

Criterios de sismorresistencia y cálculo tradicional de estructuras en la arquitectura limeña del Siglo XVII

PEDRO HURTADO VALDEZ.
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

RESUMEN

Geológicamente la costa peruana evidencia el choque de las placas Sudamericana y de Nazca que originan grandes terremotos. Esta característica siempre ha condicionado la búsqueda de sistemas constructivos sismorresistentes.

Con la colonización hispana de Perú se emplearon técnicas constructivas españolas que no soportaban sismos tan frecuentes. Frente a los daños que los terremotos ocasionaban en sus edificaciones los constructores adaptaron esta arquitectura a las características sísmicas de Perú que se fueron solucionando mediante un continuo proceso de ensayo y error. Estas experiencias se plasmaron en debates que la autoridad virreinal organizó entre los alarifes de la región después de cada terremoto y que están contenidas en actas de la época.

El objetivo del artículo es esclarecer los criterios de sismorresistencia y del cálculo estructural que se establecieron durante el siglo XVII en la arquitectura limeña, empleando como metodología la confrontación de los documentos de archivos con edificios de la época.

ABSTRACT

Geologically the Peruvian coast is defined by movements of the Nazca and South American plates, which have produced big earthquakes along the Peruvian history. This feature has conditioned since antiquity finding earthquake-resistant construction systems.

With the Spanish colonization of Peru it began to employ Iberian construction techniques. It was soon found that these techniques were not sufficient to support frequent seismic events. Faced with the continuing damage that earthquakes were causing in their buildings the master masons adapted the original Spanish architecture to the seismic characteristics of the new territory, albeit with initial constructive difficulties that were solved through a long and continuous process of trial and error, associated with the debates organized by the colonial authority among the builders after each earthquake, which are contained in the minutes of that period.

Precisely the paper's main is to clarify the criteria for seismic resistance and structural design established during the seventeenth century in Lima's architecture, from researching in archival documents and their confrontation with buildings of that period.

PALABRAS CLAVES

Sismorresistencia, restauración, cálculo tradicional.
Seismic-resistance, restoration, traditional calculation.

INTRODUCCIÓN

La región costera peruana se levanta sobre un escenario geológico de gran dinamismo, producto del enfrentamiento de la placa tectónica Sudamericana con la de Nazca. En el área de contacto entre las dos placas las masas pétreas que las conforman se comprimen acumulando energía. Una vez superado el límite de resistencia de la roca se origina una brusca ruptura, con el consiguiente desplazamiento y liberación de la energía potencial acumulada en forma de ondas sísmicas. La característica tectónica del territorio sobre la que se asienta la ciudad de Lima ha condicionado desde la antigüedad la búsqueda de sistemas constructivos que prometieran seguridad ante la continua ocurrencia de fenómenos sísmicos. La experiencia impulsó a los constructores limeños no solo a plantear nuevas técnicas sino también a su permanente evolución con vista a mejorar su eficiencia sismorresistente.



Fig.1: a) Muros ortogonales arriostrados perpendicularmente entre ellos en Puruchuco (foto propia). b) Muros de grandes espesores y poca altura en Pachacamac (foto Fernando Fujita). c) Reconstrucción de contrafuertes en muros de tapia en Mateo Salado (foto propia). d) Fibras vegetales dentro de los muros de Caral (foto propia).

Construcciones de época prehispánica como Puruchuco o Pachacamac ya evidenciaban muros con grandes espesores que oponían a los sismos la gran masa de su construcción. En Mateo Salado se encuentran muestras de recomposición de contrafuertes para dotarles de nuevas dimensiones. Estos muros conseguían arriostrarse mutuamente debido a su marcada continuidad longitudinal y a sus múltiples encuentros perpendiculares (fig.1). La visión actual de estas estructuras indica que por sus proporciones generaban poca esbeltez y otorgaban a sus muros una mayor estabilidad fuera del plano.

En algunos casos se llegó a incluir refuerzos de fibra vegetal en tramos regulares, los que colocados verticalmente y horizontalmente dentro de la masa muraria permitían absorber esfuerzos que los muros de tierra con los que se construía no podían hacerlo por sí mismos (Hurtado, 2009a). En Caral, al norte de Lima, los rellenos con piedra y barro de los muros de contención se

sujetaron con mallas elaboradas con fibras vegetales (Iwaki et al., 2012). Hoy se sabe que la disposición de estratos horizontales y verticales elásticos dentro de un muro reduce la frecuencia de su vibración al absorber gran parte de la energía liberada por el sismo, al ampliarse la ductilidad del muro (Blondet et al., s.f.).

CONSIDERACIONES DE SISMO-RESISTENCIA EN LA ARQUITECTURA VIRREINAL DEL SIGLO XVII

Con la presencia hispana en Perú se inició el empleo de técnicas constructivas propias de la península Ibérica. Pronto se observó que dichas técnicas no estaban preparadas para soportar fenómenos sísmicos tan frecuentes. Los maestros constructores se vieron en la necesidad de adaptar la original arquitectura española a las características sísmicas del nuevo territorio ante los persistentes daños ocasionados por los terremotos en sus edificaciones.

Las iniciales dificultades constructivas se fueron solucionando a través de un largo y continuo proceso de ensayo y error, sustentadas técnicamente en los debates sobre sísmo-resistencia que organizó la autoridad virreinal entre los principales alarifes de la región (Hurtado, 2009b). Así, se manifestó una cultura constructiva experimental sobre las mejoras sísmo-resistentes en los edificios, y que incluso difundió sus conocimientos en el resto del imperio español con escritos y visitas de los alarifes locales: "Poco ha vi un corto impreso, cuyo Autor es un Caballero natural de Lima, dotado de ilustres prendas; el qual, por las observaciones que hizo en su Patria, que se sabe es infestadísima de los temblores de tierra, da en el citado impreso, algunas útiles reglas para construir los Edificios, de modo, que los que los habitan peligran mucho menos en el caso de estas funestas concusiones" (Feijoo, 1774).

Si bien entonces no se tenía la definición moderna de conceptos como "esfuerzo" o "elasticidad", sí se evidencia que las construcciones eran fruto de un conocimiento experimental que llevó a idear respuestas favorables frente a los sismos. El planteamiento estructural de las soluciones adoptadas encuentra su fundamento en la búsqueda del equilibrio, mediante la combinación de formas, materiales y masas, según determinadas reglas de proporciones que asegurasen la estabilidad del edificio. Para estos alarifes la resistencia y rigidez no eran determinantes para plantear una estructura, porque las cargas que soportaban los muros de fábrica eran perfectamente admisibles en relación con la capacidad portante de los materiales con los que trabajaban (Huerta, 2004). A nivel dinámico interesó más el tipo de soluciones que permitiera acomodarse a la estructura a las modificaciones que imponían los sismos que el resistirse a ellos.

Cambio de las proporciones de los muros

La inicial observación de los maestros constructores fue que los muros tendían a separarse durante un terremoto y luego los tramos separados golpeaban unos contra otros. Este fenómeno se debe a la naturaleza discontinua y anisótropa de las fábricas antiguas, siendo normal la aparición de fisuras, ya que la estructura se mueve adaptándose a las situaciones del entorno. Durante un terremoto los muros insuficientemente conectados golpean entre sí, debido a que se generan fuerzas de inercia de sentido horizontal contrario al movimiento del suelo provocando esfuerzos por flexión, momento y cortante que actúan simultáneamente haciendo que cada muro presente características dinámicas propias y distinta frecuencia de vibración, según su naturaleza constructiva y dimensiones.

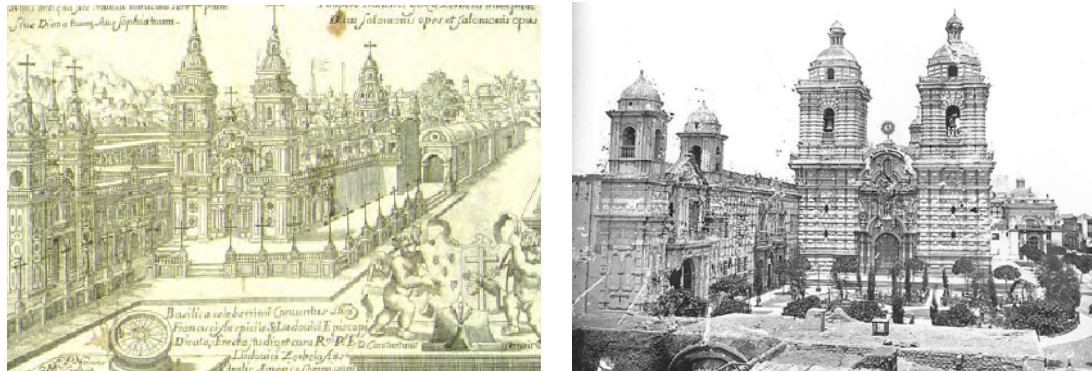


Figura 2: a) Iglesia San Francisco de Lima en 1675 (grabado de Pedro Nolasco). Las torres de la iglesia son esbeltas con tres cuerpos y chapitel de coronación. b) Iglesia San Francisco en 1874 con torres proporcionalmente más bajas que en la anterior imagen y cupulines de remate (foto Biblioteca Nacional).

En consecuencia, una de las primeras acciones fue replantear las proporciones de muros, significando el incremento del espesor para conseguir mayor estabilidad y evitar las fisuras. Sin embargo, el aumento de espesor producía también incremento de la masa en las partes altas de los edificios, con lo cual crecían las fuerzas de inercia originando desprendimiento y colapso de estas zonas, como resultado de las elevadas aceleraciones que producen los sismos (fig.2).

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. A tal efecto, Fernando de Córdoba y Figueroa sostuvo que para evitar daños en las torres de la ca-

tedral de Lima se debía decrecer su altura: “... las torres no suban lo que la monte de la planta muestra que se le quite el tercio de su altura...” (AAL, 1609, leg.6, exp.17a).

Contrafuertes con mayores dimensiones

La reflexión de ampliar las dimensiones en los muros se manifestó también para los contrafuertes (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: “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...” (AAL, 1609, leg.6, exp.17b).



Figura 3: a) Interior de la iglesia La Merced donde el arco y estribo interrumpen el trazo de la cúpula original (foto propia). b) Estribos de la iglesia Santiago Apóstol de Surco (foto propia). c) Estribos de la iglesia San Pedro de Carabaylo (foto propia).

La parte de los estribos iniciales de la catedral que se proyectaba fuera del muro eran de 6 x 9 pies (1,83 x 2,74 m) y debían de pasar a 15 x 15 pies (4,57 x 4,57 m), con lo cual se daba particular atención a una sección cuadrada que pudiera oponer al sismo su masa en ambas direcciones. Esta particular forma de concebir la estructura parece independiente de la regla del tercio que estaba muy difundida desde el Renacimiento, es decir dar al estribo de una bóveda de cañón un tercio de la luz. En la primera línea de capillas de la iglesia de La Merced de Lima se observa claramente cómo fue ampliado el ancho de los estribos para contener el empuje de las originales bóvedas de fábrica.

Los constructores también observaron que el aumento de las dimensiones de los estribos producía en ocasiones fallos inmediatos. Este comportamiento se explica en que el incremento de la masa y rigidez de la fábrica en altura funcionaba solo frente a movimientos sísmicos de regular intensidad, pero que cuando las fuerzas horizontales excedían la capacidad resistente de la fábrica el daño producido en ella resultaba grande, por fallo en las trabas entre los muros y estribos con riesgo de colapso inmediato. De allí que los estribos se construyeron reduciendo enormemente su sección según se ascendía hacia la parte alta de los muros (fig.3).

Preferencia al uso de un solo tipo de arco o bóveda

El planteamiento de las bóvedas estaba basado en la experiencia, como resultado de observar en los templos las lesiones presentes en las bóvedas cerradas o en proceso de construcción, para determinar la buena praxis o los defectos a evitar. Este modo de proyectar bóvedas no encontraría una variación sustancial en Perú, muy a pesar que en 1675 Hooke experimentó con sus cadenas colgantes en analogía con los arcos, o que en 1712 La Hire formuló la teoría del punto de ruptura para arcos. Por entonces la aproximación al diseño estructural no era buscar la forma ideal del arco ni en obtener el valor de los empujes para calcular el ancho de los estribos, sino en verificar la estabilidad de las bóvedas a partir del desplazamiento producido en los apoyos.

Como resultado de que las originales bóvedas de arista de la catedral de Lima tuvieron la misma altura de la clave pero con diferentes perfiles geométricos, en la nave central con arco rebajado y a los lados con arcos aovados, se producía una inclinación de los muros durante los terremotos. Se entiende que la existencia de 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 sismo. En consecuencia se dispuso que las bóvedas debieran de ser de las mismas características constructivas y formales, según lo atestigua Diego Guillén: “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).

A raíz del sismo de 1609 las bóvedas de la catedral de Lima quedaron sumamente dañadas, optándose por su reconstrucción 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 estribos localizados en los puntos de empujes, con espesores suficientes para garantizar su estabilidad durante los temblores. Al respecto Juan Martínez de Arrona mencionó: “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, 1614-1615, 1:f.15r). Sin embargo estas bóvedas también colapsaron en el posterior terremoto de 1687. Estos análisis motivaron luego la aparición de las bóvedas encamionadas a mediados del siglo XVII (fig.4).



Figura 4: a) Extradós de las bóvedas encamionadas en la Catedral de Lima (foto propia). b) Intradós de las bóvedas encamionadas de la Catedral de Lima (foto propia).

Atado de los muros de adobe con encadenados de madera

Como las antiguas directivas de diseño de las fábricas se basaban en leyes geométricas de proporción que en la práctica aseguraban la transmisión adecuada de los esfuerzos dentro de los límites físicos de la propia estructura, los muros trabajaban principalmente a compresión, pero que ante la aparición de otros tipos de esfuerzos se producían fisuras. En un medio sísmico las fisuras adquieren particular importancia debido a que cambian la frecuencia natural de la porción de muro que separan. 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 podrían llegar a colisionar entre ellos.

Consecuentemente en los diseños sismorresistentes se tomaba particular atención a trabar bien los muros utilizando maderos y perpiños que otorgaban continuidad a la estructura, ya que la ubicación de las fisuras, se concentraban normalmente en los encuentros entre muros y con los contrafuertes (fig.5). Igualmente, se observó que la presencia de un atado de madera continuo en la parte alta de los muros de adobe, con los que se levantaban la mayor parte de las fábricas limeñas, contribuía no solo a impedir la separa-

ción 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 continuos de madera, tan tradicional en la arquitectura costeña de Perú, 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 del forjado y que en conjunto creaban un doble encadenado horizontal. En el caso de las bóvedas de entramado se aprovechaba la base de apoyo de los arcos encamonados como parte del encadenado. En 1755 Llano y Zapata en una comunicación dirigida al Rey Fernando VI sobre los efectos de los terremotos en los edificios limeños mencionó que “Lo único, que da seguridad es la unión, o trabazón de las partes, que componen el edificio proporcionada a su misma robustez: si una gran fábrica de piedra esta sujeta con barras de hierro, u otra menor de ladrillo o tierra con maderos, ellas serán las mas seguras, porque aquellas trabazones o ligaduras impiden la desunión, que pudiera hacer el material, y aun demolido este, mantienen todas sus partes después de desunidas” (Llano y Zapata, 1755, f.4).



Figura 5: a) Encuentro entre encadenado y vigas del balcón en casa del Centro Histórico de Lima (foto propia). b) Detalle típico del encuentro en caja y espiga del encadenado con las cerchas de una bóveda encamonada en Lima (foto propia).

Nuevos sistemas constructivos de mayor ligereza y ductilidad

El verdadero avance de la construcción sismorresistente procedió del convencimiento en los maestros constructores que era mejor encontrar soluciones que admitiesen deformaciones que continuar oponiendo resistencia a los sismos, con el fin de obtener estabilidad estructural y que quedó expresada en la carta que el Arzobispo de Lima escribió al Rey de España con motivo de la evaluación de los daños del terremoto de 1678: “... siendo por sus materiales y su fábrica los edificios de mayor resistencia, hizo en ellos el temblor efecto de rayo” (AGI, leg.78).

Fruto de esta visión fue la introducción de los telares de tierra-caña (quincha) y bóvedas encamonadas, con lo cual se lograba reducir el peso de los pisos altos de los edificios, así como en los campanarios y bóvedas de las iglesias (fig.6). Con esta solución no sólo se aminoraba la incidencia de las fuerzas horizontales en altura sino que además, por las características del sistema constructivo, con uniones flexibles de madera, cinchos de hierro y cintas de cuero, se dotaba a la estructura de elementos de gran ductilidad. Al respecto, 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 fundamento, siguen enteramente el movimiento de aquellos; y no haciendo oposición la fortaleza, aunque se sientan en parte, no caen, ni se arruinan tan fácilmente” (Jorge, 1748).

Un momento crucial para el desarrollo de las bóvedas encamonadas en el Virreinato de Perú fue 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 en las bóvedas encamonadas construidas por 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: “... 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, 1688, f.70r).

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 tierra-caña: “Y así mismo le parece a este declarante no ser buena obra la que se puede aplicar abrigando con albañilería el envano de los pilares para recoger las entradas y menor fuga a los repujos 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...” (ACC, 1688, f.71v - 72r).



Figura 6: a) Telar de quincha en casa del centro histórico de Lima (foto propia). b) Campanario de entramado en la antigua iglesia La Compañía de Pisco (foto propia). c) Arquería de entramado en la Hacienda San Juan de Surco (foto propia). d) Extradós de las bóvedas encamonadas en la capilla de la Virgen de Loreto en la Casona de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos (foto propia). e) Extradós de la bóveda de época Republicana de la iglesia de La Ermita Barranco, que muestra la tipología de bóvedas autoportantes similares a las de época virreinal (foto propia). f) Extradós de la cúpula de la iglesia La Soledad (foto propia).

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, colocando 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 recibirían las cerchas: "... dicha crucería ha de ser de camón y contracamón encontradas las puntas de

las cabezas... y para obrar 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 crucería de madera para su resistencia y seguridad..." (ACC, 1688, f.72v).

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. Se caracteriza por estar formadas con cerchas que descargan el peso de toda la cubierta al encadenado que les sirve de apoyo, y son arriostradas lateralmente por correas. Este sistema constructivo es autoportante a diferencia del sistema adintelado, de mayor presencia en Europa y en el cual la bóveda viene colgada de las vigas que definen el techo y por lo tanto no genera empuje en los muros (fig.7).

En 1665 Joseph Lorenzo Moreno y Lorenzo de los Ríos conciertan la construcción de la cubierta de la capilla del Tribunal del Santo Oficio de Lima explicando las características de una bóveda adintelada: "Primeramente se han de levantar dos varas todas las paredes en redondo de un adobe de grueso, enlucido y canteado por de fuera en que se han de incluir los gruesos de las madres del cubierto de cuadrado con sus cadenas de cruceta tapadas o embebidas en la pared que han de ser veinte y dos madres de medio cuartón cada una que hacen once piezas de madera. Item se ha de entablar sobre dichas madres con tablas de roble gruesas que de cuartón grueso salgan diez porque de un cuartón a otro ha de haber una vara de hueco. Item ha de llevar cuarenta y cuatro tornapuntas en las dichas veinte y dos madres en cada una de grueso de sexma en cuadro. Item más veinte y dos cerchones uno para cada madre de a dozavo de grueso y ochava de ancho cada uno.

Item la bóveda se ha de cubrir de caña de Pisco cortada en menguante limpia y partida por medio con su yeso de tres dedos de grueso poco más o menos.

Item se ha de solar encima con ladrillo ordinario de papel rebocado con cal y asentado con barro y su estera debajo. Item se ha de enlucir así mismo toda la capilla con mezcla de cal arena y tierra pareja y vivar las esquinas bien lavado y blanqueado encima de dos manos con cal del Convento de San Francisco por ser la más blanca.

Item después de formada la bóveda del grueso referido con el yeso de Pisco se ha de enlucir toda la bóveda con el yeso de la sierra cernido con cedazo delgado y lavado todo a plana" (AGN, 1665, protocolo 651, f.802).

Esta declaración resulta relevante, porque especifica los detalles constructi-

vos y el proceso de ejecución de este tipo de bóveda. Según esta descripción inicialmente se procedió a elevar la altura del muro de adobe en todo el perímetro de la capilla en dos varas (1,67 m.) para formar un peto del espesor de una pieza de adobe, que establecía a su vez la flecha que tendría la bóveda. Dentro del muro se colocaron los encadenados de madera que servirían de apoyo, principalmente a las vigas madres, sobre las cuales se dispondría un entablado. Seguidamente se fijaron los jabalcones (tornapuntas) en los muros como apoyos en cada extremo de las vigas madres, que, además de disminuir la luz libre que salvan dichas vigas, ayudarían a la fijación de las cerchas, consideraciones constructivas que muestran semejanzas con aquellas reveladas por Fray Lorenzo de San Nicolás en el siglo XVII.

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 aquel año, siendo la contestación mayoritaria que el comportamiento estructural había sido satisfactorio. Al respecto Pedro de Asensio comentó 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..." (ACC, 1688, f.95v).

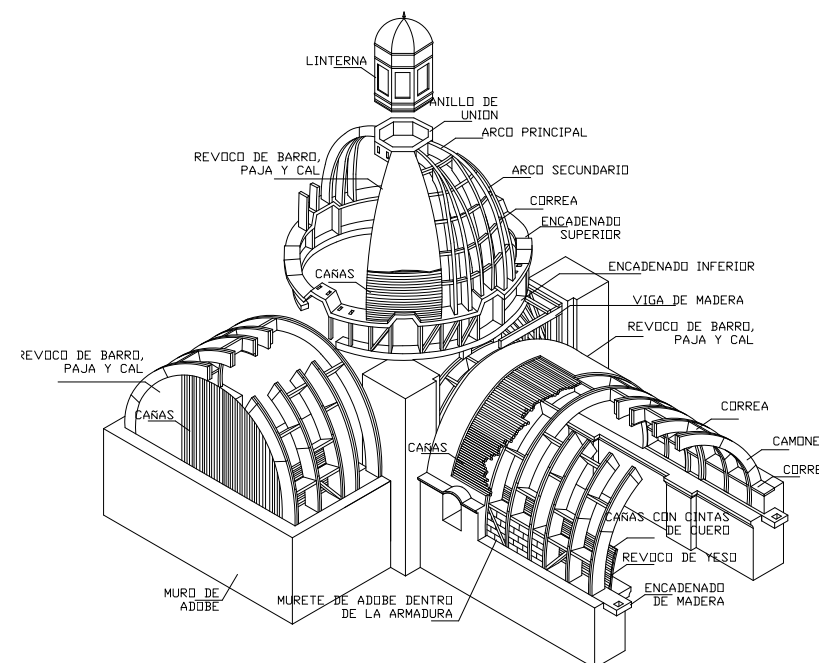
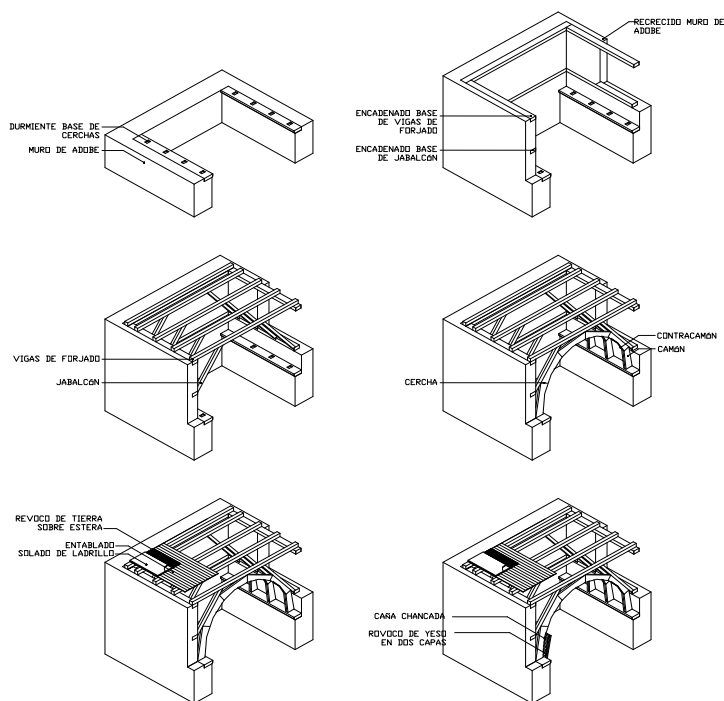


Figura 7: a) Desarrollo de la construcción de la bóveda encamionada en sistema adintelado en la capilla de La Inquisición (gráfico propio). b) Características constructivas de una bóveda encamionada autoportante (gráfico propio).

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 (AGI, 1746, leg.511).

Finalmente el Virrey José Antonio Manso Conde de Superunda siguiendo las recomendaciones de Luis Goudin, catedrático y cosmógrafo del Reino, luego del terremoto de 1746 convirtió a los entramados y a las bóvedas encamionadas en estructuras de uso obligatorio. En su dictamen Goudin refirió que: "... 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-" (Bernaes, 1972).

Empleo de cintas de cuero para la unión de elementos estructurales:

Las cintas se confeccionaban con piel de vaca u oveja, cortados en tiras de un dedo de ancho (1,7 cm). Se empleaban para unir las cañas entre sí en los telares y como elemento para fijar las cañas a las cerchas de las bóvedas encamionadas. Las cuentas de gastos efectuados en la construcción de las bóvedas encamionadas de la iglesia del Prado de Lima confirman que se costearon “más treinta pesos que se gastaron en pellejos para precintar los telares” (AAL, leg.4, f.3v). Un hecho importante se materializó en el empleo de estas cintas de cuero también para las conexiones de los elementos estructurales con el fin de generar uniones flexibles.

A los alarifes les hubiese bastado el empleo de clavos para fijar las uniones de las piezas como se hacía en España. Una lógica constructiva, aunque empírica, debió impulsarlos al uso de las cintas de cuero en estos casos. De forma que atar con cintas una estructura significaba dotarla de una mayor capacidad de deformación elástica, absorbiendo energía de deformación durante los sismos, además que esta forma de coser las piezas de madera no genera tensiones perpendiculares a la fibra en el caso de los camones cuando se ataban las bóvedas encamionadas (fig.8).



Figura 8: a) Cintas de cuero de ganado vacuno, similar a las que se empleaban en el Virreinato de Perú (foto propia). b) Cintas de cuero que atan las vigas de la capilla de la Virgen de Loreto, Casona de San Marcos (foto propia).

El intentar obtener flexibilidad en estas uniones no solo obedece al impacto de las fuerzas horizontales generadas por los sismos, sino en algo más habitual como constituye el hecho de que la madera cambia de dimensiones con la temperatura y la humedad (Gordon, 2004: 127). Además de las cintas de

cuero en algunos casos se llegó a incorporar cinchos de hierro para la unión de los elementos estructurales como lo evidencia el concierto de 1688 para las obras de las bóvedas de la iglesia del Sagrario, donde se menciona que “... se han de fijar todos dichos terceletes mayores y menores fijándolos con escuadras y cinchas de fierro” (ACML, Vol.1, f.38r-f.40v).

Excavación de pozos

Durante el siglo XVII, se reformuló la arcaica hipótesis de los “vientos internos”, según la cual las formidables explosiones de material incandescente en los volcanes producían corrientes de aire caliente circulando al interior de la tierra, que al tratar de escapar hacia la superficie impactaban fuertemente en la roca causando los terremotos. De acuerdo a estas creencias, era inevitable la apertura de pozos con la finalidad de permitir el escape de dicho aire. Así, anacrónicamente se tomaría por cierta la palabra de Plinio, que en tiempo de los romanos había hecho referencia a hoyos con características sismo-resistentes: “porque encontrará un vacío y no dará razón de hacer arruinar el edificio” (Vera, 2010, 145).

Para el siglo XVII, Fray Lorenzo de San Nicolás, aún seguidor de las ideas de los “vientos internos”, consideró en su tratado, de enorme influencia en el medio hispanoamericano de aquel tiempo, que era indispensable realizar pozos para reducir el efecto de los sismos en los edificios: “Si el daño procede de temblores de tierra, a que muchas partes marítimas están sujetas, este daño se puede prevenir con abrir muchos poços cercanos al edificio, para que por ellos se expelan los vapores, y ahuyentados no perturben la tierra con su violencia, siendo tanta, que aun allana montes, como de muchas partes lo sabemos...” (San Nicolás, 1639, f.134v).

Como consecuencia se creyó oportuno incluir hoyos y galerías subterráneas bajo los edificios, ya que se pensaba que estos elementos amortiguarían la acción sísmica al favorecer la ventilación de los gases producidos al interior de la tierra (fig.9). Después del terremoto de 1609 el licenciado Cacho de Santillana se dirigió al rey de España 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 los muros y cimientos: “... pueda haber respiración el viento de que han procedido y proceden dichos temblores” (AGI, leg.95, 1610).

Por su parte tanto 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. Así, el cabildo de Lima en su reunión del 23 de febrero de 1619 recomendó al Virrey dictar una norma para la rea-



Figura 9: a) Pozo en la iglesia San Francisco de Lima (foto propia). b) Galerías subterráneas en la iglesia San Francisco de Lima (foto propia). c) Pozo en el Museo Bodega y Cuadra de Lima (foto propia).

lización de pozos: “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...” (Arditi, s.f.).

También en el reconocimiento de las casas de la Inquisición que hicieron en 1665 los maestros fray Diego Maroto y Juan de Mansilla, 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.

Esta teoría se mantuvo vigente hasta muy avanzado el siglo XVIII, como lo atestigua la respuesta de Juan Joseph de Cevallos Rivera y Dávalos sobre los efectos de los sismos en Lima ante la consulta efectuada por Fernando VI, días después del terremoto de Lisboa de 1755: “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 accion tan portentosa, levanta la bóveda, y esta volviendo á

tomar su primera situación, zimbra y forma el movimiento de trepidación. El mismo ayre que hizo este primer esfuerzo, vá de rechazo 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...” (Languillo et al. 2007).

Solo hasta finales del siglo XVIII se pudo establecer la relación entre la teoría ondulatoria y el movimiento sísmico y que la teoría de la deriva de los continentes, se expuso recién en 1912 por Alfred Wegener, quien refirió la existencia de una corteza terrestre dividida en placas que se desplazaban sobre el manto de la tierra e interactuaban entre sí. En 1963 la teoría de la expansión de los fondos oceánicos complementó la anterior, según la cual los fondos marinos se mueven arrastrando a los continentes, generando y consumiendo placas. Estas dos últimas teorías consolidaron la “tectónica de placas” que explica actualmente el origen de los terremotos.

CONCLUSIONES

El hecho de que durante el siglo XVII no se tuvieran las herramientas y conceptos modernos para proyectar estructuras no invalida el cálculo tradicional con el que se levantaban los edificios antiguos, a la par que se desarrollaba una arquitectura sismo-resistente.

La relación de criterios y análisis de sismorresistencia que se han mostrado evidencia que los constructores limeños del siglo XVII desarrollaron un cálculo tradicional, fruto de la experiencia y de la atenta observación de las lesiones que producían los terremotos en las edificaciones, hasta materializarse en un procedimiento constructivo con proporciones y técnicas que habían demostrado en la práctica su funcionamiento.

Cada edificio que sobrevivía a los embates de los sismos era un referente de su diseño estructural para los alarifes y por el contrario cuando se producían colapsos se obtenía conclusiones de lo que no debía hacerse. Posiblemente 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 con lo que se calculaba en la antigüedad. La mejor prueba que el cálculo tradicional funcionaba es que los edificios históricos siguen en pie a pesar del tiempo, el abandono y los notables terremotos que han tenido que soportar.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arditi, Alvaro. s.f. Perú: Temblores y terremotos de Lima. Crónica histórica. Lima.
- Archivo Arzobispal de Lima (AAL): Papeles importantes de la catedral, 1609, leg.6, exp.17a / Leg.4, f.3v.
- Archivo del Cabildo Catedralicio (ACC): Libro de fábrica, 1688, f.70r / f.71v - 72r / f.95v.
- Archivo del Cabildo Metropolitano de Lima (ACML): Parecer de Diego Guillen / Libro de fábrica, 1614-1615, 1:f.15r / Libro de fábrica, Vol.1, f.38r-f.40v.
- Archivo General de Indias (AGI): Archivo de Lima, leg.78 / leg.511, Expediente sobre la reedificación de Lima, 1746 / leg.95, 28 de marzo de 1610.
- Archivo General de la Nación (AGN): Inquisición, escribano Marcelo Antonio de Figueroa, 1665, protocolo 651, f.802.
- 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. s.f. ¿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.
- Crespo Rodríguez, 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.
- Feijoo y Montenegro, B. G. 1774. Cartas eruditas, y curiosas, en que, la mayor parte, se continua el designio, del teatro critico universal, impugnando, o reduciendo a dudosas, varias opiniones comunes. Tomo quinto. Madrid: Joachim Ibarra, Impresor de cámara de S.M.
- Gordon, J. E. 2004. Estructuras o porqué las cosas no se caen. Madrid: Calamar Ediciones.
- Huerta Fernández, Santiago. 2004. Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica. Madrid: Instituto Juan de Herrera.
- Hurtado Valdez, Pedro. 2009a. La restauración de edificios construidos con tierra en zonas sísmicas: la experiencia peruana. En *Bia*, nº259, pp.99-114. Madrid: Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos de Madrid.
- Hurtado Valdez, Pedro. 2009b. 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.
- Iwaki, C.; Rubiños, Á.; Vargas, J. 2012. Sismorresistencia en las entrañas de Caral. En *Terra 2012. XIth Internacional Conference on the Study and Conservation of Earthen Architecture Heritage*. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Juan, Jorge y Antonio de Ulloa. 1748. Relación histórica del viage hecho de orden de S. Mag. a la America Meridional. Segunda parte, vol.3. Madrid: Antonio Marin.
- Languillo García-Barcena, Paulino y Federico Crespo García-Barcena. 2007. Los terremotos en la historia. *El Diario Montañés*. Santander. www.eldiariomontanes.es/20070914/opinion/articulos/terremotos-historia-20070914.html.
- Llano y Zapata, José Eusebio. 1755. Respuesta dada al rey nuestro señor D. Fernando el Sexto, sobre una pregunta, que S.M. hizo á un matematico, y experimentado en las tierras de Lima, sobre el terremoto, acaecido en el dia primero de noviembre de 1755. Sevilla: Imprenta Real de la Viuda de D. Diego Lopez de Haro.
- San Nicolás, Fray Laurencio de. 1639. *Arte y Uso de Arquitectura*. Primera y Segunda Parte. Madrid: s.i. (facs. Ed. Madrid: Albatros, 1989).
- Vera Boti, Alfredo. 2010. La arquitectura militar del Renacimiento a través de los tratadistas de los siglos XV y XVI. Tesis doctoral. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia, Escuela Técnica Superior de Arquitectura.