

# Sistemas sismorresistentes en la arquitectura histórica de fábrica: analogías entre los sistemas de las catedrales góticas españolas y las mezquitas y palacios iraníes

## *Earthquake-resistant systems in the historical masonry architecture: analogies between the systems of Spanish Gothic cathedrals and Iranian mosques and palaces*

Enrique Ramírez-Sánchez<sup>(\*)</sup>, María Josefa Cassinello-Plaza<sup>(\*)</sup>

### RESUMEN

La presente investigación forma parte de una tesis doctoral destinada a caracterizar diferentes sistemas sismorresistentes utilizados en la arquitectura histórica de fábrica. El objetivo es analizar y clasificar en tipos estructurales y constructivos estos sistemas, en gran medida, todavía desconocidos. Contribuir a disipar esta laguna del conocimiento representa un importante avance, no solo para continuar completando la historia del patrimonio histórico construido, sino también en cuanto se refiere a la posibilidad de realizar una racional conservación de este importante legado. La metodología analítica seguida es la misma que se utilizó, hace 17 años, en el caso de la catedrales góticas españolas, que sirven de referencia a la investigación en curso. El artículo pone de manifiesto las diferencias y analogías existentes entre los sistemas sismorresistentes detectados en las construcciones de fábrica histórica sismorresistentes analizadas en España e Irán.

**Palabras clave:** Arquitectura histórica de fábrica; Sistemas sismorresistentes; Catedrales góticas; Mezquitas iraníes.

### ABSTRACT

*This research is part of a doctoral thesis aimed at characterizing different earthquake-resistant systems used in historical masonry architecture. The objective is to analyze and classify these systems, to a large extent, still unknown, into structural and constructive types. Contributing to dispel this knowledge gap represents an important advance, not only to continue completing the history of the built historical heritage, but also in terms of the possibility of carrying out a rational conservation of this important legacy. The analytical methodology followed is the same that was used, 17 years ago, in the case of the Spanish Gothic cathedrals, which serve as a reference for the ongoing investigation. The article highlights the differences and analogies between the earthquake resistant systems detected in the historic earthquake-resistant masonry buildings analyzed in Spain and Iran.*

**Keywords:** Historical masonry architecture; Earthquake-resistant systems; Gothic cathedrals; Iranian mosques.

(\*) Escuela Técnica Superior de Arquitectura – Universidad Politécnica de Madrid (España).

Persona de contacto/Corresponding author: [enriqueramirez89@gmail.com](mailto:enriqueramirez89@gmail.com) (E. Ramírez)

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5315-0147> (E. Ramírez); <http://orcid.org/0000-0002-2343-3170> (M.J. Cassinello)

---

**Cómo citar este artículo/Citation:** Enrique Ramírez-Sánchez, María Josefa Cassinello-Plaza (2021). Sistemas sismorresistentes en la arquitectura histórica de fábrica: analogías entre los sistemas de las catedrales góticas españolas y las mezquitas y palacios iraníes. *Informes de la Construcción*, 73(564): e413. <https://doi.org/10.3989/ic.86023>

**Copyright:** © 2021 CSIC. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento 4.0 Internacional (CC BY 4.0).

Recibido/Received: 12/11/2020  
Aceptado/Accepted: 22/12/2020  
Publicado on-line/Published on-line: 26/11/2021

## 1. INTRODUCCIÓN, HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

Hasta el inicio del siglo XIX, con la gran difusión del uso de nuevos materiales como el hierro y el hormigón, las obras arquitectónicas más ambiciosas y relevantes, de cada cultura, se construyeron con esqueletos estructurales de fábrica, ya fuese mediante sillares de piedra, ladrillos cerámicos o de adobe.

Con el paso de los siglos, estos esqueletos estructurales fueron evolucionando y desarrollando diferentes sistemas constructivos dentro de un proceso pausado pero constante, respondiendo de manera específica a las tradiciones constructivas, materiales disponibles y cultura de cada lugar. Pero con independencia de la diversidad de estos aspectos y momento de la historia, en todo lugar donde la Tierra tembló con fuerza, destruyendo sus construcciones, existió la misma e imperiosa necesidad, la de garantizar su estabilidad física frente a los sismos acaecidos. Por ello, es bien conocida la lógica y –desvelada hipótesis– de que todas las construcciones históricas de fábrica construidas en zonas sísmicas, y que se han mantenido en pie hasta nuestros días, cuentan con estructuras sismorresistentes que les han permitido permanecer estables frente a las cargas dinámicas que les han producido los sismos surgidos a lo largo del tiempo. También existen otras edificaciones de las que hoy tan solo quedan unas ruinas con pequeños restos en pie, que resistieron varios terremotos a lo largo de su vida, pero que finalmente no soportaron otros de mayor intensidad. Sin embargo, este hecho demuestra igualmente que, de una u otra manera, contaron con un esqueleto estructural sismorresistente.



Figura 1. Ruinas del Palacio de Ctesifonte (s.III). (Archivo Autor, 2019).

Este es el caso de las famosas ruinas del Palacio Taq-i Kisra construido en la ciudad de Ctesifonte, en el siglo III, cerca de la antigua Babilonia (Figura 1). Un palacio que ocupaba una planta de más de 10.000 m<sup>2</sup> y del que solo queda una parte de la gran bóveda catenaria que cubría su acceso, y parte de una de sus fachadas. Esta histórica bóveda es la de mayor tamaño construida con fábrica de ladrillo del mundo (1). Tiene 25,65 metros de luz de vano, una altura de unos 38 metros y de largo tenía 42,93 metros. A lo largo de 15 siglos se mantuvo en pie pese a sufrir diversos sismos (2). Fue el terremoto ocurrido en el año 1880 el que arrasó el palacio, quedando la bóveda tal y como se ve en la imagen. Seguramente fue de mayor intensidad, y además es muy probable que los anteriores sismos produjeran deformaciones geométricas en sus fábricas, y aunque continuaron siendo estables, sin duda fueron debilitando su capacidad de adaptación a nuevos estados de equilibrio, deteriorando las uniones de los diferentes elementos de su esqueleto estructural.

Por otra parte, hay que tener presente que, en cada lugar y momento histórico, el hombre agudizó su ingenio de maneras diferentes, generando una gran diversidad de tipos estructurales y constructivos sismorresistentes, adaptados a las tradiciones y cultura de sus arquitecturas. Hoy, en el siglo XXI, muchos de ellos todavía son desconocidos, otros han sido recientemente desvelados y otros muchos han sido modificados por intervenciones posteriores a su construcción. Es el caso del largo proceso de investigaciones previas a la restauración del icónico Partenón de la Acrópolis de Atenas, durante el cual se han descubierto detalles constructivos sismorresistentes, que permitirán una más adecuada intervención (3).

El estudio de edificios históricos construidos con fábricas, en zonas de alto riesgo sísmico, nos puede proporcionar el valioso conocimiento específico de los sistemas sismorresistentes de cada edificio analizado. Pero solo la puesta en común de su conjunto nos permite establecer parámetros comunes y/o diferentes y realizar clasificaciones globales, cuya utilidad tiene un mayor alcance y repercusión en este campo del conocimiento, y puede contribuir a difundir los sistemas sismorresistentes históricos unidos a modelos de actuación adecuados, que contemplen la necesidad de la conservación estructural preventiva frente a los sismos futuros. Por esta razón, el objetivo de la investigación de la tesis doctoral que se está realizando, es analizar algunos de los muchos esqueletos estructurales de fábrica de arquitecturas históricas construidas en diferentes países de alto riesgo sísmico. La intención es contribuir, en mayor o menor medida, a la necesaria investigación que debe extenderse a la arquitectura construida en todas las zonas sísmicas de la Tierra. El presente artículo recoge parte de los resultados de la investigación realizada sobre diversas construcciones de Irán y su análisis comparativo con las investigaciones realizadas hace 17 años sobre las catedrales góticas españolas, que dio lugar al descubrimiento de la existencia de catedrales que cuentan con efectivos sistemas sismorresistentes, y a la primera clasificación realizada del conjunto catedralicio español en tipos estructurales y constructivos realizada por la profesora M.J. Cassinello (4).

## 2. SISMOS HISTÓRICOS EN ESPAÑA E IRÁN

En las culturas de la antigüedad los sismos fueron interpretados como un castigo divino. El hombre no podía entender que, algunas veces, la Tierra temblara con gran fuerza, trágandose en sus entrañas ciudades y montañas. Sin embargo, también hubo diferentes teorías desarrolladas por algunos hombres de ciencia, como Aristóteles, que buscaron explicaciones en el natural comportamiento de la Tierra. Al igual que Séneca, Aristóteles pensaba que los terremotos eran debidos a fuertes movimiento del aire y el agua en las supuestas cavernas que existían en las profundidades de la Tierra. La preocupación por entender y poder predecir los terremotos forma parte de la propia historia del hombre. Con el paso de los siglos los conocimientos científicos fueron avanzado, pero la sismología, tal y como la conocemos hoy en día, no nació hasta el siglo XX. Sin embargo, los hombres de diferentes épocas anteriores al desarrollo de la ciencia de la sismología y de diferentes lugares, fueron capaces de realizar la inexplicable hazaña de construir edificios sismorresistentes. Muchos de ellos pertenecen al Patrimonio de la Humanidad, entre otros; el Partenón de la Acrópolis de Atenas (Grecia), el Panteón de Roma y su Coliseo (Italia), Santa Sofía de Estambul (Turquía), y las Catedrales Góticas construidas en la zona

mediterránea (España), que se mantienen en pie pese a haber sufrido varios sismos a lo largo de los siglos.

Solo el hecho de haber sido testigos oculares de los daños producidos por los sismos, pudo ser la causa de la introducción en sus arquitecturas de sistemas sismorresistentes, que posteriormente fueron integrados en la cultura constructiva de cada lugar. Por ello es importante conocer los sismos históricos acaecidos mientras este Patrimonio era construido. Por otra parte, hay que tener presente que la documentación sobre los sismos históricos se conoce mediante relatos de la época, en los que se dice lo que ocurrió, la cantidad de vidas que se perdieron, los edificios que fueron dañados o desaparecieron. En base a estos relatos diferentes autores han determinado posibles rangos de intensidad de estos terremotos, pero no existe un real conocimiento de su magnitud (5).

*En este tiempo tremió mucho la tierra en el Real e más en la ciudad de Granada, e mucho más en la Alambra, donde derribó algunos pedazos de la cerca della. En este mesmo año tremió mucho la tierra en el Reyno de Aragón, especialmente en Barcelona y en algunos lugares del Principado de Catalueña y en el Condado de Ruisellón, é fueron por ello despoblados algunos lugares é derribadas algunas iglesias.* Alvar García de Santa María, 1431.

CIUDAD ZONA	CONSTRUCCIÓN CATEDRAL Fecha Inicio* (parte gótica)	ALGUNOS SISMOS AÑO	( Siglos IX – XVII ) INTENSIDAD MSK
CORDOBA	1.532	880-944-955 957-971-973-9	VIII - VII - VIII d - d - d - d
CADIZ	1.263	881	IX
ANDALUCIA	-----	1.013-1.024-1.079 1.356-1.357-1.431-1.680	d - X - X X-IX-X-IX
MURCIA	1.388	1.048-1.049-1.644-1.674	VIII-IX-VIII-IX
CATALUÑA	-----	1.152-1.373-1.427 1.428-1.431-1.448	X-IX-VIII VIII-VIII-VIII
GERONA	1.312*	1.152-1.427-1.428-1.448	VIII-VIII-IX-IX
BARCELONA	1.298*	1.152-1.427-1.448	VIII-VIII-IX
JAEN	1.368	1.169-1.221-1.668	X-IX-VIII
SEVILLA	1.403*	1.353-1.464-1.466	VIII-X-VIII
HUESCA	1.313	1.373	VIII
VALENCIA	1.262*	1.396	IX
ALMERIA	1.524*	1.406-1.487-1.518	IX-IX-IX
GRANADA	1.507	1.431-1.522-1.526-1.531	X-X-VIII-X

Figura 2. Catedrales góticas españolas y terremotos (M.J. Cassinello, 1991).

Los datos recogidos en la tabla (Figura 2) dejan patente los devastadores terremotos ocurridos en los lugares donde se construyeron las catedrales góticas españolas de la costa mediterránea. Los maestros medievales aprendieron a construirlas de maneras diferentes tras contemplar como los sismos las destruían. Este fue el caso de la primitiva catedral de Almería, construida sobre la anterior mezquita árabe, que se derrumbó por completo, igual que la casi totalidad de la ciudad, durante el tsunami de grado estimado en la Escala Mercalli de X a XI, ocurrido el 22 de septiembre de 1522. El más destructivo ocurrido en España. Posteriormente, la catedral fue levantada de nuevo – esta vez con esqueleto sismorresistente– y se ha mantenido en pie hasta la fecha, pese a haber soportado otros tres terremotos de alta intensidad.

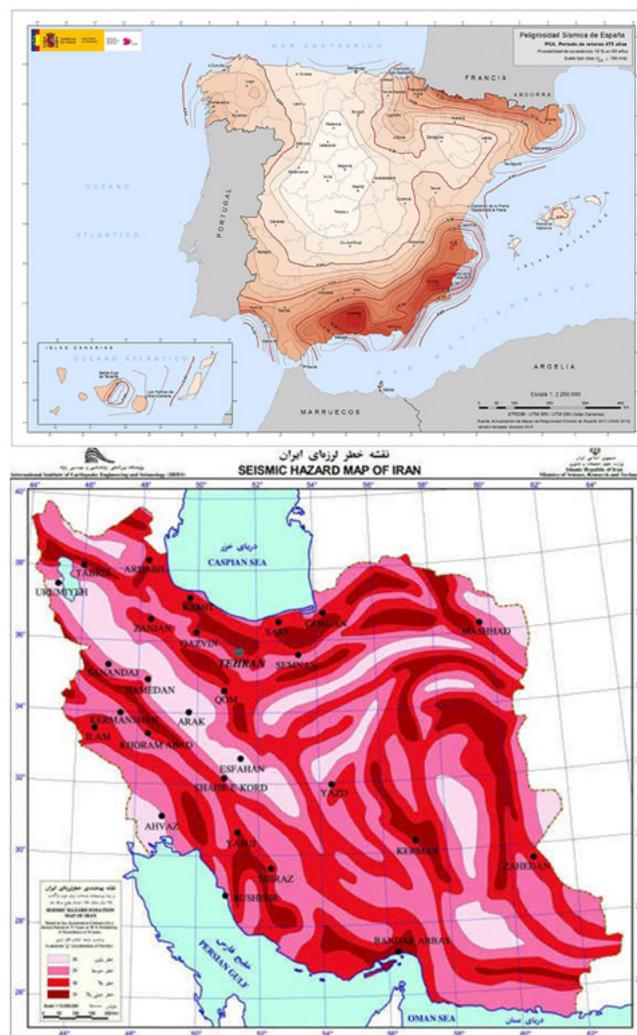


Figura 3. Riesgo sísmico en España (IGN, 2015) e Irán (IIEES, 2001).

En el caso de Irán se trata de uno de los países con más riesgo sísmico del mundo, dado que en él se juntan cuatro placas tectónicas; la placa Euroasiática, la Arábica, la India y la Africana (Figura 3). Por ello ha sufrido muchos más terremotos que España. Históricamente casi todo el país ha sufrido terremotos. Algunas de las zonas más afectadas han sido; Isfahán, Mashad, Tabriz, Urmia, Varamin, Yazd y Zanja (6).

REGIÓN ZONA	CONSTRUCCIÓN Y FECHA (SIGLO)	ALGUNOS SISMOS HISTÓRICOS (Siglos VIII-XVIII) AÑO	VÍCTIMAS REPORTADAS
ISFAHAN	Menar Jonban (XV) Mausoleo del sultán Bakht Aqa (XIV)	853 / 958 / 1755 / 1824	+1.000 / +1.000 / 40.000 / +1.000
MASHAD	Mausoleo del Iman Reza (XV) Mezquita Goharshad (XIV)	856 / 943 / 1052 / 1209 / 1270 / 1493 / 1498 / 1673 / 1678 / 1695	200.000 / 5.000 / +1.000 / +1.000 / 30.000 / +1.000 / +1.000 / 5.600 / +1.000 / +1.000
TABRIZ	Puerta Arg-e-Tabriz (XIV) Mezquita Azul de Tabriz (XV)	893 / 1042 / 1304 / 1641 / 1667 / 1679 / 1721 / 1727 / 1780	150.000 / 40.000 / +1.000 / +1.000 / 80.000 / 7.600 / 40.000 / 77.000 / 50.000
URMIA	Mezquita Rezayieh (XIII)	893 / 1042 / 1304 / 1641 / 1667 / 1679 / 1721 / 1727 / 1780	150.000 / 40.000 / +1.000 / +1.000 / 80.000 / 7.600 / 40.000 / 77.000 / 50.000
VARAMIN	Mezquita de los viernes (XIV)	855 / 856 / 1119 / 1127 / 1177 / 1485 / 1498 / 1608 / 1665 / 1678	+1.000 / 45.000 / +1.000 / +1.000 / +1.000 / +1.000 / +1.000 / +1.000 / +1.000 / +1.000
YAZD	Mezquita de los viernes (XIV) Mezquita Dahouk (XV)	734/1344/1459/1591/1752	- / - / - / - / - -/Ms=5,7/Ms=6,6/Ms=5,9/Ms=5
ZANJAN	Mausoleo de Soltaniyeh (XIV) Tumba de Molla Hassan Kashi (XVI)	893 / 1042 / 1304 / 1641 / 1667 / 1679 / 1721 / 1727 / 1780	150.000 / 40.000 / +1.000 / +1.000 / 80.000 / 7.600 / 40.000 / 77.000 / 50.000

Figura 4. Irán. Mezquitas y terremotos (Autor del artículo, 2018).

Gran parte de sus mezquitas y palacios han sufrido tantos terremotos de gran magnitud, que al igual que el caso del Palacio Taq-i Kisra construido en la ciudad de Ctesifonte, en el siglo III, cerca de la antigua Babilonia, muchos de ellos han sido reconstruidos parcial o totalmente. Este es el caso, entre otros muchos, de la Mezquita Azul de Tabriz construida en 1465, que soportó 3 graves terremotos (Figura 4), pero sucumbió casi totalmente en el terremoto de 1727. Fue reconstruida en el año 1973.

### 3. SISTEMAS SISMORRESISTENTES

A la vista de las devastadoras destrucciones provocadas por los terremotos ocurridos en la zona mediterránea de España, los maestros medievales que construyeron las catedrales góticas de esta amplia zona, crearon un nuevo tipo estructural y constructivo sismorresistente, muy alejado de las características del modelo francés utilizado en las zonas de menor riesgo sísmico de España y del resto de países de Europa que cuentan con catedrales góticas. Es curioso que algunas de las características del modelo sismorresistente de las catedrales góticas españolas han estado a la vista desde que fueron construidas sin que nadie tomara conciencia de ello. Fue necesario tener una visión global de las mismas, superponer las fechas de los sismos históricos con la de la construcción de las catedrales góticas españolas para poder constatar algunos aspectos constructivos y estructurales específicos, mediante toma de datos in situ y ensayos en laboratorio INTEMAC (7), aprovechando el estado de fisuración de algunas y las obras de restauración realizadas en otras durante el periodo de análisis.

#### FORMA GEOMÉTRICA

En primer lugar, estas catedrales no adoptaron la forma geométrica de cruz en su planta. Se levantaron sobre plantas rectangulares, generando así volumetrías de cajas cerradas - sin alas- ya que estas se hubieran desprendido del volumen de la nave central bajos las cargas dinámicas que producen los sismos, dado que su vibración hubiera sido muy diferente. En la figura 5 se recogen las plantas de la catedral de Burgos, en forma de cruz, y las de Sevilla y la iglesia de Santa María del Mar de Barcelona, de plantas rectangulares sin alas.

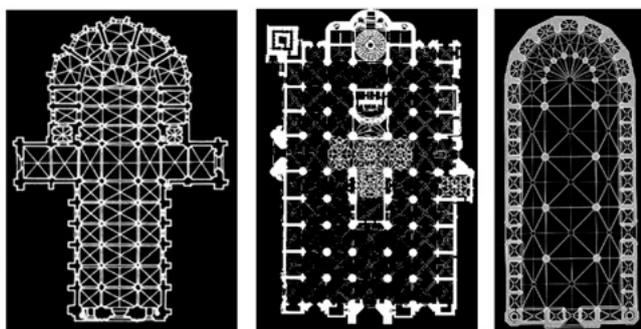


Figura 5. Burgos, Sevilla y Sta. María del Mar (M.J. Cassinello, 2003).

Se puede observar que esta geometría de caja cerrada incluye en su interior los contrafuertes de sus bóvedas, potenciando la compacidad de su modelo resistente. Es curioso como en el caso de las mezquitas y palacios construidos en Irán, mucho antes de que se construyeran las catedrales medievales, la imposición de “compacidad geométrica” ya fue una de las características de sus construcciones, respondiendo así a una premisa fundamental de su estabilidad frente a la abundan-

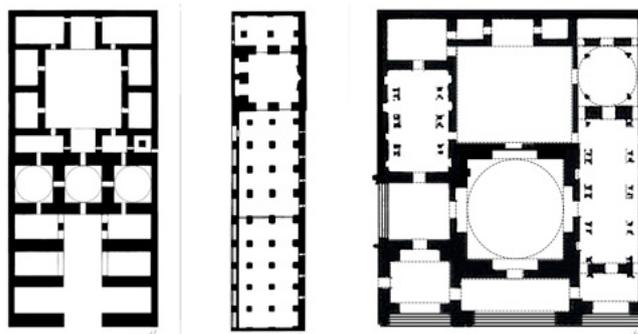


Figura 6. Plantas: Palacio Ardacher en Firuzabad, Mezquita Reza-yieh y Palacio sasánida de Sarvestan (Autor del artículo, 2019).

te existencia de sismos en este país. Se trata igualmente de volumetrías a modo de cajas cerradas. Baste recordar aquí algunos ejemplos de diferentes épocas, como el Palacio de Ardacher en Firuzabad (año 224 d.C.) y la Mezquita Rezayieh (siglo XIII) situada en Urmia, de plantas rectangulares y el Palacio sasánida de Sarvestan (siglo V d.C.) de planta cuadrada, obra maestra de la arquitectura (Figura 6).

#### CUBIERTAS

Otra característica fundamental que diferencia estas construcciones sismorresistentes históricas son sus cubiertas. Las cubiertas de las catedrales góticas españolas construidas en zonas de alto riesgo sísmico, en lugar de estar construidas con cubiertas inclinadas apuntadas cubriendo sus bóvedas, como en la catedral de Notre Dame de París (Figura 7), elemento fundamental de la reconocible imagen del estilo gótico, estas catedrales sismorresistentes eliminaron este tipo de cubiertas debido a que las cargas dinámicas de los sismos favorecerían su caída sobre las bóvedas. En su lugar construyeron cubiertas planas, aterrazadas y en algunas ocasiones, cuando el extradós de la bóveda pétreo alcanza gran altura, la bóveda emerge sin más cubrición que un revestimiento de la misma piedra, como es el caso de la nave central de la catedral de Sevilla (8) (Figura 8).



Figura 7. Notre Dame de París (Fragmento postal, 2018).

En el caso de las Mezquitas y Palacios de Irán ocurre lo mismo. Sus cubiertas son planas, aterrazadas y tan solo emergen las cúpulas, que suelen ser esféricas, en ocasiones de sección parabólica y en otros casos apuntadas de diferente trazado geométrico que los arcos apuntados del gótico. Se trata de cúpulas, generalmente construidas sobre pechinas, que al-



Figura 8. Catedral de Sevilla (Fragmento postal, 1993).

canzan mayor altura sobre la cubierta plana que las bóvedas de crucería góticas. Su extradós emerge si más revestimiento que la propia fábrica de las bóvedas, sean de piedra, ladrillo o adobe. Generalmente existen dos o más tamaños diferentes de cúpulas y/o bóvedas cilíndricas. Las que cubren pequeñas estancias que son de menor altura, y la cúpula principal que muchas veces se levanta a demás sobre tambores rectangulares, resultando más visibles y altas, configurándose, como un hito reconocible en el horizonte de la ciudad, como en la Mezquita Rezayieh (siglo XIII) situada en Urmia (Figura 9).



Figura 9. Mezquita Rezayieh (s.XIII), Urmia (Fragmento postal, 2019).

Por otra parte, la zona de acceso a las mezquitas y palacios de Irán, llamada *iwam*, es una antesala de acceso cubierta y flanqueada por una gran puerta de fábrica, generalmente de mayor altura que el resto de la construcción. La estabilidad de estas grandes puertas está garantizada por el hecho de no ser simples muros de fábrica, sino que adquieren una gran sección transversal para albergar en su coronación una media cúpula. Resultan ser grandes nichos de extradós plano. En otros casos el *iwam* está cubierto por bóvedas cilíndricas como en la Mezquita de Tarikhane (año 300 d.C) en la ciudad de Damghan, que está considerada como una de las más antiguas de Irán (Figura 10).



Figura 10. Mezquita de Tarikhane, año 300 d.C. (Fragmento postal, 2019).

Es suficientemente significativa la gran similitud existente entre las construcciones históricas ejecutadas en las zonas sísmicas de la Tierra con independencia de su estilo arquitectónico, época y lugar. Es un hecho que, ante el imperativo de la búsqueda de la estabilidad de sus construcciones frente a las cargas dinámicas que produce el sismo, el hombre, testigo ocular de las destrucciones acaecidas a lo largo de la historia, fue capaz de detectar que las formas geométricas más adecuadas frente a sismo son las rectangulares (9) (10). Paralelepípedos compactos dotados de cubiertas planas. El mismo modelo que siguieron las Catedrales Góticas españolas de la zona mediterránea y las Mezquitas y Palacios de Irán, que al ser uno de los lugares de mayor sismicidad, se construyeron de igual manera en casi todo su territorio (11).

### ENTRAMADOS DE ENJUTAS

Con independencia de la gran importancia sismorresistente de su compacta geometría paralelepípeda, hecho constatable a simple vista, lo más relevante fue el descubrimiento de la existencia de un entramado murario ortogonal que ata y rigidiza los esqueletos estructurales de las catedrales españolas construidas en zonas sísmicas (Figura 11). Este entramado está formado por las enjutas de los arcos (Figura 12) (12), los cuales en la mayor parte de las catedrales permanecen ocultos bajo sus cubiertas aterrazadas. Pero en algunos casos,

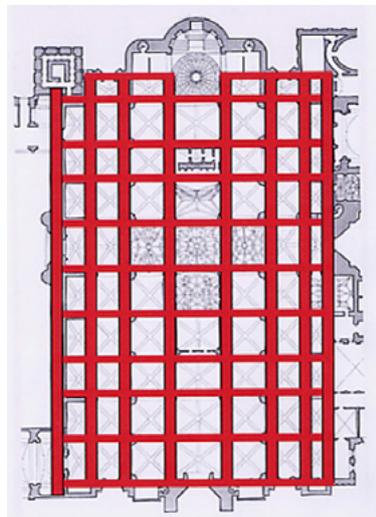


Figura 11. Catedral de Sevilla. Enjutas (M.J. Cassinello, 1999).

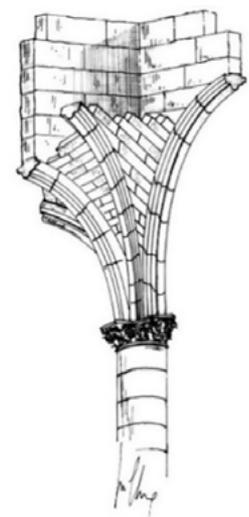


Figura 12. Arcos enjutados (M.J. Cassinello, 1999).

como en la Catedral de Sevilla, las cubiertas de algunas de sus naves no son aterrazadas dada la gran altura que alcanzan sus bóvedas, por lo que el extradós de las bóvedas emerge sin más recubrimiento que una capa de piedra que reproduce su forma geométrica (Figura 8).

Cada bóveda está construida dentro del marco rígido que forman los cruces de las enjutas de sus arcos fajones y formeros. De esta manera la deformación de las bóvedas está limitada por su marco rígido de enjutas, manteniéndose dentro del conjunto del entramado murario que ata y rigidiza toda la catedral e impide que el desplome de una bóveda arrastre a sus contiguas. Incluso las barandillas pétreas que coronan las fachadas sobre las enjutas de los arcos formeros nos hablan de su específico diseño sismorresistente (Figura 13). También los arbotantes están atados mediante los cruces espaciales de sus diferentes naves (Figura 8 y Figura 11), incluyendo pilastras intermedias rematadas con gruesos pináculos, cuyo peso contribuye a asegurar la junta estabilizando el cruce.

Es muy esclarecedor el hecho de que las catedrales góticas españolas que se construyeron en zonas de bajo riesgo sísmico, y donde no ocurrieron grandes terremotos mientras

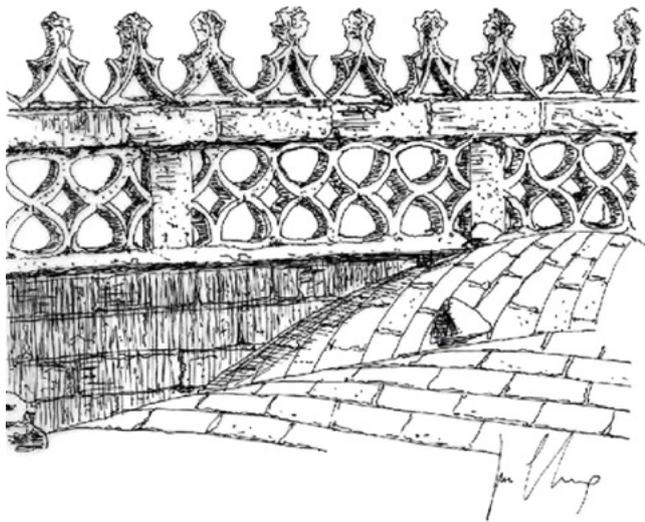


Figura 13. Bóveda enjutada Catedral de Sevilla (M.J. Cassinello, 1999).

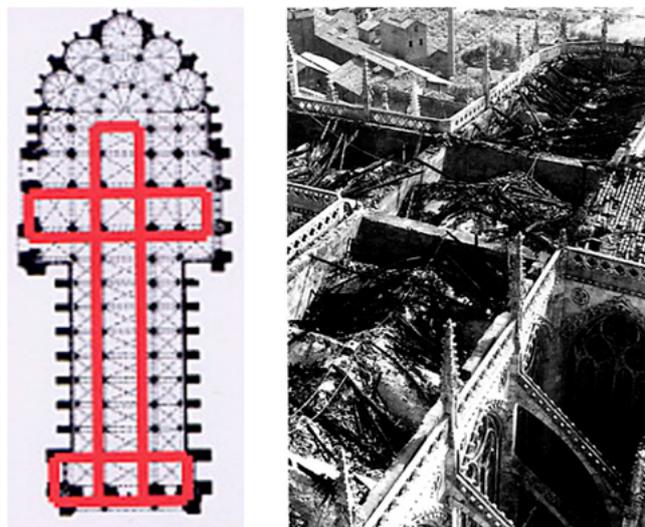


Figura 14. Enjuntamiento de la Catedral de León (M.J. Cassinello, 1999).

se construían, no están totalmente enjutas. Su esqueleto estructural sigue el modelo francés, al igual que su geometría con alas – planta en cruz- y sus cubiertas inclinadas. Se trata de tipos estructurales y constructivos muy diferentes. El modelo francés está diseñado para ser estable frente a las cargas de su propio peso, contención de empujes de sus bóvedas y de las cargas dinámicas que produce el viento en sus empinadas cubiertas. En aquellas que alcanzaron mayor altura, tuvieron que añadir otro arbotante con este fin. Pero el grado de enjuntamiento de estas catedrales es mucho inferior, no existiendo un entramado de enjutas que ate toda la catedral (5).

Este hecho queda patente observando la nave central de la Catedral de Toledo tras la pérdida de sus cubiertas inclinadas en el incendio que sufrió el 29 de mayo de 1966 y la Catedral de Notre Dame de París tras el incendio sufrido en 2019. Las bóvedas de la nave central solo cuentan con el enjuntamiento continuo de sus arcos formeros, pero no existen enjutas en sus arcos fajones (Figura 14). No existe un entramado murario ortogonal que ate y rigidice el conjunto del esqueleto estructural de la catedral frente a sismo. Se trata de un esqueleto estructural muy diferente al de la catedral de Sevilla, la de Almería, Barcelona, Santa María del Mar y el resto de las construidas en la costa mediterránea española (5).

Eugène-Emmanuel Viollet-le-Duc Violet (1814-1879) nunca habló de la existencia de sistemas sismorresistentes en los esqueletos estructurales de las catedrales góticas (5). La razón no es otra que el hecho de que en sus escritos y en su famoso libro *Dictionnaire de l'architecture française du XI<sup>e</sup> au XVI<sup>e</sup> siècle*, analizó principalmente las construcciones góticas francesas, pero no el legado catedralicio de España (13). No en vano, fue el restaurador de muchas de las principales Catedrales góticas de Francia, entre ellas Notre Dame de París, a la que dotó de su famosa aguja pétrea, lamentablemente desaparecida tras el incendio sufrido en sus cubiertas el pasado 15 de abril del 2019. Sí habló, a través de sus fantásticos dibujos de la existencia de enjutas en las naves laterales de algunas catedrales francesas, pero como elemento estabilizador del arco, no como parte de un entramado sismorresistente, inexistente en las catedrales góticas francesas.

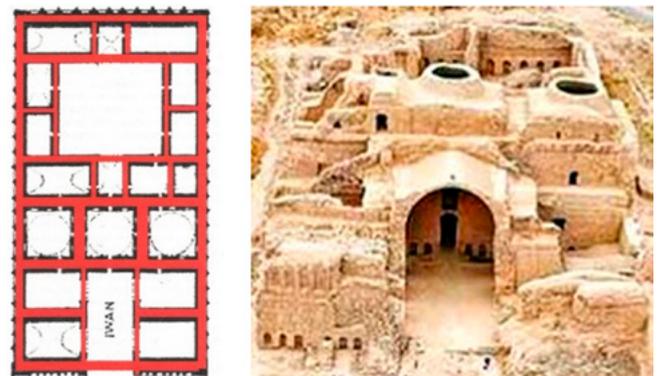


Figura 15. Palacio Ardacher. Firuzabad: Entramado de enjutas y ruina (Autor del artículo, 2019).

Siguiendo el análisis realizado por M.J. Cassinello, aunque nunca ha sido comentado, es fácil observar que las Mezquitas y Palacios construidos en Irán también cuentan con un entramado murario ortogonal que las ata y rigidiza frente a las cargas dinámicas de los fuertes y frecuentes sismos que

han sufrido a lo largo de su historia. La diferencia es que este entramado ortogonal no emerge generalmente sobre las cubiertas planas aterrazadas (Figura 8 y Figura 9), dado que sus bóvedas y cúpulas son de características muy diferentes. Se trata de cúpulas esféricas sobre pechinas o bóvedas cilíndricas. El entramado murario de enjutas sigue por ello la disposición de los diferentes arcos que definen estos tipos de bóvedas y de los muros de fábrica que delimitan los espacios a los que cubren (Figura 15).

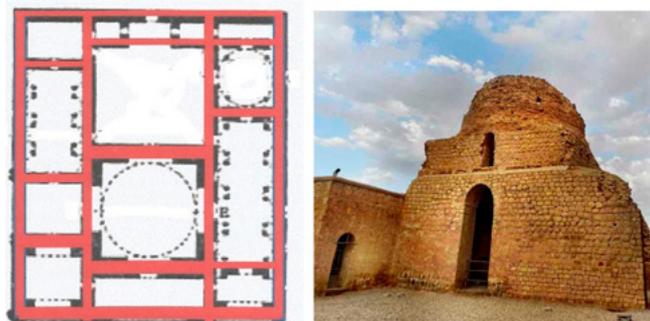


Figura 16. Palacio de Sarvestan. Entramado no simétrico de enjutas (Autor del artículo, 2019).

Se trata además de composiciones que no siempre son simétricas (Figura 16), al contrario del caso de las catedrales góticas, aspecto menos favorable para su estabilidad en caso de sismo. Pero el entramado murario ata la totalidad de sus esqueletos estructurales, hecho que ha permitido la supervivencia de algunas edificaciones de Irán tras sufrir terremotos muy frecuentes a lo largo de su vida. Esta permanencia a lo largo de los siglos, en algunas de ellas, deja patente su adecuado sistema sismorresistente (14). Aunque la alta sismicidad de este país nos ha legado multitud de ruinas, en las que tan solo han permanecido parte de sus Palacios y Mezquitas (15), muchas de ellas han sido ya restauradas (16). Otras, como las ruinas de las mezquitas y palacios más antiguos de Irán construidos en la de provincia de Fars, cercana a Shiraz, de muy alta sismicidad, fueron declarados en 2018 “Patrimonio de la Humanidad” en la categoría de “Paisaje Arqueológico Sasánida de la región de Fars”, al que pertenece el Palacio de Ardacher (Figura 15).

Una de las Mezquitas que ha sido reconstruida es la bella Mezquita Azul de la ciudad de Tabriz (siglo IX). El terremoto ocurrido en el año 1193 la destruyó casi por completo, desplomándose, no solo su gran cúpula sino también las de menor tamaño (17). Sus ruinas fueron inmortalizadas por el pintor francés Jules Laurens en 1872 (Figura 17).



Figura 17. Ruinas de la Mezquita Azul de Tabriz (Jules Laurens, 1872).

Su reconstrucción se inició en 1939 y finalizó en 1976. Se trataba de una mezquita de planta cuadrada y simétrica, con una cabecera saliente coronada por otra gran cúpula. Toda la mezquita estaba enjutada – atada – por el entramado de muros ortogonales que delimitan sus bóvedas. Sin embargo, los sismos ocurridos desde su construcción causaron su ruina. Tabriz es una de las zonas de mayor sismicidad (18). El elemento que fundamentalmente sobrevivió fue el *iwam* de cubierta abovedada. Sin duda el elemento de mayor rigidez del conjunto. La reconstrucción de la gran cúpula fue realizada por el profesor Reza Memarian, sin los minaretes y aparentemente alcanzando menor altura que la original, que superaba la altura del *iwam*.

## MINARETES, PINÁCULOS Y AGUJAS

Uno de los elementos verticales de mayor importancia dentro de la arquitectura iraní es sin duda el minarete de las mezquitas, que es especialmente vulnerable a la hora de afrontar las grandes sacudidas de los terremotos (19). Los parámetros que más influyen en su vulnerabilidad frente a sismo son su altura y esbeltez. Aunque existen muchos tipos y maneras de posicionarlos en el conjunto de las mezquitas, una de las más frecuentes es flanqueando los extremos de su fachada principal (Figura 18).

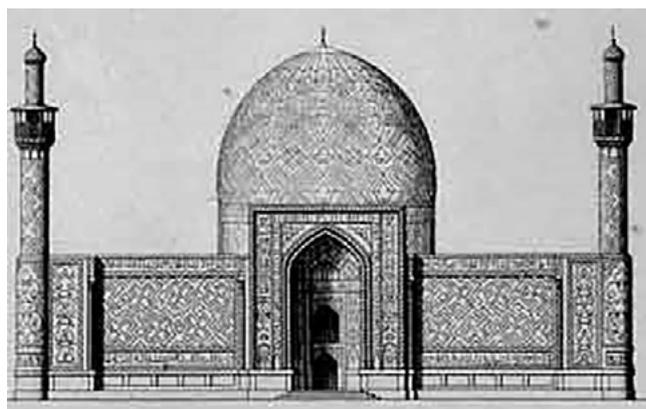


Figura 18. Alzado de la Mezquita Azul de Tabriz (Pascal Coste, 1867).



Figura 19. Menar Jonban, Isfahán (Autor artículo, 2019).

Su vulnerabilidad es la causa de que sean los elementos más dañados en caso de sismo. Sin embargo, existen algunos casos en los que se han mostrado efectivos frente a sismo, como los minaretes vibrantes de Isfahán, construidos hace ya más de 700 años (Figura 19). Estos minaretes presentan algunas singularidades

que les permiten ser estables. Con un diámetro exterior de 1,4 m en la parte inferior y 0,9 m en la parte superior, estos minaretes incluyen una escalera helicoidal en su interior que, lejos de suponer un problema grave a la hora de resistir un terremoto como sucede en otros casos, permite verificar la resistencia del minarete. Desde su interior, una persona puede hacer vibrar el minarete fácilmente sacudiéndolo levemente, provocando un pequeño oscilamiento que pone de manifiesto el funcionamiento de este sistema de amortiguación. Esto es posible gracias a dos cinturones horizontales de madera incrustados en la estructura de fábrica de cada minarete, tanto en el arranque de éste como en su remate. En los minaretes azaríes, la introducción de los *kalaafs* de madera aporta una ductilidad ciertamente efectiva en toda la estructura del minarete.

El caso de los pináculos de las catedrales góticas es muy diferente al de los minaretes iraníes. Se trata de elementos que nunca son exentos y cuentan con mucha menor altura y esbeltez que los minaretes iraníes. Con independencia de su carácter decorativo, genuino del estilo gótico defendido a ultranza por Violle-Le-Duc, los pináculos tienen una clara función estructural consistente, fundamentalmente, en evitar el deslizamiento de la junta entre el estribo y el arranque del arbotante, contribuyendo así, en menor o mayor medida a la estabilidad del conjunto (20). Este es el caso de la Catedral de Sevilla (Figura 20).



Figura 20. Pináculos de la Catedral de Sevilla (Fragmento postal, 1993).

Únicamente en las catedrales construidas en zonas de bajo riesgo sísmico se construyeron pináculos con mayores tamaños y alturas, casos en los que además de asegurar el no deslizamiento en las juntas, su peso puede contribuir a verticalizar la resultante del empuje de las bóvedas y altas cubiertas inclinadas. Son únicamente estas catedrales las que cuentan en ocasiones con esbeltas agujas ubicadas sobre la clave del crucero, como la lamentablemente desaparecida aguja de Notre Dame de París.

## BÓVEDAS

Las bóvedas de crucería pétrea de las catedrales góticas fueron sin duda una de las grandes hazañas construidas por el hombre. Buscando la luz natural en el interior del templo consiguieron con ellas dirigir y concentrar en puntos concretos las resultantes de las fuerzas actuantes. De esta manera liberaron el muro de su función portante, convirtiendo su gruesa masa pétrea en ligeras vidrieras de colores que inundan de luz la catedral. El sistema de contrarresto de las resultantes lo ubicaron en el exterior, configurándose su conjunto – *arbotantes, contrafuertes y pináculos* – en imagen icónica de esta nueva arquitectura (5).

Con independencia de que pertenezcan o no a catedrales sismorresistentes, en el caso de las bóvedas cuatripartitas, están formadas por el cruce de dos cañones que generan cuatro ple-

mentos pétreos de unos 10 o 12 cm de espesor, construidos de manera continua sobre seis arcos; dos formeros, dos fajones y dos diagonales. La clave de las bóvedas es una pieza pétrea de talla especial, situada en el cruce de los seis arcos, que sirve de unión de todos ellos. Los plementos se apoyan directamente sobre el extradós de estos seis arcos, y sobre estos se tendía una fina capa de mortero de cal. En las catedrales que no son sismorresistentes, las bóvedas se cubren con cubiertas inclinadas apoyadas en los muros de fachada mediante cerchas de madera. Se trata de bóvedas pétreas desnudas, sin más carga que la de su peso propio. Sin embargo, en las bóvedas de las catedrales góticas españolas sismorresistentes, sobre la última capa de mortero de cal tendida en su extradós, se ejecutaron gruesas capas de enjarrado – *tinajas cerámicas huecas envueltas en mortero de cal*– destinadas a la construcción de sus cubiertas planas aterrazadas. Pero si este enjarrado se hubiera ejecutado de manera uniforme en toda la altura de las bóvedas, desde sus hombros hasta sus claves (a veces de más de 10 m), las bóvedas hubieran tenido un gran incremento de peso pese al aligeramiento que las tinajas huecas representan. La excavación realizada en el extradós de la bóveda de San Pedro de la Catedral de Sevilla (7) desveló su específica y audaz configuración constructiva, no documentada previamente. En las cuatro esquinas del extradós de la bóveda aparecieron, a modo de bóvedas superpuestas, cuatro lunetos cilíndricos ejecutados en fábrica de ladrillo. El espacio entre ambas bóvedas queda así vacío, evitando que el enjarrado se realizara desde el arranque de la bóveda y minimizando así el peso sobre el extradós de la bóveda pétrea. Con esta específica configuración constructiva resulta que el incremento de peso del enjarrado está colocado de tal manera que contribuye a la estabilización de la bóveda, dado que la mayor carga debida a éste se concentra en las claves de sus arcos diagonales (Figura 21). Una audaz manera de construir las cubiertas planas aterrazadas. Esto no significa que todas las Catedrales Góticas sismorresistentes tengan esta misma configuración constructiva, pero probablemente sean muy semejantes. Hoy permanecen ocultas y por ello no documentadas.

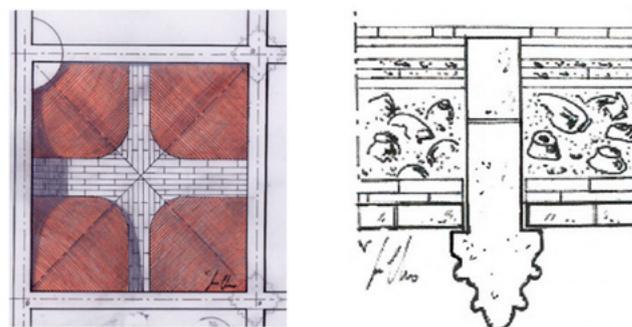


Figura 21. Bóvedas superpuestas y enjarrado (M.J. Cassinello, 2000).

Más de diez siglos antes, también los antiguos maestros iraníes agudizaron su ingenio para construir cúpulas y bóvedas de fábrica estables frente a las cargas dinámicas que producen los sismos (21) (22). Al contrario de las bóvedas de crucería góticas, las primitivas cúpulas y bóvedas iraníes reparten uniformemente sus resultantes en los muros en los que se apoyan (Figura 10). Pero también construyeron, a lo largo del tiempo, diferentes tipos estructurales y constructivos de cúpulas, levantadas sobre tambores prismáticos y pechinas, y con diferentes formas geométricas. Utilizaron también cúpulas nervadas que aportan mayor rigidez de forma y que dirigen sus resultantes hacia los pilares en los que descansan sus arcos principales (Figura 22) (23).

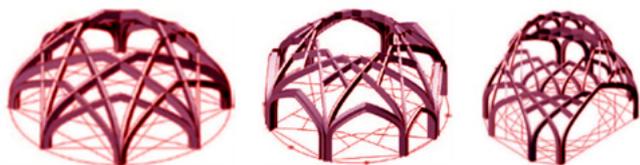


Figura 22. Entramados de nervaduras-arco (A. A. Mohammadi, 2019).

Muchas de las cúpulas iraníes son verdaderos entramados espaciales generados por el cruce de multitud de arcos entrelazados ejecutados en fábrica de ladrillos con diferentes leyes de traba que acompañan a la geometría de cada cúpula o bóveda. Existe por ello una enorme diversidad de formas resistentes de cúpulas y bóvedas de fábrica en las históricas mezquitas y palacios iraníes (Figura 22). Un ejemplo son las variadas cúpulas existentes en el Bazar de Tabriz (Figura 23). También en las catedrales góticas más tardías, se construyeron las llamadas cúpulas estrelladas, que en algunos casos son simples decoraciones pétreas, pero en otros son realmente entramados espaciales de arcos pétreos. Se realizaron generalmente cubriendo cimborrios o la nave del crucero, como en la catedral de Sevilla.

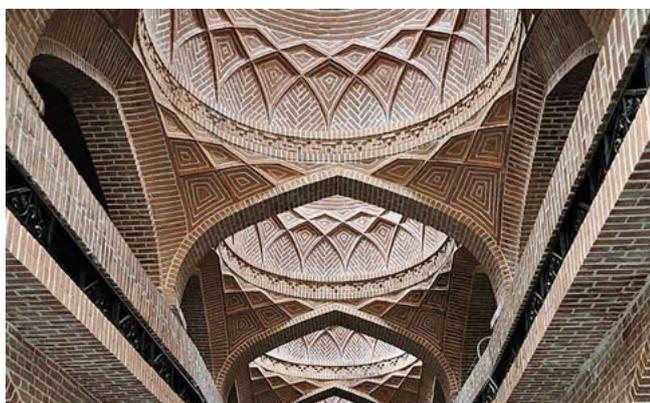


Figura 23. Bazar de Tabriz reconstruido (Autor del artículo, 2019).

Las grandes cúpulas iraníes adoptan formas de directriz apuntada, la más adecuada para ser construida con fábricas, material no resistente a tracciones (24). Se construyeron generalmente sobre gruesos tambores prismáticos que proporcionaban el necesario contrarresto de sus empujes, a la vez que acortaban el desarrollo de la cúpula en toda su altura, resultando más esbeltas desde el interior. En muchos casos fueron cúpulas dobles y triples unidas entre sí. Es el caso del santuario de Ali al-Rida, en Mashad, o la Mezquita del Imán, en Isfahán (siglo XVII) (25).

La hoja o cúpula exterior es la que alcanza mayor altura y se une a la interior mediante pequeños muretes colocados radialmen-

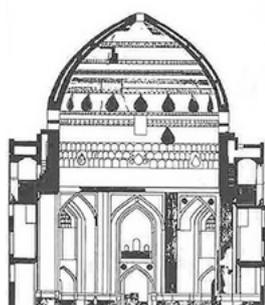


Figura 24. Nasser Goli, 2004.

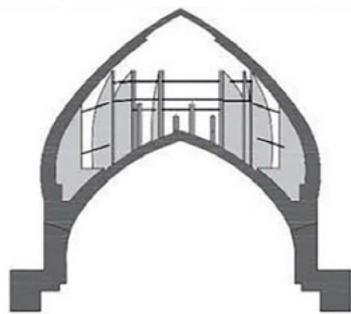


Figura 25. Nima Valibeig, 2017.

te entre ambas, que son denominados *Khashkhashis*. De esta manera el canto ante posibles flexiones generadas por cargas dinámicas es el formado por ambas hojas (Figura 24). En otros casos, en los que el vacío entre ambas hojas es de mayor tamaño, se han encontrado ingeniosos *Khashkhashis* formados por nervaduras y muretes de fábrica de ladrillo que refuerzan la sección resistente de la hoja exterior siguiendo su sección vertical, unidos a la hoja interior, no solo mediante nervaduras de fábrica sino también con entramados de madera que aportan mayor flexibilidad de movimientos, como en la Cúpula doble de Darbe-Imam (26) (Figura 25). Al vibrar la cúpula, esta red interior móvil de piezas de madera unidas entre sí consigue estabilizar la cúpula evitando su colapso, siempre en función del número de sismos de alta intensidad que cada mezquita o palacio sufra a lo largo de su vida, así como de la intensidad de estos y de sus periodos de duración. Dependiendo de todos estos factores pueden aparecer tan solo fisuras y grietas, desplomarse algunos elementos o colapsar por completo el edificio (27).

Una de las cúpulas más destacadas es la del Mausoleo de Il-khan Öljeitü (siglo XIV). Está situado al nordeste del Irán, en la provincia de Zanjan. Es conocido por su gran cúpula, llamada cúpula de Soltaniyeh (Figura 26). Se trata de una de las primeras cúpulas de *doble hoja* construidas en Irán. Se levanta sobre un tambor octogonal. Su altura desde el suelo es de 49 metros y su diámetro de 25,5 metros. En el año 2005 fue incluida como Patrimonio de la Humanidad y actualmente está en restauración.



Figura 26. Cúpula de Soltaniyeh, Zanjan (Autor del artículo, 2019).

## JUNTAS. DEFORMABILIDAD SELECTIVA

Es sabido que frente a las cargas dinámicas que producen los sismos es necesario que las construcciones sean capaces de deformarse sin alcanzar el colapso. Las fábricas históricas tienen la ventaja de que sus juntas de mortero permiten esta necesaria ductilidad.



Figura 27. Bóveda de la Catedral de Burgos (M.J. Cassinello, 2000).

La toma de datos en la Catedrales Góticas españolas dio a conocer los diferentes espesores de las juntas de mortero de cal de cada uno de los elementos del esqueleto estructural, así como sus leyes de traba. Curiosamente, resultó que en los elementos que demandan mayor rigidez, como es el caso de las enjutas y nervaduras de las bóvedas, se constató que cuentan con pequeños espesores de juntas (0,80 a 2,00 cm), incluso en algunos casos están ejecutadas casi “a hueso” (Figura 27). Sin embargo, los plementos pétreos, que necesitan mayor flexibilidad para adaptarse a las deformaciones de forma a lo largo del tiempo, cuentan con grandes espesores (2,50 a 3,80 cm). De esta manera se refuerza el adecuado funcionamiento estructural de las bóvedas, en las que sus plementos son más flexibles que las nervaduras en las que se apoyan, y en las catedrales sismorresistentes, además sus movimientos están restringidos al estar enmarcadas por el marco rígido que forman las *enjutas* de sus arcos fajones y formeros, que cuentan también con muy reducidos espesores de juntas.

La heterogeneidad fisicoquímica, reológica y mecánica de las fábricas pétreas antiguas constituye en sí misma una importante barrera para poder realizar con suficiente rigor científico la modelización de sus características fundamentales frente al análisis de su comportamiento estructural. Sin embargo, con el fin de cualificar este comportamiento estructural y cuantificar posibles rangos de variabilidad de su deformabilidad y resistencia, se realizaron en el laboratorio central de INTEMAC varios ensayos inéditos (28). Los resultados obtenidos demuestran, tal y como señaló Eduardo Torroja, que la junta de mortero es un factor determinante en el comportamiento estructural de la fábrica. En los ensayos realizados el rango de variabilidad del módulo de deformación alcanzó valores de 169,7 a 5.632,7 N/mm<sup>2</sup> con juntas de 5,50 a 17,00 mm. Este patrón de comportamiento estructural debe ser incluido en los modelos estructurales de edificios de fábrica histórica mediante un análisis de sensibilidad paramétrica para conocer el comportamiento estructural con mayor rigor.

Es increíble que los maestros medievales fueran capaces de construir las fábricas de las catedrales góticas con una *deformabilidad selectiva* en función de la demanda de rigidez de sus diferentes elementos estructurales.

La arquitectura tradicional iraní también presenta variación del espesor de las juntas de mortero según se trate de zonas de menor o mayor sismicidad. En Arg-e-Tabriz, situada en una de las zonas de mayor sismicidad de Irán, las juntas de mortero alcanzan hasta 5 cm de espesor (17). Sin embargo, no se han podido detectar grandes diferencias entre el espesor de mortero de las juntas de los arcos enjutados sobre los que arrancan las cúpulas y bóvedas y sus plementos nervados. Generalmente están revestidas de azulejos de colores y su gran altura necesitaría realizar su medición desde andamios colocados aprovechando labores de reparación. En cualquier caso, en los edificios iraníes analizados, no parece que existan criterios de *deformabilidad selectiva* en sus juntas de mortero como en las catedrales góticas. Los sistemas de estabilidad frente a sismo de las construcciones iraníes se basaron en otros aspectos como los ya comentados para los minaretes y cúpulas de doble hoja.

Otro aspecto interesante de las juntas entre los sillares pétreos de algunas catedrales góticas son los llamados *aberuadores* (Figura 28). Al igual que en la antigua Grecia y Roma

realizaron uniones de los sillares pétreos mediante llaves metálicas de hierro o bronce, que incrementaban su estabilidad frente a movimientos sísmicos, algunos maestros medievales utilizaron *-aberuadores-* entre los sillares de los pilares de las catedrales. Estas llaves consisten en la talla de canales en la cara superior de los sillares, o bien en sus laterales, en los que se vierte mortero (29).

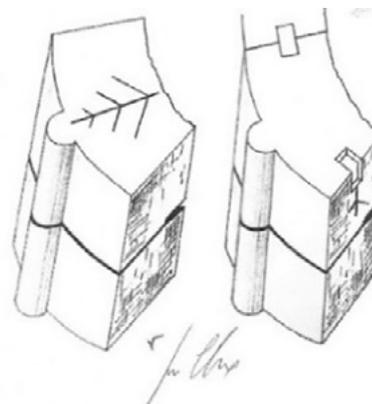


Figura 28. Aberuadores (M.J. Cassinello, 1999).

#### 4. CONCLUSIONES

En el presente artículo se recoge, por primera vez, un análisis comparativo entre las similitudes y diferencias fundamentales de los sistemas sismorresistentes de algunas de las más representativas construcciones históricas de España – Catedrales Góticas- y de Irán – Mezquitas y Palacios.

En ambos países existen zonas de mayor o menor sismicidad. Pero la gran diferencia entre ambos es que, mientras en Irán casi todo su territorio cuenta con alto riesgo sísmico, en el de España la mayor parte es de muy bajo riesgo sísmico, tan solo parte de su costa mediterránea, fundamentalmente Andalucía y Cataluña, cuentan una sismicidad necesaria de tener presente en las construcciones, pero muy inferior a la de Irán (Figura 3). Por esta razón en España existen catedrales góticas que pudieron seguir el modelo francés y otras que fueron construidas con un esqueleto estructural muy diferente para conseguir su estabilidad frente a terremotos. Sin embargo, las mezquitas y palacios iraníes se construyeron de manera similar en todo su territorio.

Tal y como se ha puesto de manifiesto en el presente artículo, ambas construcciones sismorresistentes -catedrales y mezquitas- cuentan con formas geométricas compactas y cubiertas planas en las que emergen el conjunto de sus bóvedas y cúpulas, existiendo en ambos casos un entramado ortogonal de enjutas - muros de fábrica - que atan el conjunto de sus construcciones y son capaces de absorber las acciones dinámicas producidas por los sismos. Es significativo que las zonas más sísmicas de España - Andalucía y Cataluña - cuenten con catedrales enjutas como Almería, Sevilla y Santa María del Mar, mientras que Castilla no enjuto sus catedrales (7).

Una de las mayores diferencias entre los sistemas sismorresistentes de las catedrales góticas y las mezquitas y palacios iraníes deriva de sus diferentes tipos de bóvedas, y las características del entramado ortogonal de enjutas, que rigidiza y ata el conjunto de sus construcciones frente a sismo.

Las bóvedas de las catedrales góticas sismorresistentes son bóvedas de crucería pétreo, que dirigen los empujes al sistema de contrarresto formado por arbotantes, contrafuertes y pináculos, al igual que en el caso de la mayor parte de las catedrales góticas, con independencia de ser o no sismorresistentes. La diferencia es que, para conseguir su estabilidad frente a sismo, fueron construidas sobre unas nervaduras en arco fuertemente enjutas, cuyo extradós horizontal emerge sobre las cubiertas planas proporcionándole a cada bóveda un marco rígido. Además, tal y como fue comprobado mediante ensayos físicos en el laboratorio central de INTEMAC, los plementos de las bóvedas son más deformables que sus nervaduras enjutas, dado que sus espesores de junta de mortero de cal son mucho mayores que los de estas. Una ingeniosa manera de incrementar la rigidez del entramado murario de enjutas y, sin embargo, permitir mayor deformabilidad de las bóvedas de manera independiente dentro de su propio marco rígido (5). Las cúpulas y bóvedas de las mezquitas y palacios iraníes responden a tipologías constructivas y estructurales muy diferentes a las de las catedrales góticas. Las cúpulas, levantadas generalmente sobre pechinas, se construyeron en muchas ocasiones con doble o triple hoja unidas de manera muy ingeniosa frente al sismo mediante nervaduras internas de fábrica de ladrillo conectadas mediante entramados de madera, que como en sus minaretes, permiten su balanceo y recuperación tras la absorción de las fuerzas dinámicas producidas por el sismo.

También es diferente el entramado de enjutas que ata las mezquitas y palacios de Irán. Este entramado no emerge so-

bre sus cubiertas planas como en las catedrales góticas españolas, generando un marco rígido de mayor altura que las bóvedas. Tienen otros mecanismos diferentes, ya comentados, para conseguir su estabilidad frente a sismo.

En base a los aspectos estructurales y constructivos aquí mencionados, así como a otros parámetros relevantes, las catedrales góticas españolas fueron clasificadas en 8 tipos estructurales y constructivos diferentes (5) (29). Ahora se está procediendo a la realización de la clasificación de las mezquitas y palacios iraníes, que será objeto de su posterior publicación.

Es importante tener presente, que como en España e Irán, en todos los lugares donde la Tierra tembló con fuerza, el hombre agudizó su ingenio para que sus construcciones fueran estables frente a los destructores terremotos. En cada país y momento de la historia se utilizaron sistemas sismorresistentes diferentes adaptados a sus tradiciones, anhelos y cultura arquitectónica.

Sin duda, existen muy diferentes sistemas sismorresistentes, algunos no descubiertos hasta la fecha, o no conocidos en su totalidad, y es importante desvelar hasta sus más pequeños detalles. Sin conocerlos no es posible modelizar las construcciones con suficiente rigor científico. Este es el único camino para conocer, no solo los diferentes tipos estructurales sismorresistentes históricos, sino también para poder garantizar una adecuada intervención que permita no mutilar el legado de su arquitectura y poder conservarlo para las generaciones futuras.

## 5. REFERENCIAS / REFERENCES

- (1) Kennedy, H. (2007). *Las grandes conquistas árabes*. Crítica, Barcelona, 2007.
- (2) Noval Melian A., Ortega Andrade F. (1995). Calculando el pasado. La Bóveda del Palacio de Ctesifonte. *Revista de Edificación RE*. N° 20, junio 1995.
- (3) EFE: 25/8/2008. *El Partenón servirá como modelo de edificación contra terremotos*.
- (4) Cassinello Plaza, M. J. (2003). *Trazado y Estabilidad de la Arquitectura Gótica* (Tesis doctoral). Director José Calavera. Universidad Politécnica de Madrid.
- (5) Cassinello Plaza, M. J. (2005). Influencia de los terremotos históricos en la construcción de las catedrales góticas españolas. *Annali Di Architettura: Rivista Del Centro Internazionale Di Studi Di Architettura "Andrea Palladio"*, (17), 9-20.
- (6) Vita-Finzi, C. (1983). N. N. Ambraseys y C. P. Melville: *A history of persian earthquakes* (book review). Londres: University of London, School of Oriental and African Studies.
- (7) Cassinello Plaza, M.J. (2004). Trazado y Estabilidad de la Arquitectura Gótica. *Cuadernos INTEMAC* nº 53 (p.p 1 a 46).
- (8) Cassinello Plaza, M.J. (2012). The fan roof in Spanish Gothic Architecture: mechanics and construction. En libro *l'architrave, le planche, la plate-forme. Nouvelle Histoire de la Construction*. Ed. Lausanne: École Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- (9) Bazan, E, Meli Piralla, R. (1998). *Diseño Sísmico de Edificios*. Editorial Limusa.
- (10) Barbat, A. H. (1998). *El riesgo sísmico en el diseño de edificios*. Madrid: Calidad siderúrgica.
- (11) Ferrigni, F. y Cardona, O. (2005). *Ancient buildings and earthquakes: Reducing the vulnerability of historical built-up environment*. Bari: Edipuglia.
- (12) Cassinello Plaza, M.J. (2008). Mechanics and Construction of medieval columns. System against earthquakes of the Spanish Gothic Cathedrals. En PPUR presses politechniques (Ed.) *La colonne. Nouvelle Histoire de la Construction*. Lausanne: École Polytechnique Fédérale de Lausanne. EPFL LTH3.
- (13) Hearn, M.F. (1999). *The architectural theory of Viollet le Duc. Readings and Commentary*. MIT Press 1999.
- (14) Arce García, I. S. (1996). Elementos y sistemas constructivos antisísmicos en la antigüedad: Aplicación a la restauración de estructuras históricas. Actas del *Primer Congreso Nacional de Historia de la Construcción* (pp. 39-48). Ministerio de Fomento: Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, CEDEX.
- (15) Hejazi, M. & Mehdizadeh F. (2014). *Persian Architectural Heritage*. WIT Press.
- (16) Hejazi, M. y Mehdizadeh Saradj, F. (2014). *Persian architectural heritage. Architecture, Structure and Conservation*. Southampton: WIT Press.
- (17) Saremi Naeni, D., Hasangholinejad Yasoori, K. (2016). Studying the Effect of Continent on Three Important Mosque of Timurid Period (Blue Mosque of Tabriz, Goharshadjame Mosque, Jame Mosque of Yazd). *Modern Applied Science* vol 10, n° 2. Canadian Center of Science and Education.

- (18) Fathi, A., Sadeghi, A., Emami Azadi, M. R. y Hoveidaie, N. (2019). Assessing Seismic Behavior of a Masonry Historic Building considering Soil-Foundation-Structure Interaction (Case Study of Arge-Tabriz), *International Journal of Architectural Heritage*. <https://doi.org/10.1080/15583058.2019.1568615>.
- (19) Hejazi, M., Mohammad Moayedian, S. y Daei, M. (2015). Structural Analysis of Persian Historical Brick Masonry Minarets. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. Vol. 30, Issue 2. <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29CF.1943-5509.0000746>.
- (20) Heyman, J. (1999). *El esqueleto de piedra. Mecánica de la Arquitectura de Fábrica*. Edición: Ministerio de Fomento e Instituto Juan de Herrera.
- (21) Hejazi, M. (2003). *Seismic vulnerability of Iranian historical domes*. 72. 157-165. DOI: 10.2495/ER030151
- (22) Hosseinzadeh, N. y Hosseinzadeh, M. (2012). *On the Vibration Mechanism of Historical Menar-Jonban Monument in Iran*.
- (23) Amjad Mohammadi, A., Nejad Ebrahimi, A., Shahbazi, Y. (2019). Geometric design of a masonry lattice space dome titled KARBANDI in Persian architecture. *International Journal of Space Structures*, vol 34, (1-2) 22-39. <https://doi.org/10.1177/0956059919845631>
- (24) Torroja, E. (1957). *Razón y Ser de los tipos estructurales*. Edición: Instituto de la Construcción y del Cemento. Madrid.
- (25) Valibeig, N., Rahravi Poodeh, S. & Rahimi Ariaei, A. (2017). Structural and Geometric Analysis of Discontinuous Double-Shell Persian Domes in Isfahan and Nain Dome-Building Schools, *International Journal of Architectural Heritage*, 11:8, 1101-1120. <https://doi.org/10.1080/15583058.2017.1325540>.
- (26) Maryam Ashkan, Yahaya Ahmad & Ezrin Arbi (2012). Pointed Dome Architecture in the Middle East and Central Asia: Evolution, Definitions of Morphology and Tipologies. *International Journal of Architectural Heritage*, 6:1, 46-61. <https://doi.org/10.1080/15583058.2010.501400>
- (27) Naderzadeh, A. (2009). *Application of seismic base isolation technology in Iran*.
- (28) Cassinello Plaza, M.J. (2006). Influencia del espesor de la junta de mortero en la deformabilidad de las fábricas pétreas medievales. *Materiales De Construcción*, 56(284), 69-80. <https://doi.org/10.3989/mc.2006.v56.i284.19>.
- (29) Stiros, S.C. (1995). Archaeological evidence of antiseismic constructions in antiquity. *Ann. Geophys.* 35: 725-736.