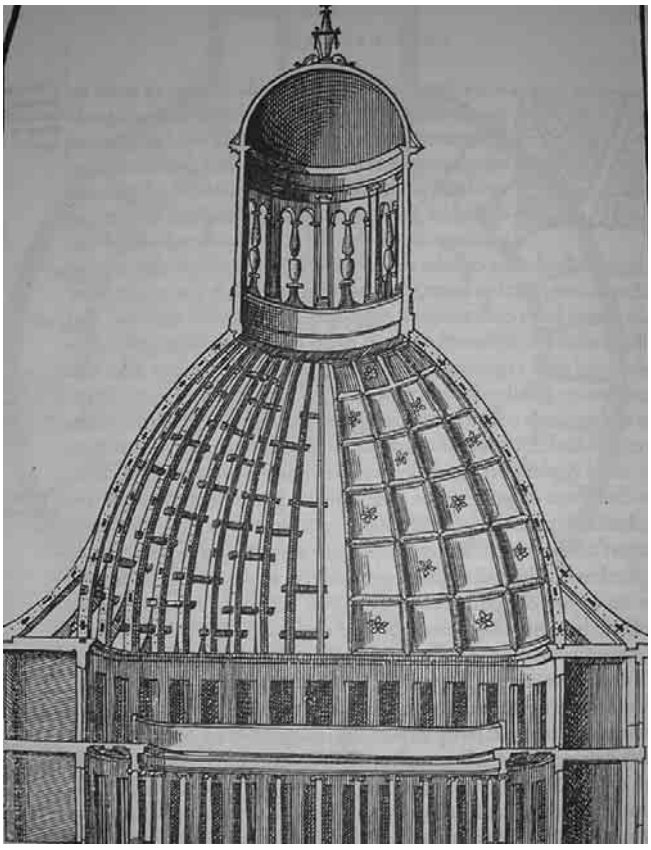


Figura 7. Lamina de De L'Orme con su sistema de armadura aplicado a una cúpula (DE L'ORME, 1561).

quien muestra un dibujo exactamente similar al de San Nicolás donde refiere que se trata de un chapitel. Por otra parte, no se ha encontrado referencia a la utilización de este tratado en el virreinato peruano, además de que las cúpulas encamonadas que aparecerán en Perú difieren completamente de aquello que San Nicolás trataba de explicar.

Aparición del sistema constructivo en España

A pesar de que entre los años 1550 a 1555, Philibert De L'Orme inventó su sistema de armadura de madera de tablas curvas y cortas, utilizándolo en 1555 en la cubierta del castillo de Limours, sobre el ala lateral de acceso[16], y en 1559 en el proyecto de la cúpula en la reconstrucción del monasterio de Montmartre[17] (figura 7), no se tienen referencias de si influenció directamente en la arquitectura hispana de entonces.
Pero será San Nicolás quien mencionará que *"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*

Figura 8. Detalle de la cercha de la bóveda encamonada en la biblioteca de la capilla de Caracciolos en Alcalá de Henares (HURTADO VALDEZ, 2004).

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 lesus, por nombre el Padre Francisco Bautista, en el Colegio Imperial de su Religión, en su gran fabrica de su iglesia, que por los malos materiales de esta Corte, fue necesario echarla de madera. Yo hize 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"[18].

De los edificios mencionados todavía no se ha confirmado la existencia de las armaduras encamonadas. Aunque estas estructuras aparecen en la biblioteca de la capilla de los Caracciolos en Alcalá de Henares (figura 8) o la iglesia parroquial de Torija en Guadalajara (figura 9) del siglo XVIII, dentro del área de Castilla, mientras que las bóvedas de madera de las iglesias de regiones vascas y gallegas corresponden notoriamente a otra tipología estructural más de acuerdo con la tradiciones del norte de Europa, en donde se curvaban largos troncos de madera para formar las

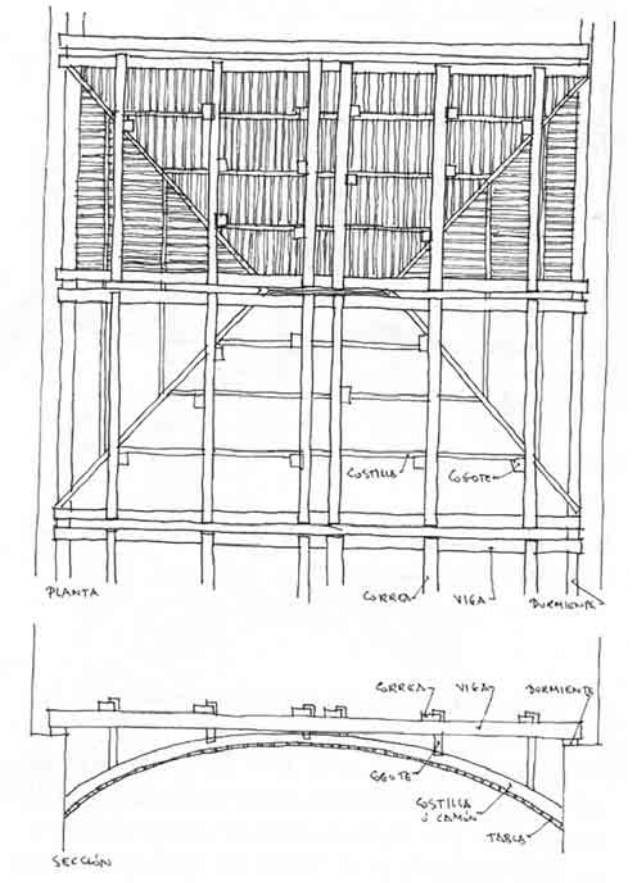


Figura 9. Detalle de la bóveda encamonada en la iglesia parroquial de Torrija, Guadalajara (VILLANUEVA, 2005).

costillas de las bóvedas de crucería.

Estos dos ejemplos no sólo son tardíos en comparación con las bóvedas encamonadas en Perú, sino que la mayoría de ellas no son autoportantes, porque están colgadas de una estructura superior, generalmente del tirante de la cubierta. Así, en la biblioteca de Caracciolos, la cercha está formada por camones clavados entre sí y sujeta de una viga superior de madera que define la estructura portante, quedando relegados los arcos únicamente a un nivel de conformación espacial. Por debajo de las cerchas se da forma a la bóveda con tablas unidas por clavos a los camones.

En la iglesia parroquial de Torija, todo el conjunto está sujeto de dobles vigas de madera a lo largo de la nave según el ritmo impuesto por los arcos fajones. Sobre estas vigas se apoyan seis

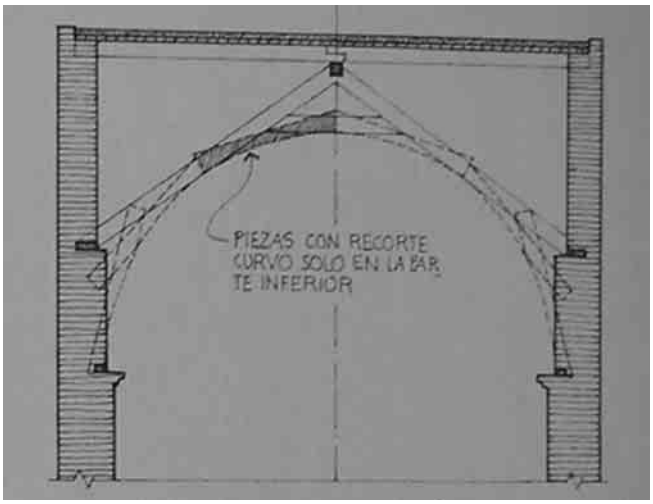


Figura 10. Sección de la bóveda de la iglesia de Santo Domingo de Lima (MARUSSI, 1981).

Figura 11. Intradós de la iglesia La Compañía de Mendoza - Argentina, (LANER, 2001).

correas longitudinales, en el sentido de la nave. Las cerchas están colgadas de las correas a través de unos listones de madera y se apoyan en ellas mediante un empalme por muesca, asegurado con clavos. Finalmente, la forma de la bóveda viene dada por tablas clavadas desde abajo sobre las cerchas. Estas tablas, al igual que en el caso anterior, están distanciadas entre ellas, dejando unas ranuras rodeadas con cordeles para facilitar la fijación del yeso.

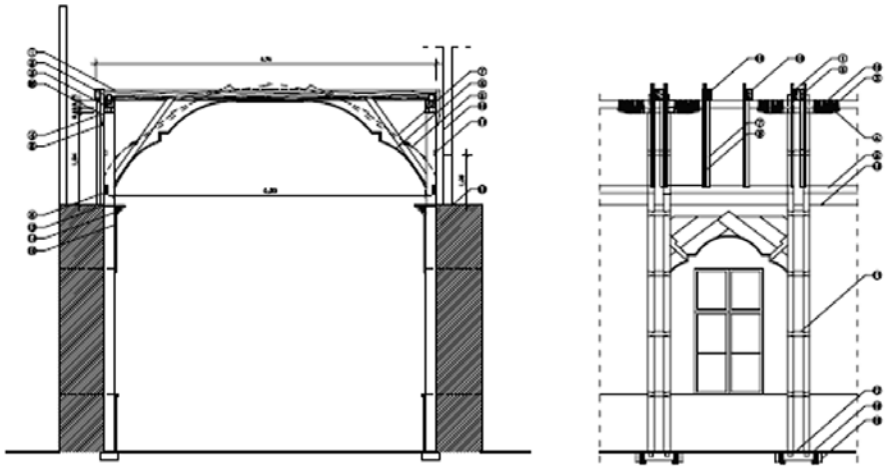
Las bóvedas encamonadas en el Virreinato del Perú

En el Virreinato del Perú se consideraba inicialmente poco decente el empleo de la madera para cubrir los templos, mas fueron los numerosos sismos que remecieron estas tierras los que motivaron la incorporación de este tipo de armadura en la arquitectura religiosa, por considerarse más seguras, especialmente después del terremoto de 1687, que para entonces ya estaba habituada al cerramiento de las cubiertas con material pétreo.
Así, en las consultas efectuadas a los principales alarifes de Lima con respecto a las reparaciones de la Catedral después del temblor de 1609, Alonso de Arenas refiere *"en lo que se propone si para la seguridad y perpetuidad conviene deshacer y bajar el dicho edificio y cubrirlo de madera, a esto no se responde porque no es justo se ponga en plática cosa tan fuera de razón y camino que no se puede presumir haya persona que en esto toque"*[19]. Por su parte, Pedro Blasco alegaba que *"en lo que toca a si es cosa conveniente cubrir la dicha iglesia de madera respondo que no soy del parecer por muchos respetos e inconvenientes y el primero es que para enmaderar la dicha iglesia se ha de perder todo lo en ella fabricado... y se han de bajar los pilares hasta los tercios bajos para que la armadura de la dicha madera no suba más de lo necesario habiendo de ser de cinco paños de más de que habiendo de cargar la madera sobre pilares y arcos de ladrillo si por falta de estribos los derriba el temblor también ha de caer la madera y si por estar bien estribados los dichos arcos se también se han de tener las bóvedas y sin éstos hay otros inconvenientes en la madera bien ordinarios que son incendios corrupciones y carcomas pues en menos de cincuenta o sesenta años crían carcomas que la va comiendo y ella misma se corrompe y acaba..."*[20]. Estas declaraciones nos dan una idea de que hasta comienzos el siglo XVII se creía más conveniente desde el punto de vista estructural y ornamental realizar las bóvedas en piedra o ladrillo.
La constatación de los efectos negativos que producían los sismos en las bóvedas de fábrica impulsó la realización de la primera experiencia, en la iglesia de Santo Domingo de Lima, de colocar una cubierta a base de bóvedas encamonadas (figura 10). De esta forma Maroto realiza en 1666 una armadura de madera curva con el tejido de una membrana de caña y recubierto de tierra, pero sujeta de una viga horizontal apoyada en los muros de adobe del templo. Esta estructura aparece un año antes de la propuesta de Lemer en Córdoba (Argentina) para la cubierta de la iglesia de La Compañía bajo la influencia del sistema constructivo desarrollado por De L'Orme (figura 11).
Habrá que esperar hasta 1675, durante la reconstrucción de la iglesia de San Francisco, cuando Manuel de Escobar y el arquitecto portugués Constantino de Vasconcellos[21], perfeccionan el sistema de Maroto de modo que las bóvedas sean autoportantes, incorporando el murete de adobe de contrarresto de empujes y uniones flexibles, logrando además definir la cúpula sobre el crucero con el mismo criterio (figura 12). A partir de este momento, esta técnica constructiva se

Figura 12. Intradós de la iglesia San Francisco de Lima (HURTADO VALDEZ, 2005).

generalizará en todo el Virreinato del Perú hasta convertirse en norma obligatoria luego del terremoto de 1746[22].

Cuando el Cabildo Eclesiástico le pide a Fray Diego Maroto su parecer respecto a la reconstrucción de las bóvedas de la Catedral, después del terremoto de 1687, 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..."[23]. Por tanto en estas tierras primó más la variable seguridad que la económica para el uso de las bóvedas y cúpulas encamonadas.



1. VIGA MADRE.
2. ESPIGA DE PIE DERECHO PASANTE POR ZAPATA Y SOLERA CON TOPE LATERAL PARA VIGA.
3. SOLERA UNIDA A ZAPATA CON CUERDAS DE CUERO.
4. ZAPATA DE PIE DERECHO.
5. PIE DERECHO.
6. ESTRIBO.
7. JABALCON.
8. TABLAS QUE FORMAN EL ARCO TRILOBULADO.
9. CERCHAS ENCAMONADAS.
10. PANEL DE CERRAMIENTO DE TELAR DE MADER, CAÑA Y BARRO (QUINCHA).
11. GATILLO DE UNIÓN DE PIES DERECHOS EN COLA DE MILANO.
12. MURO DE ADOBE.
13. TABLA DE CERRAMIENTO HORIZONTAL.
14. MOLDURA DE MADERA.
15. TIENTOS O CUERDAS DE CUERO AMARRADAS Y CLAVADAS.
16. VIGA SECUNDARIA.
17. ESPIGA DE PIE DERECHO EN BASE.
18. BASE DE PIEDRA.
19. TOPE DE LADRILLO.
20. TRABAZON DE UNIÓN ENTRE PIE DERECHO Y VIGA PRINCIPAL.

Figura 13. Detalle constructivo de la bóveda de la capilla Nuestra Señora de Loreto de Lima (HURTADO VALDEZ, 2006).

Tipología constructiva de las bóvedas encamonadas

Básicamente las categorías constructivas de estas bóvedas y cúpulas dependen de su carácter estructural. La primera corresponde al sistema suspendido, donde el intradós de la nave está formado por arcos sujetos a una armadura superior, mayormente vigas horizontales. Por lo general estos arcos no colaboran en la descarga del peso de la estructura y es utilizado 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

Figura 14. Detalle de la maqueta de la bóveda encamonada de la capilla de la Virgen de Loreto (HURTADO VALDEZ, 2005).

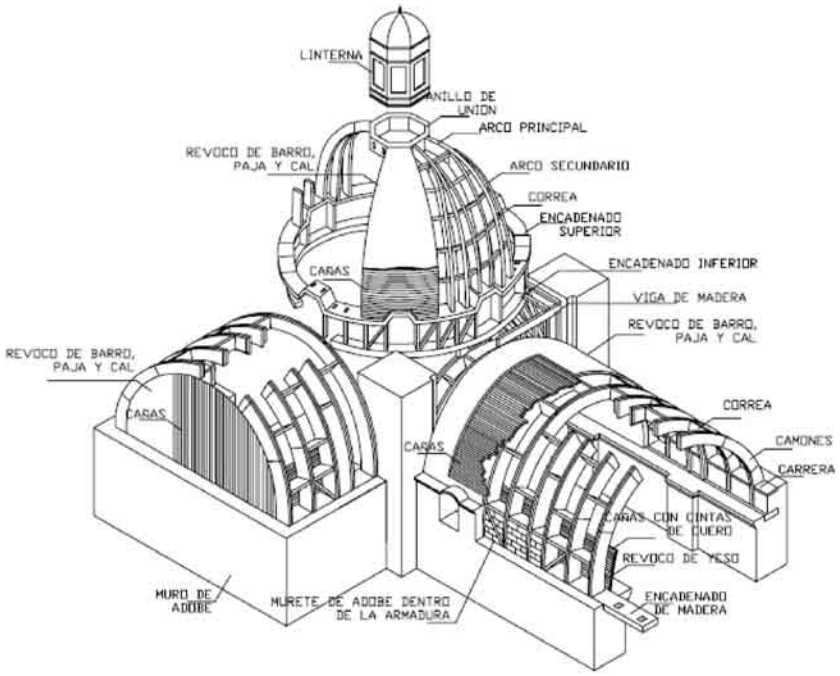


Figura 15. Detalle constructivo de la bóveda y cúpula de la iglesia de La Compañía de Pisco (HURTADO VALDEZ, 2006).

derechos laterales (figuras 13 y 14).

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 sólamente interesa definir un espacio interior sino también mostrar la volumetría exterior que adquiere la edificación, por lo que se evidencia externamente la curvatura del extradós. Aquí se generan empujes laterales que serán recibidos por los estribos y los semi diafragmas verticales de adobe incluidos en la armadura, antes de transmitir dichos esfuerzos a los muros (figura 15).

Elementos del conjunto y técnicas de ensamblaje

En general, la armadura, tanto para las bóvedas como para las cúpulas, estaba formada por los siguientes elementos:

a) Elementos de confinación al muro

Encadenado: Eran piezas que recorrían horizontalmente todo el perímetro de la armadura y marcaban el inicio de ella, estando empotrados en el muro, generalmente de adobe. Debían de servir a la nivelación del muro que era dejado en "alberca" por el maestro albañil para el inicio del trabajo del maestro carpintero. Se trataba de otorgar una superficie horizontal apta para el apoyo de los arcos, sujeta a tolerancias más estrictas que la terminación de los muros. 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.

b) 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 la forma del arco que se necesitaba (figura 16). A veces también se aplicaban cintas de cuero de vaca u oveja de un dedo de ancho, las cuales se colocaban húmedas, y al secar producían una mayor presión por retracción del material, pero formaban una unión flexible que aumentaba la ductilidad de la estructura. 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

Figura 16. Bóveda y cúpula encamonada de la iglesia La Compañía de Pisco (HURTADO VALDEZ, 2004).

necesidades.
Estas grandes piezas de conjunto se realizaban siguiendo el trazo a escala natural de la sección 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 encadenado por medio de una larga espiga, para evitar los desplazamientos horizontales que podrían ocasionar los empujes de las cerchas. En estas armaduras se ha observado que 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[24] (figura 17).
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. Posibilitaban además la disminución de las distancias entre los puntos de apoyo de las cañas, lo cual beneficiaba en su colocación, de manera que el peso del recubrimiento de tierra no las hacía ceder.
Riostras: Eran piezas de madera colocadas en forma horizontal y alternada entre las cerchas para unirlas en todo su recorrido, estando separadas por una distancia variable, que oscilaba entre los 60 y 120 cm. Su función era transmitir y redistribuir sobre ellas las cargas de las cubiertas, además de mantener la separación de los arcos y evitar en la fase constructiva el volteo de ellos.
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 conseguir 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 robustas, mediante el uso de ensambles a cola de milano. Las cerchas principales se fijaban al encadenado y al anillo central, mediante ranuras que se abrían en éstos últimos.

c) Elementos de cierre

Tejido de caña: Formada por cañas[25] unidas entre sí con cintas de cuero y conectadas a las cerchas por clavos colocados en dichas cintas. 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

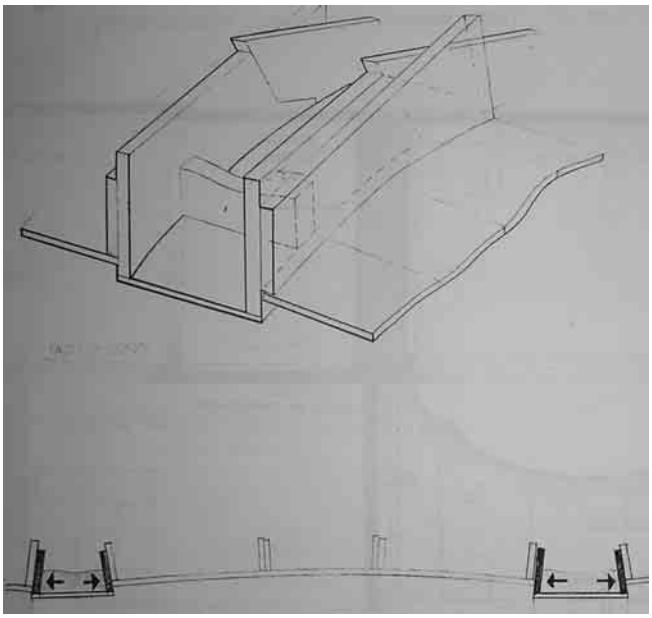


Figura 17. Detalle de la unión de los camones y contracamones, así como las trabas entre ellas en la capilla de la Virgen de Loreto (HURTADO VALDEZ, 2005).

excesiva retracción por secado. La colocación del recubrimiento de tierra permitía aislar y proteger del medio ambiente a los diversos componentes de la armadura, ya que mantiene 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 los hongos más de 20% de humedad para vivir. Asimismo, el barro, por sus buenas características de aislamiento térmico y acústico, resultaba ideal para este tipo de espacios, permitiendo también una fácil reparación de las fisuras causadas por los sismos.
Este estrato de tierra era estabilizada mediante la adición de cal, y en algunos casos se cubría con una película de jugo de cactus, con el fin de otorgar mayor impermeabilidad a la cubierta. En el intradós de la bóveda se realizaba un recubrimiento final de yeso, procurando un efecto visual de una bóveda o cúpula realizado con cantería, además de colocarse múltiples tipos de molduras.

Transmisión de cargas y empujes

Las cerchas de las bóvedas eran realizadas con madera, con incorporación de un cerramiento de tejido de cañas y revoco de tierra, por lo que otorgaban menores empujes a los muros en comparación a las originales de fábrica, ya que el empuje varía con el peso en modo proporcional[26]. Este empuje, además de verse reducido por el material usado, venía verticalizado con el empleo de un relleno de adobe en el cuarto inferior de las bóvedas. Así se conseguía transmitir con más seguridad las cargas dentro del tercio central del muro de adobe, y evitar excentricidades que resultasen riesgosas.
La colocación de riostras transversales a los arcos, a los cuales era fijado 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.
Por otro lado, la consolidación del terreno bajo las fundaciones, que se miden en períodos de decenios, conduce a asientos y cambios geométricos, obligando a la estructura a adaptarse a estas modificaciones. En el caso de una bóveda encamonada, por su flexibilidad era más fácil de realizar este ajuste con menor riesgo a su estabilidad.

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[27], buscando que la geometría de la estructura asegurase la transmisión adecuada de los esfuerzos dentro del material, generalmente trabajando sólo a compresión, sin la admisión de otros tipos de esfuerzos; en consecuencia, era normal la aparición de fisuras. A pesar de que estos signos constituyen la expresión habitual de la estructura de adaptarse a su entorno y estabilizarse en el tiempo, en un medio sísmico adquieren particular importancia, motivada por la forma y rigidez de la construcción y su relación con las propiedades del terreno. Durante un sismo, el edificio vibra bajo su frecuencia natural y si ella es cercana a la del suelo, se producirá una resonancia dinámica y el daño estructural resultante será mayor. Las fisuras de la obra cambiarán su frecuencia natural y aumentarán o disminuirán esta resonancia.
Si bien estas estructuras en tierras sudamericanas eran estáticamente estables, tenían un desempeño dinámico de riesgo, pues los construc-

tores hispanos no las habían preparado para disipar energía sísmica. Los arcos y bóvedas de fábrica se mantienen estables mientras las condiciones geométricas no cambien 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. Cuando la línea de empujes toca el extradós o intradós, se forman rótulas, entrando a trabajar un arco de modo triarticulado, siendo perfectamente estable; además, el desempeño estructural de una bóveda tiene aún más posibilidades de estabilidad.

Ciertamente, el arco catenario resulta más eficiente que el de medio punto, usualmente empleado en el Virreinato del Perú, por coincidir su forma con el recorrido de la línea de empujes. Sin embargo, cualquiera que sea la forma del arco o bóveda, ante un sismo la respuesta dinámica será esencialmente elástica si la estructura ha sufrido sólo un agrietamiento limitado y conserva todavía un carácter casi monolítico. Pero al aumentar la aceleración, a esta fase elástica se superpondrá otra con distinta frecuencia de vibración, donde los bloques de la bóveda chocan entre sí y propician su separación, hasta producir un nuevo desajuste en la geometría inicial, con la consiguiente aparición de un mecanismo de colapso produciendo el fallo de la estructura.

En las construcciones europeas en medios sísmicos, los arcos y bóvedas se ejecutaban con engatillados y grapas entre los bloques o las dovelas de piedra, para mantener en lo posible la forma de la estructura. También se dotaba de un estribo con ancho suficiente no sólo para transmitir los empujes a la cimentación, sino para consolidar la geometría de la edificación, evitando que los muros de abriesen. A pesar de todas estas precauciones, el sistema no garantizaba la estabilidad dinámica de dichas bóvedas.

Frente a las estructuras abovedadas aplicadas en Europa, en el Virreinato del Perú 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. No obstante que en un comienzo el uso de estas bóvedas no era bien vista, principalmente por los incendios[28], se impuso finalmente su utilización a tal punto que el gran maestro de obras Manuel de Escobar referirá en 1688 que "...las cubiertas de la fábrica por ser de madera larga y con clavazón del fierro es más resistente a las mociones del terremoto y en esta forma se conoce la mayor seguridad haciéndose de madera..."[29].

Dado que la fuerza de actuación de un sismo está en proporción al peso de la estructura, la utilización de un material, no sólo ligero sino principalmente realizado con materiales de alta resistencia a la tracción, permitió edificar en altura sin menoscabar la resistencia 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.

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 de quincha, ayudando a arriostrar a los muros de adobe e impidiendo su natural separación durante un sismo, tratando de brindar un efecto diafragma para responder solidariamente al movimiento, 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 el vuelco del muro de fachada, si el momento positivo se hacía grande en la parte central, cuando existía un gran distanciamiento entre contrafuertes o muros laterales.

Aumento de la ductilidad del sistema

En el caso de las bóvedas encamonadas, un gran trabajo dinámico lo realizaba el tejido de caña que actuaba como una armadura interna con amplia posibilidad de resistir tensiones (figura 18). Además el revestimiento de barro con cal no sólo protegía de la intemperie a los diferentes elementos de la estructura sino contribuía 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 durante un sismo[30].

Figura 18. Utilización actual de refuerzo de caña en los muros de adobe para aumentar su ductilidad (HURTADO VALDEZ, 2005).

Así también, 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. De esta forma, durante un temblor los arcos que formaban la bóveda podían moverse libremente también en sentido vertical dentro de la caja realizada, porque la dimensión de la espiga aseguraba que no escapara de su posición. De igual manera, el uso de cintas de cuero para las uniones (figura 19) permitió cierto grado de libertad al movimiento sin que se perdiera la forma geométrica inicial, siendo lo suficientemente flexibles para disipar la energía sísmica sin llegar a colapsar, y cuyas tolerancias de deformación eran ya tomadas en cuenta.

Descenso del centro de gravedad

El centro de gravedad de un sólido es un punto imaginario en el que puede considerase concentrado todo su peso o el punto por el cual pasa la resultante del peso. Siempre se asumió que el relleno de adobe en la parte baja del panel de quincha buscaba el descenso de su centro de gravedad, consideración que también se asumió para el caso de las bóvedas encamonadas, cuando se señalaba que *"el centro de gravedad de un entramado sencillo... se puede estimar que se encuentra situado ligeramente por debajo del punto definido por el cruce de las dos diagonales... pero, como generalmente se procedía a rellenar los espacios de la parte inferior de la armazón, con adobe o ladrillo según la clase de muro sobre el que se apoyaba el esqueleto de madera, resultaba que al situar una masa de mayor peso hacia la parte baja, la altura del centro de gravedad se acercaba a la solera, lo cual aumentaba la estabilidad..."*[31].

Sin embargo, si realizamos una rápida verificación visual de la estructura, observaremos que tanto el panel de quincha como la armadura abovedada no están huecas, sino llenas 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, de igual espesor que la parte superior.

La posición del centro de gravedad de una pared de quincha de altura "h" sin relleno de adobe en la parte inferior se determina con facilidad, ya que podemos asemejarla a un área rectangular de características homogéneas. Cuando un área posee una línea de simetría, el centroide estará obviamente en esa línea, y si hay dos líneas de simetría, el centroide se colocará en la intersección de sus diagonales, por tanto la coordenada en el eje "y" será igual a h/2. En el caso de una bóveda de cañón la coordenada "y" del centro de gravedad se ubica normalmente a 4R / 3p, medido desde la base. Sin embargo, para determinar la posición del centro de gravedad de una pared de quincha o una bóveda encamonada, incluyendo el murete de adobe en el cuarto inferior, debemos realizar un cálculo de los momentos estáticos de las partes con relleno de adobe y con relleno solo de barro y caña[32].

Así, del cálculo efectuado para comprobar la hipótesis del descenso del centro de gravedad se encontró que su nueva posición en "y" es igual a 0,95 (4R / 3p) en el caso de bóvedas, que para efectos constructivos no es significativo[33]. Por tanto, la razón para rellenar estos cuartos

Figura 19. Utilización de cintas de cuero en la capilla de La Virgen de Loreto (HURTADO VALDEZ, 1995).

inferiores con adobe están más relacionados con formar una guía que impidiese a la espiga de los camones escapar del encadenado durante los movimientos sísmicos y de asegurar en la etapa de la construcción de la bóveda, cuando se posaba el arco sobre el encadenado, el actuar como peso muerto que ayudara a verticalizar los empujes de las armaduras hasta que se completara la edificación de todo el tramo, ya que las estructuras antiguas no sólo debían estar en equilibrio una vez finalizada su construcción sino en cada etapa de ella. Finalmente, creaba un semi diafragma dentro del plano, impidiendo el desplazamiento de los arcos en el sentido lateral y absorbiendo las vibraciones sísmicas en esta dirección.

❑

BIBLIOGRAFÍA

ARCE GARCÍA, Ignacio. Elementos y sistemas constructivos antisísmicos en la antigüedad. Aplicación a la restauración de estructuras históricas. En *Actas del Primer Congreso Nacional de la Historia de la Construcción, Madrid 19-21 de septiembre de 1996.* Instituto Juan de Herrera, Madrid, 1996, pp. 39-47.

ASKELAND, Donald R. Ciencia e ingeniería de los materiales. Paraninfo, Thomson Learning, Madrid, 2001.

BARRETO ARCE, Alberto. Las construcciones antiguas y los sismos. En *International Seminar: Architecture, Construction and Conservation of Earthen Buildings in Seismic Areas.* Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima, Perú. 2005.

BERNALES BALLESTEROS, Jorge. Lima, la ciudad y sus monumentos. Consejo Superior de Investigaciones Científicas - Escuela de Estudios Hispano Americanos de Sevilla. Sevilla, España. 1972.

BLUNT, Anthony. Philibert de l'Orme (Traduzione all'italiano della edizione originale in inglese del 1958). Electa, Milano, 1997.

BOUDON, Françoise; Jean Blécon. Philibert Delorme et le château royal de Saint-Léger-en-Yvelines. Picard Editeur, Paris, 1985.

CAMPA, María Rita. "Le Nouvelles Inventions 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. Volume 1. Queens' College, Cambridge University 29th march - 2nd april 2006.* Malcom Dunkeld, James Campbell, Hentie Louw, Michael Tutton, Bill Addis, Robert Thorne. Cambridge, Inglaterra. 2006, pp. 525-541.

CANDELAS GUTIERREZ, Angel L. Bóvedas de madera: ¿se puede construir según describen los tratados?. En *Actas del Tercer Congreso Nacional de Historia de la Construcción, Sevilla 26-28 de octubre de 2000, volumen 1.* Instituto Juan de Herrera, Madrid, España. 2000, pp. 193-212.

CONTI, Raffaella. El desarrollo tecnológico de las bóvedas de madera en la experiencia de Lemer. En *Actas del Primer Congreso Nacional de la Historia de la Construcción, Madrid 19-21 de septiembre de 1996.* Instituto Juan de Herrera. Madrid, España. 1996, pp. 147-150.

DE L'ORME, Philibert. Traités d'architecture: Nouvelles Inventions pour bien bastir et á petits fraiz (1561). Premier Tome de l'Architecture (1567). Edición facsimil de Léonce Laget, Libraire-Editeur. Paris, Francia. 1988.

HEYMAN, Jacques. El esqueleto de piedra, mecánica de la arquitectura de fábrica. Instituto Juan de Herrera, Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid, Madrid, España. 1999.

HUERTA, Santiago. Arcos, bóvedas y cúpulas. Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica. Instituto Juan de Herrera, Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid, Madrid, España. 2004.

HURTADO VALDEZ, Pedro. La restauración de edificios en tierra en zonas sísmicas. En *Atti del Convengo "Costruire con terra cruda oggi".* Novi Ligure 2005. Edicomedizione. Italia. 2006 (en prensa).

HURTADO VALDEZ, Pedro. Entre torres y balcones: La imagen urbana de Lima virreinal. En *Patrimonio Iberoamericano II.* Asociación Española de Gestores del Patrimonio Cultural. Madrid, España. 2005.

HURTADO VALDEZ, Pedro. La iglesia y el colegio de la Compañía de Jesús en el puerto de Pisco - Perú. Universidad de Alcalá. Alcalá de Henares, España. 2004.

HURTADO VALDEZ, Pedro; PALIZA FLORES, Violeta; ROELEVELD OROZCO, Bernardo; ZÚÑIGA CASTRO, María. Análisis del comportamiento estructural de la bóveda de la capilla de Nuestra Señora de Loreto. Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Arquitectura Urbanismo y

Artes, Sección de Postgrado y Segunda Especialidad. Lima, Perú. 1995.
KUROIWA, Julio. Reducción de desastres. Viviendo en armonía con la naturaleza. Julio Kuroiwa. Lima, Perú. 2002.
LANER, Franco. Mettere in forza, la chiesa della Compagnia di Gesú a Cordoba. En *Adrastea N°18.* Habitat legno s.p.a. Edolo, Italia. 2001.
LOPEZ DE ARENAS, D. Breve compendio de la carpintería de lo blanco y tratado de alarifes (edición facsímil de la primera edición de Sevilla de 1633 de Luis Espinan). Albatros. Valencia, España. 1982.
MARUSSI CASTELLAN, Ferruccio. La quincha en las edificaciones monumentales del Virreinato del Perú. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Arquitectura. Madrid, España. 1981.
MINKE, Gernot. Manual de construcción en tierra. Nordan Comunidad. Montevideo, Uruguay. 2001.
NUERE MATAUCO, Enrique. La carpintería de armar española. Editorial Munilla - Lería, Madrid, España. 2000.
NUERE MATAUCO, Enrique. La carpintería de lo blanco, lectura dibujada del manuscrito de Fray Andrés de San Miguel. Colegio Oficial de Arquitectos de Andalucía Oriental, Málaga, 1990.
NUERE MATAUCO, Enrique. La carpintería de lo blanco, lectura dibujada del primer manuscrito de López de Arenas. Ministerio de Cultura, Madrid, 1985.
PARKER, Harry S. Mecánica y resistencia de materiales. Editorial Limusa S.A., México D.F., 2000.
RODRIGUEZ CAMILLONI, Humberto. Quincha architecture: the development of an antiseismic structural system in seventeenth century Lima. En *Proceedings of the Firts International Congress on Construction History. Madrid, 20 - 24 January 2003.* Instituto Juan de Herrera. Madrid, España. 2003. pp. 1.741- 1.752.
SAN CRISTOBAL, Antonio. La catedral de Lima: Estudios y documentos. Museo de Arte Religioso de la Catedral de Lima. Lima, Perú. 1996.
SAN CRISTÓBAL, Antonio. Fray Diego Maroto, alarife de Lima, 1617- 1696. Epígrafe S.A. Lima, Perú. 1996.
SAN NICOLAS, Fray Laurencio de. Arte y Uso de Arquitectura. Madrid (S.i. 1639 y 1664), Segunda Parte. Edición facsimil de Albatros Ediciones. Madrid, España. 1989.
SERLIO, Sebastiano. 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 (edición facsímil de la edición de Venecia de 1600), segunda parte. Colegio de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Asturias. Oviedo, España. 1986.
SCHILDER DIAZ, César Cristian. La herencia española: las bóvedas y cúpulas de quincha en el Perú. En Actas del Tercer Congreso Nacional de Historia de la Construcción, Sevilla, 26-28 de octubre de 2000, volumen II. Instituto Juan de Herrera, Madrid, 2000, pp. 1.019-1.026.
TIMOSHENKO, Stephen P. Mecánica de materiales. Unión Tipográfica Editorial Hispano Americana S.A. de C.V. Mexico, 1979.
TOAJAS ROGER, María Angeles. Diego López de Arenas, breve compendio de la carpintería de lo blanco y tratado de alarifes. Visor Libros S.L., Madrid, 1997.
VILLANUEVA DOMINGUEZ, Luis de. Bóvedas de madera. En *Actas del Cuarto Congreso Nacional de Historia de la Construcción, Cádiz 2 7-29 de enero de 2005, volumen II.* Instituto Juan de Herrera, Madrid, España. 2005. pp. 1.103-1.113.

NOTAS

1. Por ejemplo se ha planteado que el cambio de las bóvedas vaídas por las de crucería de la Catedral de Lima se realizaron principalmente por los gustos estilísticos. Cfr. SAN CRISTÓBAL, Antonio. La catedral de Lima: Estudios y documentos. Museo de Arte Religioso de la Catedral de Lima. Lima, Perú. 1996.

2. Generalmente se reduce todo el desempeño estructural de las bóvedas encamonadas a la disminución de peso y a un hipotético descenso del centro de gravedad de estas estructuras por la sola utilización de un relleno de adobe en su cuarto o quinto inferior. Cfr. MARUSSI CASTELLAN, Ferruccio. La quincha en las edificaciones monumentales del Virreinato del Perú. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Arquitectura. Madrid, España. 1981. Cfr. SCHILDER DIAZ, César Cristian. La herencia española: las bóvedas y cúpulas de quincha en el Perú. En Actas del Tercer Congreso Nacional de Historia de la Construcción, Sevilla 26-28 de octubre de 2000, volumen II. Instituto Juan de Herrera, Madrid, 2000, páginas 1019-1 026.

3. El hundimiento de las bóvedas de cañón realizadas con ladrillo en la iglesia de Pacasmayo y con piedra en la catedral de Cuzco produjeron el 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, reconstruidas luego en sistema encamonado.

4. En realidad el tratado de San Miguel sólo hace referencia a la traza geométrica de una cúpula encamonada sin mencionar las características de su construcción. Cfr. NUERE MATAUCO, Enrique. La carpintería de lo blanco, lectura dibujada del manuscrito de Fray Andrés de San Miguel. Colegio Oficial de Arquitectos de Andalucía Oriental, Málaga, 1990, folio 88.

5. Los principales volumenes encontrados fueron "Arquitectura" de Pietro Catáneo, edición en italiano publicado en 1554; "Tercer y cuarto libros de Arquitectura de Sebastiano Serlio", edición traducida por Villalpando en Toledo en 1565; "Perspectiva y Espectacularidad" de Euclides, editada en castellano por Pedro Ambrosio de Onderiz en Madrid en 1585; "Breve Compendio de Carpintería de lo Blanco y Tratado de Alarifes con la conclusión de la Regla de D. Incola Tartaglia y otras cosas tocantes a la carpintería de compás" de Diego López de Arenas de 1633. "Breve tratado de bóvedas regulares e irregulares" de Juan de Torrija, editado en 1661; "Arquitecto Perfecto" en dos volumenes de Sebastián Fernández de Medrano, fundador de la Academia Militar de Bruselas, editada en el último tercio del siglo XVIII; "Tratado Nuevo de las Cosas Maravillosas de Roma"; "Arquitectura Militar" de Matías Dogac en latín; "Fortificaciones de Plazas" y "Elementos Militares" de Diego Enriquez de Villegas. MARUSSI CASTELLAN. Op.cit, p. 122.

6. LOPEZ DE ARENAS, D. Breve compendio de la carpintería de lo blanco y tratado de alarifes (edición facsímil de la primera edición de Sevilla de 1633 de Luis Espinan). Albatros, Valencia, 1982, folio 32v.

7. TOAJAS ROGER, María Angeles. Diego López de Arenas, breve compendio de la carpintería de lo blanco y tratado de alarifes. Visor Libros S.L., Madrid, 1997, p. 197.

8. En el ambiente de la carpintería de lo blanco 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 definida por la torsión de los maderos para producir la curvatura sin perder el paralelismo de las caras verticales de las piezas. Este trabajo era conocido como "campaneo".

9. SERLIO, Sebastiano. Tutte l'opere d'architettura, et prrospetiva, 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 (edición facsímil de la edición de Venecia de 1600), segunda parte. Colegio de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Asturias. Oviedo, España. 1986, libro VII, cap. LXXIIII, folio 199.

10. DE L'ORME, Philibert. Traités d'architecture: Nouvelies Inventions pour bien bastir et á petits fraiz (1561). Premier Tome de l'Architecture (1567). Edición facsimil de Léonce Laget, Libraire-Editeur. Paris, Francia. 1988, folios 8v, 9, 10 y 10v.

11. LANER, Franco. Mettere in forza, la chiesa della Compagnia di Gesú a Cordoba. En Adrastea N°18. Habitat legno s.p.a. Edolo, Italia. 2001, p. 14.

12. "To demonstrate that de l'Orme's treatise had no inmediate success, it must be said that Vicenio Scamozzi in his L'idea dell'architettura universale doesn't mention it, even though he writes at lengthh about Italian and foreign architecture of the time. Scamozzi's work was the result of his log 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 ¡nterest in the gothic when illustious people, Duch as Jean Baptiste Rondelet and Armand Rose Emy, referred to itin their works". CAMPA, María Rita. "Le Nouvelles Inventions 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. Vo/ume 1. Queens' Col/e ge, Cambridge University 29th march - 2nd april 2006.* Malcom Dunkeld, James Campbell, Hentie Louw, Michael Tutton, Bill Addis, Robert Thorne. Cambridge, Inglaterra. 2006, pp. 525-541, p. 531.

13. SAN NICOLAS, Fray Laurencio de. Arte y uso de architectura (edición facsímil de la edición de Madrid de 1639 y 1664). Albatros Ediciones, Madrid, 1989, Primera Parte, Capítulo LII, folios 92 y 92v.

14. Ibidem. Segunda Parte, folio 189.

15. Se llega a decir que San Nicolás ". . . describe minuciosamente con ayuda de una lámina primorosamente dibujada la construcción de una cúpula encamonada" VILLANUEVA DOMINGUEZ, Luis de. Bóvedas de madera. En Actas del Cuarto Congreso Nacional de Historia de la Construcción, Cádiz 27-29 de enero de 2005, volumen II. Instituto Juan de Herrera, Madrid, España. 2005, pp. 1103-1113, p. 1104.

16. *"Dans les années 1550-1555, sans qu'on pu/sse préciser les dates, Delorme invente le systéme de charpente á petits bois. La résistance des poutres constituées d'ais assemblées par cheville est officiellement testée devant le roi. En 1555, l'invention, aux dires de l'architecte, est mise en oeuvre au château de Limours pour couvrir ¡'a/lle d'accés... Celle-ci pourrait donc étre une de ces charpentes d'assemblage ¿ arbalétriers courbes reliés par des liernes".* BOUDON, Françoise; Jean Blécon. Philibert Delorme et le château royal de SaintLéger-en-Yvelines. Picard Éditeur, Paris, 1985, p. 53.

17. *"Un incendio distrusse nel 1559 II convento de Montmartre, e poco prima della sua morte Enrico II promise al/e suore di soccorrerle nell'opera di ricostruzione, concedendo loro l'uso dei materiali giá imp/e gati per una Salle de Triomphe effimera reaiizzata al/e Tournelles. In previsione di ció de l'Orme progettó un'immensa rotonda di 180 piedi di diametro... e coperto da un'alta cupo/a lignea dalia struttura caratteristicamenfe ingegnosa, sormontata da una larga lanterna...".* BLUNT, Anthony. Philibert de l'Orme (Traducción al italiano de la edición original de inglés de 1958). Electa, Milano, 1997, p. 99

18. SAN NICOLAS, Fray Laurencio de. Op.cit, Segunda Parte, Capítulo LI, folio 189.

19. SAN CRISTÓBAL SEBASTIAN, Antonio. Op.cit, p. 51.

20. Ibidem, p. 54.

21. Constanino de Vasconcelos falleció en 1668, dos años después que Maroto introdujera el sistema de bóvedas encamonadas y aunque al principio era partidario de cubrir el templo con bóvedas de ladrillo es de suponer que finalmente debió plantear junto a Escobar la estructura de cubierta a base de madera en la iglesia San Francisco.

22. En el dictamen que el cosmógrafo francés Luis Goudin dirigió al Virrey, después del terremoto de 1746 en Lima, refería que era *"evidente que el País no permite edificio elevado ni construcción pesadas y las paredes sean de piedras, o de ladrillos, o de adobes, cuando todas ellas piden que en su naturaleza un cierto grueso... así mismo de madera para la bóveda que según se acostumbra se hará de quincha.* BERNALES BALLESTEROS, Jorge. Lima, la ciudad y sus monumentos. Consejo Superior de Investigaciones Científicas - Escuela de Estudios Hispano Americanos de Sevilla. Sevilla, España. 1972, p. 305.

23. SAN CRISTÓBAL SEBASTIAN, Antonio. Op.cit, p. 98.

24. Corresponden a las bóvedas a las cuales se tuvo acceso directo, concernientes a las cubiertas de la Catedral de Lima, la capilla de la Virgen de Loreto en la Casona de San Marcos de Lima y la iglesia jesuita de Pisco.

25. 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.

26. El espesor de una bóveda de fábrica era muy parecido al realizado en madera, caña y tierra. Sin embargo 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.

27 Los tres criterios estructurales fundamentales son resistencia, rigidez y estabilidad. Sin embargo para un maestro constructor antiguo los conceptos de resistencia y rigidez eran secundarios al momento de proyectar una edificación. Es un hecho que las tensiones medias de una estructura normal de fábrica son bajas y las deformaciones generalmente despreciables, por lo que la clave para entender estas estructuras ha de buscarse en una correcta comprensión de su geometría. Cfr. HEYMAN (1995).

26 En las reparaciones de la catedral de Lima a inicios del siglo XVII Juan del Corral dirá: *"siendo de carpintería tiene muchos riesgos de fuego y durar poco las maderas y esto digo por experiencia que tengo de España de haber desbaratado y visto desbaratar algunas iglesias y conventos en España...".* SAN CRISTOBAL SEBASTIAN, Antonio. Op. cit, p. 56.

29. Ibidem, p. 102.

30 En los ensayos realizados por la Universidad Nacional de Ingeniería sobre casas modulares de quincha se observó que cuando al recubrimiento de barro y paja se incorporaba un delgado estrato de arena, cemento y yeso incrustándose en las fisuras del revoque de tierra formaban un elemento monolítico. El recubrimiento general que producía controlaba la curva esfuerzo deformación horizontal del conjunto, resistiendo su propio peso en dirección horizontal, es decir, sin colapsar. KUROIWA (2002), p. 141.

31. MARUSSI CASTELLAN (1981), p. 111.

32. El momento estático de un área plana 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. Este es el principio por medio del cual se determina la posición del centroide de una figura compleja.

33. Para el cálculo se han considerado un peso específico de los adobes de 1,400 Kg/m3 y de la quincha conservadoramente de 900 Kg/m3. Los resultados arrojaron un descenso del centro de gravedad para paneles verticales del 7% de su posición sin que tuviera el relleno de adobes en la parte baja y un 5% para superficies curvas, que dentro de la estructura general no es relevante para mejorar su comportamiento sísmico. Lógicamente el descenso será aún menor si se considera el mayor valor del peso específico de la quincha de 1,200 Kg/m3. ❑