

CRITERIOS DE SISMORRESISTENCIA Y CÁLCULO TRADICIONAL DE ESTRUCTURAS EN LA ARQUITECTURA PERUANA DEL SIGLO XVII

CRITERIA OF SEISMIC RESISTENT AND TRADITIONAL CALCULATION OF STRUCTURES IN THE PERUVIAN ARCHITECTURE OF CENTURY XVII

Pedro HURTADO Valdez¹

Resumen

La existencia de monumentos que han sobrevivido a las acciones de los sismos en ellos demuestra que los constructores antiguos no eran ajenos a consideraciones de sismorresistencia para mantener la estabilidad de sus edificaciones. El hecho de que el cálculo de aquel entonces se basase en reglas empíricas de proporciones, obtenidas por la experiencia, no ilegítima su validez. Se debe tener presente la lógica constructiva de aquel entonces, según la cual la variable de equilibrio era la que condicionaba los parámetros del diseño, a diferencia del cálculo científico actual según la cual son las consideraciones de resistencia y rigidez las que condicionan preferentemente el diseño estructural. Si bien desde inicios de la colonización hispana de Perú se emplearon las técnicas tradicionales españolas de construcción, fue durante el siglo XVII cuando se alcanzó un notable avance en el desarrollo de un cálculo tradicional de los elementos constructivos, fruto de la necesidad de contar con edificios que fueran lo suficientemente seguros para soportar los terremotos.

Abstract

The existence of monuments that have survived earthquake actions on them shows that the ancient builders were not unconnected with the issues of earthquake resistance to maintain the stability of their buildings. The fact that the calculation of the time were based on empirical rules of proportion, obtained by experience, not illegitimate its value. It should be noted the constructive logic of the time, according to which the balance was the variable which conditioned the design parameters, unlike the current scientific calculation, whereby are the strength and stiffness the main considerations that influence the structural design. Although since the beginning of Hispanic colonization of Peru it was used the traditional Spanish building techniques, it was during the seventeenth century when it reached a notable advance in the development of a traditional calculation of the structural components, result of needing for more secure buildings to withstand the earthquakes.

Palabras clave:

Terremotos y resistencia sísmica; resistencia sísmica de estructuras; resistencia sísmica de edificios antiguos.

Key words

Earth quakes and seismic resistance, seismic resistant structures, ancient seismic resistant buildings.

¹ Arquitecto (Universidad Ricardo Palma, Perú). Doctor en arquitectura con mención en mecánica de las estructuras antiguas (Universidad Politécnica de Madrid, España). Máster en restauración y gestión del patrimonio (Universidad de Alcalá, España). Especialización en restauración de monumentos (Universidad La Sapienza de Roma, Italia). Maestría en restauración de monumentos (Universidad Nacional de Ingeniería, Perú).

1. Introducción

A nivel geológico la región costera de Perú está definida por las placas Sudamericana y de Nazca, las cuales comparten un límite convergente de subducción. Este fenómeno ocasiona el deslizamiento de la placa de Nazca bajo la Sudamericana cerca de 9 cm al año aproximadamente (KUROIWA 2002). En el área de contacto entre ambas placas las masas pétreas se comprimen, distorsionándose y acumulando energía. Al superar el límite de resistencia de la roca se produce una brusca ruptura, con el consiguiente desplazamiento y liberación de la energía acumulada en forma de ondas sísmicas. En la zona de subducción se originan los mayores sismos superficiales de interplaca en el mar, mientras que en la costa la inclinación y descenso de la placa de Nazca se hace mayor, ocurriendo los mayores sismos dentro de aquella a profundidades intermedias de 50-70 Km. Este movimiento geológico ha originado a lo largo de la historia peruana terremotos de grandes magnitudes e intensidades superiores a VII en la escala de Mercalli Modificada, con elevadas pérdidas materiales y humanas (ARDITI s.f.; GARCÍA, 1997).² Obviamente la característica tectónica de la costa peruana ha condicionado desde la antigüedad la búsqueda de sistemas constructivos que prometiesen cierta seguridad. La experiencia impulsó a los constructores no sólo a plantear nuevas técnicas sino también a su permanente evolución con vista a mejorar su eficiencia sismorresistente. Por ejemplo construcciones de época prehispánica, como Puruchuco o Pachacamac, muestran muros con grandes espesores que generan poca esbeltez y les otorgan una mayor estabilidad fuera del plano, debido a que podían oponer a los sismos la gran masa de su construcción. Además presentan una marcada

continuidad longitudinal y con múltiples encuentros en sentido perpendicular entre muros para arriostrarse mutuamente (Fig. 1).

Se tienen evidencias que en algunos casos se llegó a incluir refuerzos de fibra vegetal en tramos regulares, colocados verticalmente y horizontalmente dentro de la masa muraria, permitiendo absorber tensiones que la tierra sola no podía hacerlo (HURTADO 2009a).³ De esta manera se puede decir que el conjunto de soluciones adoptado en aquellas épocas permitieron tener fábricas armadas. En general la disposición de estratos horizontales y verticales elásticos reduce la frecuencia de la vibración al absorber gran parte de la energía liberada por el sismo, lo que supone, la reducción de los efectos provocados por las fuerzas horizontales al haberse ampliado la ductilidad de los muros.⁴

Cuando se trataba de construcciones piramidales, éstas se levantaban con gruesos muros de contención realizados con adobes en aparejos dispuestos en ambos sentidos para garantizar un mejor trabajo y en ciertas ocasiones se incluían ramas de árboles. En Caral los rellenos de piedra y barro dentro de los muros de contención se sujetaron con mallas elaboradas con fibras vegetales (IWAKI et al. 2012). Además la forma simple y compacta de estos edificios definía una estructura prístina, con los centros de rigidez y de masas cercanos entre sí, consecuentemente se evitaba crear grandes excentricidades que pudiesen causar daños en las zonas más alejadas del edificio.

Las edificaciones domésticas, por su parte, solían levantarse con materiales ligeros a base de sencillos entramados de caña o madera rolliza recubiertos con barro (quincha prehispánica) que por su flexibilidad permitían disipar la energía sísmica.

² La escala de Mercalli marca la intensidad o escala de observaciones, como medida de estimación de la vibración a través de sus efectos en las construcciones y en la naturaleza. La intensidad VII indica dificultad de mantenerse de pie, percepción por personas conduciendo vehículos, los muebles altos pueden volcarse y romperse. Agrietamiento de las esquinas y en la parte central de construcciones de adobe, tapial y piedras unidas con barro. Pequeñas fisuras en las esquinas de las construcciones de albañilería con techos ligeros y flexibles. Desprendimiento de revoco de telares de quincha. Deslizamientos de tierras en suelos inclinados.

³ El uso de cañas para armar hiladas parece ser un procedimiento antiguo, por ejemplo en Babilonia durante la dinastía kassita (S. XIII a.C.), cada siete hiladas se disponía un estrato de hoja de palma (ARCE 1996, p. 40). En la arquitectura griega clásica se colocaban refuerzos metálicos o de madera dentro del muro, dispuestos en forma vertical y horizontal (FOULIATOS 1993, p. 37). Similarmente en las construcciones de la región Himalaya las viviendas estaban normalmente reforzadas con elementos de madera dentro de los muros (LANGENBACH 2010).

⁴ La inclusión de estos elementos de refuerzo en los muros de tierra y su comportamiento sismorresistente ha originado una literatura muy extensa. Entre otros estudios citamos los experimentos efectuados por Blondet en la Universidad Católica del Perú (BLONDET et al. 2003). Igualmente la pruebas de Kuroiwa en la Universidad Nacional de Ingeniería del Perú (KUROIWA 2002, pp. 128-138). Los ensayos efectuados por Minke en la Universidad de Kassel, Alemania (MINKE 2001, pp. 161-169).



Figura 1: a) Muros ortogonales arriostrados perpendicularmente entre ellos en Puruchuco. b) Muros de grandes espesores y poca altura en Pachacamac. c) Fibras vegetales dentro de los muros de Caral.

2. Consideraciones de sismorresistencia en la arquitectura virreinal del siglo XVII

Con la colonización hispana de Perú se comienzan a emplear nuevas técnicas constructivas, propias de la península Ibérica. Prontamente los españoles observaron que dichas técnicas no estaban suficientemente preparadas para soportar fenómenos sísmicos tan frecuentes.⁵ Frente a los persistentes daños ocasionados por los terremotos en sus edificaciones los constructores se vieron en la necesidad de adaptar la original arquitectura española a las características sísmicas del nuevo territorio, aunque con iniciales dificultades constructivas que se fueron solucionando a través de un largo y continuo proceso de ensayo y error, a lo que se asociaron los debates sobre sismorresistencia que organizó la autoridad virreinal entre los principales alarifes de la región después de cada terremoto.

2.1 Cambio de las proporciones de los muros.

Si bien en aquel tiempo los constructores no tenían la definición moderna de conceptos como tensión, línea de empujes, elasticidad, etc. si poseían una intuición que les llevó a acercarse aunque a nivel empírico a la naturaleza de las soluciones a adoptarse en las construcciones frente a los sismos. A diferencia de los análisis estructurales modernos donde se da importancia a las variables de resistencia y rigidez del diseño, en las estructuras antiguas primaba la consideración de estabilidad. Evidentemente para un constructor antiguo las necesidades

de resistencia y rigidez no eran decisivas al momento de plantear una estructura, porque las tensiones a las que tenían que hacer frente los muros de fábrica eran perfectamente admisibles en relación con la capacidad portante de ellas (HEYMANN 1999; HUERTA 2004).

Sin embargo es natural que en una fábrica aparezcan fisuras, ya que la estructura se mueve adaptándose a las situaciones del entorno, como pueden ser asentamientos del terreno, cambios térmicos, variaciones del contenido de humedad del aire, etc. A pesar que las dimensiones de los muros puedan estar de acuerdo con las proporciones geométricas para sistemas arriostrados, sus características constructivas resultan insuficientes en una zona sísmica, porque las fisuras originan independencia de los muros. Durante un terremoto los elementos insuficientemente conectados actúan como arietes, con características dinámicas propias y distinta frecuencia de vibración. Además se generan fuerzas de inercia de sentido horizontal contrario al movimiento del suelo provocando esfuerzos por flexión, momento y cortante, que actúan simultáneamente en cada uno de los muros.

En consecuencia una de las primeras acciones formuladas para reducir el efecto de los sismos en los muros fue replantear sus proporciones, incrementándose su espesor con el fin de conseguir mayor rigidez. Sin embargo este aumento de espesor significaba también el incremento de la masa en las partes altas de los edificios, con lo cual crecían las fuerzas de inercia origi-

⁵ En el sur de la península Ibérica existen zonas sísmicamente activas, pero presentan una periodicidad muy espaciada (Martínez 2003). Mientras que los constructores españoles encontraron en el Virreinato del Perú terremotos temporalmente poco espaciados entre ellos y con grandes magnitudes. La magnitud del terremoto de 1746 ha sido calculada en 8,4° en la escala de Richter, con una intensidad de X-XI en la escala modificada de Mercalli (GARCÍA 1997, p. 12). Para estas fechas todavía no se había producido el terremoto de Lisboa de 1755.

nando desprendimiento y colapso de estas zonas, debido principalmente a las elevadas aceleraciones que producen los sismos.

Ante tal situación se optó posteriormente por aminorar la altura de las edificaciones, especialmente en los casos de refacción y consolidación de las construcciones dañadas por anteriores terremotos.⁶ Por ejemplo Fernando de Córdoba y Figueroa sostenía que para evitar daños en las torres de la catedral de Lima se debía bajar la altura de ellas.⁷ Los alarifes confirmaron luego la sustancial importancia que se dio a la estimación de la altura máxima que podían soportar las edificaciones bajo los efectos de los sismos, que en la práctica significaba aminorar la esbeltez de los muros (Fig. 2).



Figura 2: a) Iglesia San Francisco de Lima en 1675, según Pedro Nolasco. Las torres de la iglesia son esbeltas con tres cuerpos y chapitel de coronación. b) Iglesia San Francisco en 1874 con torres proporcionalmente más bajas que en la anterior imagen y cupulines de remate.

2.2 Estribos con mayores dimensiones.

La reflexión de ampliar las dimensiones en muros se dio también para los estribos que soportaban el empuje de arcos y bóvedas. Así Alonso de Arenas al evaluar los daños que el terremoto de 1609 había causado en la catedral de Lima refería que las dimensiones de sus estribos eran insuficientes para

contener los empujes durante un terremoto y como tal debían de crecer sus proporciones.⁸ Es necesario indicar que los antiguos constructores medían el empuje de los arcos por su efecto directo en los muros y no asociaban como se hace actualmente el término empuje al concepto de fuerza. Es decir si un muro necesitaba estribos, entonces la bóveda empujaba, pero si no era necesario colocar estribos entonces la bóveda no empujaba. Esta consideración no invalida el cálculo tradicional por equilibrio que se efectuaba, aunque actualmente se pueda calcular el empuje de un arco basándose en las leyes de la mecánica y de la resistencia de materiales. Prueba de ello se manifiesta en los arcos romanos y en las grandes catedrales

góticas que continúan en pie a pesar del paso del tiempo.⁹ No obstante, los constructores observaron que el aumento de las dimensiones de los estribos producía en ocasiones fallos inmediatos. Esto se explica en que el incremento de la masa y rigidez de la fábrica funcionaba solo frente a movimientos

⁶ Como consecuencia del terremoto de Lisboa de 1755 en España también se recomendó la disminución de la altura de los edificios, principalmente en las zonas directamente afectadas por la catástrofe.

⁷ «... las torres no suban lo que la monte de la planta muestra que se le quite el tercio de su altura...» (AAL. Papeles importantes de la catedral, 1609, leg.6, exp.17).

⁸ «Y supuesto que el daño recibido fue la causa dicha y es sin duda no le tuviere el reparo de esto consiste en darle fortaleza y la podrá tener añadiendo a los estribos hechos seis pies y medio de aumento de pilar en la salida y de ancho nueve por manera que ha de quedar el largo del dicho estribo de quince pies y el grueso de otros tantos e ir formado juntamente con los dichos estribos las puertas para que toda la obra vaya a un tiempo trabada...» (Ibidem).

⁹ La observación de casos ejemplares cuajó en una serie de pautas aplicables a las proporciones de los estribos. Así, los constructores romanos consideraban normal una relación entre el espesor del tambor que soportaba una cúpula de hormigón igual a 1/7 de la luz independientemente del tamaño del domo. Los constructores góticos, por su parte, solían dar a sus estribos alrededor de 1/4 de la luz de la nave central. Durante el Renacimiento y el Barroco los estribos de las bóvedas de medio punto tenían algo más de 1/3 de la luz (HUERTA 2004).



Figura 3: a) Iglesia Santiago Apóstol de Surco. b) Iglesia San Pedro de Carabayllo.

sísmicos de regular intensidad, pero que cuando las fuerzas horizontales excedía la capacidad resistente de la fábrica el daño producido en ella resultaba grande, por fallo en las trabas entre los muros y estribo con riesgo de colapso inmediato. De allí que los estribos se construyeron reduciendo su sección según se ascendía hacia la parte alta de los muros (Fig. 3).

2.3 Preferencia al uso de un solo tipo de bóveda.

Similarmente a los casos anteriores el cálculo tradicional de bóvedas estaba basado en la experiencia, como resultado de observar detenidamente ejemplos levantados o en construcción, ya sea por sus buenos resultados, sus patologías o su ruina. Es decir que cada bóveda fue un experimento en sí mismo y si durante su proceso constructivo y posterior descimbrado mantenía su estabilidad significaba que la prueba había resultado satisfactoria y quedaba como modelo. Del mismo modo cada colapso también proveía una apreciable información de situaciones a evitar.

Se debe recordar que recién en 1675 Hooke experimenta con sus cadenas colgantes en analogía con los arcos, y la teoría del punto de ruptura para arcos se origina en Francia con La Hire en 1712, mientras que la aparición del concepto de línea de empujes se produce a inicios del siglo XIX simultáneamente en Inglaterra (Moseley 1835) y en Francia (Méry 1840). De allí que estos conceptos no eran todavía manejados por los alarifes para la

construcción de arcos y bóvedas, por lo que la aproximación al diseño estructural no era buscar la forma ideal del arco ni en obtener los empujes para calcular el ancho de los estribos, sino en verificar la estabilidad de las bóvedas a partir del desplazamiento que se producía en los apoyos.

Como resultado de que las originales bóvedas de la catedral de Lima fueran en la nave central de arco rebajado y a los lados de perfil aovado, se producía una inclinación de los muros durante los terremotos. Esto se explica en que se tenían dos tipos de empujes diferentes que no se anulaban entre sí, ocasionando un empuje localizado en la parte superior de los muros, el cual se incrementaba durante un evento sísmico. En consecuencia se dispuso que las bóvedas debieran de ser de las mismas características constructivas y de diseño.¹⁰ Igualmente el licenciado Cacho de Santillana se hizo eco de los pareceres de los alarifes para las bóvedas de la catedral de Lima, con recomendaciones del estudio de las técnicas constructivas prehispánicas, indicando que eran estructuras cuyos constructores debían haber hecho ya el análisis correspondiente de los efectos de los sismos en ellas.

Por otra parte las originales bóvedas de arista de la catedral de Lima realizadas en fábrica a raíz del sismo de 1609 quedaron sumamente dañadas, por lo que se optó reconstruirlas mediante el empleo anacrónico de las bóvedas de crucería. El argumento de esta decisión fue que dado que los empujes son concentrados en una bóveda de crucería, entonces bastaría con dotar a los muros de estri-

¹⁰ "Y habiendo visto como tengo visto y entendido antes de ahora el cerramiento que está hecho en la misma Iglesia de las capillas de arista y los arcos aovados digo que están sin fuerza ninguna respecto de no tener estribos suficientes para que puedan hacer fuerza la nave menor en la mayor.." (ACML, Parecer de Diego Guillen).

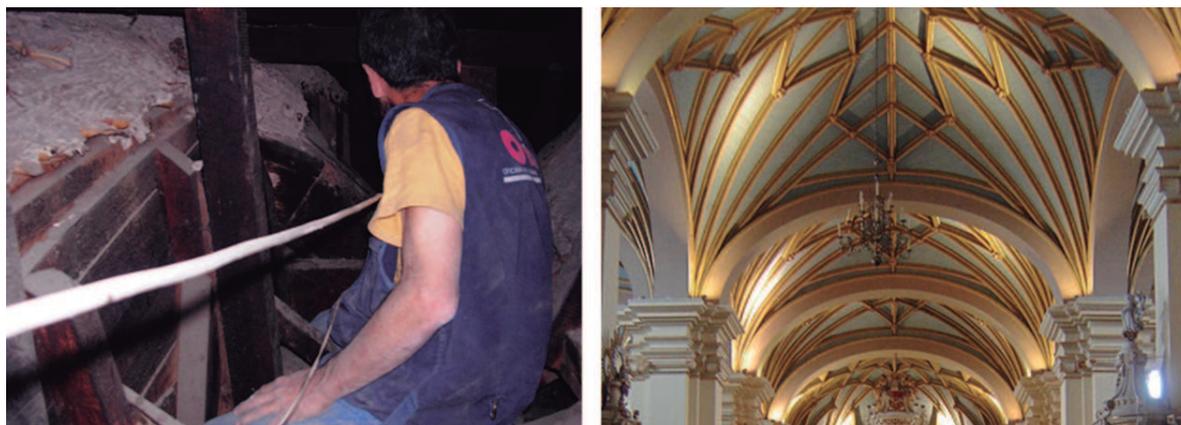


Figura 4: a) Extradós de las bóvedas encamonadas en la Catedral de Lima.
b) Intradós de las bóvedas encamonadas de la Catedral de Lima.

bos localizados en los puntos de empujes, con espesores suficientes para garantizar su estabilidad durante los temblores (HURTADO 2009a).¹¹ Por tanto ser capaces de absorber las fuerzas fuera del plano. Sin embargo estas bóvedas también colapsaron en el terremoto de 1687.

Todos estos análisis motivaron la posterior aparición de las bóvedas encamonadas a mediados del siglo XVII (Fig. 4).

2.4 Atado de los muros de adobe con encadenados de madera.

Como las antiguas directivas de cálculo de fábrica se basaban en leyes geométricas de proporción que aseguraban la transmisión adecuada de los esfuerzos dentro de los límites físicos de la propia estructura los muros trabajaban principalmente a compresión, evitando la aparición de otros tipos de esfuerzos, por lo que era normal la aparición de fisuras.¹² En un medio sísmico adquieren particular importancia debido a que estas fisuras cambian la frecuencia natural de la porción de muro que abordan. De esta forma dentro de la estructura se pueden tener segmentos de muro con frecuencias dispares que durante un sismo vibrarán de modo diferente y pueden llegar a colisionar entre ellos. Consecuentemente en los diseños sismorresistente de

las construcciones históricas se tomaba particular atención a trabar bien los muros utilizando maderos y perpiaños que otorgaban continuidad a la estructura, ya que la ubicación de las fisuras, propia del comportamiento dinámico de los muros, se concentraban normalmente en los encuentros entre ellos y también con los contrafuertes y estribos. Igualmente se observó que la presencia de un atado de madera continuo en la parte alta de los muros de adobe contribuía a impedir no solo la separación de los muros sino a evitar su vuelco, como resultado del efecto de borde libre, ante una fuerza inercial actuando fuera del plano. Se notó además que los muros de fachada de las viviendas con balcones sufrían menos que aquellas que no los tenían. Esto se debía a que la base de madera sobre el que se levantaba el balcón se ataba a los durmientes que recibían las vigas en el otro sentido de los muros y que en conjunto creaban un atado horizontal además de tener el peso adicional del piso superior que fijaba al encadenado. En el caso de las bóvedas de entramado se aprovechaba la base de apoyo de los arcos encamonados como parte de este atado, además de la presencia de nudillos de empostramiento en el muro.

¹¹ Juan Martínez de Arzona menciona «que bajar las naves colaterales y hacerlas de crucería es el mejor remedio que puede haber para asegurar la nave principal... y haber pasado por ellas el temblor grande del año quinientos y ochenta y seis y los que más ha habido sin recibir daño porque son de crucería y en nuestra Santa Iglesia se ha visto lo mal que aprueban las bovedas de arista con los pocos que han pasado por ellas las han dejado tan lastimadas...» (ACML. Libro de fábrica, 1614-1615, 1: f.15r).

¹² Incluso los constructores antiguos proyectaban los edificios considerando las deformaciones que podrían aparecer en el tiempo y como tal deberían las estructuras ser capaces de acomodarse a las nuevas configuraciones (CASSINELLO 2005, p. 10)



Figura 5: a) Extradós de las bóvedas encamonadas en la capilla de la Virgen de Loreto en la Casona de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos. b) Campanario de entramado en la antigua iglesia La Compañía de Pisco. c) Arquería de entramado en la Hacienda San Juan de Surco.

2.5 Mantenimiento de las estructuras después de cada sismo.

Los alarifes recomendaron que las estructuras de la catedral se evaluaran y repararan después de cada terremoto, para evitar que en el siguiente los daños fueran acumulativos. Asimismo se recomendó el mantenimiento continuo de los recubrimientos de tierra y yeso que servían de aislamiento y protección de muros y bóvedas, con la finalidad de mantener constante el equilibrio de humedad de los elementos constructivos con los que estaban hechos. Así se reprimía la proliferación de hongos e insectos en las piezas de madera, impidiendo la pérdida de las propiedades mecánicas de aquellos elementos que conferían ductilidad a la estructura.¹³

2.6 Nuevos sistemas constructivos de mayor ligereza y ductilidad.

El verdadero avance de la construcción sismorresistente procedió del convencimiento en los alarifes que era mejor encontrar soluciones que absorbiesen deformaciones que continuar oponiendo resis-

encia a los sismos. Esto último se confirma con la carta que le Arzobispo de Lima escribió al Rey con motivo de la evaluación de los daños del terremoto de 1678.¹⁴

Fruto de esta visión fue la introducción de los entramados de tierra y bóvedas encamonadas, con lo cual se lograba reducir el peso de las partes altas de los edificios, así como en los campanarios y bóvedas de las iglesias (Fig. 5). Con esta solución no sólo se aminoraba la incidencia de las fuerzas horizontales en altura sino que además, por las características del sistema constructivo, se dotaba a la estructura de elementos de gran ductilidad (HURTADO 2007).¹⁵

Un momento crucial para el desarrollo de las bóvedas encamonadas en el Virreinato de Perú lo constituyó el caso de la reconstrucción de las bóvedas de la catedral de Lima después del terremoto de 1687, el cual provocó el colapso de las bóvedas de crucería. Fray Diego Maroto ofreció al Cabildo Eclesiástico una visión de seguridad estructural de las bóvedas encamonadas construidas por

¹³ La humedad es de importancia vital para la fisiología de insectos y hongos, indispensable para la germinación de las esporas, la digestión de la madera por encima, el transporte de las sustancias nutritivas y todas las funciones vitales. La colocación del recubrimiento de tierra y yeso permitían aislar y proteger del medio ambiente a los diversos componentes de la armadura, ya que mantenía secos los elementos de madera y cañas debido a su baja humedad de equilibrio, de 0,4% para un barro arenoso con 20% de humedad del aire hasta un 6% para un barro arcilloso con 97% de humedad del aire, característica que se veía ayudada por la alta capilaridad de la tierra. En las condiciones descritas las fibras vegetales presentan una alta resistencia al ataque de insectos y hongos, ya que los insectos necesitan encontrarse en un ambiente con una humedad entre 14 y 18% para vivir y los hongos con más de 20% de humedad (HURTADO 2007).

¹⁴ «...siendo por sus materiales y su fábrica los edificios de mayor resistencia, hizo en ellos el temblor efecto de rayos» (AGI. Archivo de Lima, leg. 78).

¹⁵ Los viajeros de la expedición científica española de 1748, Jorge Juan y Antonio de Ulloa opinaban que «...jugando todo el Edificio con los estremecimientos de los Terremotos, y estando ligados sus fundamentos, siguen enteramente el movimiento de aquellos; y no haciendo oposición la fortaleza, aunque se sientan en parte, no caen, ni se arruinan tan fácilmente» (JUAN 1748, p. 43).

él mismo algunos años antes en la iglesia de La Veracruz y en la iglesia del Sagrario, proponiendo reconstruir las bóvedas de la catedral bajo este mismo sistema.¹⁶ A su vez Pedro Fernández de Valdés anotaba que los estribos de adobe no podían contener las fuerzas horizontales que se producían durante los sismos, principalmente en las partes altas de los muros, por ello era preferible la disminución de peso haciendo las nuevas bóvedas de entramados de caña y tierra.¹⁷ Esto se entiende claramente en que pasar de materiales rígidos y pesados como la piedra o el ladrillo a la madera significa una sustancial mejora de la eficiencia sismorresistente. Por ejemplo el peso específico de una bóveda encamionada es aproximadamente 900 Kg/m³, mientras que el del granito de Panamá con el que se construía en el Virreinato del Perú bordea los 2700 Kg/m³ y el ladrillo costeño los 1800 Kg/m³. Entonces el Cabildo Metropolitano encomendó a Maroto en su calidad de Maestro Mayor de la catedral, el diseño de las nuevas bóvedas, las cuales serían realizadas con cerchas (arcos de madera) efectuadas con camones y contracamones (piezas curvas de madera) que se solapaban para formar un arco, cuyos encuentros serían efectuados a testa y clavados a tresbolillo. Para realizar las nuevas bóvedas se debían demoler las antiguas dejando una parte de ladrillo o adobe en los arranques de la estructura de madera para presentar mayor estabilidad en el sentido lateral de los arcos, y al obligado uso de un encadenado de base que atase los muros, que a modo de enjarje recibían las cerchas.

Maroto dio también instrucciones precisas de rellenar los senos de las bóvedas para contener los empujes de los arcos.¹⁸

Para 1691 se habían construido tres bóvedas encamionadas correspondientes a la parte posterior de la fachada principal de la catedral. Nuevamente el Cabildo pidió a los alarifes la evaluación de las nuevas bóvedas ante el terremoto de este año, siendo la contestación mayoritaria que el comportamiento estructural había sido satisfactorio.¹⁹ Después del sismo de 1699, el cual provocó el desplome de las plantas altas realizadas en fábrica de muchas construcciones, el Virrey Conde de la Moncloa ordenó que las partes superiores de los edificios se debían reconstruir únicamente con entramados de caña tejida, prohibiendo la nueva edificación de pisos elevados de adobe y ladrillo, bajo pena de graves multas a peones y alarifes que desobedecieran la ley, disposición que fue confirmada por Real Cédula del 26 de octubre de 1701.²⁰ El terremoto de 1746 que afectó sensiblemente a la capital del virreinato ocurrió a las 22:30 horas, cuando la mayor parte de la población de la ciudad dormía en sus viviendas. Por entonces Lima tenía cerca de 60,000 habitantes de los cuales fallecieron 1,141 personas, la gran mayoría de ellas como resultado del maremoto que sacudió el puerto del Callao y no como acción directa del terremoto (GARCÍA 1997). Tomando en cuenta la magnitud del sismo y la elevada destrucción producida se nota una baja incidencia de daños humanos.²¹

¹⁶ «...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...» (ACC. Libro de fábrica, 1688, f.70r).

¹⁷ «Y así mismo le parece a este declarante no ser buena obra la que se puede aplicar abrigando con albañilería el emvano de los pilares para recoger las entradas y menor fuga a los rempujos de los arcos particularmente cuando la experiencia ha demostrado en la obra de la iglesia de san Pedro Nolasco donde se aplicó este género con mas cuerpo y así en lo grueso como en lo largo y se vino con el temblor al suelo... le parece a este declarante que habiendo de ser de madera yeso y caña no necesita de más aplicación...» (Ibidem, f.71v - 72r).

¹⁸ «...dicha cruería ha de ser de camón y contracamón encontradas las puntas de las cabezas... y para obrara dichas tres bóvedas ante todas cosas se han de obligar a demoler lo que ha quedado de ellas de ladrillo dejando tan solamente dos varas y media de alto en cada movimiento en los rincones sobre que se ha de asentar sobre yeso un tablón de ochava de grueso... como también se han de macizar todos los rincones de las bóvedas por detrás de la cruería de madera para su resistencia y seguridad...» (Ibidem). La mayor parte de las bóvedas de entramado levantadas correspondían al sistema en arco, las cuales definen un paso adelante en la evolución de las bóvedas de madera y entramado. Se caracteriza por estar formadas con cerchas que descargan el peso de toda la cubierta al encadenado que les sirve de apoyo, y son arriostadas lateralmente por correas. Este sistema constructivo es autoportante a diferencia del sistema adintelado o en viga, de mayor presencia en Europa y en el cual la bóveda viene colgada de éstas y no genera empuje en los muros.

¹⁹ Pedro de Asensio comentaba que «...con ellas se ha reconocido la seguridad para los temblores pues acabadas de hacer le sobrevino el temblor del día veinte de septiembre del año pasado de seiscientos y noventa que fue tan grande como el de veinte de octubre de seiscientos y ochenta y siete y causó mayores ruinas en otros edificios que los antecedentes y en estas tres bóvedas no recibieron daño ninguno...» (Ibidem, f.95v).

²⁰ (AGI, Archivo de Lima, leg. 511, Expediente sobre la reedificación de Lima, 1746).

²¹ La magnitud del terremoto de 1746 ha sido calculada en 8,4° en la escala de Richter, habiendo producido una intensidad de X-XI en la escala modificada de Mercalli (GARCIA 1997, p.12).



Figura 6: a) Pozo en la iglesia San Francisco de Lima. b) Galerías subterráneas en la iglesia San Francisco de Lima.

Una explicación a este fenómeno se encuentra en el sistema estructural adoptado en las construcciones después del terremoto de 1687, cuando se realizaron los pisos superiores con los entramados de caña tejida, de menor peso y mayor ductilidad. Ciertamente durante el terremoto los edificios sufrieron grandes daños pero no llegaron a colapsar dando tiempo a sus ocupantes de ponerse a salvo, ratificando en la práctica el buen desempeño sismorresistente del sistema constructivo utilizado. En cualquier caso toda la experimentación que durante dos siglos se venía efectuando con distintos tipos de bóvedas ya sea de cantería, fábrica o de madera, por conseguir mejorar la eficiencia sismorresistente de cada una se vio detenida por la administración colonial, cuando el Virrey José Antonio Manso Conde de Superunda siguiendo las recomendaciones del catedrático y cosmógrafo del reino Luis Goudin convirtió el empleo de las bó-

vedas encamionadas en obligatorio luego del terremoto de 1746.²²

2.7 Excavación de pozos:

Durante el siglo XVII se reformuló la antigua hipótesis de que la existencia de enormes explosiones de material incandescente al interior de la tierra era el causante de los terremotos.²³ Como consecuencia de esta teoría se creyó oportuno el incluir pozos y galerías subterráneas bajo los edificios, actuando como elementos de amortiguación de la acción sísmica al favorecer la ventilación de los gases producidos (Fig. 6). El licenciado Cacho de Santillana se dirigió al rey de España después del terremoto de 1609 advirtiéndole de la necesidad de perforar pozos para menguar el efecto de los sismos en las estructuras y de suprimir las acequias que estaban trazadas por las casas, porque humedecían sus muros y cimientos.²⁴ Por su parte tanto

²² En el dictamen que 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...se prohibieran los arcos de bóveda -de fábrica-» (BERNALES 1972, p. 305). La inversión estatal en la construcción civil disminuyó durante el mandato del Virrey Conde de Superunda a pesar de la abundancia de las arcas virreinales, cuyos recursos se enviaron a España. Es probable que el virrey optará por un sistema constructivo que había mostrado ya su eficiencia sismorresistente y que además era de menor costo con respecto a las bóvedas de fábrica.

²³ Estas ideas vienen desde época de los griegos, quienes pensaban que los pozos permitían el escape de las corrientes de aire caliente provenientes de los volcanes, que al circular por el interior de la tierra ocasionaba los terremotos. No será hasta 1779 cuando Gutierre Joaquín Vaca de Guzmán publica su *Dictamen sobre la utilidad, o inutilidad de la excavación del Pozo-Airon, y nueva abertura de otros pozos, cuevas y zanjas para evitar los Terremotos*, en la cual pondría en duda el funcionamiento antisísmico del Pozo Airón, realizado por los musulmanes en las afueras de Granada, delante de la Puerta Elvira. También se llegó a pensar que los terremotos se transmitían a través de campos eléctricos, por tanto bastaba con colocar varillas en el subsuelo procurando hacer el efecto similar a un pararrayos.

²⁴ «... pueda haber respiración el viento de que han procedido y proceden dichos temblores» (AGI, Archivo de Lima, leg. 95, 28 de marzo de 1610).

el alcalde de Lima Nicolás de Rivera como el Virrey Conde Chinchón expusieron, en 1619 y 1631 respectivamente, ante el cabildo de la ciudad que a través de la conformación de pozos se permitía la evacuación del aire contenido dentro de la tierra.²⁵ Incluso tratados importantes como el de Fray Lorenzo de San Nicolás mencionaba que era indispensable realizar pozos para menguar el efecto de los sismos en los edificios.²⁶

Así en el reconocimiento que hicieron en 1665 los maestros fray Diego Maroto y Juan de Mansilla de las casas de la Inquisición comentaron que era necesario efectuar perforaciones hasta llegar al nivel freático porque habían observado que las viviendas que tenían pozos habían resistido mejor a los sismos.²⁷ Incluso el cabildo de Lima en su reunión del 23 de febrero de 1619 recomendó al Virrey dictar una norma para la realización de pozos.²⁸

Este supuesto se mantuvo vigente hasta muy avanzado el siglo XVIII, como lo atestigua la consulta efectuada por Fernando VI, días después del terremoto de Lisboa de 1755, a Juan Joseph de Cevallos Rivera y Dávalos sobre los efectos de los sismos en Lima y las medidas adoptadas por su población para contrarrestarlos. Cevallos en una visita a El Escorial explicó al Rey el particular pensamiento existente de la época sobre los orígenes de los terremotos.²⁹ Se debe recordar que no será hasta finales del siglo XVIII, cuando recién se establece

la relación entre la teoría ondulatoria y el movimiento sísmico, y que la teoría de la deriva de los continentes, se expone recién en 1912 por Wegener, quien refiere la existencia de una corteza terrestre dividida en placas que se desplazan sobre el manto de la tierra e interactúan entre sí. La teoría de la expansión de los fondos oceánicos de 1963 complementó la anterior, según la cual los fondos marinos se mueven arrastrando a los continentes, generando y consumiendo placas.

Conclusión.

El hecho que durante el siglo XVII no se tuvieran las herramientas y conceptos modernos del cálculo científico no invalida el cálculo tradicional con el que se levantaban las estructuras y se desarrollaba una arquitectura sismorresistente. Indudablemente muchas de estas estructuras no pasarían una evaluación efectuada a la luz de valores consignados en los modernos manuales y normas de construcción, las cuales han sido elaborados desde la perspectiva de la rigidez y la resistencia en lugar de la estabilidad. Sin embargo la mejor prueba que el cálculo tradicional funcionaba es que los edificios históricos siguen en pie a pesar del tiempo, los notables terremotos que han tenido que soportar y la falta de mantenimiento. Por consiguiente hay que evitar los prejuicios que pueden llevar a una apreciación equivocada sobre el desempeño estructural

²⁵ Ibidem.

²⁶ «Si el daño procede de temblores de tierra, a que muchas partes marítimas están sujetas, este daño se puede prevenir con abrir muchos pozos cercanos al edificio, para que por ellos se expelan los vapores, y abuyentados no perturben la tierra con su violencia, siendo tanta, que aun allana montes, como de muchas partes lo sabemos. Para remediar este daño tuvo antiguamente la ciudad de Granada un pozo, en la calle de Elvira, de notable anchura y profundidad, todo labrado de ladrillo, que llamaban el pozo Ayron, por donde expelían los vientos, sin que causasen temblores: el qual está oy tapado, y los ancianos que habitan en aquella ciudad afirman por relación, no aver avido temblores mientras duro el estar ablerito: daño que han experimentado despues de cerrado» (SAN NICOLÁS 1639, f. 134v).

²⁷ «se hagan unos pozos hasta dar en agua, labrados con su campana de cal y ladrillo, . . . respecto de que con la experiencia de que tiene las casas donde hay pozos ha sido poco o nada el daño que han recibido, y esto lo juran a Dios Nuestro Señor y a la Cruz de ser muy necesario y de mucha utilidad a las dichas casas y viviendas. . . » (CRESPO 2005, p. 131).

²⁸ «... Le parece ser muy buen remedio hacerse muchos pozos por donde pueda aver rrespiración. El bien de que an procedido y proceden. Los dos temblores se a experimentado y que así lo propone y pide se de borden y mande que se hagan pozos en todas las casas desta ciudad y abriendose tratado sobre ella se acordó y mandó que se comunique con el Excmo. señor virrey destes reynos y se de cuenta de lo contenido en esta propusíon para que su Exca. probea y bordene. . . » (ARDITI s.f, p. 6).

²⁹ «La causa de la diversidad de estos movimientos es la individualidad de la que se discurre probablemente serlo del mismo temblor: esto es, el incendio que se forma de las materias combustibles, depositadas en las grandes cabernas, ó concabidades subterráneas. Este gran fuego dilata el ayre circunvecino, que no pudiendo contenerse en el espacio que ocupaba, hace fuerza contra toda la bóveda de la caberna, y se comunica con el mismo impulso á los demás huecos subterráneos que tienen comunicación con aquel en que se forma el incendio. La fuerza del ayre, que es la mayor que se conoce en la naturaleza, y quizá la única capaz de acción tan portentosa, levanta la bóveda, y esta volviendo á tomar su primera situación, zímbray y forma el movimiento de trepidación. El mismo ayre que hizo este primer esfuerso, vá de rechaço chocando en todas las cabernas vecinas, y produciendo el mismo efecto con la diferencia de que impeliéndolas ázia los lados, causa el movimiento de undulación que es el que se experimenta más frecuentemente, y a mayores distancias; porque el de trepidación solo se siente en aquel parage que está vertical sobre el punto del incendio. Vuelve el ayre á su primitivo lugar, repite el primer efecto y alternativamente continúa a cortos intervalos hasta que pierde la fuerza por la resistencia, ó por otra novedad que ocurra en el incendio, en el mismo ayre, ó en la boveda, y así se vé que todos los temblores traen interrumpido, y como á sacudidas el movimiento. Si los torbellinos ó remolinos repiten muy frecuentemente, ó agitan un tiempo tanto ázia arriba como á los lados, causan el movimiento mixto» (LANGUILLO et al. 2007).

de la técnica constructiva de un edificio que acuse daño por patologías o efectos de los sismos, incluso si hubiere colapsado. Hoy en día que está en auge el empleo de modelos matemáticos, por ejemplo de elementos finitos, para representar el comportamiento estático y dinámico de estas estructuras, surge la llamada de atención sobre los criterios de asignación de parámetros en dicha modelización. Si bien los modelos no lineales han significado un avance en esta dirección no se debe olvidar que estas estructuras son hiperestáticas y muy sensibles a las modificaciones del entorno como desplazamientos, fisuras, giro de sus conexiones no rígidas, etc. Todo ello define cierta incertidumbre sobre su

real estado, el que no es del todo necesario para determinar si una construcción antigua es estable o no. Basta con ver el caso de los arcos de fábrica para comprobar que un sencillo ejercicio de cálculo gráfico nos puede arrojar conclusiones sobre su estabilidad y el margen de seguridad que tiene, sin tener que recurrir a complicados sistemas matemáticos de modelización. No obstante si se opta por este camino se deben obtener datos que en muchos casos deberán conseguirse por ensayos para ajustar la modelización (Fig.7). Obviar esta consideración significaría navegar por aguas aparentemente tranquilas pero plagadas de incertidumbres y errores.



Figura 7: a) Ensayo de una sección de bóveda encamionada en escala 1:1 de 6,50 m de luz libre y 3,25 m de altura en la Universidad Politécnica de Madrid. b) Posición de los LDVT para obtener datos de desplazamientos en las uniones entre camones y luego ser llevado a un modelo matemático.

Bibliografía

ARCE GARCIA, Ignacio

1996 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*, pp. 39-47. Madrid: Instituto Juan de Herrera.

ARCHIVO DEL CABILDO CATEDRALICIO - PERU (ACC).

ARCHIVO DEL CABILDO METROPOLITANO DE LIMA - PERU (ACML).

ARCHIVO GENERAL DE INDIAS - ESPAÑA (AGI).

ARDITI, Alvaro

s.f. *Perú: Temblores y terremotos de Lima. Crónica histórica*. Lima.

BERNALES BALLESTEROS, Jorge

1972 *Lima, la ciudad y sus monumentos*. Sevilla: Consejo Superior de Investigaciones Científicas - Escuela de Estudios Hispano Americanos de Sevilla.

BLONDET, Marcial; LOAIZA, César y Gladis VILLA GARCÍA.

¿Viviendas sismorresistentes de tierra? Una visión a futuro. En *Actas del XIV Congreso Nacional de Ingeniería Civil*. Iquitos: Capítulo de Ingeniería Civil del Consejo Departamental de Loreto del Colegio de Ingenieros del Perú.

CASSINELLO, Pepa

2005 Influencia de los terremotos históricos en la construcción de las catedrales góticas. En *Annali di Architettura*, vol.17, pp. 9-20. Centro Internazionale di Studi di Architettura Andrea Palladio de Vicenza.

CRESPO RODRIGUEZ, María Dolores

2005 *Arquitectura doméstica de la ciudad de Los Reyes (1535-1750)*. Sevilla: Consejo Superior de Investigaciones Científicas - Escuela de Estudios Hispano Americanos, Universidad de Sevilla, Diputación de Sevilla.

GARCIA ACOSTA, Virginia

1997 *Historia y desastres en América Latina*. Red de Estudios Sociales de Prevención de Desastres en América Latina. (www.desenredando.org/public/libros/1997/hydv2/hydv2-intro_sep-09-2002.pdf).

HEYMAN, Jacques

1999 *El esqueleto de piedra, mecánica de la arquitectura de fábrica*. Madrid: Instituto Juan de Herrera.

HUERTA FERNANDEZ, Santiago

2004 *Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica*. Madrid: Instituto Juan de Herrera.

HURTADO VALDEZ, Pedro

2007 Estructuras antisísmicas: Las bóvedas encamionadas en el Virreinato del Perú. En *Actas del Quinto Congreso Nacional de Historia de la Construcción*, vol. 2, pp. 533-542. Madrid: Instituto Juan de Herrera.

HURTADO VALDEZ, Pedro

2009a Masonry or wooden vaults?: the technical discussion to rebuilt the vaults of the cathedral of Lima in the seventeenth century. En *Proceedings of the Third International Congress on Construction History*, pp. 845-852. Cottbus: Brandenburg University of Technology.

HURTADO VALDEZ, Pedro

2009b La restauración de edificios construidos con tierra en zonas sísmicas: la experiencia peruana. En *Bia*, nº 259, pp. 99-114. Madrid: Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos de Madrid.

JUAN, Jorge y Antonio DE ULLOA

1748 *Relación histórica del viaje hecho de orden de S. Mag. a la América Meridional*. Segunda parte, vol. 3. Madrid: Antonio Marin.

KUROIWA, Julio

2002 *Reducción de desastres. Viviendo en armonía con la naturaleza*. Lima: Julio Kuroiwa.

LANGENBACH, Randolph

2010 "Earthquake resistant traditional construction" is not an oxymoron*: The resilience of timber and masonry structures in the Himalayan Region and beyond, and its relevance to heritage preservation in Bhutan. En *Proceedings of the International Conference on Disaster Management and Cultural Heritage "Living in Harmony with the Four Elements"*, pp. 1-25. Timbu: The Royal Government of Bhutan.

LANGUILLO GARCIA-BARCENA, Paulino y Federico CRESPO GARCIA-BARCENA

2007 Los terremotos en la historia. *El Diario Montañés*. Santander, www.eldiariomontanes.es/20070914/opinion/articulos/terremotos-historia-20070914.html.

MARTINEZ SOLARES, José Manuel

2003 Sísmicidad histórica de la península Ibérica. En *Física de la Tierra*, nº 15, pp.13-28. Madrid: Universidad Complutense de Madrid.

MINKE, Gernot

2001 *Manual de construcción en tierra*. Montevideo: Editorial Nordan-Comunidad.

SAN NICOLAS, Fray Laurencio de

1639 *Arte y Uso de Arquitectura*. Primera y Segunda Parte. Madrid: s.i. (facs. Ed. Madrid: Albatros, 1989).

TOULIATOS, P.G.

1993 *The traditional aseismic techniques in Greece*. En AITIM, n° 164, pp. 42-45. Madrid: Asociación de Investigación de las Industrias de la Madera.

IWAKI, Carlos; RUBIÑOS, Álvaro y Julio VARGAS

2012 Sismorresistencia en las entrañas de Caral. En *Terra 2012. XIth International Conference on the Study and Conservation of Earthen Architecture Heritage*. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.

