

3.3 Análisis y clasificación de los sistemas en tipos formales, constructivos y estructurales

3.3 ANÁLISIS Y CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS EN TIPOS FORMALES, CONSTRUCTIVOS Y ESTRUCTURALES

El estudio constructivo de las fábricas ubicadas en zonas de gran peligrosidad sísmica posibilita una visión local, pero también parcial e incompleta, sobre un problema global como son los terremotos. Su análisis y comparación pormenorizada nos permiten partir desde una serie de parámetros sismorresistentes ya detectados.

La identificación de las distintas soluciones o sistemas constructivos que favorecen un comportamiento sismorresistente en las construcciones históricas objeto de estudio en la presente investigación carecen en la mayoría de casos de una parametrización y clasificación de las mismas.

Son varias las investigaciones que tratan sobre este tema, siempre desde el punto de vista constructivo y atendiendo en mayor o menor medida a la posible clasificación de los sistemas identificados en ellos.

Los casos de estudio abordados en apartados anteriores, reconocidos de manera singular a través de algunas de las investigaciones citadas que los han abordado, y contrastado con situaciones reales o simuladas de terremotos, ayudan a cuantificar la eficacia de dichos sistemas de forma puntual, para cada uno de los casos, pero carecen de una clasificación específica para cada tipología de todos estos sistemas que permitan obtener una visión global del tipo de funcionamiento y parámetros por los que se rigen en cada caso.

Desde la óptica parcial que analiza cada uno de los sistemas constructivos y estructurales, los tipos identificados se multiplican conforme ampliamos el rango de estudio, haciendo necesaria la creación de una taxonomía común que parametrize de una manera fundamental los aspectos comunes que influyen en la definición tipológica, constructiva, estructura, material o compositiva de dichos sistemas.

Los diferentes casos seleccionados en este artículo responden a la realidad cambiante que imponen los terremotos en las zonas de mayor peligrosidad sísmica. En relación a una serie de características constructivas, estructurales y funcionales, se ha desarrollado una clasificación que incluye distintos sistemas sismorresistentes con ciertas analogías dentro de la arquitectura histórica de fábrica, tal y como se desarrolla más adelante.

Dicha clasificación pretende servir de base para todos los sistemas antisísmicos que forman parte de la investigación, pero también como modelo para otros que se puedan encontrar en el futuro, sistematizando el proceso según una serie de criterios comunes y dando cabida a cualquier otro sistema que forme parte de la configuración constructiva de cualquier edificio.

De esta forma, se consigue una categorización abierta a nuevos sistemas o elementos constructivos históricos que puedan descubrirse más adelante en otras construcciones de fábrica, permitiendo establecer analogías y los correspondientes puntos en común entre ellos según su tipología constructiva, estructural y funcional. Se trata de obtener una clasificación flexible y en constante crecimiento, con la posibilidad de incluir y ampliar cuando sea necesario nuevos sistemas sismorresistentes detectados en arquitecturas distintas.

Por último, merece la pena señalar que, si bien dicha clasificación está orientada específicamente a un análisis sobre las construcciones de fábrica, existen determinados parámetros que podrían ser de aplicación a otros sistemas constructivos con función sismorresistente, principalmente en lo que respecta a los tipos funcionales.

Con este objetivo se ha desarrollado una clasificación en función de los parámetros sismorresistentes identificados con anterioridad. Dichos conceptos y variables se han aplicado a algunas de las muestras más representativas de las regiones abarcadas en la presente tesis doctoral, comparándolas con muestras análogas, tipológica e históricamente hablando, y que se ubican en zonas que se podrían considerar muy próximas a éstas, pero sin el componente de riesgo sísmico que presentan las primeras.

El estudio de cada uno de los casos se lleva a cabo en cuatro grupos diferenciados, en los que se comparan distintas configuraciones o elementos arquitectónicos muy concretos, equiparables bien por su tipología estructural, espacial, funcional, constructiva o material.

Estos cuatro grupos engloban aspectos tan relevantes como la configuración general de la construcción de cada edificación, la estructura muraria, las columnas y otros elementos verticales, y por último las bóvedas, cúpulas y otros elementos de cubrición.

Cada uno de estos apartados recoge a su vez una subclasificación que pretende unificar criterios entre ellos, de cara a buscar una serie de características comunes que respondan de manera análoga a los principios sismorresistentes ya mencionados previamente. A partir de esta diferenciación y parametrización de estos sistemas es posible identificar e ir asociando los sistemas sismorresistentes de las regiones seleccionadas como casos de estudio dentro de las distintas tipologías propuestas.

A continuación, se desarrollan estos cuatro grandes grupos en los diferentes tipos y subtipos identificados, a través de los cuales se pretende ir configurando una plantilla de control para ir recogiendo las peculiaridades constructivas de cada solución y sistema, de cara a facilitar la labor de diferenciación entre las distintas variantes que puedan presentar en cada región y lograr discernir el funcionamiento esencial de dichos sistemas y los principios sismorresistentes a los que responden.

Por último, se presentan una serie de fichas correspondientes a determinadas muestras dentro de cada uno de los casos de estudio que forman parte de la presente investigación. En todas ellas, disponibles en el anexo correspondiente, se recogen los sistemas que presenta cada construcción, clasificados dentro de estos cuatro grupos que se plantean para llevar a cabo la taxonomía de sus características sismorresistentes.

3.3.1 CONFIGURACIÓN GENERAL DE LA CONSTRUCCIÓN

El primero de los grupos en los que se engloban algunos de los sistemas sismorresistentes más presentes en la arquitectura histórica de fábrica son los que tienen que ver con la configuración general de toda la construcción.

Dentro de este gran grupo de sistemas encontramos gran variedad de soluciones que tienen que ver no solo con la propia concepción del edificio en sí, sino también todos aquellos factores externos que contribuyen a un mejor comportamiento desde el punto de vista sísmico.

Para incluir todos estos aspectos, podemos diferenciar entre cuatro tipos que comprenden todas estas características generales que envuelven el desempeño estructural de un determinado edificio histórico de fábrica.

Uno de los que tienen que ver con el contexto urbano que lo rodea, constituye el primer tipo de dentro de los sistemas vinculados a la configuración general de la construcción. Se trata de la disposición urbana y relación con el entorno, que incluye todos aquellos sistemas que tienen que ver con la situación urbana del edificio dentro del tejido del barrio o el distrito en el que se encuentra. Este parámetro incluye todas aquellas características externas al propio edificio no sólo en el momento de la concepción de la construcción, sino también su evolución a partir de entonces y la posible influencia que genera la situación actual del entramado urbano contemporáneo que lo rodea.

El segundo de los cuatro grandes grupos de este apartado tiene que ver con un primer acercamiento al aspecto formal y volumétrico del edificio. La importancia de la forma geométrica adoptada tiene mucho que ver con la compacidad del edificio, y ligado a ella, la esbeltez y altura general de sus elementos. Estas características están íntimamente ligadas con la búsqueda de una estabilidad mejorada de la propia construcción, cuya configuración volumétrica externa puede suponer un factor agravante o atenuante en situaciones de sismo, donde se busca una distribución lo más homogénea y compacta posible.

En el caso de volumetrías más fragmentadas, este tipo de sistemas refleja también las posibles fragmentaciones que puede presentar el conjunto arquitectónico, ya sea a través de un único volumen o varias piezas independientes, pero con este mismo carácter unitario en forma de caja, que puede además estar interconectado o no con el resto de cuerpos.

Análogamente a esta configuración exterior, se plantea otro subtipo para la propia configuración espacial del interior del edificio. Dada la relevancia que adquiere el esqueleto estructural de este tipo de construcciones ubicadas en zonas de gran riesgo sísmico, y la expresividad estructural que encontramos en ellos, desprovista normalmente de elementos prominentes y ornamentales sin función estructural, este subtipo está íntimamente ligado al anterior. Los espacios interiores que se obtienen en este tipo de arquitecturas responden de manera directa a esta sinceridad estructural, patente de cara al exterior y al interior en la mayoría de casos.

No obstante, en este tipo de soluciones se incluyen aspectos sismorresistentes no incluidos en el plano exterior, y que ejercen en muchas ocasiones un papel vital de cara a asegurar la ansiada estabilidad de todo el conjunto en situaciones de actividad telúrica.

Por último, el cuarto tipo propuesto recoge todos aquellos sistemas y soluciones que tienen que ver con la propia configuración constructiva del edificio, desde su composición material a todo tipo de refuerzos que fortalezcan los esqueletos de fábrica de la construcción. También se incluyen elementos que forman parte de la propia envolvente estructural, como sucede por ejemplo con la apertura de huecos u otros elementos que influyen en la globalidad del edificio.

A la hora de parametrizar cada uno de estos sistemas, el procedimiento propuesto varía en función de cada una de las soluciones, pudiendo presentar unos niveles de aplicación que reflejen el grado de afectación de dicho sistema, o bien indicando simplemente si dispone o no del tipo de sistema que se esté abordando en cada caso. En otros, sin embargo, se señalan directamente una serie de subtipos para cada uno de los sistemas identificados. En todo caso, en cada apartado se referencia cada uno de estas características o niveles con un código específico, que combinado con el grupo y la tipología nos permite obtener un código de referencia para cada tipo de sistema, reflejando además estos grados o variables dentro de cada uno de ellos.

Para visualizar de manera clara todos estos sistemas, se pueden consultar las fichas individualizadas para cada uno de ellos en el apartado correspondiente de los anexos, las cuales complementan cada uno de los casos y sistemas mencionados a continuación.

En estas fichas se recogen de manera sintetizada los parámetros más importantes que tienen que ver con cada sistema, reflejando el tipo al que pertenecen, el grupo que las engloba, las regiones donde se han desarrollado, el material empleado en cada una de ellas, las variantes en las que se manifiesta en las regiones analizadas, así como el mecanismo sismorresistentes que lo convierten en un sistema sismorresistente que merece la pena mantener y conservar de cara a posibles episodios sísmicos futuros.

3.3.1.1 Sistemas de tipo "Urbano"

Los sistemas sismorresistentes de tipo urbano tienen mucho que ver con la disposición urbana y la relación con el entorno, tal y como se ha expuesto en los tres casos de estudio (Irán, Perú y Bengala). La consideración de "sistemas" está íntimamente relacionada con el carácter sismorresistente que determinadas estrategias aportan a la globalidad del conjunto arquitectónico, derivando estas decisiones de tipo urbano en otras de carácter constructivo que pueden afectar tanto a su estructura muraria como a los elementos verticales planteados en ellas como parte del sistema portante que se asienta en el terreno o construcciones preexistentes.

La ubicación de este tipo de elementos en cada región seleccionada dispone de una serie de particularidades que tienen que ver con distintos factores culturales, climáticos o geográficos que han impuesto soluciones de implantación urbana de distinto tipo.

Esta disposición ejerce un importante papel de atenuación o agravamiento de las fuerzas horizontales que la rodean, funcionando bien como un contrafuerte externo o bien como un elemento de gran riesgo para la estabilidad del conjunto arquitectónico. En este último caso, merece la pena señalar el perjudicial efecto que puede producirse entre construcciones que no constan de una correcta continuidad entre sus elementos, sustituyendo el efecto "contrafuerte" por el denominado "efecto ariete" que tan devastador resulta en situaciones de sismo.

Entre las estrategias y disposiciones que influyen en un mejor comportamiento sismorresistente encontramos una serie de situaciones que presentan distintas peculiaridades según los siguientes parámetros que se desarrollan a continuación.

- Compacidad urbana

La compacidad y disposición urbana de cada caso de estudio dentro del entramado urbano de las ciudades, si bien no constituye un sistema sismorresistente que realmente influya de manera notable en la consolidación y reforzamiento de los edificios históricos de fábrica ubicados en zonas de gran peligrosidad, sí que refleja el grado de anexión y arriostamiento que se produce de manera externa al edificio. No sólo en los edificios adyacentes a la propia construcción objeto de estudio, sino también los que se adosan a los primeros y que acaban afectando de igual manera en el edificio principal, convirtiéndose en un parámetro muy importante a tener en cuenta.

Las distintas situaciones identificadas en los tres casos de estudio recogen las siguientes características según el tipo de construcción:

- a. Construcción completamente integrada en la trama urbana que lo rodea, con un nivel alto de compacidad, correspondiente a una consolidación urbana propia de los núcleos históricos muy consolidados.
- b. Construcción integrada en la trama urbana que lo rodea, con un nivel medio de compacidad, correspondiente a una consolidación urbana propia de los núcleos históricos muy consolidados, pero con espacios abiertos anexos.
- c. Construcción integrada en la trama urbana que lo rodea, con un nivel escaso o nulo de compacidad en su entorno más próximo.
- d. Construcción exenta o aislada de la trama urbana.



Fig. 3.210 Catedral, Cusco (T.Whitby)



Fig. 3.211 Mashad (MIT)



Fig. 3.212 Shatgumbad, Bagerhat, (Maplogs)

- Anexión externa de edificios adyacentes

El nivel de consolidación presente en el exterior de cada construcción puede ayudar a apuntalar y consolidar de manera externa el esqueleto estructural de una determinada construcción, ya sean sus elementos portantes como aquellos que ejercen una función secundaria, estructuralmente hablando.

Este tipo de soluciones está muy presente en los desarrollos orgánicos de las ciudades de tradición islámica, donde el crecimiento orgánico de sus construcciones, de marcado carácter multifuncional e incluso efímero, favorece la versatilidad y aprovechamiento tanto de sus edificios más monumentales como de todo tipo de espacios públicos, tal y como sucede por ejemplo en el caso de los bazares.

La anexión volumétrica de este tipo de edificaciones adyacentes evolucionó de distinta forma según el desarrollo urbano de las ciudades y su concepción de los espacios públicos, diferenciando las siguientes situaciones:

- a. Anexión de edificaciones externas en una proporción superior al 50% de su perímetro. La situación a la que dan lugar presenta características constructivas que favorecen la continuidad y un correcto arriostramiento externo de los elementos estructurales entre ambos edificios.
- b. Anexión de edificaciones externas en una proporción inferior al 50% de su perímetro. La situación a la que dan lugar presenta características constructivas que favorecen la continuidad y un correcto arriostramiento externo de los elementos estructurales entre ambos edificios.
- c. Anexión de edificaciones externas, pero sin continuidad estructural con el edificio principal, con un desempeño estructural reducido dentro de todo el conjunto.



Fig. 3.213 Coricancha y convento de Santo Domingo, Cusco (Autor)

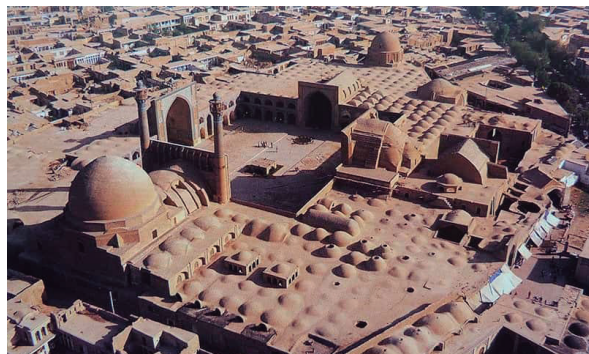


Fig. 3.214 Mezquita Jameh, Isfahan (Unesco)

- Fragmentación en volumetrías independientes

En los casos y tipologías en los que no fue posible o conveniente plantear grandes edificaciones compactas y masivas, ya fuese por criterios culturales, geológicas (subsidiencias) o por limitaciones técnicas, algunas edificaciones históricas se plantearon desde un primer momento como piezas fragmentadas.

Estas volumetrías podían presentar mayor o menor independencia entre ellas, ya fuese mediante la conexión puntual de alguno de sus espacios o bien mediante la vinculación de dichos volúmenes a nivel de cimentaciones, reduciendo así la vulnerabilidad de tener una construcción demasiado monumental, pero beneficiándose también de un comportamiento unitario que otorgue cierta rigidez y arriostramiento global a todo el conjunto.

La fragmentación de las volumetrías que componen los complejos históricos de fábrica más importantes en las tres regiones de estudio se puede clasificar en función de las siguientes estrategias:

- a. Fragmentación generalizada del conjunto estructural principal en volumetrías independientes sin aparente conexión constructiva entre ellas.
- b. Fragmentación generalizada del conjunto estructural principal en volumetrías independientes conectadas de manera muy puntual a través de volúmenes adyacentes y con continuidad estructural y espacial.
- c. Fragmentación generalizada del conjunto estructural principal en volumetrías independientes conectadas de manera muy puntual a través de volúmenes adyacentes, pero sin continuidad estructural ni espacial.
- d. Fragmentación mínima dentro del conjunto estructural principal, reducida únicamente a pequeñas volumetrías secundarias sin aparente conexión constructiva entre ellas.



Fig. 3.215 Complejo Bayazid Bastami (Autor)



Fig. 3.216 Bibi Pari, Dhaka (G.Eichhorn)

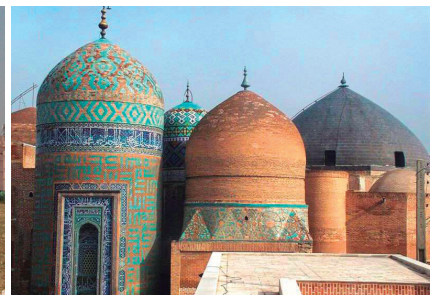


Fig. 3.217 Santuario del Jeque Safi, Ardabil (Autor)

- Adaptación topográfica, urbana y climática

Una de las vías para mitigar los efectos destructivos de determinadas construcciones se basa en la adaptación topográfica al lugar, favoreciendo así situaciones de mayor independencia entre distintas construcciones y viéndose favorecidas por las ventajas topográficas y geológicas que aporta una ubicación.

La distribución de las grandes construcciones de fábrica sobre el terreno puede ayudar a mitigar la vulnerabilidad de estos edificios mediante estrategias que derivan de esta adaptación topográfica, ya sea por ejemplo aprovechando los afloramientos rocosos para implantar grandes construcciones masivas que se puedan beneficiar del aislamiento sísmico que les proporcionan estas formaciones o bien mediante la disposición de geometrías más orgánicas que se planteen en una mayor armonía estructural respecto al terreno. Esta adaptación topográfica puede funcionar también como un sistema de disipación que responda a la morfología del terreno, acomodando la arquitectura al suelo y no al revés.

Este tipo de adaptación al lugar permite además un mejor comportamiento de todo el sistema de cimentaciones, por ejemplo, a la hora de plantear la evacuación del agua de lluvia, y evitando en última instancia el posible deterioro de los materiales o el hundimiento de las fábricas que ejercen un papel fundamental a la hora de asegurar la estabilidad de todo el conjunto. Este tipo de implantaciones se podría clasificar en diversas estrategias en función de la adaptación que se produce en distintos casos:

- a. Adaptación de la construcción a la morfología del terreno natural existente.
- b. Adaptación de la construcción a las características resistentes o materiales del terreno existentes.
- c. Adaptación de la construcción a la distribución urbana existente o a construcciones preexistentes con mayor capacidad de resistencia y solidez.
- d. Adaptación de la construcción a las condiciones climatológicas externas de cara a evitar la degradación de ciertos materiales o elementos de determinadas edificaciones.



Fig. 3.218 Machu Picchu, Cusco (Autor)



Fig. 3.219 Templo de Huaytara (Autor)



Fig. 3.220 Wiñay Huayna (Autor)

- Agrupación y atado de edificios

La disposición de elementos independientes, o incluso fragmentados dentro de una misma construcción, ha desencadenado en muchos casos un desarrollo constructivo que ha buscado un atado de sus elementos más vulnerables, ya sea a través de sistemas de atado perimetrales, lineales o superficiales, o bien mediante la agrupación en torno a un núcleo central que aglutine a las construcciones anexas a él.

De esta forma se puede llegar a mejorar un comportamiento más unitario en el caso de complejos de escala de manzana urbana, aportando un arriostramiento adicional que en cierto modo favorece el comportamiento en forma de caja que tan beneficioso resulta para cualquier edificación individual. El agrupamiento permite una mayor y mejor disipación de la energía sísmica que pueda producirse en cualquiera de los puntos más vulnerables de la estructura, reduciendo la concentración de tensiones indeseadas en los puntos más conflictivos que podrían potenciarse en exceso en caso de actuar de manera independiente.

Las distintas formas de atado que se reproducen en la agrupación de edificios históricos de fábrica son las siguientes:

- a. Agrupación y atado de volumetrías independientes conectadas a través de un "cinturón" de atado perimetral que recoge y engloba a una serie de edificaciones que quedan relacionadas a través de su superficie exterior.
- b. Agrupación y atado de volumetrías independientes conectadas a través de un núcleo masivo de mayor resistencia estructural que articula y vincula a través de su posición centralizadora la configuración estructural de cada una de estas construcciones secundarias.
- c. Agrupación y atado de volumetrías independientes conectadas a través de una capa de cimentaciones común que arriostra las piezas principales.



Fig. 3.221 Ollantaytambo (Autor)

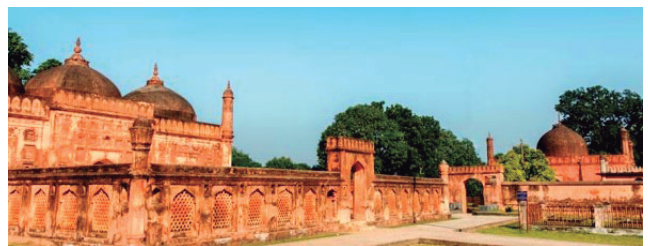


Fig. 3.222 Complejo Tahakhana, Gaur (R.Hasan)

3.3.1.2 Sistemas de tipo "Volumétrico" (exterior)

En el aspecto volumétrico, destacan sobre todo las configuraciones ortogonales que favorecen una compacidad geométrica muy acentuada, ya sea a través de distintas tipologías de planta centralizada o incluso recurriendo a configuraciones que recuerdan a las de tipo piramidal de diversas culturas.

El objetivo de este tipo de soluciones es por un lado el de homogeneizar la distribución de las tensiones que puedan producir discontinuidades en la estructura y también reducir la altura del centro de gravedad de todo el conjunto arquitectónico que lo constituye.

En este sentido se han desarrollado distintos modelos de compacidad y concentración de volúmenes en las regiones abarcadas en la presente investigación, con desarrollos singulares respecto a otras arquitecturas análogas, ya sea por conexiones históricas, geográficas o culturales.

La búsqueda de edificaciones realmente monumentales que consiguiesen captar la atención del visitante o los propios habitantes de las ciudades, no supuso sin embargo un riesgo para la estabilidad de las construcciones más ambiciosas de cada cultura, gracias en parte a la sustitución de elementos ornamentales más vulnerables en situaciones de sismo por otro tipo de decoración más beneficiosa dentro de la propia estructura del edificio. O al menos, con elementos de menor prominencia que no fuesen tan perjudiciales para las edificaciones aledañas o los posibles usuarios de estas construcciones históricas que en ocasiones albergaban gran cantidad de aforo en su interior.

Este tipo de soluciones sumado a la utilización de elementos de refuerzos adicionales, incorporados por el exterior de estos grandes volúmenes hechos en fábrica permitió conservar y asegurar un tipo de construcción muy masiva, pero con unas condiciones sismorresistentes que han permitido su estabilidad con el paso de los siglos a través de sistemas

- Ortogonalidad exterior

La presencia de geometrías ortogonales en los exteriores de edificaciones históricas supone uno de las características más recurrentes en las construcciones históricas de fábrica ubicadas en zona de gran peligrosidad sísmica.

Este tipo de ortogonalidad se revela como el más fiel reflejo del interior de los edificios más monumentales, con un esqueleto estructural que se manifiesta de cara al exterior no solo en su volumetría general, sino también a través de elementos repetitivos dispuestos ortogonalmente siguiendo una retícula común que se repite en el interior.

Las geometrías ortogonales que se desarrolla en los exteriores de las construcciones situadas en zonas de alta sismicidad quedan patentes en diferentes situaciones apreciables desde el exterior:

- a. Volumetría compleja basadas en la repetición de un módulo ortogonal de geometrías cuadrangulares, y ortogonalidad muy marcada tanto en planta como en sección.
- b. Volumetría compleja basadas en la repetición de un módulo ortogonal de geometrías cuadrangulares, y ortogonalidad muy marcada en planta o en sección.
- c. Volumetría simple constituidas por elementos ortogonales o de geometrías cuadrangulares, y con una ortogonalidad muy marcada, tanto en planta como en sección.
- d. Volumetría simple constituidas por elementos ortogonales o de geometrías cuadrangulares, y con una ortogonalidad muy marcada en planta o en sección.



Fig. 3.223 Catedral de Cusco (Autor)

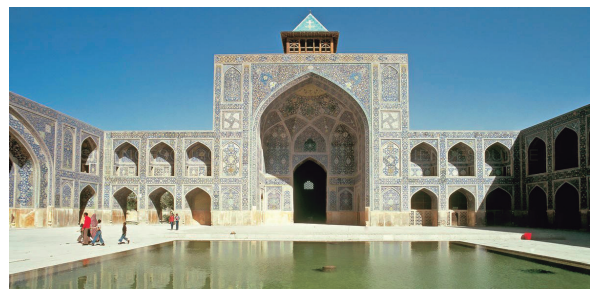


Fig. 3.224 Mezquita del Shah, Isfahan (Autor)

- Simetría exterior

Las situaciones de cierta simetría suponen uno de los mecanismos más empleados de cara a llevar a cabo los planteamientos constructivos más ambiciosos de cada cultura, constituyendo un recurso muy útil en la composición formal de los edificios históricos.

El desarrollo de esta simetría puede aprovecharse no solo en planta, sino también en sección, con una repetición que puede aparecer incrementada en determinados elementos exteriores como simples recursos compositivos pero que a nivel estructural se revelan como una de las estrategias que otorgan mayor estabilidad al conjunto cuando los elementos que se replican a través de esta simetría aportan de mayor rigidez a todo el conjunto.

La continuidad que aporta la contraposición de elementos estructurales idénticos sin duda ayuda a generar unas condiciones estables orientadas a conseguir el conjunto más unitario posible, sobre todo cuando el elemento replicado una o varias veces forma parte del esqueleto estructural ortogonal que configura la totalidad del edificio. En este sentido podemos encontrar distintos niveles de simetría en la concepción de los elementos exteriores de las edificaciones ubicadas en zonas de gran sismicidad:

- a. Simetría exterior de volumetrías completas, en dos o más ejes distintos.
- b. Simetría exterior de volumetrías completas, en un único eje de cada plano.
- c. Simetría exterior de elementos parciales, en dos o más ejes distintos de cada plano.
- d. Simetría exterior de elementos parciales, en un único eje de cada plano.



Fig. 3.225 San Francisco (Autor)



Fig. 3.226 Complejo Amir Chakhmaq, Yazd (B.Gagnon)



Fig. 3.227 Zafar Khan, Tribeni, (P.Speaks)

- Compacidad volumétrica

La concepción de volumetrías compactas se manifiesta de manera habitual en todo tipo de construcciones ubicadas en zonas de alta sismicidad.

Desde la configuración basada en paralelepípedos hasta modelos que se aproximan al tipo piramidal, las construcciones históricas exploraron distintos desarrollos que aglutinasen la mayor parte del volumen del edificio en la menos superficie posible, reduciendo así el riesgo de discontinuidades críticas en el transcurso de un terremoto y en última instancia el colapso de las estructuras.

Las estrategias que giran alrededor de esta búsqueda de mayor compacidad oscilan desde la acumulación de volumetrías sencillas en forma de caja hasta tipologías de planta centralizada que van desde la planta circular a los polígonos de varios lados. Esta compacidad se reproduce en algunos casos en la propia sección del edificio, con una acumulación de los componentes más masivos localizados en la zona central de la construcción, evitando así disonancias que pudieran agravar los efectos de las fuerzas horizontales, características en situaciones de sismo. Algunas de las situaciones y subtipos de compacidad volumétrica que se pueden identificar son los siguientes:

- a. Construcción de alta compacidad integrada en un único volumen principal que engloba toda la envolvente en torno a un núcleo central más masivo.
- b. Construcción de compacidad media integrada en un único volumen principal que engloba toda la envolvente, pero sin un núcleo central claro que actúe de polarizador.
- c. Construcción de alta compacidad compuesta por varios volúmenes conectados internamente en torno a un núcleo central que concentra los volúmenes principales.
- d. Construcción de compacidad media compuesta por varios volúmenes conectados internamente, pero sin un núcleo central claro que actúe de polarizador.



Fig. 3.228 Mezquita de Urmia (Autor)



Fig. 3.229 Soltaniyeh, Zanjan (Autor)

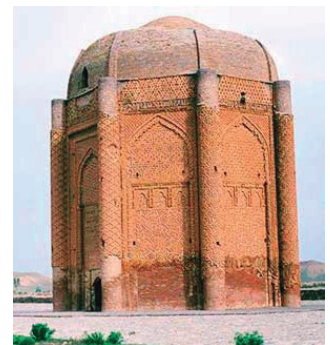


Fig. 3.230 Torre Kharraqan (Autor)

- Reducción de altura del centro de gravedad

La reducción de proporciones en las zonas de mayor vulnerabilidad sísmica queda patente no sólo en la volumetría general de las edificaciones más monumentales, sino también en los elementos parciales que las conforman.

La diversidad de elementos que presentan una reducción de esbeltez comparado con otros casos del mismo estilo, tiene mucho que ver con el tipo de arquitectura que estemos analizando en cada caso, apoyándose normalmente en estrategias complementarias como la reducción de altura de los cuerpos perimetrales o la disposición piramidal de estos elementos.

De esta forma es habitual encontrar una reducción de esbeltez, o altura del centro de gravedad, de distinto tipo según el caso y el tipo de construcción desarrollada por cada región:

- a. Reducción de la esbeltez de todo el conjunto, mediante la distribución piramidal de la envolvente construida del esqueleto estructural principal.
- b. Reducción de la esbeltez de todo el conjunto, mediante la distribución cónica o troncocónica de la envolvente construida del esqueleto estructural principal.
- c. Reducción de la esbeltez de todo el conjunto, mediante la disposición de elementos adicionales lineales o perimetrales en la base, adosados de manera externa al esqueleto estructural principal.
- d. Reducción de la esbeltez de todo el conjunto, mediante la disposición de elementos adicionales puntuales en la base, adosados de manera externa al esqueleto estructural principal.

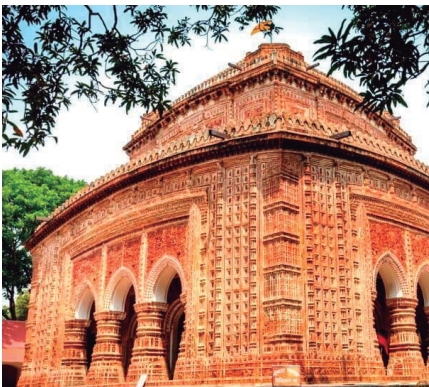


Fig. 3.231 Kantanagar, Dinajpur, (R.Hasan)

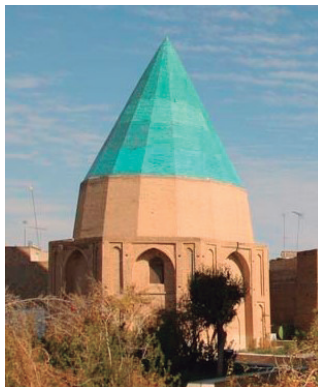


Fig. 3.232 Gonbad Sabz, Qom (Autor)



Fig. 3.233 Mausoleo Molla Hassan Kashi (Autor)

- Reducción de elementos prominentes y ornamentales

Las características volumétricas de los elementos ornamentales de mayor esbeltez y dimensión dentro de los conjuntos arquitectónicos ubicados en riesgo sísmico vieron reducidas las dimensiones verticales de manera drástica en las zonas de mayor riesgo sísmico. El caso más evidente se desarrolla en el apartado de columnas y otros elementos verticales, cuya verticalidad supone uno de los casos más críticos a la hora de hacer frente a un episodio sísmico importante.

Esta reducción de elementos voluminosos se depuró a nivel general en todo el conjunto exterior, evitando volúmenes excesivamente prominentes que pudiesen provocar daños mayores en la estructura principal en caso de colapso.

Algunas de las estrategias utilizadas en este sentido fueron las siguientes:

- a. Integración de los elementos más voluminosos dentro de la envolvente estructural del conjunto arquitectónico.
- b. Reducción de la dimensión más desfavorable de las volumetrías de mayor prominencia que forman parte del conjunto arquitectónico.
- c. Sustitución y desarrollo de tipologías singulares de menor prominencia en las volumetrías de mayor proporción que forman parte del conjunto arquitectónico.
- d. Supresión de cuerpos completos en las volumetrías de mayor prominencia que forman parte del conjunto arquitectónico.



Fig. 3.234 Catedral de Cusco (Autor)



Fig. 2.235 Mezquita Azul, Tabriz (Autor)

- Contrafuertes exteriores

De cara a minimizar los posibles desequilibrios que se pueden llegar a generar en los edificios de fábrica más masivos, es frecuente encontrar todo tipo de refuerzos exteriores que apuntalen los esqueletos estructurales de estas grandes construcciones históricas, ya sea a través de contrafuertes exteriores, puntuales, lineales o superficiales.

A este respecto encontramos contrafuertes de todo tipo de tamaños y disposiciones, llegando a desarrollar verdaderas subestructuras que, si bien pueden ejercer un papel funcional muy importante dentro de la configuración espacial del edificio, en realidad albergan una función estructural vital para asegurar la envolvente estructural de las construcciones más vulnerables.

De acuerdo a las distintas morfologías que pueden adoptar este tipo de medidas exteriores, y en lo que se refiere al aspecto volumétrico externo, se puede diferenciar entre los siguientes subtipos de refuerzos:

- a. Utilización de contrafuertes puntuales en el exterior de la envolvente.
- b. Utilización de contrafuertes perimetrales en el exterior de la envolvente.
- c. Utilización de contrafuertes superficiales en el exterior de la envolvente.
- d. Integración de contrafuertes puntuales en la propia envolvente del edificio.
- e. Integración de contrafuertes perimetrales en la propia envolvente del edificio.
- f. Integración de contrafuertes superficiales en la propia envolvente del edificio.

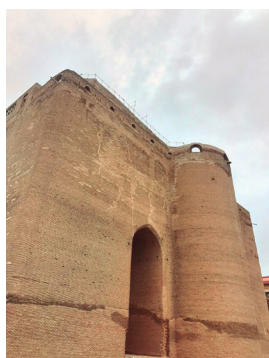


Fig. 3.236 Arg-e-Tabriz (Autor)



Fig. 3.237 Takht-e-Soleyman (Autor)

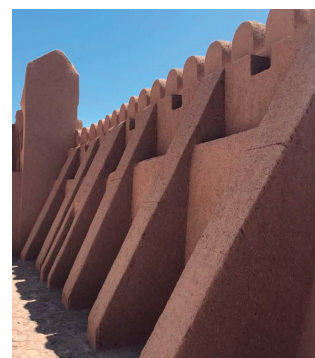


Fig. 3.238 Contrafuertes Bam (Autor)

- Contrapesos superiores

Una de los sistemas más eficaces para trasladar la concentración de tensiones al plano del suelo es la utilización de contrapesos en las zonas superiores de los muros, acentuando la disipación de las fuerzas de cúpulas y arcos hacia el propio terreno.

De esta forma es frecuente encontrar todo tipo de soluciones que recuerdan análogamente a la disposición de pináculos en el caso de la arquitectura gótica, cuya ubicación sobre los arbotantes de las catedrales y otras construcciones se conseguía acelerar y asegurar el proceso de desplazamiento de las cargas más significativas del esqueleto estructural.

Como consecuencia, encontramos distintas tipologías de contrapesos ubicados como remates de distintos elementos constructivos según la distribución y el comportamiento estructural de los mismos:

- Contrapesos integrados en el sistema de cubrición y la volumetría principal, utilizados como cerramiento horizontal de cubierta.
- Contrapesos puntuales ubicados sobre la estructura portante vertical y la volumetría principal, utilizados como remates de muros y otros elementos verticales.
- Contrapesos puntuales integrados en la estructura portante vertical y la volumetría principal, utilizados como remates de muros y otros elementos verticales.
- Contrapesos lineales ubicados sobre la estructura portante vertical y la volumetría principal, utilizados como remates de muros y otros elementos verticales.
- Contrapesos lineales integrados en la estructura portante vertical y la volumetría principal, utilizados como remates de muros y otros elementos verticales.

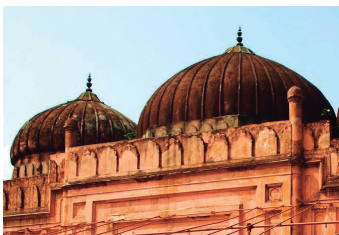


Fig. 3.239 Fuerte de Lalbagh, Dhaka (Smeasin)



Fig. 3.240 Soltaniyeh (Autor)

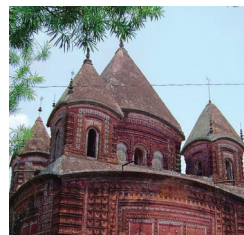


Fig. 3.241 Pancha ratna (Paurag)



Fig. 3.242 Zerkhaneh, Yazd (Autor)

- Arcos de descarga y codales

Entre los elementos auxiliares de descarga en las edificaciones ubicadas en zonas de gran riesgo sísmico, es habitual encontrar la utilización de arcos de descarga exteriores que liberan de cierta carga a determinados elementos de los edificios, normalmente los entramados murarios exteriores o las cornisas de todo tipo de construcciones realizadas en fábrica, ya sea de piedra o ladrillo.

Su uso en algunos casos puede ser posterior al planteamiento del esqueleto estructural principal del edificio, tal y como revelan en muchos casos la disposición de estos arcos de descarga, que pueden encontrarse de manera muy puntual en zonas de mayor riesgo, ya sea para el propio edificio como para el entorno más próximo. En este sentido también es frecuente encontrar este tipo de sistemas entre edificios de distinta antigüedad, con ángulos algo forzados para asegurar una mínima conexión estable entre ambos, lo cual da pistas de su concepción posterior.

Para categorizar los distintos tipos de arcos más frecuentes que encontramos en la arquitectura histórica de fábrica se puede diferenciar entre las siguientes situaciones estables:

- a. Codales o arcos de descarga pertenecientes al esqueleto estructural principal, con continuidad estructural, material y espacial, que disipa las fuerzas y cargas horizontales del edificio directamente hacia el terreno u otra parte de la propia construcción.
- b. Codales o arcos de descarga de naturaleza constructiva distinta al esqueleto estructural principal, ya sea por discontinuidad estructural, material o espacial, que disipa las fuerzas y cargas horizontales del edificio directamente hacia el terreno u otra parte de la propia construcción.
- c. Codales o arcos de descarga perteneciente al esqueleto estructural principal, con continuidad estructural, material y espacial, que disipa las fuerzas y cargas horizontales del edificio sobre otras construcciones adyacentes.
- d. Codales o arcos de descarga de naturaleza constructiva distinta al esqueleto estructural principal, ya sea por discontinuidad estructural, material o espacial, que disipa las fuerzas y cargas horizontales del edificio sobre otras construcciones adyacentes.



Fig. 3.243 Kucheh, Nain (Autor)



Fig. 3.244 Kucheh, Yazd (Autor)



Fig. 3.245 Kucheh, Irán (Autor)



Fig. 3.246 Kucheh, Kashan (Autor)

3.3.1.3 Sistemas de tipo "Espacial" (interior)

De cara al planteamiento de los espacios interiores de los edificios ubicados en zona de alta sismicidad las construcciones históricas de fábrica recurrieron principalmente a sistemas muy ligados a una modulación y orden internos muy estrictos.

La disposición de espacios interiores a partir de plantas reticuladas y ortogonales sentó las bases para un crecimiento ordenado basado en la repetición de elementos sencillos. Utilizando como recurso de crecimiento una simetría interna muy marcada, los espacios que encontramos dentro de las construcciones de mayor vulnerabilidad presentan una serie de sistemas con una geometría que tiende a la regularización de dicho crecimiento, ya sea en planta o en sección.

Bajo esta premisa, algunas de las estrategias donde vemos esta acentuación de una simetría interna más estricta es en las construcciones de planta centralizada, donde se produce una distribución lo más homogénea posible de las tensiones propias de cualquier episodio sísmico importante. Pero también mediante situaciones espaciales que tienen que ver con el ya mencionado efecto de "caja", con naves a la misma altura para evitar discontinuidades indeseadas constructivamente hablando.

En muchas de las construcciones históricas de fábrica vemos cómo incluso este tipo de sistemas se conciben integrados dentro del propio esqueleto estructural, obteniendo por ejemplo en el caso de los templos religiosos un pretexto idóneo para plantear una serie de refuerzos interiores que generen distintos tipos de huecos, nichos y hornacinas laterales. Estos sistemas han dado lugar a una serie de espacios aprovechados por distintas civilizaciones en forma de capillas o pequeños mihrabs independientes, perfectamente integrados en la liturgia y el culto a las distintas deidades de cada cultura y religión, pero que corren el riesgo de olvidar la función estructural de los elementos que los conforman.

En este caso hablamos no solo de posibles mutilaciones estructurales de dichos elementos, sino también del riesgo que se corre al rellenar dichos espacios, concebidos en ocasiones como huecos aligerantes dentro del conjunto global estructural, y hacerlo de una manera inadecuada que agrave los efectos de un sismo en lo que respecta a los movimientos horizontales del mismo.

- Simetría interior

Tal y como se ha mencionado, una de las configuraciones más empleadas y con un comportamiento más beneficioso dentro de la conformación estructural de los ambientes interiores se basa en la distribución simétrica de dichos espacios.

Este tipo de disposiciones responde a uno de los principios antisísmicos esenciales, fundamentado en la distribución uniforme del peso y la rigidez, gracias a un mecanismo de simetría de los elementos constructivos más importantes.

En este sentido podemos diferenciar entre distintas configuraciones según el grado de simetría que pueda implementarse en cada caso:

- a. Simetría en planta y sección, en dos o más ejes distintos de cada plano (planta/sección).
- b. Simetría en planta y sección, en un único eje de cada plano (planta/sección).
- c. Simetría en planta o en sección, en dos o más ejes distintos de cada plano (planta/sección).
- d. Simetría en planta o en sección, en un único eje de cada plano (planta/sección).

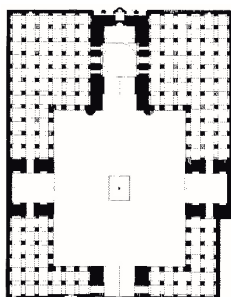


Fig. 3.247 Goharshad (Autor)

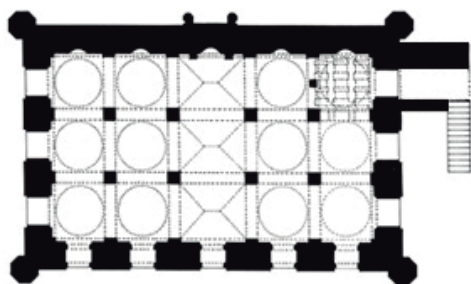


Fig. 3.248 ChotoSona (Autor)

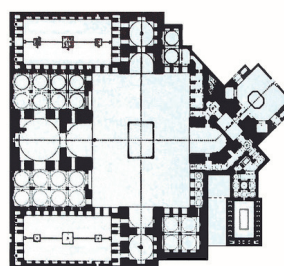


Fig. 3.249 Mezquita del Iman (Autor)

- Centralización de la planta

Entre todas las manifestaciones en las que se reproducen ciertas situaciones simétricas, la concepción de plantas centralizadas supone el mecanismo de simetría más intensificada, con una variedad formal expresada a través de multitud de geometrías.

Esta solución fue ampliamente empleada en el caso de espacios de veneración de escala reducida o media, tal y como sucede en el caso de tumbas y mausoleos de distintas culturas, entre las que podemos diferenciar los siguientes subtipos de planta centralizadas:

- Planta centralizada de base circular y distribución homogénea de las cargas estructurales a lo largo de todo su perímetro.
- Planta centralizada de base circular, pero con distribución focalizada en puntos concretos del perímetro geométrico.
- Planta centralizada de base cuadrada y distribución homogénea de las cargas estructurales a lo largo de todo su perímetro.
- Planta centralizada de base cuadrada, pero con distribución focalizada en puntos concretos del perímetro geométrico.
- Planta centralizada de base poligonal y distribución homogénea de las cargas estructurales a lo largo de todo su perímetro.
- Planta centralizada de base poligonal, pero con distribución focalizada en puntos concretos del perímetro geométrico.
- Planta centralizada de geometría mixta tanto poligonales como circular, con distribución homogénea de las cargas estructurales a lo largo de todo su perímetro.
- Planta centralizada de geometría mixta, tanto poligonal como circular, con distribución focalizada en puntos concretos del perímetro geométrico.

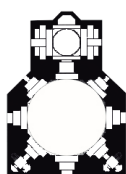


Fig. 3.250 Cúpula de Soltaniyeh (Autor)

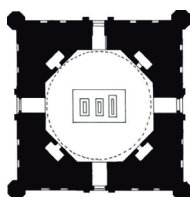


Fig. 3.251 Mausoleo Eklakhi (Autor)

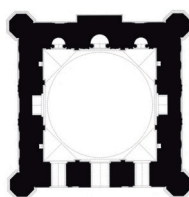


Fig. 3.252 Mezquita Jore Bangla (Autor)

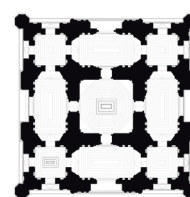


Fig. 3.253 Tumba Bibi Pari (Autor)

- Modulación interior

La utilización de plantas reticuladas ortogonales está muy ligada a la disposición de los elementos portantes interiores de cualquier edificio, y en caso de construcciones ubicadas en zonas de alta sismicidad, esta modulación adquiere una gran relevancia estructural.

El criterio de modulación de este tipo de plantas está muy vinculado al uso del espacio interior y como consecuencia, es relativamente frecuente encontrar plantas reticuladas en función de distintos módulos básicos que pueden ir o no combinados en un mismo espacio interior.

La eficacia estructural de esta modulación tiene mucho que ver con la distribución de estos módulos, normalmente ortogonales y con una repetición de estos elementos que suele beneficiar a aquellos desarrollos con un menor número de módulos en planta y un mayor número de repeticiones de estos, buscando como resultado retículas lo más uniformes posibles. Es por ello que se limita a cuatro módulos distintos los espacios identificados en estas construcciones. La diversidad y número de módulos empleados tanto volumétricamente como en planta permite por tanto distinguir entre diferentes tipos de modulación interior:

- a. Utilización de un único módulo (en planta) con idéntico desarrollo volumétrico en un mismo espacio interior
- b. Utilización de un único módulo (en planta) con dos o más desarrollos volumétricos distintos en un mismo espacio interior
- c. Utilización de dos módulos distintos (en planta), cada uno con su desarrollo volumétrico específico en un mismo espacio interior
- d. Utilización de dos módulos distintos (en planta), cada uno de ellos con dos o más desarrollos volumétricos distintos en un mismo espacio interior



Fig. 3.254 Mezquita Shatgumbad, Bagerhat (G.Rabbani)

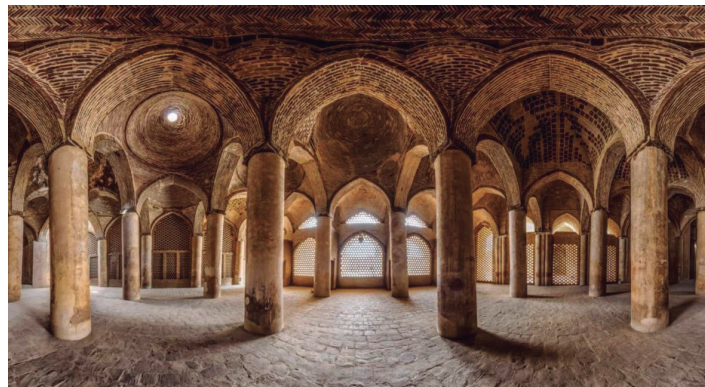


Fig. 3.255 Mezquita Jameh, Isfahan (D.Ricardo)

- Disposición de naves a misma altura

Con el fin de disminuir las posibles discontinuidades en los sistemas portantes de la edificación, es fácil encontrar construcciones con una disposición de naves a la misma altura. El desarrollo singular de esta tipología dentro de los estilos de cada cultura queda de manifiesto al acercarnos a las regiones de mayor sismicidad del planeta.

De esta forma se evitan discontinuidades en los soportes y concentración de tensiones en los puntos de encuentro entre distintas naves, beneficiando un comportamiento unitario de toda la estructura al transmitir los esfuerzos horizontales por la cubierta de una manera continua. Con ello se logra igualar el desempeño estructural de las columnas interiores, sobre todo en las naves con la misma luz entre apoyos.

Para identificar las distintas situaciones que podemos encontrar se puede hablar de:

- a. Disposición de nave principal y naves secundarias a la misma altura, tanto hacia el interior como al exterior.
- b. Disposición de nave principal y naves secundarias a distinta altura en el interior, pero igualadas hacia el exterior.
- c. Disposición de nave principal y naves secundarias a distinta altura, tanto hacia el interior como al exterior.
- d. Disposición de nave principal y naves secundarias a distinta altura y de manera decreciente, con más de dos alturas distintas de nave.



Fig. 3.256 Catedral de Cusco (Autor)



Fig. 3.257 Shatgumbad, Bagerhat (E.Hasan)

- Integración de contrafuertes interiores dentro de la volumetría principal

La utilización de contrafuertes en todo el perímetro de los edificios masivos más monumentales se podría considerar uno de los sistemas estabilizadores más comunes de toda la arquitectura histórica. Sin embargo, lo que es menos frecuente es encontrarlos integrados en la propia volumetría, camuflados en forma de muros separadores para delimitar capillas laterales u otros espacios de acceso al edificio.

La necesidad de crear distintos espacios auxiliares que complementan al uso principal del edificio provoca un encubrimiento de la función estructural de estos elementos, normalmente ubicados en el perímetro del esqueleto estructural como refuerzo adicional para redirigir las cargas del edificio al terreno.

Para diferenciar la integración de estos elementos dentro de la volumetría general de todo el edificio se pueden identificar los siguientes subtipos:

- a. Contrafuertes interiores no conectados estructuralmente entre sí, utilizados como muros separadores entre distintos espacios de gran tamaño, como por ejemplo capillas, huecos de acceso o nichos de gran tamaño.
- b. Contrafuertes interiores conectados estructuralmente entre sí a través de un muro portante exterior, normalmente muy masivo.
- c. Contrafuertes completamente integrados en la estructura muraria portante exterior, con espesor igual o similar al del propio muro.

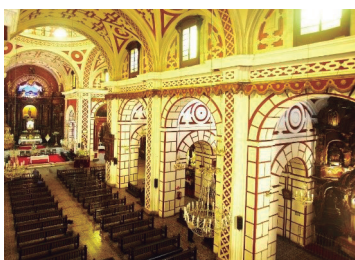


Fig. 3.258 Basílica de San Francisco de Lima (Autor)



Fig. 3.259 Capillas catedral Cusco (Autor)

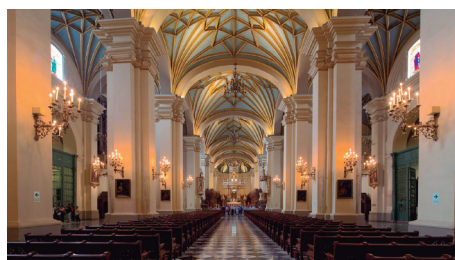


Fig. 3.260 Interior catedral de Lima (Autor)

- Apertura e integración de huecos, nichos y hornacinas laterales

La incorporación de huecos en los extremos de los espacios interiores es una de las situaciones constructivas más habituales en todo tipo de edificios de todas las culturas, principalmente aquellos destinados al culto de una determinada imagen o símbolo.

Sin embargo, el tamaño y disposición de este tipo de huecos tiene una importante función de aligeramiento en el caso de las construcciones ubicadas en zonas de alto riesgo sísmico, reduciendo de manera considerable la carga masiva de muchos muros portantes, principalmente aquellos situados en el perímetro estructural del edificio.

Estos sistemas suelen conservar el trazado interno de las retículas interiores, tanto en la disposición de los elementos portantes puntuales interiores, como es el caso de las salas hipóstilas, como la disposición de posibles contrafuertes interiores dentro de la volumetría principal, tal y como se acaba de mencionar en el apartado anterior. En relación al tipo de hueco incorporado en la estructura podemos diferenciar entre:

- a. Apertura e integración de huecos y espacios de gran tamaño entre elementos portantes adyacentes y con conexión estructural entre ellos en el entramado murario de la envolvente, como grandes capillas o zonas de acceso y de paso.
- b. Apertura e integración de huecos y espacios de tamaño medio en el propio entramado murario de la envolvente, utilizados como pequeñas capillas o mihrabs.
- c. Apertura e integración de huecos y espacios de pequeño tamaño en el propio entramado murario de la envolvente, como nichos y hornacinas.



Fig. 3.261 Catedral Lima (Autor) Fig. 3.262 Cripta Pizarro (Autor) Fig. 3.263 Mez. Adina (Postal) Fig. 3.264 Mez. Bagha (Postal) Fig. 3.265 Mez. Darasbari (Postal) Fig. 3.266 Mez. Kusumba (Banglapedia)

3.3.1.4 Sistemas de tipo "Constructivo" (general)

Dentro de la configuración general de la construcción encontramos diversos sistemas que se pueden extraer de manera genérica para analizar las características constructivas de la totalidad del conjunto edificatorio de las arquitecturas ubicadas en zonas de gran sismicidad.

En el plano material, la compatibilidad entre elementos adyacentes y la continuidad estructural que presentan las distintas secciones de una construcción ayudan a conseguir un comportamiento lo más unitario posible, principalmente si la unión entre planos se realiza teniendo en cuenta los posibles movimientos horizontales que pueden surgir en situaciones de sismo.

A este respecto, aunque la utilización de un único material principal a la hora de plantear el esqueleto estructural de los edificios monumentales puede contribuir a esta función, la realidad es que en ocasiones la discontinuidad material puede plantear distintas ventajas y desventajas según el elemento constructivo en el que nos encontremos, tal y como veremos adelante para cada caso.

Para contrarrestar los posibles desajustes y desplazamientos excesivos que van asociados a cualquier temblor de tierra, la inclinación de ciertos elementos constructivos se revela como una de los sistemas más efectivos para hacer frente a las grandes sacudidas de los terremotos. Esta inclinación puede reflejarse no solo en determinados componentes de la construcción, sino también a nivel general para dotar de mayor estabilidad a todo el conjunto, llegando a soluciones de tipo piramidal que presentan cierto escalonamiento desde la base hasta su zona de mayor altura.

A la hora de evitar situaciones desfavorables durante el transcurso de un terremoto, es frecuente encontrarse con construcciones especialmente cerradas, con un aspecto macizo y sólido que huye de la concentración de tensiones en las esquinas, y en este sentido el número de huecos planteados en la estructura muraria desempeña un papel fundamental para lograrlo.

La reducción de este tipo de elementos suele ir muy ligado también a la supresión de elementos no portantes, como todos aquellos con función ornamental y cuya redundancia repercute de manera muy negativa en los cuerpos de mayor esbeltez o con una vulnerabilidad más acusada.

- Continuidad material en los distintos planos

A pesar de que se presupone una compatibilidad material entre los distintos elementos que forman parte de las construcciones históricas más importantes, la continuidad material no siempre se manifiesta de igual manera en el caso de los edificios ubicados en zonas de alta sismicidad.

De hecho, en general, es muy frecuente encontrar distintos materiales no solo entre distintos planos, sino también en un mismo plano, tal y como se desarrolla en apartados sucesivos, con una utilización de materiales que engloba no sólo a distintos tipos de fábricas, sino que también se combina en un mismo elemento constructivo con materiales como la madera o piezas cerámicas de distinto tipo.

Esta continuidad material suele venir ligada, bien a un reforzamiento de las esquinas en el caso de presentar materiales más rígidos en los bordes de los planos, o bien a una estrategia de aligeramiento y aislamiento sísmico en el caso de emplear materiales distintos para cada plano, diferenciando entre las siguientes situaciones:

- Utilización de un mismo material para todos los planos que conforman el conjunto edificado.
- Utilización de dos materiales distintos en un mismo plano, con continuidad material en los encuentros con otros planos adyacentes, ya sean paños verticales o planos horizontales de cubrición.
- Utilización de dos materiales distintos en un mismo plano, sin continuidad material en los encuentros con otros planos adyacentes, ya sean paños verticales o planos horizontales de cubrición.
- Utilización de tres o más materiales distintos en un mismo plano, con continuidad material en los encuentros con otros planos adyacentes, ya sean paños verticales o planos horizontales de cubrición.
- Utilización de tres o más materiales distintos en un mismo plano, sin continuidad material en los encuentros con otros planos adyacentes, ya sean paños verticales o planos horizontales de cubrición.



Fig. 3.267 Ciudadela Bam (Autor)



Fig. 3.268 Mezquita Azul (Autor)



Fig. 3.269 Palacio Arzobispal, Cusco (Autor)

- Inclínación de elementos constructivos

Una de las configuraciones más empleadas en las construcciones de la antigüedad es la que hacía uso de geometrías con una cierta inclinación, ya fuese en determinados elementos o en la configuración general del edificio a través de formas piramidales.

La estrategia perseguida con estas geometrías en forma de talud buscaba reforzar el comportamiento estructural de todo el conjunto o parte de él, principalmente como estrategia de mitigación de las enormes sacudidas a las que podía hacer frente la estructura en situaciones de terremoto. Su utilización también vino ligada a permitir cierto movimiento en los elementos más vulnerables de la estructura sin llegar a desequilibrarlos por completo, evitando en última instancia el colapso y los daños sobre otras zonas del edificio.

Se pueden identificar por tanto los siguientes sistemas de inclinación según la función estructural de dichos elementos:

- a. Inclínación de la totalidad del elemento principal que constituye el edificio, dando lugar a una envolvente con base circular y volumetría cónica o troncocónica.
- b. Inclínación de la totalidad del elemento principal que constituye el edificio, dando lugar a una envolvente con base poligonal y volumetría piramidal o troncopiramidal.
- c. Inclínación de determinados elementos puntuales, con base circular y volumetría cónica o troncocónica.
- d. Inclínación de determinados elementos puntuales, con base poligonal y volumetría piramidal o troncopiramidal.
- e. Inclínación de determinados elementos lineales o puntuales, dando lugar a volumetrías en forma de talud.



Fig. 3.270 Minarete de Pandua (A.Gupta)



Fig. 3.271 Muro Gaur (A.Gupta)



Fig. 3.272 Ollantaytambo (Autor)

- Reducción del número y la dimensión de huecos

A pesar del desarrollo singular llevado a cabo por las culturas ubicadas en zona sísmica en lo que respecta a la apertura de huecos en los entramados de fábrica, una de las medidas más eficaces para evitar los desajustes producidos en ellas es sencillamente la reducción del número y dimensión de dichos huecos.

Esta reducción y supresión de huecos responde a una búsqueda de continuidad en los elementos portantes principales, ya fuesen muros, cúpulas u otros elementos verticales de grandes dimensiones. La propia configuración de estas construcciones, en ocasiones con naves a la misma altura y sin presencia de grandes tambores bajo las cúpulas de los edificios monumentales, impedía la incorporación de huecos en zonas del edificio que habitualmente servían para introducir luz a las edificaciones planteadas en regiones de menor sismicidad.

Sin embargo, en aquellas zonas donde la recurrencia de terremotos era alta, se llevaron a cabo distintas estrategias para aminorar los efectos destructivos de éstos:

- Inexistencia de ventanas en la envolvente exterior del edificio.
- Representación simbólica y ornamental del hueco, mediante perfilado o relieve macizo con forma de puerta o ventana sobre el propio elemento constructivo.
- Relleno o tapiado de huecos existentes con el mismo material del entramado murario.
- Disposición de huecos con escalonamiento o reducción paulatina del ancho de abertura.



Fig. 3.273 Mausoleo del Imam Davāzdah (Autor)



Fig. 3.274 Mez. Bagha (Postal)



Fig. 3.275 Mezquita Kusumba (Unesco)



Fig. 3.276 Templo Huaytará (Autor)

- Supresión de elementos no portantes y simplificación ornamental

En gran parte de la arquitectura histórica de fábrica ubicada en zonas de alta sismicidad se aprecia cierta simplificación ornamental si lo comparamos con construcciones equivalentes de otras regiones que no se enfrentan a esta amenaza.

Más allá de la beneficiosa y reiterada sobriedad que encontramos en muchas de estas construcciones, los constructores que plantearon dichas construcciones no perdieron la oportunidad de engalanar sus obras mediante la introducción de distintos recursos ornamentales.

En este sentido, es frecuente encontrar un desarrollo singular de todo lo que respecta a la decoración que se manifiesta en las construcciones ubicadas en zonas de gran peligrosidad. Algunas de las estrategias que encontramos para atenuar los efectos perjudiciales de contar con una decoración no estructural excesiva son las siguientes:

- a. Supresión de cualquier tipo de decoración no portante.
- b. Sustitución de la decoración no portante por ornamentación y motivos geométricos basados en el uso de distintos materiales y formatos de ladrillos y sillares, integrados en la propia estructura del edificio.
- c. Sustitución de la decoración no portante por ornamentación y motivos geométricos basados en el uso del color sobre los elementos constructivos que conforman la propia estructura del edificio.
- d. Sustitución de la decoración no portante por ornamentación y motivos geométricos basados en el uso de bajorrelieves resaltados sobre el plano exterior de la propia estructura del edificio.



Fig. 3.277 Agha Soltan Bakht (Autor)

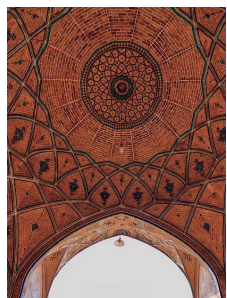


Fig. 3.278 Agha Bozorg (Autor)



Fig. 3.279 Palacio Tabriz (Autor)

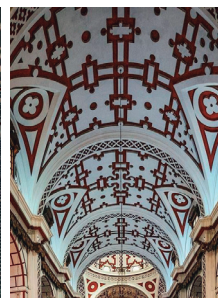


Fig. 3.280 S. Francisco (Autor)

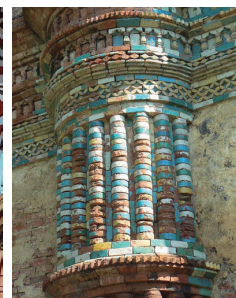


Fig. 3.281 Puerta Gumpi (P. Federico)

Como síntesis de muchos de los puntos comentados en este apartado, se recogen a continuación los tipos estables identificados en el caso de la arquitectura histórica de fábrica perteneciente a las construcciones religiosas de las regiones de Irán, Perú y Bengala, y asociados cada uno de ellos a los siguientes códigos identificativos:

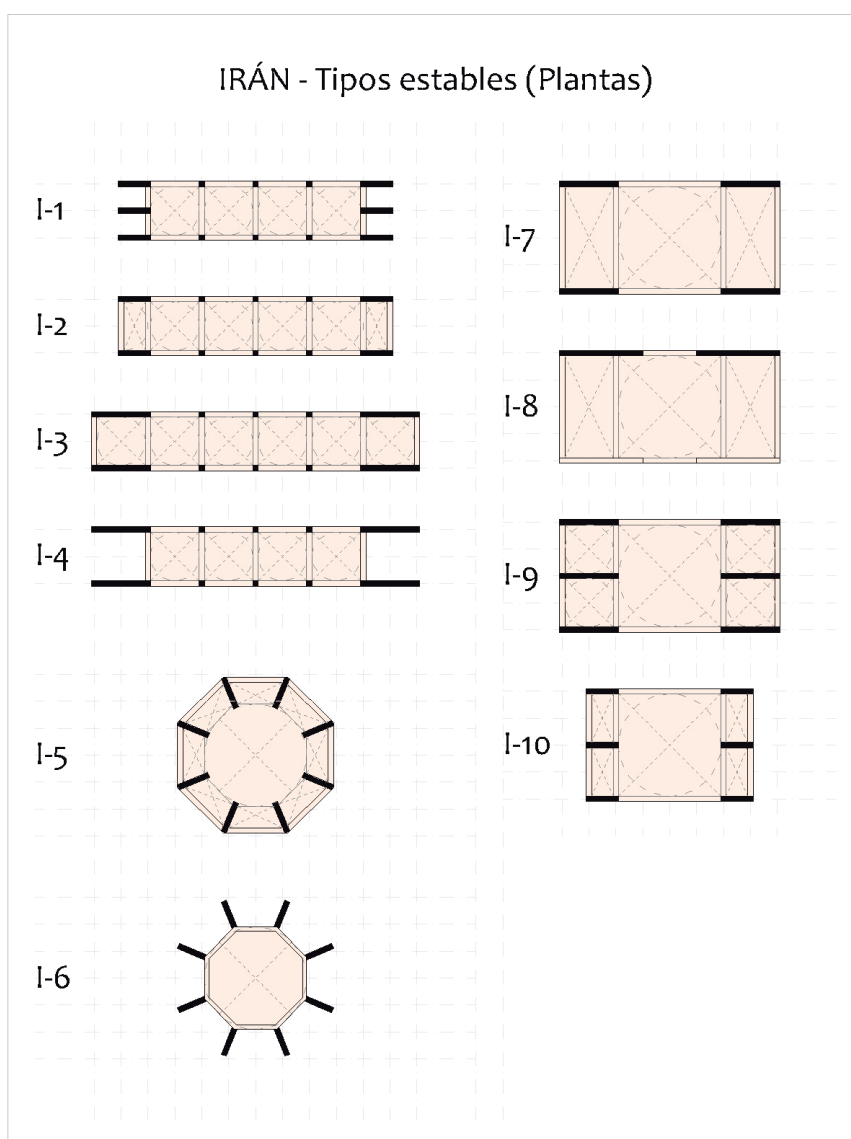


Fig. 3.282 Tipos estables Irán (Autor)

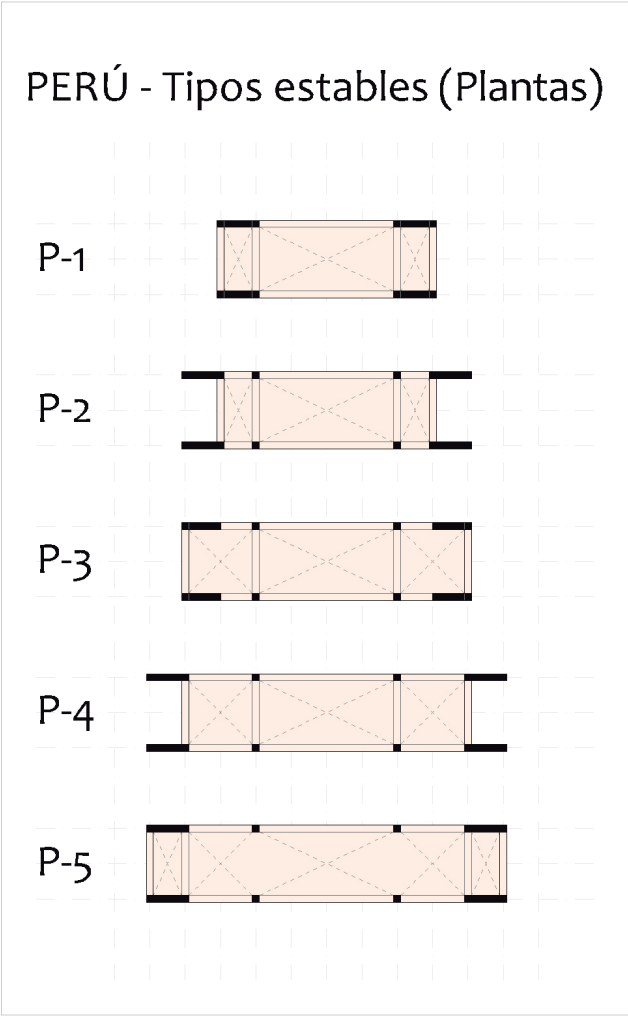


Fig. 3.283 Tipos estables Perú (Autor)

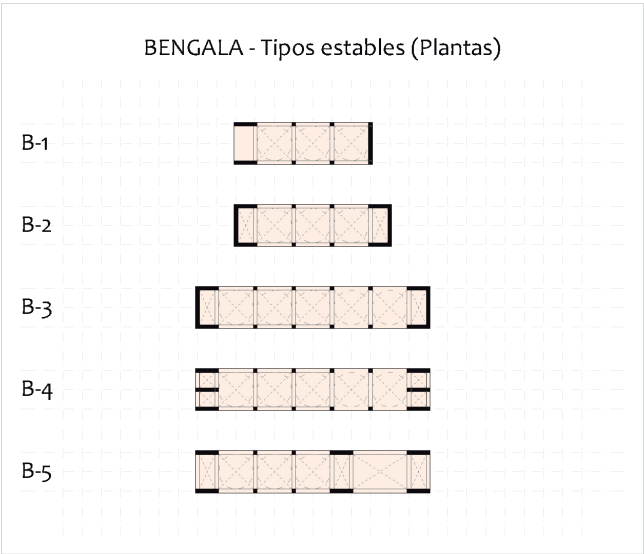


Fig. 3.284 Tipos estables Bengala (Autor)

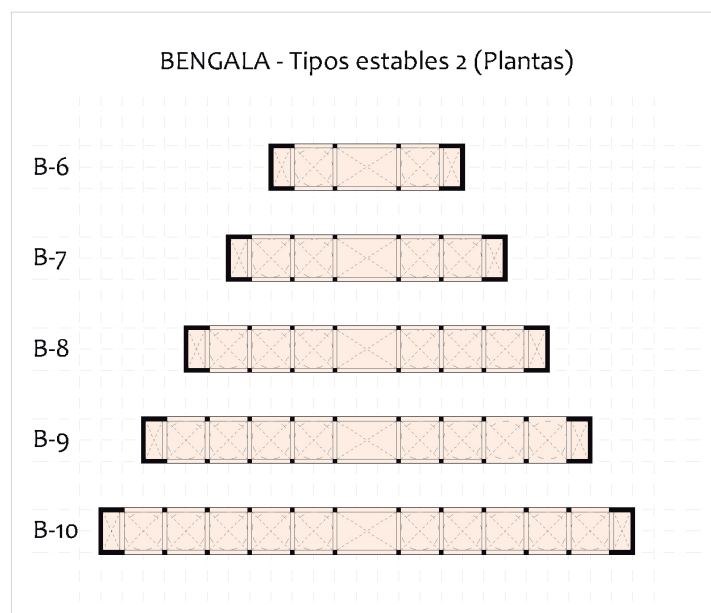


Fig. 3.285 Tipos estables Bengala (Autor)

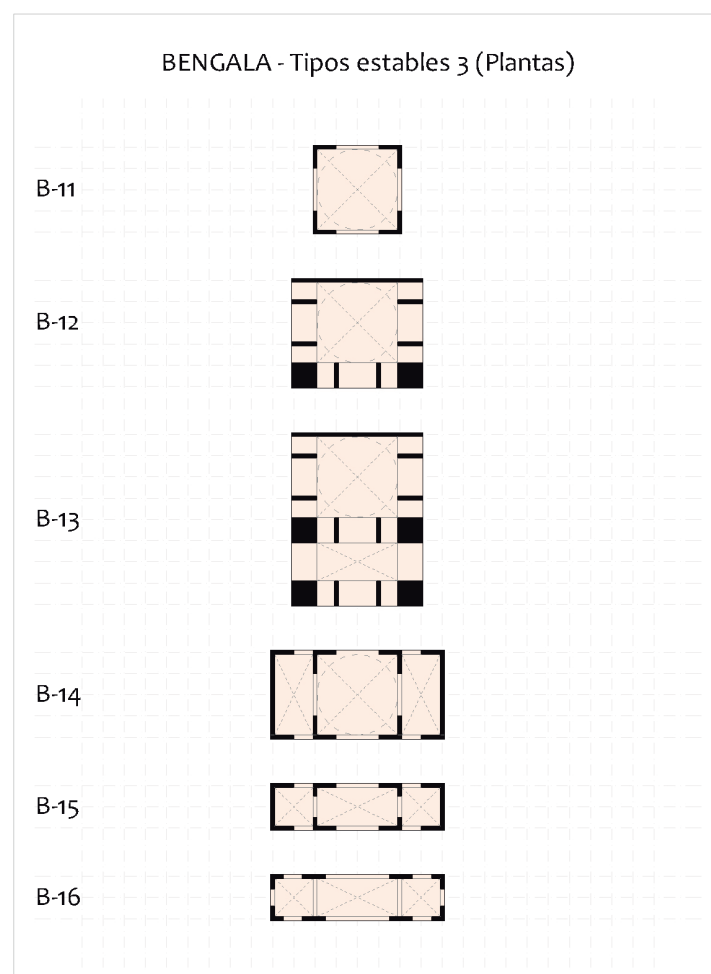


Fig. 3.286 Tipos estables Bengala (Autor)

Como conclusión de este apartado, todos los sistemas y situaciones sismorresistentes relacionados con la configuración general de la construcción que se han mencionado se recogen en el siguiente cuadro resumen en base a los tipos y subtipos establecidos. Esta clasificación, y la referencia alfanumérica ligada a ella, será tomada como referencia en las fichas de cada una de las construcciones recogidas en los anexos ("5.4 Fichas de las muestras seleccionadas").

En la siguiente tabla se añade una columna que recoge, a modo de resumen, el número de variantes identificadas para cada uno de los subtipos en los que se divide cada tipología de este primer grupo dedicado a la configuración general de la construcción:

GRUPOS	TIPOS	SUBTIPOS	Nº variantes identificadas en cada subtipo
A- Configuración general de la construcción	01 Urbano (entorno)	01 Compacidad urbana	4 (a-d)
		02 Anexión externa de edificios adyacentes	3 (a-c)
		03 Fragmentación en volumetrías independientes	4 (a-d)
		04 Adaptación topográfica, urbana y climática	4 (a-d)
		05 Agrupación y atado de edificios	3 (a-c)
	02 Volumétrico (exterior)	06 Ortogonalidad exterior	4 (a-d)
		07 Simetría exterior	4 (a-d)
		08 Compacidad volumétrica	4 (a-d)
		09 Reducción de altura del centro de gravedad	4 (a-d)
		10 Reducción de elementos prominentes y ornamentales	4 (a-d)
		11 Contrafuertes exteriores	6 (a-f)
		12 Contrapesos superiores	5 (a-e)
		13 Arcos de descarga	4 (a-d)
	03 Espacial (interior)	14 Simetría interior	4 (a-d)
		15 Centralización de la planta	8 (a-h)
		16 Modulación interior	4 (a-d)
		17 Disposición de naves a misma altura	4 (a-d)
		18 Integración de contrafuertes interiores dentro de la volumetría principal	3 (a-c)
		19 Apertura e integración de huecos, nichos y hornacinas laterales	3 (a-c)
	04 Constructivo (general)	20 Continuidad material en los distintos planos	5 (a-e)
		21 Inclinação de elementos constructivos	5 (a-e)
		22 Reducción del número y la dimensión de huecos	4 (a-d)
		23 Supresión de elementos no portantes y simplificación ornamental	4 (a-d)

Elaboración propia

3.3.2 ESTRUCTURA MURARIA

De cara a profundizar en el aspecto constructivo de algunos de los elementos mencionados en el apartado anterior, se conforma este segundo bloque relacionado con uno de los puntos más importantes de cualquier estructura histórica de fábrica, su estructura muraria.

En este grupo se ahonda en aquellos sistemas que repercuten directamente en la estabilidad estructural de los muros, que constituyen una de las piezas clave dentro de cualquier esqueleto estructural expuesto a la acción del sismo y sus efectos destructivos.

De cara a una homogeneización de este grupos y los dos siguientes, se propone una subclasificación común para todos ellos, recurriendo a los aspectos sismorresistentes en los que se enmarcan, tanto en este caso como en el de los apartados de "columnas y otros elementos verticales" y también al de "cubiertas", identificando diferentes subtipos dentro de cada uno de estos cuatro tipos comunes que engloban la totalidad de sistemas identificados para cada uno de estos elementos constructivos, así como aquellos que puedan encontrarse a raíz de futuras investigaciones.

El primero de estos tipos recoge todos aquellos sistemas encontrados en las estructuras murarias y que están íntimamente ligados con un adecuado aislamiento sísmico de dichos muros a través de distintas estrategias sismorresistentes que pueden ir desde el tratamiento singular de las capas de cimentación que en muchos casos se han podido observar en construcciones destruidas o reaprovechadas por civilizaciones posteriores, hasta la utilización de diversos sistemas que redujeron el contacto con el terreno y por tanto con los efectos devastadores de los sismos.

En este sentido se aprecian distintas estrategias que buscan minimizar la transmisión de las fuerzas horizontales, dotando de mayor resistencia a este elemento tan relevante dentro de cualquier estructura, y que sin embargo albergan un conocimiento sismorresistente de gran valor que aún hoy en día permanece oculto bajo las enormes construcciones masivas que se sirven de ellos para mantener su estabilidad.

El segundo de los tipos propuestos engloba aquellos sistemas relacionados con todas aquellas estrategias ligadas al principio sismorresistente que busca un aligeramiento de la estructura, en este caso a través de distintas soluciones que permiten reducir en mayor o menor medida la concepción masiva de estos elementos tan relevantes. Algunas de las vías para lograrlo fueron desde la propia supresión de elementos no portantes hasta la sofisticación material que introdujo otros materiales de mayor ligereza dentro del propio entramado murario, como por ejemplo sucede en el caso de los rellenos aligerantes, tal y como se comenta más adelante.

Con el mismo fin se desarrollaron diversas clases de mortero y conectores entre las fábricas que conformaron los muros, que en algunos casos presentan un tratamiento material distribuido gradualmente según la rigidez y resistencia de dichas fábricas.

Como complemento a este tipo de soluciones se plantea un tercer tipo de sistemas vinculados con el atado y

unión entre elementos, tanto a gran escala si hablamos de atado con otros elementos, como a nivel interno si lo que se busca es un atado de las fábricas de los entramados murarios.

Dentro de este gran apartado relacionado con todos aquellos sistemas de atados vinculados a los muros se recogen todos aquellos sistemas de refuerzo de los distintos elementos característicos que encontramos en los entramados murarios, como sucede por ejemplo en el caso de dos de los puntos más vulnerables de cualquier construcción histórica de fábrica: sus huecos y esquinas. También se abordan distintos sistemas de arriostamiento, tanto interno como externo, tal y como sucede con los distintos recursos de contrafuertes que apuntalan las estructuras más vulnerables.

Este tipo de soluciones en muchos casos han sido identificados como consecuencia de un inadecuado mantenimiento y conservación de los entramados murarios que encontramos en las construcciones históricas más expuestas a sismo, pero también como resultado de la reutilización de las fábricas de dichas construcciones llevada a cabo por culturas posteriores, que dejaron a la vista las soluciones que permanecían ocultas dentro de la estructura principal de esos edificios.

Para finalizar, se propone una cuarta tipología de sistemas asociada a los principios de ductilidad y elasticidad, si bien esta característica es más propia de otras partes de la estructura, tal y como se desarrolla más a fondo en el apartado de cubiertas. Sin embargo, el adecuado comportamiento que presentan otros elementos portantes de la estructura en lo que respecta a este principio sismorresistente lo convierte en una medida transversal tal y como se menciona también en el grupo de columnas y otros elementos verticales.

Las estrategias identificadas en este tipo de soluciones que aportan ductilidad al conjunto murario van desde el aprovechamiento de la deformabilidad selectiva de las juntas de mortero hasta la propia composición material de las fábricas utilizadas, que en ocasiones se pueden ver complementadas a su vez por elementos adiciones dispuestos entre ellos con la doble función de mejorar el sistema de atado y proporcionar cierta elasticidad a los tipos estables que desarrollaron las culturas más expuestas al sismo.

En cuanto a la parametrización de dichos sistemas, tal y como se ha mencionado en el apartado anterior, se plantea una taxonomía flexible de cada uno de los sistemas, en función de la morfología y comportamiento estructural de cada solución.

En base a estos subtipos y su caracterización es posible asociar un código específico a cada sistema en los que se puedan reflejar las distintas situaciones dentro de cada uno de ellos. Estos sistemas quedan reflejados, al igual que sucede con los otros tres grupos, en las correspondientes fichas vinculadas a la estructura muraria, con una descripción y contextualización geográfica, estructural y cultural un poco más detallada.

3.3.2.1 Sistemas de tipo "Aislamiento sísmico"

Dentro de los tipos que se han planteado dentro del grupo vinculado a la estructura muraria, aquellos más relacionados con el comportamiento sísmico de la cimentación y el arranque de dichos muros constituyen uno de los puntos más interesantes y con mayor recorrido de cara a su investigación futura.

El carácter subterráneo de muchas de estas estrategias conforma un enorme interrogante, pero también un posible caso de estudio que sin duda seguirá arrojando luz a la sismorresistencia presente en gran parte de los edificios históricos de fábrica que aún permanecen en pie a día de hoy.

En este sentido, los sistemas identificados hasta la fecha posiblemente suponen una pequeña parte de todo el conocimiento antisísmico que se fue desarrollando a lo largo de generaciones por diversas culturas ubicadas en zonas de gran sismicidad. No obstante, la naturaleza de alguno de estos elementos ha permitido analizar muchos de estos sistemas que forman parte del arranque de los edificios más monumentales, gracias por ejemplo a la disposición de enormes plataformas y basamentos que emergen desde el suelo, aportando un aislamiento sísmico más o menos notable a las construcciones que se asientan sobre ellos.

La utilización de sillares e hiladas de mayor dimensión, con piezas de dimensiones realmente colosales en algunas construcciones, permiten analizar el comportamiento general de determinados conjuntos arquitectónicos, aunque mantienen la incógnita de cómo se planteó su asiento sobre el terreno en determinados casos.

En otros, sin embargo, sí que ha sido posible acceder a estas cimentaciones planteadas en zonas de gran riesgo sísmico, en las cuales se llegaron a desarrollar sofisticados tratamientos de las distintas capas que conformaron el lecho de arranque de distintas construcciones de fábricas más o menos masivas.

La riqueza formal y constructiva de estos sistemas queda patente también en el apartado correspondiente al grupo asociado a columnas y otros elementos verticales, donde se completa la caracterización de este tipo de medidas ligadas al aislamiento sísmico de los elementos portantes en contacto con el terreno.

- Disposición de distintas capas de cimentación bajo los muros

Una de los sistemas sismorresistentes presentes en las zonas de mayor sismicidad del planeta lo encontramos precisamente en el punto de encuentro donde confluyen la naturaleza geológica del terreno y el arranque constructivo de cualquier edificación.

El comportamiento estructural de este tipo de sistemas fomenta la búsqueda de situaciones sismorresistentes que afrontan este aislamiento sísmico a través de la mitigación en la transmisión de la energía sísmica, englobando diversos tipos, pero también diferenciándose de otros subtipos que pueden disponerse a través de distintas capas, con un comportamiento estructural algo distinto, tal y como se desglosa en el siguiente subtipo.

La caracterización de los sistemas identificados hasta la fecha, basados en la disposición de distintas capas, permite plantear una taxonomía basada en la configuración material y constructiva de estas capas de cimentación en función del número de capas, origen o naturaleza, y disposición y posible compacidad:

- a. Utilización de distintas capas de cimentación, de origen geológico, dispuestas de manera natural y sin compactar.
- b. Utilización de distintas capas de cimentación, de origen geológico, compactadas total o parcialmente.
- c. Utilización de distintas capas de cimentación, de origen animal o vegetal, dispuestas de manera natural y sin compactar.
- d. Utilización de distintas capas de cimentación, de origen animal o vegetal, compactadas total o parcialmente.
- e. Utilización de distintas capas de cimentación, tanto de origen geológico como animal o vegetal, dispuestas de manera natural y sin compactar.
- f. Utilización de distintas capas de cimentación, tanto de origen geológico como animal o vegetal, compactadas total o parcialmente.
- g. Utilización de una única capa de cimentación, de origen geológico y compactada.
- h. Utilización de una única capa de cimentación, de origen geológico y sin compactar.
- i. Utilización de una única capa de cimentación, de origen animal o vegetal.

- Sistemas de rodamiento y deslizamiento

Al contrario de lo que se ha mencionado previamente para aquellos sistemas basados en la disposición de distintas capas de cimentación, cuya estrategia de aislamiento sísmico buscaba minimizar la energía sísmica transmitida a la construcción, existe un conjunto de sistemas ligado al punto anterior que plantean ligeras diferencias en su comportamiento sismorresistente.

Con los sistemas de rodamiento o deslizamiento que encontramos en las capas de cimentación de muchas construcciones históricas, se busca cierta mitigación, pero en ocasiones, también se fomenta cierto movimiento de los elementos más vulnerables de la estructura, evitando la acumulación de tensiones en los arranques de los muros, con el perjudicial efecto que podría tener para todo el conjunto en caso de desestabilización.

Los sistemas de rodamiento pueden favorecer su propio movimiento y el de los elementos que lo configuran, reasentándose en situaciones de sismo y dando como resultado una nueva situación de equilibrio que impide que el entramado murario acabe colapsando. Tomando como referencia este comportamiento estructural, se pueden diferenciar los siguientes sistemas sismorresistentes:

- Sistema de rodamiento constituido por elementos independientes, de origen geológico.
- Sistema de rodamiento constituido por elementos relacionados entre sí, de origen geológico.
- Sistema de rodamiento constituido por elementos independientes, de origen animal o vegetal.
- Sistema de rodamiento constituido por elementos relacionados entre sí, de origen animal o vegetal.
- Sistema de rodamiento constituido por elementos independientes, tanto de origen geológico como animal o vegetal.
- Sistema de rodamiento constituido por elementos relacionados entre sí, tanto de origen geológico como animal o vegetal.



Fig. 3.287 Restos de Shicras, Caral (B.Dhwty)



Fig. 3.288 Shicras, Caral (EdN)



Fig. 3.289 Entramado de madera, Lahijan (A.Naderzadeh)

- Arranque de muros mediante zócalos de mayor resistencia

De cara a reducir la exposición sísmica de las construcciones más masivas, en muchas de las construcciones históricas de fábrica se recurrió al uso de zócalos de gran resistencia que permiten absorber gran parte de la energía sísmica que se transmite en situaciones de terremoto. Este mecanismo suele ir ligado a la utilización de fábricas de mayor tamaño que las empleadas en el muro, aunque para aquellos casos en los que se recurre a formatos similares tanto en zócalo como en el entramado murario, normalmente se suele compensar con una mayor resistencia material de los elementos que conforman estos arranques.

Además de la dimensión y propiedades materiales de las fábricas que conforman estos zócalos, la variabilidad que presentan estos sistemas depende también del número de hiladas o su disposición en relación al terreno actual. En el primer caso se puede completar la caracterización del subtipo de arranque añadiendo el número de hiladas sobre el nivel del suelo. A la hora de considerar la situación respecto al terreno, sin embargo, surge la problemática de no conocer con exactitud en muchos casos el nivel original del suelo, como consecuencia de sedimentos y baldosados que pueden ser posteriores a la construcción, por lo que considerar su situación actual, emergiendo desde dentro del terreno o sobre él, aporta una información escasamente útil de cara a analizar los distintos tipos de zócalos, identificados en función de la configuración de sus fábricas:

- a. Arranque de muros mediante zócalo a base de sillares de mayor dimensión que las fábricas empleadas en el entramado murario.
- b. Arranque de muros mediante zócalo a base de sillares de igual dimensión que las fábricas empleadas en el entramado murario, pero de mayor resistencia material.
- c. Arranque de muros mediante zócalo a base de mampuestos de mayor dimensión que las fábricas empleadas en el entramado murario.
- d. Arranque de muros mediante zócalo a base de mampuestos de igual dimensión que las fábricas empleadas en el entramado murario, pero de mayor resistencia material.
- e. Arranque de muros mediante zócalo a base de ladrillos de mayor dimensión que las fábricas empleadas en el entramado murario.



Fig. 3.290 Mezquita Azul, Tabriz (Autor)



Fig. 3.291 Iglesia Sto. Domingo. Coricancha, Cusco (Autor)



Fig. 3.292 Zócalo de arranque de muro (A.Naqi)

- Plataformas y basamentos inclinados o en forma de talud

A nivel murario, la inclinación de las plataformas de arranque de los esqueletos estructurales enfatizó el mecanismo de aislamiento sísmico que proporcionaba ya de por sí la utilización de estos grandes basamentos de apoyo. La configuración obtenida en el elemento de encuentro con el terreno ayudó a mejorar el comportamiento general del esqueleto estructural que se apoyó sobre estas plataformas, ayudando a mitigar la transmisión de fuerzas horizontales a la parte superior de la estructura.

La disposición de rellenos en su interior podría constituir una medida complementaria de gran importancia desde el punto de vista estructural, si bien la adopción de este tipo de estrategias sólo puede registrarse en aquellos casos que ha quedado visible después de siglos de reaprovechamiento de sus fábricas o debido al abandono de dichas construcciones. De esta forma, se pueden plantear las siguientes variaciones dentro de este tipo de sistemas:

- Inclinación de la totalidad de la plataforma o basamento sobre la que se erige el edificio, con base poligonal y superficies rectas.
- Inclinación de la totalidad de la plataforma o basamento sobre la que se erige el edificio, con base circular y superficies curvas, a base de sillares o ladrillos también inclinados.
- Inclinación de la totalidad de la plataforma o basamento sobre la que se erige el edificio, con base circular y superficies curvas, a base de sillares o ladrillos rectos o mampuestos sin labrar.
- Inclinación de determinadas secciones de la plataforma o basamento sobre la que se erige el edificio, con base poligonal y superficies rectas.
- Inclinación de determinadas secciones de la plataforma o basamento sobre la que se erige el edificio, con base circular y superficies curvas, a base de sillares o ladrillos también inclinados.
- Inclinación de determinadas secciones de la plataforma o basamento sobre la que se erige el edificio, con base circular y superficies curvas, a base de sillares o ladrillos rectos o mampuestos sin labrar.



Fig. 3.293 Corikancha (Autor)



Fig. 3.294 Palacio arzobispal Cusco (Autor)



Fig. 3.295 Ollantaytambo (Autor)

- Utilización de hiladas y piezas de gran tamaño y resistencia

El mecanismo utilizado en las propias plataformas y basamentos de arranque se extrapoló en algunos casos al propio entramado murario, favoreciendo un aislamiento sísmico en los elementos superiores a través de la disposición de hiladas y piezas de mayor tamaño y resistencia que contenían y minimizaban la transmisión de las fuerzas sísmicas a los elementos de cubrición más vulnerables.

En este sentido, este tipo de elementos intercalados en el muro de mayor tamaño y/o resistencia que las fábricas empleadas en el entramado murario, podían utilizarse a lo largo de una misma hilada de manera continua. Pero también a lo largo de varias hiladas sucesivas o intercaladas, con elementos que podían presentar igual o distinta talla en función de la región, influyendo directamente en una mejora del aislamiento sísmico de la estructura.

A este respecto se pueden identificar distintas situaciones que hacen uso de este tipo de sistemas:

- a. Disposición de una hilada completa de fábricas pétreas, de mayor tamaño y/o resistencia que las empleadas en el entramado murario.
- b. Disposición de varias hiladas completas de fábricas pétreas, de mayor tamaño y/o resistencia que las empleadas en el entramado murario, y colocadas de manera consecutiva.
- c. Disposición de varias hiladas completas de fábricas pétreas, de mayor tamaño y/o resistencia que las empleadas en el entramado murario, y colocadas de manera alterna respecto a las hiladas principales.
- d. Disposición de piezas puntuales de fábricas pétreas, sin continuidad en una misma hilada, pero de mayor tamaño y/o resistencia que las empleadas en el entramado murario.



Fig. 3.296 Machu Picchu (Autor)



Fig. 3.297 Sacsayhuaman (Autor)



Fig. 3.298 Mezquita de Bagha (Postal)

- e. Disposición de una hilada completa de planchas metálicas, de mayor resistencia que las fábricas empleadas en el entramado murario.
- f. Disposición de varias hiladas completas de planchas metálicas, de mayor resistencia que las fábricas empleadas en el entramado murario, y colocadas de manera consecutiva.
- g. Disposición de varias hiladas completas de planchas metálicas, de mayor resistencia que las fábricas empleadas en el entramado murario, y colocadas de manera alterna respecto a las hiladas principales.
- h. Disposición de piezas puntuales de planchas metálicas, sin continuidad en una misma hilada, pero de mayor resistencia que las fábricas empleadas en el entramado murario.



Fig. 3.299 Cimentación Inca, Cusco (Autor)



Fig. 3.300 Muros Cusco (Autor)



Fig. 3.301 Muros incas, Cusco (Autor)

3.3.2.2 Sistemas de tipo "Aligeramiento"

El segundo de los tipos pertenecientes al grupo correspondiente a la estructura muraria es el relacionado con uno de los aspectos más importantes de cara a una mitigación de los posibles daños generados en situaciones de sismos, vinculado a un aligeramiento de la propia estructura.

Si bien esta característica está más vinculada a los sistemas de cubrición de los edificios históricos, tal y como queda de manifiesto a través del concepto "pilar fuerte-viga débil", lo cierto es que en muchos casos un aligeramiento puede llegar a reducir los daños ocasionados por las enormes estructuras masivas sobre otras partes de la estructura, reduciendo por ejemplo las posibilidades de colapso por el temido "efecto ariete".

Para conseguirlo, las estrategias a seguir comparten en algunos puntos los mecanismos de los sistemas empleados también en otros elementos verticales o incluso en las grandes estructuras de cubrición, tal y como ya se ha señalado. Esto posibilita una comparación entre sistemas de distintos grupos, permitiendo el establecimiento de distintos puntos en común entre ellos.

Entre las distintas soluciones implementadas en el entramado murario, es frecuente observar la supresión de distintos elementos no portantes, ya sean de carácter decorativo o incluso funcional, tal y como sucede con algunos muros separadores autoportantes sin función estructural dentro del esqueleto global que conforma el conjunto arquitectónico.

En cuanto al aligeramiento del propio entramado murario portante, los recursos utilizados parten de la necesidad de disponer los elementos de mayor rigidez y resistencia en las zonas próximas al terreno, atajando así el impacto sísmico desde la base del edificio, pero también posibilitando una ligereza mayor en las zonas de mayor altura.

En aquellos casos con una distribución más continua y homogénea dentro del propio muro, los sistemas implementados en las zonas de mayor sismicidad recogen una serie de soluciones que van desde la utilización de sillares, ladrillos y mampostería de composición material más ligera, hasta la experimentación con morteros y rellenos aligerantes que permiten reducir la carga masiva de este tipo de construcciones históricas de fábrica.

- Supresión de paños y otros elementos no portantes

La supresión de elementos constructivos no estructurales supuso uno de los factores decisivos a la hora de reducir el riesgo por efecto ariete sobre los entramados murarios que sí que ejercían un importante desempeño estructural de cualquier edificio.

La posibilidad de dañar determinados muros pertenecientes al esqueleto principal de las edificaciones más monumentales derivó en una supresión de este tipo de elementos masivos en aquellas construcciones ubicadas en zonas de alto riesgo sísmico, depurando todos aquellas particiones y piezas auxiliares en favor de una sinceridad estructural presente en la mayoría de edificios de estas regiones, principalmente a través de las siguientes medidas:

- Inexistencia de paños y otros elementos no portantes adosados a muros estructurales, tanto por el exterior como por el interior del edificio.
- Inexistencia de paños y otros elementos no portantes adosados a muros estructurales por el exterior del edificio.
- Inexistencia de paños y otros elementos no portantes adosados a muros estructurales por el interior del edificio.
- Inexistencia de paños y otros elementos no portantes adosados a columnas y otros elementos verticales con función estructural.



Fig. 3.302 Mezquita Bara Sona, Gaur (Fragmento postal)

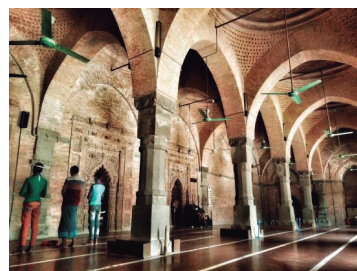


Fig. 3.303 Mezquita de Bagha (F.M.Roni)



Fig. 3.304 Catedral de Lima (Autor)

- Rellenos aligerantes dentro del entramado murario

La utilización de rellenos aligerantes constituye uno de los sistemas más utilizados en distintas regiones de gran sismicidad. Además de la ventaja económica y funcional que posibilita esta solución constructiva a la hora de levantar algunos de los entramados más monumentales de muchas culturas, con una puesta en obra mucho más rápida en el caso de los muros de sillares más elaborados, el empleo de rellenos aligerantes en los núcleos de dichos muros favorece un comportamiento estructural unitario en situaciones de sismo.

El desempeño estructural de este tipo de rellenos es muy similar al implementado también en las columnas, tal y como se desarrolla en el apartado correspondiente, con un funcionamiento que permite tener un anillo externo rígido, y un núcleo interno más ligero que aglutina y conecta ambas caras internas de los entramados murarios, que pueden presentar normalmente un acabado rugoso e irregular o, por el contrario, liso y moderadamente labrado.

A pesar de la dificultad de acceder y verificar la utilización de este tipo de soluciones en las construcciones que permanecen en pie hasta nuestros días, es posible encontrar distintas opciones entre los entramados murarios de edificaciones destruidas o reutilizadas con el paso de los siglos, entre las que se pueden identificar las siguientes:

- a. Rellenos aligerantes confinados en el interior de los entramados murarios estructurales, a base de un único material conglomerante.
- b. Rellenos aligerantes mixtos confinados en el interior de los entramados murarios estructurales, a base de un material conglomerante y otros elementos de relleno de origen pétreo.
- c. Rellenos aligerantes mixtos confinados en el interior de los entramados murarios estructurales, a base de un material conglomerante y otros elementos de relleno de origen cerámico.
- d. Rellenos aligerantes mixtos confinados en el interior de los entramados murarios estructurales, a base de un material conglomerante y otros elementos de relleno de origen vegetal o animal.



Fig. 3.305 Corikancha, Cusco (Autor)



Fig. 3.306 Relleno Cusco (Autor)



Fig. 3.307 Relleno muro Cusco (Autor)



Fig. 3.308 Relleno muros (Autor)

- Reemplazo del mortero por conectores puntuales de mayor ligereza

Una de las estrategias sismorresistentes más empleadas en la arquitectura histórica de fábrica de cara a lograr aligerar en cierto modo las construcciones es la sustitución del mortero por conectores puntuales situados entre fábricas, ocultas a simple vista en los muros que permanecen en pie.

Es por ello que su utilización sólo puede acreditarse en entramados murarios con fábricas separadas o reutilizadas, donde estos sistemas han quedado al descubierto, aunque su uso generalizado en gran parte de la arquitectura histórica ubicada en zona de alto riesgo sísmico hace prever un empleo mucho mayor de este recurso constructivo, sobre todo en aquellas culturas que desarrollaron entramados murarios con fábricas conectadas entre sí directamente sin el uso aparente de mortero entre ellas.

En función de los distintos materiales empleados para aligerar el muro sin necesidad de tener que renunciar al efecto aglutinante del mortero, los conectores puntuales podrían clasificarse de la siguiente manera:

- Sustitución de la capa de mortero por conectores puntuales y grapas de origen metálico.
- Sustitución de la capa de mortero por conectores puntuales de origen vegetal.
- Sustitución de la capa de mortero por conectores puntuales de tipo conglomerante.
- Sustitución de la capa de mortero por conectores puntuales de tipo pétreo.
- Sustitución de la capa de mortero por conectores puntuales de tipo mixto, ya sea mediante conectores de distinto tipo o la combinación de distintos materiales de la misma naturaleza para un mismo conector.



Fig. 3.309 Corikancha Cusco (Autor)

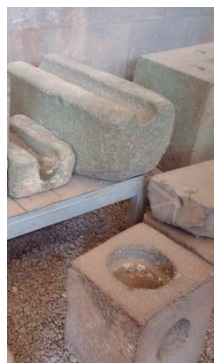


Fig. 3.310 Corikancha (Autor)



Fig. 3.311 Hendidura Corikancha, Cusco (Autor)

- Utilización de sillares o ladrillos de composición material más ligera

De entre todas las estrategias de aligeramiento presentes en el entramado murario, la utilización de sillares o ladrillos de composición material más ligera fue uno de los sistemas que permitieron su puesta en práctica en la totalidad del muro, constituyendo un importante ahorro de materiales nobles y posibilitando una aplicación más o menos puntual en determinadas hiladas, o bien en grandes áreas de determinados paños del muro.

Las variantes materiales que encontramos en este tipo de sistemas se manifiestan en un abanico de opciones que van desde fábricas pétreas de mayor ligereza que las utilizadas en los entramados murarios, hasta la utilización de ladrillos cerámicos o de naturaleza vegetal perfectamente integrados como una pieza más, como por ejemplo sucede con la inserción de bloques de madera dentro de muros de piedra o ladrillo.

En este sentido, se pueden diferenciar las siguientes situaciones:

- a. Utilización de sillares o ladrillos de composición material más ligera que las empleadas en el entramado murario, dispuestos en una hilada completa.
- b. Utilización de sillares o ladrillos de composición material más ligera que las empleadas en el entramado murario, dispuestos en varias hiladas completas y colocadas de manera consecutiva.
- c. Utilización de sillares o ladrillos de composición material más ligera que las empleadas en el entramado murario, dispuestos en varias hiladas completas pero alternadas respecto a las hiladas principales.
- d. Utilización de sillares o ladrillos de composición material más ligera que las empleadas en el entramado murario, dispuestos de manera puntual y sin continuidad en una misma hilada.



Fig. 3.312 Mezquita Baraduari Sona (K.Miah)



Fig. 3.313 Mezquita Baraduari (Fragmento postal)



Fig. 3.314 Sillar de Arequipa (Autor)

- Distribución gradual de los materiales según su peso

En el caso de entramados murarios que combinan dos o más materiales distintos, uno de los aspectos más importantes de cara a lograr un comportamiento sismorresistente realmente efectivo viene ligado a la correcta distribución de éstos en función de sus cualidades materiales, con los materiales de mayor peso en las secciones inferiores y los más ligeros en las zonas superiores.

A este respecto, una de las características más importante a tener en cuenta por los arquitectos que tuvieron la responsabilidad de erigir las construcciones erigidas en zona sísmica tuvo mucho que ver con el peso de las fábricas empleadas y la combinación de éstas para dotar de resistencia, y también de cierta ligereza, a los paños con función estructural.

Para lograrlo, la distribución de los distintos materiales dentro de un mismo muro podía variar de la siguiente forma:

- a. Distribución gradual de la totalidad de materiales que conforman el entramado murario portante de la totalidad del edificio.
- b. Distribución gradual de la totalidad de materiales que conforman el entramado murario portante perimetral.
- c. Distribución gradual de la totalidad de materiales que conforman determinados entramados murarios portantes del edificio.
- d. Distribución gradual de los materiales que constituyen el arranque, cuerpo y coronación de los muros.
- e. Distribución gradual únicamente de los materiales que constituyen el arranque de los muros.

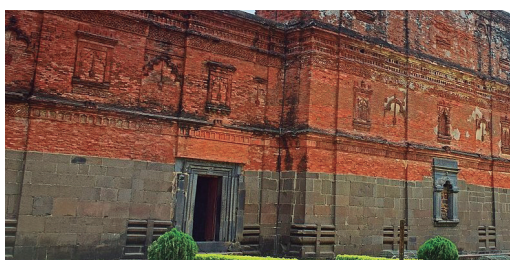


Fig. 3.315 Mezquita Adina, Pandua (A.Gupta)



Fig. 3.316 Convento Santo Domingo, Cusco (Autor)



Fig. 3.317 San Juan Bautista de Huaytará (Autor)

- Reducción de decoración no estructural

Tal y como se ha mencionado en el caso del primer grupo de sistemas relacionados con la configuración general de la construcción, la simplificación ornamental de los elementos que componen las construcciones históricas más monumentales se extrapoló también a los propios entramados murarios.

Si bien es cierto que estos elementos no concentran tanta carga ornamental como otras partes de los edificios de fábrica, la utilización de decoración no estructural se verá escasamente representada en el patrimonio histórico ubicado en zonas de alta sismicidad.

Para contrarrestar esta sobriedad en los entramados murarios portantes, los constructores de estas regiones recurrieron principalmente a una serie de estrategias que posibilitaban introducir cierta creatividad artística en los muros, sobre todo en los de fachada:

- Supresión de cualquier tipo de decoración no portante.
- Sustitución de la decoración no portante por ornamentación y motivos geométricos basados en el uso de distintos materiales integrados en el propio entramado murario del edificio.
- Sustitución de la decoración no portante por ornamentación y motivos geométricos basados en el uso de distintos formatos de ladrillos y sillares, integrados en el propio entramado murario del edificio.
- Sustitución de la decoración no portante por ornamentación y motivos geométricos basados en el uso del color sobre los elementos constructivos que conforman el propio entramado murario del edificio.
- Sustitución de la decoración no portante por ornamentación a base de azulejos sobre el plano exterior del propio entramado murario del edificio.
- Sustitución de la decoración no portante por ornamentación y motivos geométricos basados en el uso de bajorrelieves resaltados sobre el plano exterior del propio entramado murario del edificio.



Fig. 3.318 Agha Soltan Bakht (Autor)



Fig. 3.319 Mezquita Kerman (Autor)



Fig. 3.320 Mezquita de Kerman (Autor)



Fig. 3.321 Puerta Gumpti, Gaur (LHI)

3.3.2.3 Sistemas de tipo "Atado y unión de elementos"

A la hora de asegurar la estabilidad de los entramados murarios, los sistemas de tipo "atado" desempeñan un papel fundamental de cara a asegurar no solo la correcta unión de las propias fábricas que lo componen, sino también una adecuada conexión entre los distintos elementos adyacentes a dichos muros.

La configuración estructural de estos muros y su armonía dentro de todo el conjunto fomentó la aparición de distintos sistemas integrados dentro del propio esqueleto estructural, lo cual puede llegar a producir cierto enmascaramiento de dichas soluciones, tal y como sucede por ejemplo en el caso de los entramados de enjutas.

La función estabilizadora de este tipo de estrategias queda patente también en todo tipo de refuerzos y conectores incrustados dentro del entramado murario, ocultos por tanto a simple vista en el caso de muros en buen estado, donde en muchos casos resulta difícil identificar y verificar el empleo de estos refuerzos interiores a simple vista.

Por el contrario, algunos de los sistemas que sí que son más detectables incluso en aquellos muros en perfecto estado de conservación son los empleados como refuerzos en huecos y esquinas, donde algunas de las medidas forman parte del entramado murario visible a través del maclado de sillares o los distintos tipos de tallas empleadas. De igual forma sucede con todos aquellos refuerzos exteriores orientados a contrarrestar las posibles fuerzas horizontales tan características en situaciones de sismo, tal y como sucede con contrafuertes y arcos de descarga.

En lo que respecta al arriostramiento de estos entramados murarios, las distintas soluciones de atado abordan tanto la interconexión entre los distintos muros como la correcta unión con otros elementos como las columnas, principalmente a través de distintos tipos de tirantes que permiten alcanzar un comportamiento lo más unitario posible ante situaciones de sismo.

Este arriostramiento puede venir incluido directamente sobre el propio entramado murario, especialmente en aquellos dispuestos en todo el perímetro del esqueleto estructural principal, tal y como se desarrolla más adelante.

- Entramados de enjutas

La disposición de enjutas sobre los arcos principales de la estructura supone uno de los sistemas más efectivos cuando la estructura se enfrenta a los efectos devastadores que puede llegar a ocasionar un terremoto. Tal y como ya se ha mencionado en el caso de los tipos estructurales de las catedrales góticas españolas, la utilización de estos entramados enjutados favorece un comportamiento unitario en situaciones de sismo, pudiendo complementarse con otras medidas adicionales de contrarresto en función del grado de enjutamiento.

A la hora de plantear estos enjutamientos, resulta determinante el grado de enjutamiento empleado en las naves principales, con un comportamiento mejorado en el caso de enjutar no sólo los arcos principales (formeros), sino también los arcos transversales (fajones), que permiten un arriostramiento más acentuado en toda la sección superior del esqueleto estructural, y en última instancia, en el desempeño estructural de todo el conjunto. Para diferenciar las distintas situaciones utilizadas en los casos con cubierta plana aterrazada, se pueden identificar los siguientes sistemas de atado según el grado de enjutamiento de las naves principales:

- a. Enjutamiento de los arcos perimetrales principales (formeros), en edificaciones con una única nave.
- b. Enjutamiento de los arcos principales y transversales (formeros+fajones), en edificaciones con una única nave.
- c. Enjutamiento de los arcos perimetrales principales (formeros), en edificaciones con dos o tres naves a la misma altura.
- d. Enjutamiento de los arcos principales y transversales (formeros+fajones), en edificaciones con dos o tres naves a la misma altura.
- e. Enjutamiento de los arcos perimetrales principales (formeros), en edificaciones con cuatro o más naves a la misma altura.
- f. Enjutamiento de los arcos principales y transversales (formeros+fajones), en edificaciones con cuatro o más naves a la misma altura.

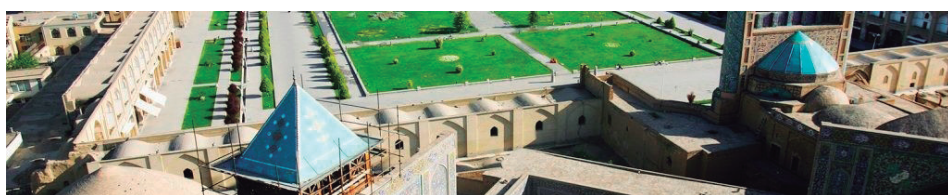


Fig. 3.322 Plaza Naqsh-e Jahan, Isfahan (Fragmento postal)



Fig. 3.323 Mezquita Nasir al-Mulk (Autor)

- Refuerzos y armados integrados dentro del entramado murario

Con el fin de fortalecer la estructura a nivel interno, se incluyeron en determinados casos refuerzos y armados incrustados dentro del propio entramado murario, reforzando estos elementos de manera análoga al funcionamiento que presentan recursos constructivos como el hormigón armado contemporáneo.

La ubicación y disposición de este tipo de armados internos, así como el tamaño y tipo de material empleado, permiten una caracterización de estos sistemas sismorresistentes, que actúan no sólo desde el punto de vista del atado estructural, sino también para alcanzar cierto aligeramiento de la estructura en muchos casos, tal y como sucede con los esqueletos y entramados de madera incrustados en las esquinas y huecos.

Algunos de los sistemas identificados en la arquitectura histórica de fábrica son los siguientes:

- Refuerzos puntuales de origen vegetal incrustados dentro del entramado murario.
- Refuerzos puntuales de origen metálico incrustados dentro del entramado murario.
- Refuerzos puntuales de tipo pétreo incrustados dentro del entramado murario.
- Combinación de refuerzos puntuales, dando lugar a refuerzos de tipo mixto incrustados dentro del entramado murario, ya sea mediante la combinación de materiales de distinta o de la misma naturaleza.
- Refuerzos o armados continuos, de origen vegetal e incrustados dentro del entramado murario.
- Refuerzos o armados continuos, de origen metálico e incrustados dentro del entramado murario.
- Refuerzos o armados continuos, de tipo pétreo e incrustados dentro del entramado murario.
- Combinación de refuerzos o armados continuos, dando lugar a refuerzos de tipo mixto incrustados dentro del entramado murario, ya sea mediante la combinación de materiales de distinta o de la misma naturaleza.



Fig. 3.324 Casa de Hielo, Bam (E.Mokhtari)



Fig. 3.325 Malla de refuerzo, Bam (Autor)



Fig. 3.326 Malla refuerzo, Bam (Autor)

- Refuerzos de esquinas y huecos a través de sus propias fábricas

Dentro del entramado murario de las construcciones históricas de fábrica, las esquinas y huecos de los muros constituyen dos de los elementos más vulnerables en situaciones de sismo, como consecuencia de ser dos de los focos más importantes de acumulaciones de tensiones en situación de terremoto.

Para paliar esta situación que podía desembocar en muchos casos en el desplazamiento de las fábricas y posterior colapso de estos elementos tan relevantes desde el punto de vista estructural, los constructores de las distintas regiones sísmicas idearon distintos sistemas de reforzamiento de estos puntos, ya fuese a través de las propias fábricas o mediante elementos auxiliares incrustados en ellas, tal y como puede caracterizarse a través de los siguientes tipos de refuerzos:

- a. Utilización de sillares en forma de L para atar hiladas adyacentes ubicadas en dos planos distintos.
- b. Utilización de un mismo sillar con forma poligonal para configurar al mismo tiempo la esquina entre jamba y dintel, o bien jamba y antepecho.
- c. Utilización de un mismo sillar con forma poligonal para configurar al mismo tiempo las dos esquinas entre dintel, jamba y antepecho.
- d. Utilización de sillares reforzados con ensanchamiento o relieve en las esquinas.
- e. Utilización de fábricas de mayor tamaño en comparación con las empleadas en el entramado murario, dentro del plano del muro, empleadas para configurar los huecos o esquinas.
- f. Utilización de fábricas de mayor tamaño en comparación con las empleadas en el entramado murario, fuera del plano del muro, empleadas para configurar huecos o esquinas recrecidos.
- g. Utilización de fábricas de mayor resistencia en comparación con las empleadas en el entramado murario, empleadas para configurar los huecos o esquinas.

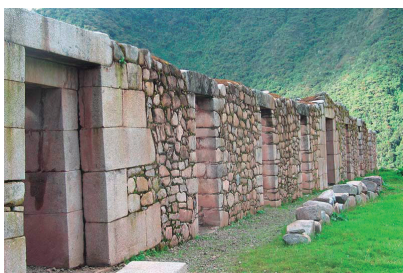


Fig. 3.327 Vilcabamba (Autor)



Fig. 3.328 Muro Inca (Autor)



Fig. 3.329 Convento de Santo Domingo, Cusco (Autor)



Fig. 3.330 Machu Picchu (Autor)

- Refuerzos exteriores, contrafuertes, codales y arcos de descarga

La disposición de refuerzos en los entramados murarios perimetrales se desarrolló ampliamente por gran parte de las regiones ubicadas en zonas sísmicas, ya fuese a través de contrafuertes o arcos de descarga.

Aunque la disposición más habitual de este tipo de refuerzos se situara en el exterior de los edificios, lo cierto es que en muchos casos se introdujeron estos elementos hacia el interior, integrando todos estos contrafuertes y arcos de descarga dentro de la propia estructura, mimetizando su desempeño estructural con otros fines de tipo más funcional, ya fuese para generar espacios, crear divisiones entre ellos, o servir de soporte para todo tipo de aspectos, ligados por ejemplo al propio culto en el caso de las edificaciones religiosas.

Teniendo en cuenta estas consideraciones relacionadas con su disposición en relación al entramado murario, se pueden categorizar estos refuerzos de la siguiente manera:

- Contrafuertes o refuerzos exteriores, de la misma altura que el entramado murario, y con sección recta y continua.
- Contrafuertes o refuerzos interiores, de la misma altura que el entramado murario, y con sección recta y continua.
- Contrafuertes o refuerzos exteriores, de la misma altura que el entramado murario, y con sección recta y decreciente.
- Contrafuertes o refuerzos exteriores, de menor altura que el entramado murario, y con sección recta y continua.
- Contrafuertes o refuerzos exteriores, de menor altura que el entramado murario al que da soporte, y con sección recta y decreciente.
- Contrafuertes o refuerzos exteriores, de la misma altura que el entramado murario, y con sección curva y continua.

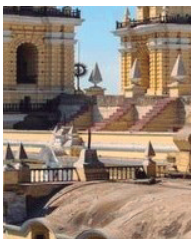


Fig. 3.331 S. Francisco (Postal)

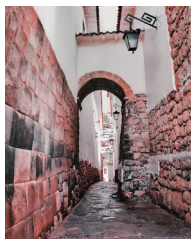


Fig. 3.332 Cusco (Autor)

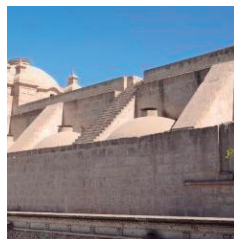


Fig. 3.333 Compañía de Jesús (Autor)



Fig. 3.334 Bazar de Tabriz (M.G.Aure)

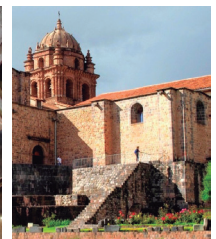


Fig. 3.335 Corikancha (Autor)

g. Contrafuertes o refuerzos exteriores, de la misma altura que el entramado murario, y con sección curva y decreciente.

h. Contrafuertes o refuerzos exteriores, de menor altura que el entramado murario, y con sección curva y continua.

i. Contrafuertes o refuerzos exteriores, de menor altura que el entramado murario, y con sección curva y decreciente.

j. Utilización de codales o arcos de descarga en el exterior del edificio.

k. Utilización de codales o arcos de descarga en el interior del edificio.

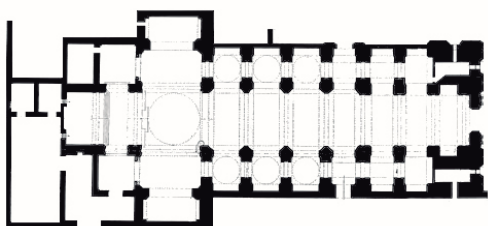


Fig. 3.336 Basílica de San Francisco (Autor)

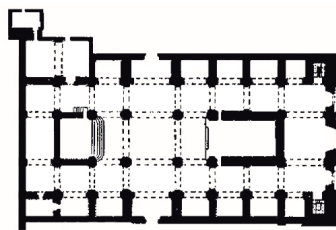


Fig. 3.337 Catedral Cusco (Autor)

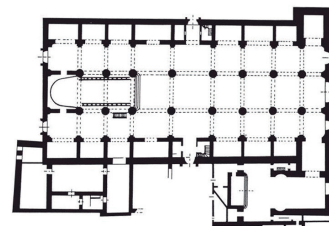


Fig. 3.338 Catedral de Lima (Autor)

- Conectores entre sillares y ladrillos

A pesar de la distancia cultural, espacial y cronológica, la utilización de conectores entre sillares y ladrillos se puede considerar una de las medidas más singulares, y a la vez transversales, dentro de las distintas arquitecturas históricas de fábrica ubicadas en zonas de gran sismicidad, muchas de ellas sin aparente conexión cultural más allá de la exposición sísmica a la que se vieron sometidas sus construcciones.

La disposición de estos elementos suele llevarse a cabo entre las distintas caras adyacentes de los propios sillares o ladrillos, incrustándose mediante distintos tipos de hendiduras en las caras internas del muro, ocultas a simple vista desde cualquier de las superficies del muro.

A nivel material, este tipo de sistemas sismorresistentes abarcaron piezas de origen pétreo, cerámico, metálico, vegetal o distintos tipos de conglomerante, los cuales se utilizaron indistintamente en diferentes tipos de conectores según su forma y disposición entre fábricas:

- Conectores en forma de clavijas y grapas incrustadas en hendiduras realizadas en las caras horizontales y/o verticales de piezas adyacentes.
- Conectores en forma de travesaños incrustados en hendiduras realizadas en las caras horizontales y/o verticales de piezas adyacentes.
- Conectores en forma de planchas situadas en las caras horizontales y/o verticales de piezas adyacentes.
- Conectores en forma de rellenos conglomerantes vertidos y endurecidos sobre hendiduras realizadas en las caras horizontales y/o verticales de piezas adyacentes.
- Conectores en forma de fundidos metálicos vertidos y endurecidos sobre hendiduras realizadas en las caras horizontales y/o verticales de piezas adyacentes.
- Conectores en forma de fábricas transversales de mayor tamaño, perpendiculares al muro.



Fig. 3.339 Grapas Qorikancha (Autor)



Fig. 3.340 Hendiduras grapas Qorikancha (Autor)



Fig. 3.341 Conectores Arg-e-Tabriz (Autor)

- Incorporación de tirantes y codales

El arriostramiento de los distintos entramados murarios pertenecientes a construcciones históricas se vino desarrollando prácticamente hasta nuestros días en aquellas edificaciones más expuestas al sismo y con grandes posibilidades de verse dañadas en situaciones de terremotos futuros.

Para asegurar una correcta conexión entre los distintos elementos se planteó en muchos casos la incorporación de tirantes y codales que atasen estos elementos entre sí y asegurasen un comportamiento más unitario de todo el esqueleto estructural del edificio, evitando el colapso de muros muy próximos entre sí que pudieran verse afectados por derrumbes parciales.

En este sentido, la utilización de estos sistemas podía llevarse a cabo durante el proceso de construcción o a posteriori, una vez que la estructura experimentase los efectos destructivos de los sismos. En este supuesto es difícil contar con la fecha exacta de incorporación de estos sistemas, si bien el encuentro con el muro y el tipo de pieza empleada permite identificar en determinados casos si se trata de una medida adoptada desde un inicio o necesariamente ha debido ser implementada con posterioridad. Teniendo en cuenta este matiz, podemos diferenciar entre las siguientes variantes de este sistema sismorresistente:

- a. Incorporación de tirantes y codales metálicos entre distintos entramados murarios adyacentes.
- b. Incorporación de tirantes y codales metálicos entre entramados murarios y columnas u otros elementos verticales portantes adyacentes.
- c. Incorporación de tirantes y codales de madera entre distintos entramados murarios adyacentes.
- d. Incorporación de tirantes y codales de madera entre entramados murarios y columnas u otros elementos verticales portantes adyacentes.



Fig. 3.342 Iglesia de Belén (Autor)



Fig. 3.343 Tirantes de madera (Irán)



Fig. 3.344 Mezquita Sayed, Isfahan (Autor)

- Traba y maclado de las fábricas

El desarrollo experimentado por muchas culturas en lo que respecta al tallado y maclado de las fábricas tuvo un impacto excepcional en el arriostramiento interno de los entramados murarios más monumentales, en los que se hizo conveniente dotar del mejor atado posible a dichos muros ante situaciones de sismo.

En el caso de las fábricas de ladrillo, las distintas leyes de traba suplieron en cierto modo un atado algo menos preciso que en el caso de las fábricas pétreas, donde los niveles de minuciosidad a la hora de plantear los encuentros entre sillares podían llegar a alcanzar altas cotas de precisión incluso en muros de menor entidad estructural.

A este respecto se recogen algunos de los tipos de aparejo más empleados en lo que respecta al tallado de las fábricas que conforman los muros:

- Entramado murario con aparejo de tipo poligonal o engastado, con piezas con gran número de lados y ángulos, pero perfectamente talladas y pulidas, con un encaje milimétrico entre sí.
- Entramado murario con aparejo de tipo ciclópeo, con piezas de gran tamaño, pero con un gran nivel de tallado en sus caras. Puede presentar con piezas más pequeñas como "relleno" entre grandes bloques.
- Entramado murario con aparejo de tipo sedimentario, con piezas trapezoidales o rectangulares perfectamente labradas y formando hiladas horizontales bien definidas.
- Entramado murario con aparejo de tipo celular, con piezas labradas con acabado convexo y encajadas al milímetro entre sí.
- Entramado murario con aparejo de tipo rústico, con piezas ligeramente labradas y colocadas sin mayor acomodo, rellenando los vacíos con tierra y pequeños cantos rodados.
- Entramado murario con fábricas de acabado deliberadamente rugoso e irregular para un mejor agarre del mortero utilizado.
- Entramado murario con aparejo de tipo mixto, combinación de dos o más tipos de formatos de aparejo distinto.



Fig. 3.345 Engastado (I. Budzbon)

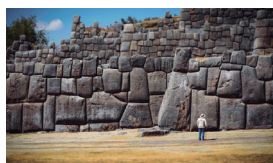


Fig. 3.346 Ciclópeo (Autor)



Fig. 3.347 Sedimentario (Autor)



Fig. 3.348 Celular (Autor)

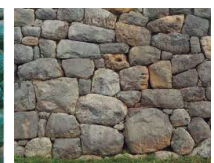


Fig. 3.349 Rústico (Autor)

- Arriostramiento de los muros en su coronación, arranque y/o cimentaciones.

Dentro de los sistemas concebidos para servir como arriostramiento interno de los muros, el atado perimetral exterior supone una de las medidas de atado más relevantes de cara a lograr un comportamiento lo más unitario y estable posible, evitando así posibles desajustes a la hora de enfrentar los desplazamientos horizontales de cualquier seísmo, incluso desde el planteamiento de la propia cimentación.

La concepción constructiva de estos arriostramientos y su funcionamiento estructural como verdaderos cinturones de atado favoreció su adaptación a distintos elementos constructivos de los edificios, tal y como se desarrolla más adelante. En el caso de los entramados murarios, se pueden identificar las siguientes aplicaciones para este tipo de sistema sismorresistente:

- a. Arriostramiento perimetral de todo el entramado murario a través de un único cinturón de atado compuesto por piezas de mayor resistencia y/o dimensión que las fábricas empleadas en el muro.
- b. Arriostramiento perimetral de todo el entramado murario a través de dos o más cinturones de atado compuestos por piezas de mayor resistencia y/o dimensión que las fábricas empleadas en el muro.
- c. Arriostramiento perimetral de todo el arranque del muro a través de un único cinturón de atado dispuesto en la base, y compuesto por una o varias hiladas de piezas de mayor resistencia y/o dimensión que las fábricas empleadas en el entramado murario.
- d. Arriostramiento completo de toda la cimentación del entramado murario a través de piezas de mayor resistencia y/o dimensión que las fábricas empleadas en el muro.
- e. Arriostramiento perimetral o parcial de la cimentación del entramado murario a través de piezas de mayor resistencia y/o dimensión que las fábricas empleadas en el muro.
- f. Arriostramiento combinado tanto en la cimentación como en el propio entramado murario a través de piezas de mayor resistencia y/o dimensión que las fábricas empleadas en el muro.



Fig. 3.350 Mezquita de Bagha (Fragmento postal)

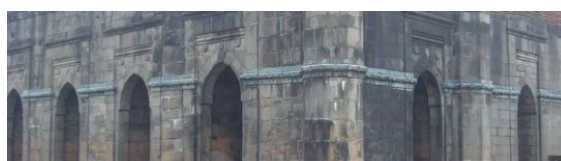


Fig. 3.351 Mezquita de Baraduari (G.K.Das)

3.3.2.4 Sistemas de tipo "Elasticidad y ductilidad"

El último de los tipos establecidos es el que abarca todos aquellos sistemas relacionados con una mejora de las propiedades dúctiles de alguno de los elementos que conforman los entramados murarios realizados en fábrica.

Si bien este tipo de sistemas presentan una mayor implementación y desarrollo en el caso de las cubriciones y otros elementos horizontales, lo cierto es que este tipo de medidas aporta una mejora transversal a distintos elementos que conforman el esqueleto estructural principal de algunas de las construcciones más ambiciosas de determinadas culturas.

La consecución de situaciones de cierta elasticidad, también en el apartado murario, puede llegar a comportar beneficios estructurales a todo el conjunto, sobre todo en aquellos esqueletos constructivos con configuraciones excesivamente rígidas que reclaman una leve mejora de su capacidad deformable, evitando así en última instancia la acentuación del temido efecto ariete entre sus muros principales.

Para alcanzar este equilibrio entre estabilidad, rigidez y ductilidad, algunos de los ejemplos históricos de construcciones de fábrica que han llegado hasta nuestros días aportan más información sobre qué elementos de los entramados murarios pudieron ver mejorada esta faceta sismorresistente.

Uno de los más claros se encuentra en la dimensión y composición material de las juntas de mortero, con un desarrollo especialmente llamativo en las construcciones ubicadas en regiones de alta sismicidad, donde es posible por ejemplo encontrar espesores de junta del doble de dimensión que la propia hilada de las fábricas que conforman los muros.

De igual forma, las construcciones de estas zonas presentan distintas estrategias incluidas en el propio entramado murario, ya sea a través de distintos tipos de elementos que aportan una mayor ductilidad al muro en función de su ubicación, disposición y tamaño.

Por su parte, las propias fábricas empleadas en este tipo de construcciones presentan en algunos casos características materiales que propician un mejor comportamiento sismorresistente de la totalidad del muro, pero también en otros elementos, tal y como se desarrolla más adelante.

- Tratamiento singular de las juntas

Tal y como ya se ha mencionado, uno de los aspectos más importantes en el desempeño estructural de las construcciones de fábrica radica en el correcto tratamiento material de las juntas de mortero planteadas.

La deformabilidad selectiva que se busca en determinadas situaciones, así como la dimensión y configuración de dichas juntas, permiten clasificar distintos recursos sismorresistentes utilizados en muchas de las construcciones históricas expuestas a los seísmos de manera recurrente:

- a. Incremento del espesor de junta, con capas de mortero de espesor igual o mayor que la mitad del ancho de la fábrica empleada.
- b. Disposición de juntas triangulares entre fábricas trapezoidales.
- c. Utilización de morteros con composición material a base de toba o ceniza volcánica molida.
- d. Utilización de morteros con composición material a base de fragmentos cerámicos.
- e. Utilización de morteros con composición material a base de plomo.
- f. Utilización de morteros con composición material a base de cal.
- g. Utilización de morteros con composición material a base de barro.
- h. Utilización de morteros con composición material a base de fibras vegetales.
- i. Utilización de morteros con composición material a base de teja triturada.



Fig. 3.352 Mortero Bam (Autor)



Fig. 3.353 Mortero de barro (Autor)



Fig. 3.354 Juntas trapezoidales, Chan Chan (Autor)



Fig. 3.355 Mortero de pirita (Autor)

- Incorporación de elementos puntuales de mayor ductilidad

La disposición de una serie de elementos de mayor ductilidad en el entramado murario constituye uno de los sistemas sismorresistentes más empleados por distintas culturas que tuvieron que hacer frente a la acción del sismo. La ubicación y tamaño de las distintas piezas puntuales identificadas permite distinguir entre diversas estrategias constructivas adoptadas en los encuentros más vulnerables a la hora de afrontar las sacudidas más violentas:

- Incorporación de elementos puntuales de mayor ductilidad y tamaño que las fábricas empleadas, dispuestos de manera homogénea en la totalidad del muro.
- Incorporación de elementos puntuales de mayor ductilidad y tamaño que las fábricas empleadas, dispuestos de manera localizada en una determinada sección del muro.
- Incorporación de elementos puntuales de mayor ductilidad y tamaño que las fábricas empleadas, dispuestos en las esquinas y bordes del muro.
- Incorporación de elementos puntuales de mayor ductilidad y tamaño que las fábricas empleadas, dispuestos en las jambas de los huecos del muro.
- Incorporación de elementos puntuales de mayor ductilidad que las fábricas empleadas, dispuestos de manera homogénea en la totalidad del muro.
- Incorporación de elementos puntuales de mayor ductilidad que las fábricas empleadas, dispuestos de manera localizada en una determinada sección del muro.
- Incorporación de elementos puntuales de mayor ductilidad que las fábricas empleadas, dispuestos en las esquinas y bordes del muro.
- Incorporación de elementos puntuales de mayor ductilidad que las fábricas empleadas, dispuestos en las jambas de los huecos del muro.

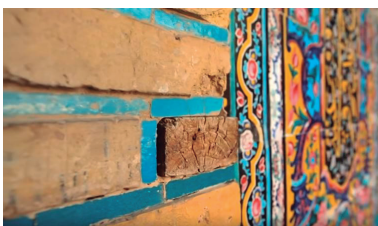


Fig. 3.356 Kalaaf Mezquita Nasir Al Mulk (Autor)

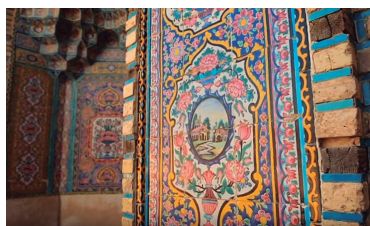


Fig. 3.357 Kalaafs Mezquita Nasir Al Mulk (Autor)

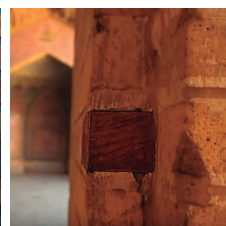


Fig. 3.358 Nasir Al Mulk (Autor)

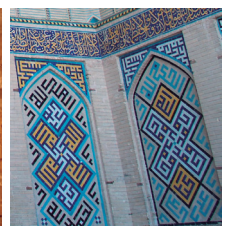


Fig. 3.359 Al-Hakim (Autor)

- Integración de elementos lineales de mayor ductilidad

Con el mismo objetivo que en el punto anterior, los constructores de las edificaciones situadas en zonas de gran peligrosidad sísmica llevaron a cabo la integración de elementos lineales de mayor ductilidad dentro del entramado murario. A nivel material, esta mejora de la ductilidad solía introducirse principalmente a través de distintos tipos de fibras, cañas y ramas vegetales, aunque la variabilidad de estos elementos abarca todo tipo de travesaños y piezas continuas de madera.

La incorporación de este tipo de sistemas lineales respondía en la mayoría de los casos a fortalecer zonas muy específicas de dichos muros, como puertas o ventanas abiertos en ellos, o simplemente para dotar de cierta elasticidad al esqueleto principal de la estructura del edificio:

- a. Integración de elementos lineales de mayor ductilidad que las fábricas empleadas en el muro, dispuestos sobre varias hiladas y con continuidad lineal en todo el paño.
- b. Integración de elementos lineales de mayor ductilidad que las fábricas empleadas en el muro, dispuestos sobre una única hilada y con continuidad lineal en todo el paño.
- c. Integración de elementos lineales de mayor ductilidad que las fábricas empleadas en el muro, dispuestos sobre los dinteles de los huecos y con continuidad lineal en todo el paño.
- d. Integración de elementos lineales de mayor ductilidad que las fábricas empleadas en el muro, dispuestos sobre varias hiladas, pero sin continuidad a lo largo de todo el paño.
- e. Integración de elementos lineales de mayor ductilidad que las fábricas empleadas en el muro, dispuestos sobre una única hilada y sin continuidad a lo largo de todo el paño.
- f. Integración de elementos lineales de mayor ductilidad que las fábricas empleadas en el muro, dispuestos sobre los dinteles de los huecos y sin continuidad a lo largo de todo el paño.

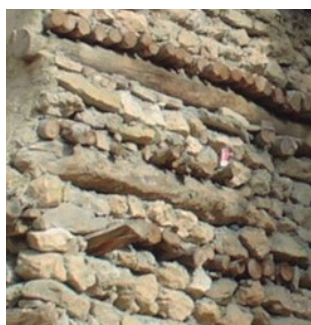


Fig. 3.360 Marco de madera, Keloseh (Autor)



Fig. 3.361 Elementos lineales de mayor ductilidad (Autor)

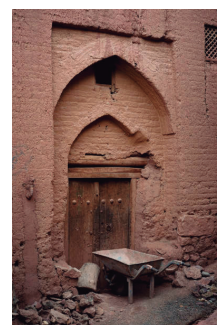


Fig. 3.362 Kandovan (B.Ribard)

- Composición material de mayor ductilidad del propio ladrillo o sillar

El desarrollo singular que experimentaron los propios ladrillos o sillares no sólo tuvo una importante influencia a la hora de mejorar la ligereza de estos entramados murarios, sino que también está muy relacionado con un aumento de la elasticidad general de dichos elementos constructivos.

La ductilidad que aportan determinados aditivos y áridos dentro de la propia composición de los ladrillos cerámicos o de adobe, así como la concepción de sillares específicos con una mayor porosidad y ligereza, permiten dotar a la estructura muraria general de una elasticidad que en muchos casos puede llegar a ser muy beneficiosa para el desempeño global de toda la estructura.

Si bien la composición material de muchos de estos sillares ubicados en zonas de alta sismicidad constituye aún un enorme campo de investigación en lo que respecta a sus capacidades sismorresistentes, podría establecerse la siguiente clasificación genérica de cara a englobar los distintos subtipos identificados hasta la fecha:

- Utilización de sillares completos de naturaleza ígnea.
- Utilización de fábricas compuestas de toba volcánica.
- Utilización de fábricas compuestas de fibras vegetales.
- Utilización de fábricas compuestas de fragmentos cerámicos.
- Utilización de fábricas compuestas de fragmentos óseos.
- Utilización de fábricas compuestas de estiércol de animales.
- Utilización de fábricas compuestas de dos o más materiales distintos de mayores propiedades dúctiles.



Fig. 3.363 Fábricas de ladrillo de Bam (Autor)



Fig. 3.364 Lajas volcánicas Arequipa (Autor)

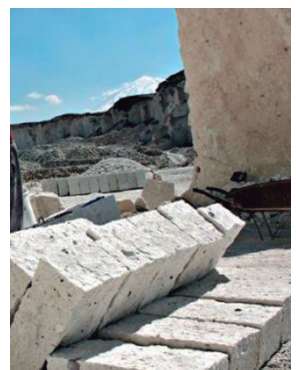


Fig. 3.365 Sillar de Arequipa (letracierta.pe)

De cara a recopilar todos los sistemas mencionados para el bloque vinculado a la estructura muraria, se presenta a continuación un cuadro resumen con la clasificación de todos los tipos y subtipos identificados y desarrollados en este texto.

Con el fin de resumir el número de variantes identificadas para cada uno de los subtipos en los que se divide cada tipología de este grupo, orientado a la estructura muraria de la construcción, se añade también una última columna que sintetiza la variabilidad presente en cada uno de los subtipos analizados en este apartado:

GRUPOS	TIPOS	SUBTIPOS	Nº variantes identificadas en cada subtipo
B - Estructura muraria	01 Aislamiento sísmico	01 Disposición de distintas capas de cimentación bajo los muros	9 (a-i)
		02 Sistemas de rodamiento y deslizamiento	6 (a-f)
		03 Arranque de muros mediante zócalos de mayor resistencia	5 (a-e)
		04 Plataformas y basamentos inclinados o en forma de talud	6 (a-f)
		05 Utilización de hiladas y piezas de gran tamaño y resistencia	8 (a-h)
	02 Aligeramiento	06 Supresión de paños y otros elementos no portantes	4 (a-d)
		07 Rellenos aligerantes dentro del entramado murario	4 (a-d)
		08 Reemplazo del mortero por conectores puntuales de mayor ligereza	5 (a-e)
		09 Utilización de sillares o ladrillos de composición material más ligera	4 (a-d)
		10 Distribución gradual de los materiales según su peso	5 (a-e)
		11 Reducción de decoración no estructural	6 (a-f)
	03 Atado y unión de elementos	12 Entramados de enjutas	6 (a-f)
		13 Refuerzos y armados integrados dentro del entramado murario	8 (a-h)
		14 Refuerzos de esquinas y huecos a través de sus propias fábricas	7 (a-g)
		15 Refuerzos exteriores, contrafuertes y arcos de descarga	11 (a-k)
		16 Conectores entre sillares y ladrillos	6 (a-f)
		17 Incorporación de tirantes y codales	4 (a-d)
		18 Traba y maclado de las fábricas	7 (a-g)
		19 Arriostramiento de los muros y sus arranques y cimentaciones	6 (a-f)
	04 Elasticidad y ductilidad	20 Tratamiento singular de las juntas	9 (a-i)
		21 Incorporación de elementos puntuales de mayor ductilidad	8 (a-h)
		22 Integración de elementos lineales de mayor ductilidad	6 (a-f)
		23 Composición material de mayor ductilidad del propio ladrillo o sillar	7 (a-g)

Elaboración propia

3.3.3 COLUMNAS Y OTROS ELEMENTOS VERTICALES

El tercero de los bloques propuestos engloba todos aquellos sistemas ligados a otro de los aspectos clave en el desempeño estructural de todo el sistema portante vertical de la estructura, en este caso a través de los soportes puntuales como son las columnas y otros elementos verticales.

Este tercer grupo completa por tanto esta faceta estructural portante que tan íntimamente relacionada está con el aspecto murario recogido en el apartado anterior, con el cual va asociado de cara a lograr un comportamiento unitario lo más equilibrado y estable posible. Por este motivo las categorías tipológicas propuestas en este grupo se han procurado unificar en este caso con los tipos propuestos para los sistemas ligados a los entramados murarios, con los cuales comparte numerosas analogías no sólo en este primer nivel taxonómico, sino también en los subtipos identificados para cada uno de los cuatro bloques que configuran esta clasificación.

Con este fin se ha conservado un primer tipo correspondiente a aquellos sistemas relacionados con una respuesta sismorresistente basada en situaciones de aislamiento sísmico en los puntos de encuentro más próximo al terreno. Las estrategias empleadas, al igual que se implementó en el caso de los entramados murarios, buscaron reducir la transmisión de fuerzas horizontales a los elementos verticales puntuales más vulnerables en este tipo de construcciones de fábrica, donde cualquier mínimo desplazamiento de alguno de los sillares o ladrillos podía desembocar en un desajuste estructural grave que produjese en última instancia el colapso total o parcial de la estructura.

Estas situaciones de aislamiento sísmico pudieron lograrse a través de distintas formas, ya fuera mediante la disposición de elementos intermedios entre el terreno y los elementos portantes verticales para evitar su exposición a sismo, o bien aportando cierta flexibilidad a los puntos de arranque, permitiendo a la totalidad de la estructura afrontar ligeros oscilamientos sin llegar a dañarse.

Este principio está muy vinculado con el segundo de los tipos propuestos para este grupo, en torno al cual se reúnen algunos de los sistemas sismorresistentes que responden al principio aligeramiento estructural, aspecto de especial relevancia a la hora de reducir la peligrosidad de estos elementos, tanto desde el enfoque de su propia supervivencia como la de otros elementos portantes que dependen de ellos. Los mecanismos empleados para este fin son perfectamente equivalentes a aquellos mencionados en el caso de los entramados murarios, reduciendo el peso de los distintos elementos que lo conforman y favoreciendo una correcta distribución arquitectónica de éstos dentro de cada componente constructivo que constituye el esqueleto estructural.

La reducción de esbeltez y de toda aquella ornamentación no estructural en los elementos portantes verticales supuso un factor determinante de cara a asegurar un comportamiento satisfactorio en situaciones de sismo, favoreciendo así una concepción geométrica de menores proporciones verticales que repercutió en la disminución de altura general de todas aquellas construcciones ubicadas en zonas de con una alta sismicidad.

La tercera tipología propuesta recoge todos aquellos sistemas vinculados a las distintas estrategias de atado, tanto entre los distintos elementos como los que posibilitan una correcta conexión entre cada una de las fábricas que los componen.

Las medidas de este tipo que se pueden encontrar en columnas y otros elementos verticales prominentes engloban tanto aquellos que presentan refuerzos incluidos en el propio elemento vertical, como los planteados de manera externa, ya sea a través de contrafuertes, arcos de descarga o distintos tipos de tirantes dispuestos entre elementos.

A nivel interno se pueden encontrar asimismo distintas estrategias de atado entre fábricas, ya sea mediante el propio trabado de las fábricas que lo conforman hasta la disposición de elementos puntuales entre ellas para favorecer un comportamiento unitario que rigidice en cierta forma aquellos soportes verticales en situación de mayor vulnerabilidad.

El último de los tipos está íntimamente ligado a aquellos sistemas mencionados de manera análoga en el caso de los entramados murarios, buscando situaciones de sismorresistencia a través de situaciones de cierta elasticidad y ductilidad. Aunque esta característica sea más beneficiosa en el caso de las cubriciones superiores, o incluso para los masivos muros de fábrica, las columnas y otros elementos verticales pueden llegar a albergar distintas soluciones para aportarles una ligera flexibilidad en situaciones de terremoto.

Algunos de los sistemas que pueden dotar de cierta sismorresistencia a estos elementos son aquellos que incorporan estas propiedades dúctiles a los distintos componentes constructivos que los conforman, tal y como se menciona en el apartado de juntas o de las propias fábricas.

La parametrización de los distintos subtipos identificados recoge todas aquellas particularidades en las que pueden manifestarse estos sistemas en el caso de las columnas y otros elementos verticales importantes, aunque pueda presentar una taxonomía general común con otros grupos a nivel de tipos o incluso subtipos, tal y como sucede con varios de los sistemas correspondientes al apartado general de los entramados murarios.

La descripción y contextualización cultural, geográfica y constructiva de este tercer grupo de estrategias con comportamiento sismorresistente queda de manifiesto en las fichas identificadas con este bloque, donde se complementa la información de cada una de estas medidas.

3.3.3.1 Sistemas de tipo "Aislamiento sísmico"

La faceta sismorresistente de los elementos incluidos en este bloque no podría tenerse en cuenta de manera completa sin incluir uno de los aspectos más importantes a la hora de asegurar su estabilidad estructural ante situaciones de **sismo**.

La disposición de cada uno de los elementos verticales dentro de la configuración general del edificio, sumado a las distintas situaciones de encuentro con el terreno posibilitaron un comportamiento más o menos adecuado de cara a lograr un aislamiento sísmico óptimo que lograra hacer funcionar de manera unitaria a la mayor cantidad posible de soportes.

En este sentido las construcciones históricas con grandes salas hipóstilas y su relación espacial reflejan en gran medida la realidad sísmica a la que hacen frente cada uno de estas construcciones, con distribuciones especialmente modulares y una configuración de los arranques de las columnas que aportan una percepción de solidez mucho mayor que aquellas planteadas en zonas de menor actividad telúrica.

El encuentro de estos esbeltos elementos con el suelo constituye una de los campos de estudio con mayor recorrido para seguir arrojando luz sobre las características sismorresistentes de gran parte de los soportes en los que se apoyan algunas de las construcciones más monumentales de la arquitectura histórica de fábrica de muchas regiones.

Tal y como sucede en determinados casos en los que ha sido posible la apreciación de diversas estrategias de fortalecimiento en los arranques de columnas y otros soportes, la cimentación de este tipo de elementos en gran parte del patrimonio histórico alberga una racionalidad y un aislamiento sísmico que posiblemente pueda seguir aportando conocimiento sobre las medidas implementadas para asegurar su estabilidad hasta nuestros días.

En algunas de las edificaciones donde sí que ha sido posible un análisis de estos encuentros con el terreno, se han podido identificar distintas estrategias que en situaciones de sismo han contribuido a mitigar la transmisión de las fuerzas horizontales propias de cualquier terremoto, desde la disposición de elementos intermedios hasta estrategias encaminadas a permitir ligeros movimientos del esqueleto estructural.

- Disposición de distintas capas de cimentación bajo los elementos verticales

Una de las medidas más exploradas por aquellas civilizaciones con una alta exposición al sismo lo encontramos en la concepción de las cimentaciones que soportan los elementos verticales de mayor relevancia dentro del armazón estructural de los edificios históricos.

En algunos de los casos en los que ha sido posible acceder a esta sección oculta de las edificaciones de fábrica, se ha constatado cómo se planteó una cimentación heterogénea con distintas capas de diferente naturaleza y características, con un mayor grado de sofisticación y experimentación en el caso de las construcciones masivas de mayores dimensiones.

Tomando como referencia algunas de las estrategias implementadas con este fin, se ha podido establecer la siguiente propuesta taxonómica que permite clasificar los posibles tipos encontrados también en el futuro, en función de la naturaleza de las distintas capas que lo componen y la disposición y posible compacidad de las mismas:

- a. Empleo de diversas capas de cimentación, de naturaleza geológica, sin compactar y dispuestas de manera natural.
- b. Empleo de diversas capas de cimentación, de naturaleza geológica, compactadas total o parcialmente.
- c. Empleo de diversas capas de cimentación, de origen animal o vegetal, dispuestas de manera natural y sin compactar.
- d. Empleo de diversas capas de cimentación, de origen animal o vegetal, compactadas total o parcialmente.
- e. Empleo de diversas capas de cimentación, tanto de origen geológico como animal o vegetal, dispuestas de manera natural y sin compactar.
- f. Empleo de diversas capas de cimentación, tanto de origen geológico como animal o vegetal, compactadas total o parcialmente.
- g. Empleo de una única capa de cimentación, de naturaleza geológica y compactada.
- h. Empleo de una única capa de cimentación, de naturaleza geológica y sin compactar.
- i. Empleo de una única capa de cimentación, de origen animal o vegetal.

- Sistemas de rodamiento y deslizamiento

Para evitar la concentración de tensiones que se acumulan en los arranques de las columnas y otros elementos verticales, algunos constructores de la antigüedad plantearon sus soportes sobre diversos sistemas de rodamiento que buscaban posibilitar cierto movimiento en ellos dentro del límite de seguridad que imponía la estructura.

En el caso de las columnas y demás soportes puntuales de las salas hipóstilas, se reducía así el riesgo de colapso de alguna de las naves, si bien esta medida de mitigación podría no ser suficiente en aquellos casos donde las enormes sacudidas distorsionaban en exceso la posición de la base respecto al eje vertical de dichos elementos. Para diferenciar los distintos sistemas implementados en algunos casos identificados, se pueden establecer las siguientes estrategias:

- a. Sistema de deslizamiento constituido por dos o más niveles de rodamiento, con elementos de origen geológico.
- b. Sistema de deslizamiento constituido por una única capa de elementos de origen geológico.
- c. Sistema de deslizamiento constituido por dos o más niveles de rodamiento, con elementos de origen animal o vegetal.
- d. Sistema de deslizamiento constituido por una única capa de elementos de origen animal o vegetal.
- e. Sistema de deslizamiento constituido por dos o más niveles de rodamiento, con elementos mixtos, tanto de origen geológico como animal o vegetal.
- f. Sistema de deslizamiento constituido por una única capa de elementos mixtos, tanto de origen geológico como animal o vegetal.



Fig. 3.366 Cementación de Chan Chan (C.Campana)



Fig. 3.367 Sistemas de rodamiento, Masuléh (A.Naderzadeh)

- Arranque de elementos verticales mediante materiales de mayor resistencia

La disposición de piezas de mayor resistencia en los arranques de los elementos verticales constituye una de las soluciones más extendidas y observables dentro del patrimonio histórico de fábrica, sobre todo si lo comparamos con otros casos y estilos análogos en zonas de menor sismicidad, donde esta preocupación no está tan patente con el las regiones más vulnerables.

A pesar de la dificultad de acceder a materiales de mayor resistencia, como la piedra, los constructores de algunas regiones del planeta, como Bengala, fueron conscientes de la gran ventaja que suponía fortalecer el aislamiento sísmico de estos elementos, llegando incluso a transportarla varios cientos de kilómetros en algunos casos con el fin de poder mejorar sus edificios en este aspecto.

Como consecuencia, es frecuente observar distintas situaciones en los arranques de columnas y otros elementos verticales:

- Arranque de elementos verticales mediante sillares de mayor dimensión y resistencia que las fábricas empleadas en el cuerpo principal vertical.
- Arranque de elementos verticales mediante sillares de igual dimensión que las fábricas empleadas en el cuerpo principal vertical, pero de mayor resistencia material.
- Arranque de elementos verticales mediante sillares de igual resistencia que las fábricas empleadas en el cuerpo principal vertical, pero de mayores dimensiones.
- Arranque de elementos verticales mediante una combinación de las mismas fábricas empleadas en el cuerpo principal vertical, y sillares o ladrillos de mayor dimensión y/o resistencia que las primeras.
- Arranque de elementos verticales mediante ladrillos de igual resistencia que las fábricas empleadas en el cuerpo principal vertical, pero de mayores dimensiones.



Fig. 3.368 Bibi pari (Postal)

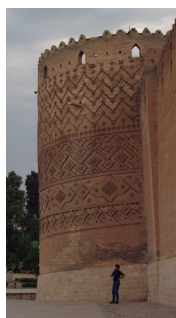


Fig. 3.369 Arg-e-Karim (Autor)



Fig. 3.370 Racchi (El Letao)



Fig. 3.371 Mezquita Qadam Rasul, Gaur (Fragmento postal)



Fig. 3.372 Chinchero (Autor)

- Basamentos inclinados y grandes plataformas de arranque

La utilización de plataformas o basamentos inclinados acentuó el funcionamiento sismorresistente de muchos edificios, propiciando un aislamiento sísmico que solía combinarse con el punto mencionado anteriormente, gracias a la disposición de materiales de mayor resistencia en dichos arranques.

Si bien esta disposición ayudaba a mejorar ligeramente la situación del centro de gravedad del edificio, la principal ventaja de esta medida estriba en la concepción reforzada de toda la base, de mayor estabilidad gracias a geometrías normalmente troncocónicas o troncopiramidales.

Como resultado, se pueden identificar las siguientes piezas

- a. Disposición de plataforma inclinada sobre la que se erigen los soportes y/o elementos constructivos verticales, con base poligonal y superficie recta (desarrollo troncopiramidal o en forma de talud).
- b. Disposición de plataforma inclinada sobre la que se erigen los soportes y/o elementos constructivos verticales, con base circular y superficie recta (desarrollo troncocónico).
- c. Empleo de basamentos inclinados sobre los que se erigen los soportes y/o elementos constructivos verticales, con base poligonal y superficie recta (desarrollo troncopiramidal).
- d. Empleo de basamentos inclinados sobre los que se erigen los soportes y/o elementos constructivos verticales, con base circular y superficie recta (desarrollo troncocónico).
- e. Empleo de basamentos inclinados sobre los que se erigen los soportes y/o elementos constructivos verticales, con base circular y superficie curva.



Fig. 3.373 Cimentación Templo Vishnu, en Dinajpur (M.Sanskriti)



Fig. 3.374 Arranque Mezquita de Katra (P.Sarkar)



Fig. 3.375 Tumba Firoz Minar (Fragmento postal)

- Utilización de piezas de gran tamaño y resistencia

De cara a mejorar el aislamiento sísmico en los puntos de encuentro con el terreno, los constructores de las regiones de mayor sismicidad exploraron las diversas maneras de reducir la transmisión de las fuerzas sísmicas horizontales a través de las columnas y otros elementos verticales importantes dentro del entramado estructural del edificio.

Para lograrlo, se planteó un fortalecimiento de dichos elementos, tanto en arranques como en todo el desarrollo vertical, con piezas de mayor tamaño y resistencia que las fábricas utilizadas de manera principal en ellos, disponiéndose de manera puntual o en todo un anillo o tambor de estos elementos.

De esta forma se pueden plantear las siguientes variaciones presentes en este subtipo de sistemas:

- a. Disposición de varias hiladas o anillos completos de fábricas pétreas, de mayor tamaño y/o resistencia que las empleadas en el cuerpo principal vertical, y colocadas de manera consecutiva.
- b. Disposición de varias hiladas o anillos completos de fábricas pétreas, de mayor tamaño y/o resistencia que las empleadas en el cuerpo principal vertical, y colocadas de manera alterna respecto a las hiladas o anillos principales.
- c. Disposición de una hilada completa de fábricas pétreas, de mayor tamaño y/o resistencia que las empleadas en el cuerpo principal vertical.
- d. Disposición de piezas puntuales de fábricas pétreas, sin continuidad en una misma hilada o anillo, pero de mayor tamaño y/o resistencia que las empleadas en el cuerpo principal vertical.



Fig. 3.376 Mezquita Azul, Tabriz (Autor)

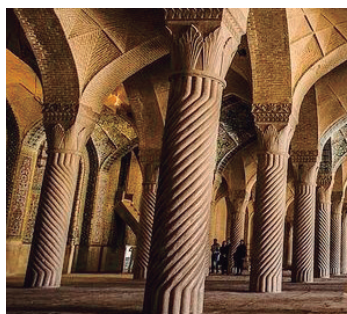


Fig. 3.377 Mezquita Nasir-Al-Mulk (Autor)



Fig. 3.378 Mezquita Qadam Rasul, Gaur (Fragmento postal)

3.3.3.2 Sistemas de tipo "Aligeramiento"

En lo que respecta a la segunda tipología de sistemas sismorresistentes identificados en la arquitectura histórica de fábrica, se recogen todas aquellas medidas ligadas al aligeramiento de los elementos verticales estructurales.

Al igual que se ha mencionado en el caso del grupo correspondiente a los entramados murarios, este principio sismorresistente se manifiesta también en este gran bloque de sistemas, si bien esta faceta tiene una vinculación mucho más importante en el caso de las cubriciones, tal y como se aborda en el último de los grupos, relacionado con los distintos tipos de cubiertas desarrollados en las regiones con una mayor sismicidad.

Los subtipos identificados en este apartado recogen una serie de sistemas relacionados con el aligeramiento de los distintos componentes que configuran estos elementos verticales, ya sea respecto a la composición material de los propios sillares o ladrillo, o los distintos tipos de conglomerantes o soluciones alternativas dentro de columnas, torres, minaretes, u otros elementos singulares verticales.

La distribución material de estos elementos conforma una de las condiciones sismorresistentes más elementales a la hora de conseguir un correcto comportamiento de todos los soportes y estructurales verticales. La disposición de los materiales de mayor resistencia en la base de columnas y otros soportes permite minimizar los movimientos en las zonas más elevadas de estos elementos, precisamente en uno de los puntos más vulnerables, en el caso de las columnas, en situaciones de sismo debido a su condición de unión con las cubiertas.

De igual forma la reducción de altura de estas piezas constructivas y la supresión de elementos ornamentales no estructurales en ellas han permitido reducir el riesgo de impacto con otros componentes del esqueleto estructural, obteniendo modelos con forma de caja lo más sencillas y austeras posibles desde el punto de vista de sus volumetrías.

Sin embargo, los constructores de la época vieron en esta exigencia estructural una oportunidad para plantear distintas soluciones para compensar en cierto modo cada una de estas medidas que tendían hacia una sobriedad lo más acentuada posible, tal y como veremos en los siguientes apartados.

- Reducción de esbeltez y altura del centro de gravedad

Tal y como recoge el principio de antigraedad mencionado por Kirikov, a través del cual se destaca la ventaja de disponer el centro de gravedad lo más próximo posible al suelo, los constructores de la antigüedad erigieron sus elementos verticales con una configuración lo menos esbelta posible, reduciendo el riesgo sísmico en estos elementos tan vulnerables. Algunos de los recursos para lograrlo están íntimamente relacionados con los tipos señalados en el aislamiento sísmico de las construcciones, con el que se premia la disposición de basamentos de mayor anchura que el cuerpo principal vertical, o a través de la colocación de los elementos más pesados en las zonas más cercanas al terreno.

Una de las medidas más evidentes y utilizadas en las regiones de mayor sismicidad es la simple disposición de alturas más reducidas en estos elementos, con proporciones menos esbeltas que en otras zonas del mismo estilo donde sin embargo la capacidad destructiva de los temblores asociados a los movimientos telúricos supone una amenaza menor, o directamente inexistente.

En este sentido, se pueden identificar las siguientes situaciones relacionadas con la situación del centro de gravedad:

- a. Reducción de la esbeltez de columnas u otros elementos verticales, mediante el estrechamiento gradual en altura de dicho elemento estructural.
- b. Reducción de la esbeltez de columnas u otros elementos verticales, mediante la integración completa de dichos elementos en otros cuerpos adyacentes, tengan o no función estructural.
- c. Reducción de la esbeltez de columnas u otros elementos verticales, mediante la integración parcial de dichos elementos en otros cuerpos adyacentes, tengan o no función estructural.
- d. Reducción de la esbeltez de columnas u otros elementos verticales, mediante la disposición de elementos adicionales puntuales en la base, adosados de manera externa al soporte estructural principal.
- e. Reducción de la esbeltez de columnas u otros elementos verticales, mediante la supresión de cuerpos superiores en los elementos verticales exteriores.



Fig. 3.379 Goharshad Mosque, Mashhad (Autor)

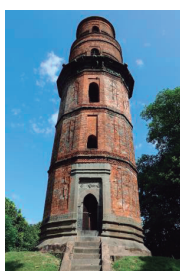


Fig. 3.380 Firoz Minar (P. Bama)



Fig. 3.381 Mezquita de Adina, Pandua (A. Gupta)



Fig. 3.382 Mez. Katra (WBT)

- Rellenos aligerantes dentro del núcleo de los elementos verticales

Uno de los aspectos donde queda de manifiesto el aligeramiento de los distintos elementos que conforman las columnas y otras volumetrías portantes de gran verticalidad es en la propia configuración de los rellenos utilizados en el interior de estos elementos verticales, los cuales supusieron también cierto ahorro de material noble en estos edificios que hicieron uso de ellos.

La utilización de este tipo de medidas como material de relleno permite prescindir del uso de las fábricas en su núcleo interior, aligerando de manera sustancial el peso de estas piezas sin tener que recurrir al vaciado interno. De esta forma se consigue disponer de una columna interior rigidizadora que a su vez puede llegar a presentar distintos grados de aligeramiento en función de la composición material y las piezas incluidas en la mezcla de estos rellenos.

Entre los distintos subtipos identificados, se pueden diferenciar los siguientes:

- a. Rellenos aligerantes confinados en el núcleo interior de las columnas u otros soportes verticales, a base de un único material conglomerante tipo mortero.
- b. Rellenos aligerantes mixtos confinados en el núcleo interior de las columnas u otros soportes verticales, a base de un material conglomerante y otros elementos adicionales de origen pétreo.
- c. Rellenos aligerantes mixtos confinados en el núcleo interior de las columnas u otros soportes verticales, a base de un material conglomerante y otros elementos adicionales de origen cerámico.
- d. Rellenos aligerantes mixtos confinados en el núcleo interior de las columnas u otros soportes verticales, a base de un material conglomerante y otros elementos de relleno de origen vegetal o animal.



Fig. 3.383 Arranque torre de esquina (A.Naqi)



Fig. 3.384 Chullpa, Sillustani (Autor)



Fig. 3.385 Sitio de Racchi, Cusco (Autor)



Fig. 3.386 Templo Vishnu, Dinajpur (B.S.Sunny)

- Reemplazo del mortero por conectores puntuales de mayor ligereza

En el caso de las columnas y otros elementos verticales con función portante, uno de los recursos utilizados de cara a aligerar aún más la concepción estructural de estas construcciones se centró en el elemento conglomerante de dichas fábricas.

Si bien el mortero conforma un componente de mayor ligereza que las propias fábricas, en determinadas ocasiones se sustituyó su uso por conectores de mayor ligereza que permitían seguir teniendo mecanismo de unión entre las fábricas utilizadas.

La utilización de este tipo de soluciones puede clasificarse de la siguiente forma, en función de los distintos materiales utilizados y la disposición de estos elementos respecto al elemento constructivo principal:

- a. Sustitución del mortero por conectores puntuales interiores, de origen metálico.
- b. Sustitución del mortero por conectores puntuales interiores de origen vegetal.
- c. Sustitución del mortero por conectores puntuales interiores de tipo conglomerante.
- d. Sustitución del mortero por conectores puntuales interiores de tipo pétreo.
- e. Sustitución del mortero por conectores puntuales interiores de tipo mixto, ya sea mediante conectores de distinto tipo o la combinación de distintos materiales de la misma naturaleza para un mismo conector.
- f. Sustitución del mortero por conectores puntuales transversales, visibles externamente, y de origen metálico.
- g. Sustitución del mortero por conectores puntuales transversales, visibles externamente, y de origen vegetal.
- h. Sustitución del mortero por conectores puntuales transversales, visibles externamente, y de tipo conglomerante.
- i. Sustitución del mortero por conectores puntuales transversales, visibles externamente, y de tipo pétreo.
- j. Sustitución del mortero por conectores puntuales transversales, visibles externamente, y de tipo mixto, ya sea mediante conectores de distinto tipo o la combinación de distintos materiales de la misma naturaleza para un mismo conector.

- Utilización de sillares o ladrillos de composición material más ligera

De cara a intervenir directamente en la totalidad de los cuerpos verticales con función portante, o en parte de ellos, los constructores de la antigüedad recurrieron al empleo de sillares o ladrillos aligerados para disminuir la carga masiva de estos elementos.

Las grandes posibilidades a la hora de incluir estas fábricas aligeradas incluían distintas opciones de colocación, ya fuese de manera generalizada en todo el volumen estructural o bien haciendo uso de estos sillares o ladrillos ligeros únicamente en hiladas o anillos concretos.

Para distinguir los distintos tipos de estrategias presentes en la arquitectura histórica de fábrica se pueden identificar las siguientes opciones:

- a. Empleo de fábricas aligeradas, ya sea en formato de sillar o ladrillo, de menor peso que las empleadas en el cuerpo vertical principal, dispuestos en un anillo o hilada completa.
- b. Empleo de fábricas aligeradas, ya sea en formato de sillar o ladrillo, de menor peso que las empleadas en el cuerpo vertical principal, dispuestos en varios anillos o hiladas completas y colocadas de manera consecutiva.
- c. Empleo de fábricas aligeradas, ya sea en formato de sillar o ladrillo, de menor peso que las empleadas en el cuerpo vertical principal, dispuestos en varios anillos o hiladas completas pero alternadas respecto a los anillos, tambores o hiladas principales.
- d. Empleo de fábricas aligeradas, ya sea en formato de sillar o ladrillo, de menor peso que las empleadas en el cuerpo vertical principal, dispuestos de manera puntual y sin continuidad en un mismo anillo o hilada.

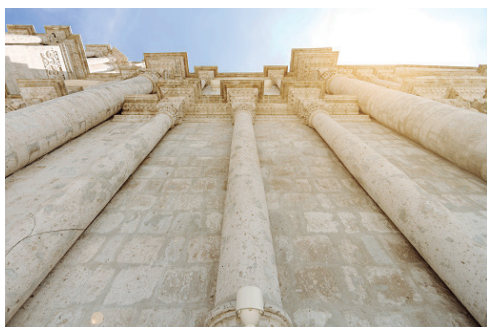


Fig. 3.387 Columnas Catedral Arequipa (S.Mayer)



Fig. 3.388 Pilares Iglesia de la Compañía de Jesús (Autor)



Fig. 3.389 Mezquita Adina (Postal)

- Distribución gradual de los materiales según su peso

Para alcanzar una situación constructiva lo más estable posible, también frente a situaciones de sismo, los elementos portantes verticales de las construcciones de fábrica desarrollaron una racionalidad estructural acentuada en el caso de las columnas y otros elementos verticales constituidos por dos o más materiales distintos.

La distribución gradual de los diferentes materiales utilizados a la hora de conformar estas piezas estructurales responde, en la mayoría de casos, a una preocupación por situar los elementos más masivos y rígidos en las zonas inferiores, reservando para las zonas superiores aquellos materiales con unas características más ligeras.

Como consecuencia, podemos diferenciar entre las siguientes situaciones:

- a. Distribución gradual generalizada de la totalidad de materiales que conforman cada una de las columnas y otros soportes estructurales en la totalidad del edificio.
- b. Distribución gradual generalizada de la totalidad de materiales que conforman cada uno de los elementos verticales principales integrados en el edificio, como torres o minaretes.
- c. Distribución gradual generalizada de la totalidad de materiales que conforman determinadas columnas o elementos verticales del edificio.
- d. Distribución gradual parcial de algunos de los materiales que conforman determinadas columnas o elementos verticales del edificio, ya sea en su arranque, cuerpo y/o coronación.
- e. Distribución gradual únicamente de los materiales que constituyen el arranque de columnas u otros elementos verticales del edificio.



Fig. 3.390 Mil (D.Qebirier)



Fig. 3.391 Mezquita Qadam Rasul, en Gaur (C.Joint)



Fig. 3.392 Esquina Corikancha, Cusco (Autor)

- Reducción de decoración no estructural

De manera análoga a lo expuesto en los dos grupos anteriores, la concepción de las columnas y otros elementos verticales portantes de las edificaciones ubicadas en zonas de gran riesgo sísmico, presentan desarrollos mucho más austeros que los erigidos en regiones de menor sismicidad.

De esta forma, la utilización de volumetrías prominentes en estas construcciones destaca por una sobriedad ornamental que se ve compensada por diferentes recursos artísticos que permiten engalanar estos elementos portantes, sin comprometer la función estructural de dichos elementos, y evitando así en última instancia la generación de daños mayores en otras áreas del edificio. A este respecto, las medidas identificadas para reducir la decoración no estructural en las zonas de mayor sismicidad varían entre las siguientes situaciones:

- a. Supresión de cualquier tipo de ornamentación no portante.
- b. Sustitución de la ornamentación no portante por decoración y motivos geométricos basados en el uso de distintos materiales integrados en la propia columna o elemento vertical.
- c. Sustitución de la ornamentación no portante por decoración y motivos geométricos basados en el uso de distintos formatos de ladrillos y sillares, integrados en la propia columna o elemento vertical.
- d. Sustitución de la ornamentación no portante por decoración y motivos geométricos basados en el uso del color sobre los elementos constructivos que conforman la propia columna o elemento vertical.
- e. Sustitución de la ornamentación no portante por decoración a base de azulejos sobre el plano exterior de la propia columna o elemento vertical.
- f. Sustitución de la ornamentación no portante por decoración y motivos geométricos basados en el uso de bajorrelieves resaltados sobre el plano exterior de la propia columna o elemento vertical.



Fig. 3.393 Mezquita Lotan, Gaur (M.Ahmed)

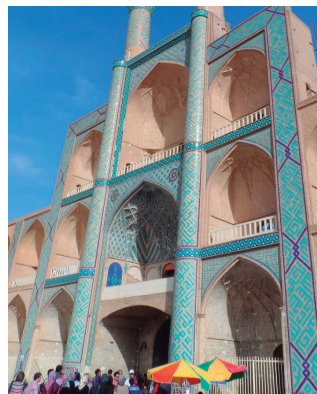


Fig. 3.394 Amir Chakhmaq, Yazd (Autor)



Fig. 3.395 Shah-e Cheragh, Shiraz (Autor)

3.3.3.3 Sistemas de tipo "Atado y unión de elementos"

El tercero de los tipos establecidos dentro del grupo de columnas y otros elementos verticales engloba todos aquellos sistemas relacionados con el atado y la unión estructural de estas piezas de gran verticalidad y función portante.

Para conseguirlo, una de las estrategias más utilizadas es la disposición de todo tipo de refuerzos, tanto en el interior como en el exterior de estos elementos, ya sea mediante piezas incrustadas en ellos como otras piezas adicionales anexadas por el exterior, tal y como se desarrolla a continuación.

En aquellos casos con una dimensión considerable, este fortalecimiento y atado se produce también en algunos de los puntos más vulnerables que aparecen en ellos, como los arranques, coronaciones, o incluso en posibles huecos, quiebras y esquinas que pueden conformar la volumetría de estos elementos verticales.

A nivel interno se han llegado a identificar distintas medidas de conexión de los propios sillares o ladrillos, de una manera similar a las empleadas en el caso de los entramados murarios. La utilización de distintos mecanismos de refuerzo interno se manifiesta a través de diferentes subtipos de unión entre las fábricas, ya sea a través de su propia traba y maclado o haciendo uso de todo tipo de conectores, tanto visibles como ocultos en el interior de dichos elementos verticales. En este último caso queda patente, una vez más, la confirmación de la hipótesis planteada en la presente investigación, con sistemas sismorresistentes visibles en aquellos casos en los que ha sido posible la observación del interior de las construcciones de fábrica desmontadas y reaprovechadas con el paso de los siglos, dejando al descubierto muchos de estos sistemas ocultos en el interior de estos elementos desde su construcción.

Gracias a este tipo de circunstancias, ha sido posible por ejemplo acceder al núcleo central rigidizador que se dispuso en el interior de muchas de las columnas y soportes verticales de la arquitectura histórica de fábrica ubicada en zonas de alta sismicidad.

En lo que respecta al arriostramiento externo, es frecuente encontrarse con diversos tipos de tirantes dispuestos entre columnas y otros soportes puntuales en el interior de las salas hipóstilas de mayor o menor tamaño, aspecto que se aborda más adelante y que tiene mucho que ver con los entramados murarios, a los que suelen ir conectados para dotar de mayor unidad a todo el esqueleto estructural.

- Refuerzos integrados en columnas y otros elementos verticales

La inclusión de refuerzos en el entramado de fábrica que conforma las columnas y otras volumetrías de gran verticalidad permitió conservar en muchos casos las dimensiones, proporciones y usos de algunos de estos elementos característicos en gran parte de los estilos arquitectónicos desarrollados tanto en zona sísmica como en áreas de menor peligrosidad.

La variabilidad de los sistemas pertenecientes a este subtipo se manifestó de manera singular en las distintas regiones con gran actividad telúrica, ya fuese a través de la ubicación de estos elementos, su tamaño, y su relación respecto a las fábricas principales que constituyen cada uno de estos elementos con función portante.

Para distinguir las peculiaridades de cada uno de los sistemas empleados en la arquitectura histórica de fábrica se pueden establecer las siguientes particularidades:

- a. Refuerzos de origen vegetal incrustados dentro de columnas u otros elementos verticales del edificio.
- b. Refuerzos de origen metálico incrustados dentro de columnas u otros elementos verticales del edificio.
- c. Refuerzos de tipo pétreo incrustados dentro de columnas u otros elementos verticales del edificio.
- d. Combinación de refuerzos puntuales, dando lugar a refuerzos de tipo mixto incrustados dentro de columnas u otros elementos verticales del edificio, ya sea mediante la combinación de materiales de la misma o distinta naturaleza.



Fig. 3.396 Ballal Bati, Gaur (B.Wall)



Fig. 3.397 Menar Jonban, Isfahan (Autor)

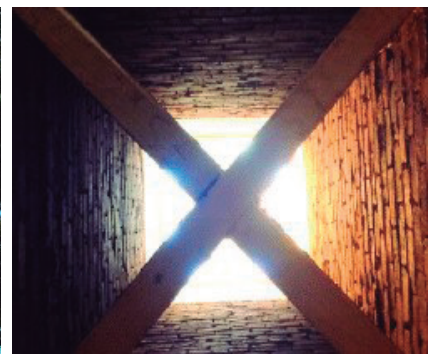


Fig. 3.398 Refuerzos Badgir (Autor)

- Refuerzos de esquinas y huecos a través de sus propias fábricas

En aquellos elementos verticales de gran significación era frecuente acudir a volumetrías de mayor tamaño que permitían la introducción de pequeñas aberturas entre sus fábricas, tal y como sucede en torres, minaretes, o grandes puertas de acceso a ciudades, recogidas también en este bloque de elementos verticales. Su uso, aunque en muchas ocasiones venía planteado como un recurso compositivo más, presenta un enorme desafío dentro de la estabilidad de todo el conjunto de estos masivos elementos, por lo que muchas culturas desarrollaron sistemas sismorresistentes implementados en ellos que fortalecieron estos puntos tan vulnerables en situación de terremoto.

En el caso de contar con geometrías rectas, vemos cómo además se llevó un desarrollo singular en determinadas esquinas de dichas volumetrías, reduciendo la fragilidad que presentan las fábricas en los bordes de las grandes estructurales verticales. Entre todas las estrategias utilizadas para mejorar estos puntos se pueden diferenciar las siguientes:

- a. Empleo de sillares en forma de L para atar hiladas adyacentes ubicadas en dos planos distintos.
- b. Empleo de un mismo sillar con forma poligonal para configurar al mismo tiempo una o más esquinas y encuentros, entre jamba, dintel y/o antepecho.
- c. Empleo de sillares reforzados con ensanchamiento o relieve en las esquinas.
- d. Empleo de fábricas de mayor tamaño en comparación con las empleadas en el elemento vertical, dentro del plano principal, utilizadas para configurar los huecos o esquinas.
- e. Empleo de fábricas de mayor tamaño en comparación con las empleadas en el elemento vertical, fuera del plano principal, utilizadas para configurar huecos o esquinas recrecidos.
- f. Empleo de fábricas de mayor resistencia en comparación con las empleadas en el elemento vertical, utilizadas para configurar los huecos o esquinas.



Fig. 3.399 Cusco (Autor)



Fig. 3.400 Puerta de Gumpti, Gaur (Fragmento postal)



Fig. 3.401 Firoz Minar, Malda (D.Dolphin)

- Refuerzos exteriores, contrafuertes, codales y arcos de descarga

De cara a fortalecer algunas de las estructuras verticales más expuestas sismo, muchas de las construcciones históricas presentan en la actualidad distintos tipos de refuerzos exteriores, ya sea mediante contrafuertes o arcos de descarga que ayudan a consolidar y atar el plano externo de estos grandes elementos que configuran puertas, torres y otras volumetrías de gran verticalidad.

En ciertos casos, la utilización de estos refuerzos podía llevarse a cabo con posterioridad a las obras de construcción de estas edificaciones, con el objetivo de mitigar a posteriori unos esfuerzos horizontales que en algunas ocasiones tuvieron que sufrir dichas estructuras sin este complemento de atado exterior.

En función de las configuraciones constructivas y geométricas de estos refuerzos, se puede hablar de los siguientes sistemas sismorresistentes de refuerzo exterior:

- Refuerzo exterior de sección recta y continua, de la misma altura que el elemento vertical al que da soporte.
- Refuerzo exterior de sección recta y decreciente, de la misma altura que el elemento vertical al que da soporte.
- Refuerzo exterior de sección recta y continua, de menor altura que el elemento vertical al que da soporte.
- Refuerzo exterior de sección recta y decreciente, de menor altura que el elemento vertical al que da soporte.
- Refuerzo exterior de sección curva, de menor altura que el elemento vertical al que da soporte.
- Refuerzo exterior en forma de codal o arco de descarga, introducido para atar un determinado elemento vertical con otra parte de la estructura principal del edificio, u otra construcción adyacente.

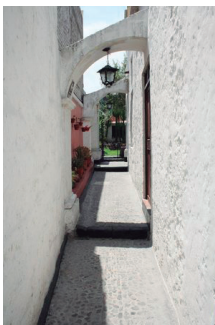


Fig. 3.402 Arequipa (Autor)



Fig. 3.403 Bayazid B. (Autor)



Fig. 3.404 Yazd (Autor)

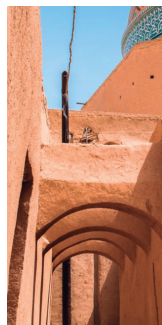


Fig. 3.405 Yazd (Autor)



Fig. 3.406 Santa Catalina (Autor)

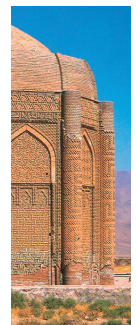


Fig. 3.407 Torre (Autor)

- Conectores entre sillares y ladrillos

Tal y como se ha desarrollado en el bloque dedicado a sistemas implementados sobre la estructura muraria, los elementos verticales de gran relevancia incluyeron distintos tipos de conectores entre los sillares y ladrillos de las construcciones históricas más importantes.

El funcionamiento de atado, normalmente oculto en el interior de las fábricas, permite conectar piezas adyacentes en una misma hilada, anillo o tambor, con la particularidad de encontrar en el caso de las columnas con sistemas de atado que permitieron conectar distintos tambores de manera vertical, a través de conectores ubicados en el eje central de los soportes.

La exposición continuada a fenómenos telúricos de gran magnitud desembocó en la búsqueda de soluciones de atado en determinadas hiladas, anillos o tambores de estas estructuras verticales con función portante, entre las que se pueden destacar las siguientes medidas:

- a. Conectores con forma de clavija o grapa incrustadas en hendiduras realizadas en las caras horizontales y/o verticales de piezas adyacentes.
- b. Conectores con forma de travesaño de madera incrustados entre piezas adyacentes.
- c. Conectores a base de planchas situadas en las caras horizontales y/o verticales de piezas adyacentes.
- d. Conectores a base de rellenos conglomerantes vertidos y endurecidos sobre hendiduras realizadas en las caras horizontales y/o verticales de piezas adyacentes.
- e. Conectores a base de fundidos metálicos vertidos y endurecidos sobre hendiduras realizadas en las caras horizontales y/o verticales de piezas adyacentes.
- f. Conectores en forma de fábricas transversales de mayor tamaño, perpendiculares al elemento vertical principal.



Fig. 3.408 Ollantaytambo (Autor)



Fig. 3.409 Arg-e-Tabriz (Autor)



Fig. 3.410 Corikancha (Autor)



Fig. 3.411 Conectores Corikancha, Cusco (Autor)

- Incorporación de tirantes

La utilización de sistemas de arriostramiento interno ha sido una de las medidas más implementadas dentro de la arquitectura histórica de fábrica, corrigiendo en ocasiones situaciones desfavorables o no planteadas desde un principio en este tipo de construcciones.

La condición de ensayo y error de las edificaciones históricas ubicadas en zonas de alta peligrosidad sísmica y su exposición constante a los efectos y temblores propios de los terremotos provocó el empleo de este tipo de sistemas, introduciéndolos con posterioridad a su fecha de construcción original.

El funcionamiento estructura de estos elementos, que solían servir no sólo para atar cada uno de los soportes entre sí, sino también con el entramado murario portante, minimizaba el riesgo de desajustes importantes en la estructura que provocasen el colapso de las cubiertas, gracias al funcionamiento unitario que proporcionan a todo el conjunto cada vez que se hace frente a las grandes sacudidas que pueden azotar estos edificios. Entre las diversas conexiones y naturaleza de estos elementos podemos diferenciar entre:

- a. Disposición de tirantes metálicos entre diferentes soportes estructurales adyacentes.
- b. Disposición de tirantes metálicos entre diferentes soportes estructurales y los entramados murarios adyacentes.
- c. Disposición de tirantes de madera entre diferentes soportes estructurales adyacentes.
- d. Disposición de tirantes de madera entre diferentes soportes estructurales y los entramados murarios adyacentes.
- e. Combinación de tirantes metálicos y de madera entre diferentes soportes estructurales y los entramados murarios adyacentes.



Fig. 3.412 Tirantes (Autor)



Fig. 3.413 Kusumba (N. Huda)



Fig. 3.414 Mez. Borujerd (Asadi)

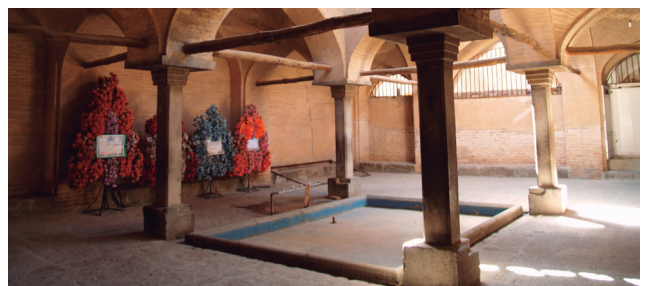


Fig. 3.415 Interior Mezquita Sayed (Autor)

- Traba y maclado de las fábricas

El arriostramiento que ejercen las distintas leyes de traba y el tallado de gran precisión desarrollado en muchas de las regiones de mayor sismicidad histórica representa uno de los factores interesantes desde el punto de vista sismorresistente, de cara a dotar de un atado lo más idóneo posible para soportar los embates de los terremotos.

La sofisticación de estos atados internos queda de manifiesto a través de los distintos aparejos empleados para erigir todo tipo de columnas y elementos verticales de gran importancia estructural o funcional:

- Utilización de aparejo de tipo poligonal o engastado, con piezas con gran número de lados y ángulos, pero perfectamente talladas y pulidas, con un encaje de gran precisión entre sí.
- Utilización de aparejo de tipo ciclópeo, con piezas de gran tamaño, pero con un gran nivel de tallado en sus caras. Puede presentar con piezas más pequeñas como "relleno" entre grandes bloques.
- Utilización de aparejo de tipo sedimentario, con piezas trapezoidales o rectangulares perfectamente labradas y formando hiladas horizontales bien definidas.
- Utilización de aparejo de tipo celular, con piezas labradas con acabado convexo y encajadas con una gran precisión entre sí.
- Utilización de aparejo de tipo rústico, con piezas ligeramente labradas y colocadas sin mayor acomodo, rellenando los vacíos con tierra y pequeños cantos rodados.
- Utilización de fábricas de acabado deliberadamente rugoso e irregular para un mejor agarre del mortero utilizado.
- Utilización de aparejo de tipo mixto, combinación de dos o más tipos de formatos de aparejo distinto.



Fig. 3.416 Engastado (I.Budzbon)

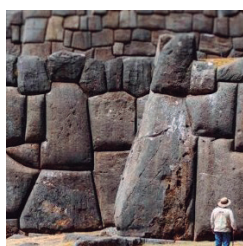


Fig. 3.417 Ciclópeo (Autor)

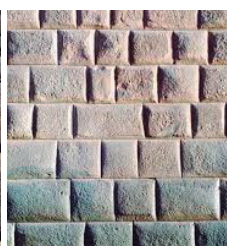


Fig. 3.418 Sedimentario (Autor)



Fig. 3.419 Celular (Autor)

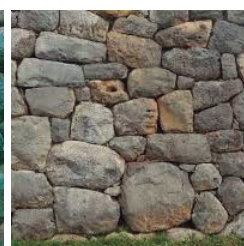


Fig. 3.420 Rústico (Autor)

- Arriostramiento de los elementos verticales, y sus arranques y cimentaciones

Continuando con otro tipo de arriostramientos ubicados en el interior de las columnas y otros elementos verticales, se puede encontrar este subtipo de atado utilizado tanto en un único elemento exento como en continuidad en otras piezas estructurales, tal y como se ha mencionado en el caso de los entramados murarios.

La ubicación de este tipo de sistemas puede manifestarse en los elementos verticales con función portante situados en el interior del edificio, o bien de manera externa para aquellos otros incrustados en la envolvente exterior del edificio.

Para aquellos elementos puntuales integrados en muros, el arriostramiento de estos elementos verticales en sus arranques y cimentaciones permite establecer una continuidad constructiva y material en toda la construcción, ejerciendo como cinturones de atado para todo el edificio.

Teniendo en consideración este tipo de singularidades, se pueden caracterizar los distintos tipos de arriostramiento según las siguientes características:

- a. Arriostramiento perimetral de todo el elemento vertical portante a través de un único cinturón de atado compuesto por piezas de mayor resistencia y/o dimensión que las fábricas utilizadas en el cuerpo vertical principal.
- b. Arriostramiento perimetral de todo el elemento vertical portante a través de dos o más cinturones de atado compuestos por piezas de mayor resistencia y/o dimensión que las fábricas utilizadas en el cuerpo vertical principal.



Fig. 3.421 Muyucmarca, Cusco (Autor)



Fig. 3.422 Mausoleo Eklakhi de Hazrat (NMA)



Fig. 3.423 Mezquita Baraduari (Fragmento postal)



Fig. 3.424 Dakhil (R.Safvi)

- c. Arriostramiento perimetral de todo el arranque del elemento vertical portante a través de un único cinturón de atado dispuesto en la base, y compuesto por una o varias hiladas de piezas de mayor resistencia y/o dimensión que las fábricas utilizadas en el cuerpo vertical principal.
- d. Arriostramiento completo de toda la cimentación del elemento vertical portante a través de piezas de mayor resistencia y/o dimensión que las fábricas utilizadas en el cuerpo vertical principal.
- e. Arriostramiento perimetral o parcial de la cimentación del elemento vertical portante a través de piezas de mayor resistencia y/o dimensión que las fábricas utilizadas en el cuerpo vertical principal.
- f. Arriostramiento combinado tanto en la cimentación como en el propio elemento vertical portante a través de piezas de mayor resistencia y/o dimensión que las fábricas utilizadas en el cuerpo vertical principal.

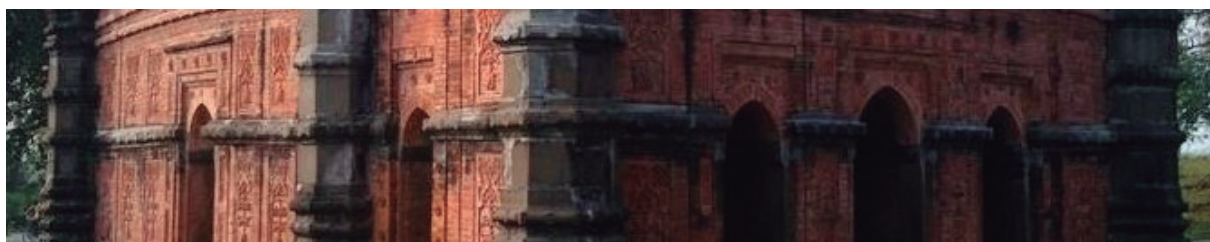


Fig. 3.425 Mezquita Sura (Fragmento postal)

- Núcleo central rigidizador dentro de los elementos verticales

Dentro de los sistemas de atado concebidos para conectar las distintas fábricas que conforman las columnas y elementos verticales de las estructuras de fábrica, la disposición de núcleos centrales rigidizadores dentro de éstos supone una de las medidas más efectivas e integrales desde el punto de vista sismorresistente, conjugando a la perfección su comportamiento estructural con otros principios antisísmicos, tal y como vuelve a mencionarse a continuación para los sistemas de tipo elástico. A pesar de su disposición oculta en el interior de los soportes estructurales, y la dificultad de análisis que presentan este tipo de sistemas, muchos de ellos aún desconocidos, se establece la siguiente caracterización a través de los parámetros encontrados en algunos de los casos documentados y aquellos elementos de mayor dimensión:

- Disposición de núcleo central rigidizador en la totalidad del eje interior de los cuerpos de gran verticalidad, compuesto por un elemento continuo a base de fábricas pétreas o cerámicas.
- Disposición de núcleo central rigidizador en la totalidad del eje interior de las columnas, compuesto por un único elemento de madera.
- Disposición de núcleo central rigidizador en la totalidad del eje interior de las columnas, compuesto por varios elementos de madera.
- Disposición de núcleo central rigidizador en la totalidad del eje interior de las columnas, compuesto de relleno conglomerante vertido y endurecido.
- Disposición de núcleo central rigidizador en una determinada sección del eje interior de las columnas, compuesto por un único elemento de madera.
- Disposición de núcleo central rigidizador en una determinada sección del eje interior de las columnas, compuesto por varios elementos de madera.
- Disposición de núcleo central rigidizador en una determinada sección del eje interior de las columnas, compuesto de relleno conglomerante vertido y endurecido.



Fig. 3.426 Interior minarete (M.Hejazi)



Fig. 3.427 Mezquita Darasbari (D.Tribune)

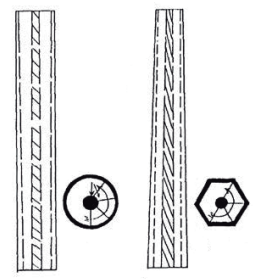


Fig. 3.428 Núcleo minaretes (M.Hejazi)

3.3.3.4 Sistemas de tipo "Elasticidad y ductilidad"

Para finalizar con la revisión de los distintos tipos de sistemas del bloque de columnas y otros elementos verticales, merece la pena detenerse en aquellos que responden a los principios de elasticidad y ductilidad, dotando de cierta flexibilidad a las piezas estructurales de mayor verticalidad dentro del esqueleto general del edificio.

La utilización de este tipo de sistemas tiene su reflejo en los soportes y columnas interiores, aunque probablemente sea en los elementos externos donde se manifiesta de una manera más efectiva para reducir el riesgo de colapso o caídas parciales de las fábricas que lo conforman.

Es el caso por ejemplo de los minaretes de las mezquitas o de las torres de determinados templos, donde aportar cierta ductilidad y elasticidad a sus fábricas puede llegar a suponer la diferencia entre registrar desplazamientos horizontales insalvables o conservar su posición estable tras una violenta sacudida.

La configuración constructiva de todo el conjunto y la armonía estructural con este tipo de sistemas significó el punto de partida a la hora de desarrollar e implementar este tipo de soluciones dentro de todo tipo de soportes y elementos verticales. Uno de los puntos donde vemos esta preocupación por asegurar la estabilidad de las construcciones históricas más monumentales es en la composición material de las juntas de mortero y el desarrollo singular en lo que respecta a su espesor y dimensión, sobre todo si lo comparamos con otras zonas de menor sismicidad, donde su uso presenta notables diferencias.

En estas regiones se llegaron a implementar interesantes soluciones adicionales, mejorando de manera sobresaliente el comportamiento sismorresistente de estas estructuras a través de la incorporación de elementos de mayor ductilidad entre sus fábricas. En este sentido la variabilidad de soluciones se refleja tanto en su naturaleza y tamaño como en las zonas de disposición de dichas piezas, que pueden utilizarse puntualmente en determinados puntos de la estructura o bien de manera lineal o perimetral a lo largo de hiladas o anillos completos.

Por último, en las zonas con gran exposición sísmica se aprecia también una cierta experimentación en las zonas con ciertas carencias o abundancia de ciertos materiales, lo cual posibilitó que se llegara a explorar la utilización de ladrillos o sillares de composición material mejorada, aspecto que se abordó también desde el punto de vista de la ductilidad.

- Tratamiento singular de las juntas

La deformación selectiva que proporcionan las distintas juntas de mortero planteadas en el caso de las construcciones históricas de fábrica tiene también su reflejo en la concepción, dimensión y composición material de dichas juntas, en las columnas y otros elementos verticales con función portante dentro del esqueleto estructural de los edificios ubicados en zonas de alto riesgo sísmico.

En base a estos parámetros se pueden determinar los siguientes subtipos de juntas:

- Incremento del espesor de junta, con capas de mortero de espesor igual o mayor que la mitad del ancho de la fábrica empleada.
- Disposición de juntas triangulares entre fábricas trapezoidales.
- Utilización de morteros con composición material a base de toba o ceniza volcánica molida.
- Utilización de morteros con composición material a base de fragmentos cerámicos.
- Utilización de morteros con composición material a base de plomo.
- Utilización de morteros con composición material a base de cal.
- Utilización de morteros con composición material a base de barro.
- Utilización de morteros con composición material a base de fibras vegetales.
- Utilización de morteros con composición material a base de teja triturada.



Fig. 3.429 Arg-e-Tabriz (Autor)



Fig. 3.430 Detalle esquina Baba Adam, Rampal (Aopu)



Fig. 3.431 Ollantaytambo (Autor)



Fig. 3.432 Juntas (Autor)

- Incorporación de elementos puntuales de mayor ductilidad

En los puntos más vulnerables de los elementos portantes verticales se buscó flexibilizar el comportamiento estructural a través de piezas puntuales de mayor ductilidad que las fábricas que los conformaban, integrándolas y disponiéndolas en los puntos de encuentro más delicados de cara a hacer frente a las enormes sacudidas de un terremoto. A partir de la disposición y dimensiones de estos elementos se puede diferenciar entre:

- a. Integración de piezas puntuales de mayor ductilidad y tamaño que las fábricas empleadas, dispuestos de manera homogénea en la totalidad del elemento vertical.
- b. Integración de piezas puntuales de mayor ductilidad y tamaño que las fábricas empleadas, dispuestos de manera localizada en una determinada sección del elemento vertical.
- c. Integración de piezas puntuales de mayor ductilidad y tamaño que las fábricas empleadas, dispuestos en las esquinas y bordes del elemento vertical.
- d. Integración de piezas puntuales de mayor ductilidad y tamaño que las fábricas empleadas, dispuestos en las jambas de los huecos del elemento vertical.
- e. Integración de piezas puntuales de mayor ductilidad que las fábricas empleadas, dispuestos de manera homogénea en la totalidad del elemento vertical.
- f. Integración de piezas puntuales de mayor ductilidad que las fábricas empleadas, dispuestos de manera localizada en una determinada sección del elemento vertical.
- g. Integración de piezas puntuales de mayor ductilidad que las fábricas empleadas, dispuestos en las esquinas y bordes del elemento vertical.
- h. Integración de piezas puntuales de mayor ductilidad que las fábricas empleadas, dispuestos en las jambas de los huecos del elemento vertical.



Fig. 3.433 Iglesia Belén (Autor)



Fig. 3.434 Arg-e-Tabriz (Autor)



Fig. 3.435 Kalaafs (Autor)

- Integración de elementos lineales de mayor ductilidad

La utilización de piezas de mayor ductilidad tuvo un desarrollo lineal en algunas de las columnas y elementos verticales de la arquitectura histórica, actuando con una doble función de refuerzo y flexibilización en las estructuras de mayor esbeltez.

La configuración de marcos de atado con elementos de mayor ductilidad favoreció cierto movimiento en situaciones de sismo, principalmente mediante travesaños de madera y otros formatos de piezas de origen vegetal, como cañas o fibras.

Atendiendo a la función y ubicación de estos elementos, es habitual encontrar distintas formas de incorporación de estas piezas en las construcciones de mayor sismicidad:

- Incorporación de elementos lineales de mayor ductilidad que las fábricas empleadas en el cuerpo vertical principal, dispuestos sobre varias hiladas consecutivas.
- Incorporación de elementos lineales de mayor ductilidad que las fábricas empleadas en el cuerpo vertical principal, dispuestos sobre varias hiladas separadas.
- Incorporación de elementos lineales de mayor ductilidad que las fábricas empleadas en el cuerpo vertical principal, dispuestos sobre una única hilada puntual.
- Incorporación de elementos lineales de mayor ductilidad que las fábricas empleadas en el cuerpo vertical principal, dispuestos sobre los dinteles de los huecos.
- Incorporación de elementos lineales de mayor ductilidad que las fábricas empleadas en el cuerpo vertical principal, dispuestos tanto en las hiladas o anillos del elemento vertical como en los dinteles de los huecos que alberga.

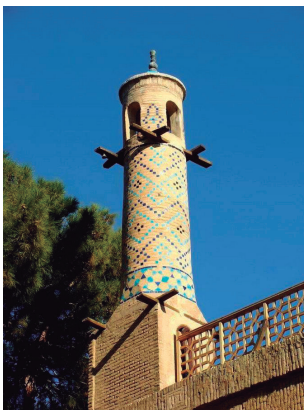


Fig. 3.436 Menar Jonban, Isfahan (Autor)



Fig. 3.437 Refuerzos de madera Arg-e-Tabriz (Autor)

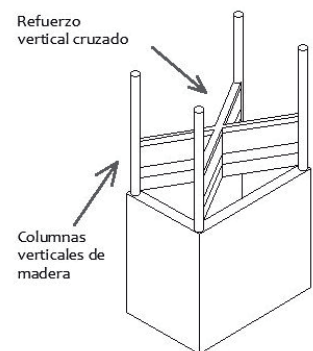


Fig. 3.438 Interior Badgir (Autor)

- Composición material de mayor ductilidad del propio ladrillo o sillar

Tal y como ya se mencionó en el apartado de los entramados murarios, los materiales utilizados en el caso de las columnas y otros elementos verticales con función portante también recurrieron al empleo de ladrillos o sillares con unas propiedades dúctiles mejoradas que posibilitaron cierto movimiento en dichas estructuras de fábrica.

Gracias a la porosidad y baja densidad que presentaban algunos de estos materiales se consiguió flexibilizar cada uno de estos componentes y en última instancia el conjunto edificado, ya fuese mediante las propias características de determinadas piedras aligeradas con las que se labraron directamente los sillares, o bien la amalgama de elementos utilizados a la hora de conformar cada uno de los ladrillos cerámicos o de adobe.

En este sentido se pueden identificar diferentes recursos materiales a la hora de mejorar las propiedades dúctiles de los sillares y ladrillos desarrollados en las zonas de mayor riesgo sísmico:

- a. Empleo de sillares completos de naturaleza ígnea.
- b. Empleo de fábricas compuestas de toba volcánica.
- c. Empleo de fábricas compuestas de fibras vegetales.
- d. Empleo de fábricas compuestas de fragmentos cerámicos.
- e. Empleo de fábricas compuestas de fragmentos óseos.
- f. Empleo de fábricas compuestas de estiércol de animales.
- g. Empleo de fábricas compuestas de dos o más materiales distintos de mayores propiedades dúctiles que las fábricas utilizadas en el elemento vertical principal.



Fig. 3.439 Columnas frente a la Catedral de Arequipa (Autor)



Fig. 3.440 Piedra Arequipa (Autor)



Fig. 3.441 Terracota (A.Chatterjee)

A modo de resumen de todos los subtipos ligados al comportamiento sismorresistente de columnas y otros elementos verticales, se compendian a continuación los tipos y subtipos desarrollados en este bloque, relativos al tercer grupo de sistemas ligado a las columnas y otros elementos verticales portantes.

Al igual que en apartados previos, y a modo de síntesis de lo expuesto anteriormente, se referencia en cada caso el número de variantes presentes en cada uno de los subtipos establecidos, atendiendo a la clasificación general propuesta en esta investigación, y permitiendo de esta forma visibilizar el enorme rango que presenta cada uno de los sistemas sismorresistentes vinculados a este capítulo:

GRUPOS	TIPOS	SUBTIPOS	Nº variantes por cada subtipo (código alfabético)
C - Columnas y otros elementos verticales	01 Aislamiento sísmico	01 Disposición de distintas capas de cimentación bajo los elementos verticales	9 (a-i)
		02 Sistemas de rodamiento y deslizamiento	6 (a-f)
		03 Arranque de elementos verticales mediante materiales de mayor resistencia	5 (a-e)
		04 Basamentos inclinados y grandes plataformas de arranque	5 (a-e)
		05 Utilización de piezas de gran tamaño y resistencia	4 (a-d)
	02 Aligeramiento	06 Reducción de esbeltez y altura del centro de gravedad	5 (a-e)
		07 Rellenos aligerantes dentro del núcleo de los elementos verticales	4 (a-d)
		08 Reemplazo del mortero por conectores puntuales de mayor ligereza	10 (a-j)
		09 Utilización de sillares o ladrillos de composición material más ligera	4 (a-d)
		10 Distribución gradual de los materiales según su peso	5 (a-e)
		11 Reducción de decoración no estructural	6 (a-f)
	03 Atado y unión de elementos	12 Refuerzos integrados en columnas y otros elementos verticales	4 (a-d)
		13 Refuerzos de esquinas y huecos a través de sus propias fábricas	6 (a-f)
		14 Refuerzos exteriores, contrafuertes y arcos de descarga	6 (a-f)
		15 Conectores entre sillares y ladrillos	6 (a-f)
		16 Incorporación de tirantes	5 (a-e)
		17 Traba y maclado de las fábricas	7 (a-g)
		18 Arriostramiento de los elementos verticales y sus arranques y cimentaciones	6 (a-f)
		19 Núcleo central rigidizador dentro de los elementos verticales	7 (a-g)
	04 Elasticidad y ductilidad	20 Tratamiento singular de las juntas	9 (a-i)
		21 Incorporación de elementos puntuales de mayor ductilidad	8 (a-h)
		22 Integración de elementos lineales de mayor ductilidad	5 (a-e)
		23 Composición material de mayor ductilidad del propio ladrillo o sillar	7 (a-g)

Elaboración propia

3.3.4 CUBIERTAS (BÓVEDAS, CÚPULAS Y OTROS ELEMENTOS DE CUBRICIÓN)

El último de los grupos planteados en este análisis y clasificación de sistemas sismorresistentes engloba todas aquellas soluciones vinculadas a los sistemas de cubrición de las estructuras históricas, ya sea mediante configuraciones en forma de bóvedas, cúpulas o cualquier otro elemento con función estructural y disposición horizontal dentro del esqueleto global.

Con este último bloque se completa por tanto el análisis de todos aquellos puntos de relevancia dentro del entramado global de cualquier estructura histórica de fábrica: desde su encuentro con el terreno y la disposición de distintos tipos de cimentaciones, pasando por los diferentes sistemas portantes verticales, como los entramados murarios o elementos y soportes puntuales como pilares, columnas o torres, hasta cerrar el círculo mediante el análisis planteado en este apartado, que pretende abordar todos aquellos sistemas incluidos en los elementos "horizontales", o de conexión, entre los elementos portantes verticales.

En este sentido, la taxonomía propuesta pretende acoger no sólo aquellos elementos pertenecientes a la envolvente exterior, sino también a todos aquellos elementos con una función análoga de conexión, cierre o soporte apoyado sobre las estructuras verticales que pudieran disponerse en el interior de las construcciones, tal y como puede suceder con los forjados u otras estructuras horizontales interiores.

Manteniendo como referencia la clasificación establecida en los dos anteriores grupos, y en consonancia con el primero de ellos, se conserva la organización propuesta a través de los cuatro tipos establecidos. En lo que respecta al primero de ellos, correspondiente a los sistemas orientados a mejorar el aislamiento sísmico de los edificios, los sistemas implementados en las cubiertas fomentan una independencia estructural de bóvedas, cúpulas y otros elementos de cubrición importantes, minimizando la exposición y vulnerabilidad de estas estructuras a través de distintas estrategias de aislamiento.

Si en el caso de los entramados murarios y otros elementos portantes verticales este aislamiento solía concentrarse en las zonas de arranque de dichos muros y soportes, en el caso de las cubiertas estos sistemas se reproducen principalmente en los puntos donde se produce esta transmisión sísmica desde el terreno, localizados en los arranques y encuentros de estas bóvedas, cúpulas y otros elementos horizontales con los entramados murarios y otras estructuras verticales.

Unido a este primer tipo se identifica una segunda tipología dedicada al aligeramiento de estas configuraciones horizontales de cubrición, cuyas condiciones masivas, en el caso del patrimonio de fábrica más monumental, adquieren un punto de especial importancia a la hora de plantear estos elementos constructivos.

La peligrosidad y el efecto destructivo que pueden llegar a generar las cubiertas más pesadas sobre los usuarios u otras áreas del edificio constituyen uno de los aspectos más relevantes a la hora de abordar los posibles sistemas de aligeramiento implementados en las cubriciones de las estructuras históricas de fábrica, cuya exposición al sismo puede llegar a desencadenar una amplificación de los efectos y desplazamientos horizontales en sus fábricas que acabe por provocar el colapso total o parcial de estos elementos. A este

respecto, merece la pena señalar la importancia de aquellas configuraciones con una distribución gradual de los materiales según su peso, así como aquellas medidas implementadas de cara a aumentar la ligereza de sus sillares, ladrillos o aquellos elementos con función conglomerante. De esta forma se consigue un comportamiento más armónico de este tipo de estructuras a la hora de afrontar grandes temblores, obteniendo como resultado una estructura más ligera que responda de una manera unitaria a estos desplazamientos horizontales, y evitando así posibles desajustes y movimientos enfrentados en sus fábricas.

Como complemento a este segundo tipo de sistemas se plantea una tercera tipología vinculada a todas aquellas estrategias que responden a situaciones de atado y unión entre elementos. Dentro de este apartado se recogen subtipos de sistemas que buscan dar respuesta a la correcta conexión entre las propias fábricas que componen las cubiertas, pero también desde una búsqueda de aportar mayor arriostramiento a todo el conjunto destinado a la cubrición de estas construcciones.

También dentro de este tercer tipo se incluyen aquellos sistemas ligados a la estructura interna pero planteados como elementos externos de conexión, tal y como puede suceder con la utilización de tirantes o conectores que puedan unir las cubriciones más masivas con otros elementos auxiliares ligados al esqueleto estructural general.

Por último, y en concordancia con lo planteado en los dos anteriores grupos correspondientes a todos aquellos elementos portantes verticales, ya fuesen lineales o puntuales, se presenta un cuarto tipo de sistemas vinculado a los principios de elasticidad y ductilidad. Si bien este aspecto constituye una situación verdaderamente beneficiosa para la faceta vertical de la estructura, lo cierto es que este tipo de estrategias se revela muy conveniente para el caso de las cubiertas, donde aportar cierta flexibilidad a las construcciones puede llegar a contribuir de manera notable al comportamiento sismorresistente de toda la estructura, manteniendo en lo posible un marco y una configuración unitaria en todo el conjunto para evitar el colapso total o parcial.

Como consecuencia, algunos de los sistemas que se relacionan con este principio de elasticidad los encontramos desarrollados también en los tres grupos anteriores, pero manifestándose de una manera singular para el caso de las cubriciones. No obstante, los subtipos identificados en los sistemas implementados en cubiertas están muy relacionados con una mejora de las propiedades dúctiles de los distintos elementos que conforman las cubiertas, desde sus propias fábricas hasta la configuración de las juntas de mortero empleadas entre ellas.

Las particularidades y características de este último grupo de sistemas sismorresistentes se desarrollan de manera contextualizada en los apartados correspondientes a los casos y zonas de estudio ya abordadas, sintetizando la información relativa a cada uno de estos subtipos en las fichas planteadas en los anexos, así como una descripción constructiva de los aspectos más relevantes de cada uno de estos sistemas.

3.3.4.1 Sistemas de tipo "Aislamiento sísmico"

A pesar de que la primera tipología planteada en este último grupo relativo a las cubiertas es la que menor número de subtipos presenta, la implementación de los sistemas descritos a continuación conforma una de las barreras con mayor repercusión y trascendencia a la hora de mitigar los efectos destructivos de cualquier temblor de cierta intensidad.

Como principal medida de contención sísmica, los sistemas recogidos en este apartado buscan aminorar el impacto de las fuerzas propias de cualquier terremoto, a través de dos mecanismos principales que confrontan esta transmisión desde los elementos en contacto con el terreno hasta los distintos elementos de cubrición o remate de la estructura.

La primera de ellas tiene que ver con una estrategia de interposición, estableciendo barreras o sistemas más o menos independizados estructuralmente de los elementos portantes verticales sobre los que se apoyan estas cubriciones. Gracias al fortalecimiento de los arranques de estas cubiertas se consigue reducir la intensidad de las fuerzas transmitidas en ellas, reduciendo así la gran vulnerabilidad que presentan estas estructuras.

La segunda vía para mitigar los efectos destructivos de los seísmos en bóvedas, cúpulas y otros elementos horizontales es a través de estrategias de atenuación, reduciendo la transmisión de esta energía sísmica hacia los elementos de cubrición desde la propia estructura portante vertical sobre la que se apoyan las cubiertas, y que conectan directamente con la fuente de emisión de estas fuerzas horizontales, tan características de los terremotos.

La disposición oculta de este tipo de sistemas dentro de estos puntos de encuentro entre cubriciones y apoyos dificulta la ya de por sí compleja labor de identificación de estas soluciones constructivas, al igual que sucede en el caso de aquellos sistemas incluidos en las cimentaciones de las construcciones. Sin embargo, y como consecuencia de una deficiente conservación y mantenimiento de parte de este patrimonio, ha sido posible aproximarse a este tipo de medidas incrustadas en muchas ocasiones en los puntos de encuentro entre ambas partes de la estructura, permitiendo un acercamiento constructivo a estos sistemas con comportamiento sismorresistente y función de reforzamiento.

- Sistemas de deslizamiento en su encuentro con la estructura muraria

De cara a reducir la transmisión de energía sísmica a los elementos de cubrición más vulnerables, las construcciones históricas de fábrica llegaron a plantear en algunos casos determinados sistemas de aislamiento sísmico en el punto de encuentro entre las cubriciones superiores y los entramados murarios de fábrica.

Las diversas soluciones de deslizamiento en estos puntos ejercen una doble función de gran relevancia. Por un lado, dotando de cierta independencia estructural al elemento de cubrición, y por otro minimizando la transferencia de fuerzas dinámicas desde los elementos portantes inferiores sobre los que se apoyan estos elementos.

Esta estrategia se presenta como fundamental en las cubriciones puntuales tipo cúpula, donde la integración de elementos auxiliares en los arranques de las mismas produce que se desliguen estas grandes estructuras de cubrición de las acciones sísmicas.

A pesar de la escasez de muestras correspondientes a este subtipo de sistemas, se pueden establecer los siguientes criterios para llegar a caracterizar las distintas intervenciones relacionadas con este tipo de soluciones, tanto aquellas que ya se han descubierto como las que se pudieran identificar en el futuro, gracias a la analogía de este tipo de sistemas en los dos grupos previos descritos con anterioridad en el caso de los muros y las columnas y otros elementos verticales:

- a. Sistema de deslizamiento conformado por dos o más capas o elementos de rodamiento, a base de piezas de origen geológico.
- b. Sistema de deslizamiento conformado por una única capa o elemento, de origen geológico.
- c. Sistema de deslizamiento conformado por dos o más capas o elementos de rodamiento, a base de piezas de origen animal o vegetal.
- d. Sistema de deslizamiento conformado por una única capa o elemento, de origen animal o vegetal.
- e. Sistema de deslizamiento conformado por dos o más capas o elementos de rodamiento, a base de piezas de tipo mixto, tanto de origen geológico como animal o vegetal.
- f. Sistema de deslizamiento conformado por una única capa o elemento de tipo mixto, tanto de origen geológico como animal o vegetal.

- Arranque de cubiertas mediante materiales de mayor resistencia

Con el objetivo de fortalecer los arranques de las cubiertas de mayores dimensiones, las bóvedas, cúpulas y otros elementos de cubrición pertenecientes a construcciones situadas en zonas de alta sismicidad experimentaron un fortalecimiento de estos puntos de encuentro a través de piezas y materiales de mayor resistencia que los planteados para la estructura principal de cubrición.

La mejora material de estos elementos, así como su dimensión, permiten absorber una parte de las fuerzas dinámicas horizontales transmitidas a las cubriciones en situaciones de seísmo, evitando de esta forma una resonancia excesiva en las cubiertas que acabe provocando el colapso de las mismas.

Las particularidades de este subtipo de sistemas, orientados a mejorar el aislamiento sísmico de las cubiertas, se pueden clasificar en las siguientes situaciones constructivas:

- a. Arranque de cubiertas mediante sillares de mayor dimensión y resistencia que las fábricas empleadas en el cuerpo principal horizontal de cubrición.
- b. Arranque de cubiertas mediante sillares de igual dimensión que las fábricas empleadas en el cuerpo principal horizontal de cubrición, pero de mayor resistencia material.
- c. Arranque de cubiertas mediante sillares de igual resistencia que las fábricas empleadas en el cuerpo principal horizontal de cubrición, pero de mayores dimensiones.
- d. Arranque de cubiertas mediante una combinación de las mismas fábricas empleadas en el cuerpo principal horizontal de cubrición, y sillares o ladrillos de mayor dimensión y/o resistencia que las primeras.
- e. Arranque de cubiertas mediante ladrillos de igual resistencia que las fábricas empleadas en el cuerpo principal horizontal de cubrición, pero de mayores dimensiones.



Fig. 3.442 Catedral de Cusco (Fragmento postal)



Fig. 3.443 Mezquita Al-Nabi, Qazvin (M.Asadi)



Fig. 3.444 Catedral de Lima (Autor)

3.3.4.2 Sistemas de tipo "Aligeramiento"

El segundo de los tipos establecidos corresponde con todos aquellos sistemas vinculados a un fomento del aligeramiento general de toda la estructural principal de las cubiertas, ya sean bóvedas, cúpulas u otros elementos de cubrición.

Al contrario de lo comentado en los dos bloques anteriores, ligados a las estructuras portantes verticales, la utilización de diversos recursos de aligeramiento de la estructura de cubrición supuso uno de los factores clave a la hora de plantear los monumentales y masivos esqueletos estructurales de las construcciones de fábrica situados en zonas de gran riesgo sísmico.

Los subtipos identificados en este apartado constituyen un factor clave de cara a facilitar cierto movimiento de toda la cubierta, aspecto que está íntimamente ligado con el cuarto de los tipos desarrollados en este bloque, relacionado con un mayor aporte de flexibilidad a toda la estructura, tal y como se menciona más adelante.

Las estrategias para lograrlo se articulan a través de diferentes subtipos que permiten reducir la carga masiva en esta faceta de remate horizontal en las estructuras de fábrica. La configuración general de estas cubriciones, la distribución gradual de sus materiales y la reducción de esbeltez que se consigue a través de una disminución de altura y proporciones en estos elementos, tiene mucho que ver con la localización del centro de gravedad de dichas estructuras y su relación de vulnerabilidad en situaciones de terremoto.

De manera similar, la supresión y reducción de la ornamentación no estructural más prominente en estos edificios contribuye no sólo a un aligeramiento general de toda la estructura, sino también a evitar posibles daños ocasionados por la caída o impacto de los objetos de mayores dimensiones situados sobre el plano de cubrición del esqueleto estructural de la construcción.

A nivel interno, la ligereza de las cubiertas de mayores dimensiones se abordó a través de distintas estrategias que posibilitaron una disminución considerable del peso de estas construcciones sin llegar a afectar al desempeño estructural de estas. Para lograrlo se planteó desde un aligeramiento de las propias fábricas y sus rellenos hasta un vaciado de bóvedas, cúpulas y otras estructuras de cubrición de grandes proporciones, disponiendo de capas intermedias que permitían reducir de manera considerable el apartado masivo de estas enormes estructuras de fábrica.



Fig. 3.445 Mezquita Jameh, Isfahan (Fragmento postal)

- Reducción de esbeltez y altura del centro de gravedad

La configuración constructiva de las cubiertas de los edificios históricos más monumentales alberga una racionalidad sísmica patente en la disposición de todos sus elementos de cubrición, con unas proporciones y singularidades geográficas que se manifiestan de manera clara en el caso de la envolvente horizontal de dichas construcciones.

La concepción volumétrica de estas cubiertas ubicadas en regiones de alta sismicidad expresa una reducción de esbeltez en los elementos prominentes destinados a la cubrición o al remate estructural de los espacios de mayores dimensiones, ya sea mediante la propia disminución de altura de bóvedas o cúpulas, o bien a través de su integración en la envolvente y/o forjados superiores, reduciendo de esta manera la exposición de los elementos de mayor dimensión y prominencia. De esta forma podemos distinguir entre los siguientes mecanismos destinados a reducir la esbeltez y altura de estos cuerpos de cubrición:

- a. Reducción de la esbeltez de bóvedas, cúpulas y otros elementos de cubrición, mediante un ensanchamiento acusado en la base de dicho cuerpo estructural.
- b. Reducción de la esbeltez de bóvedas, cúpulas y otros elementos de cubrición, mediante la integración completa de dichos elementos en otros cuerpos adyacentes, tengan o no función estructural.
- c. Reducción de la esbeltez de bóvedas, cúpulas y otros elementos de cubrición, mediante la integración parcial de dichos elementos en otros cuerpos adyacentes, tengan o no función estructural.
- d. Reducción de la esbeltez de bóvedas, cúpulas y otros elementos de cubrición, mediante la disposición de elementos adicionales puntuales en la base, adosados de manera externa al soporte estructural principal.

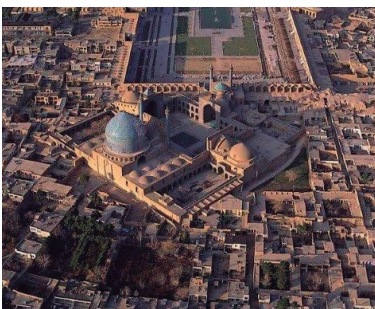


Fig. 3.446 Mezquita del Imam, Isfahan (E.Jamei)

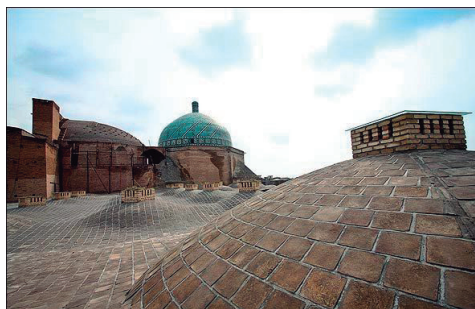


Fig. 3.447 Mezquita Jameh, Qazvin (Autor)

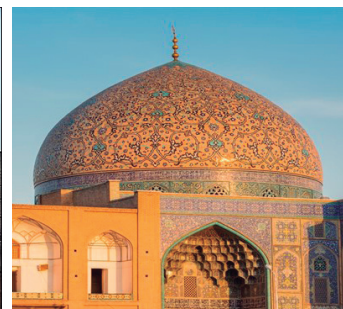


Fig. 3.448 Mezquita Lotf Allah, Isfahan (Autor)

- Rellenos aligerantes dentro de las cubiertas

A nivel interno, algunos de los sistemas implementados en bóvedas, cúpulas y otros elementos de cubrición, recogen soluciones de aligeramiento que contribuyen a reducir el peso de las estructuras de fábrica de mayores dimensiones, tal y como ocurre por ejemplo en grandes mezquitas o catedrales, donde la carga de sus fábricas pétreas puede llegar a constituir un punto de gran riesgo ante situaciones de movimientos telúricos.

A pesar de su ubicación en el interior de las cubiertas, en algunos casos ha sido posible examinar la utilización de sistemas de aligeramiento en las capas de relleno de bóvedas y cúpulas, ya sea mediante la disposición de piezas de características materiales más ligeras o la combinación de distintos elementos más livianos que las fábricas que conforman el esqueleto estructural principal.

Con estas decisiones constructivas implementadas en cubierta los constructores de la antigüedad lograron no solo disponer de una solución más rápida y barata a la hora de plantear la terminación de las obras más monumentales de cada región, sino también prescindir del uso de fábricas en el interior de estas cubriciones, fortaleciendo y compactando el interior a través de estos rellenos a la vez que se conseguía aligerar todo el conjunto del esqueleto estructural.

Es el caso de los enjarrados que encontramos en gran cantidad de bóvedas, con los cuales se logra alcanzar el nivel establecido para la cara superior de la cubierta sin incrementar en demasía el peso del total de la cubrición, reduciendo el riesgo de colapso en situaciones de sismo.

A este respecto, se pueden establecer las siguientes soluciones destinadas a reducir el peso de las cubriciones realizadas en fábrica:

- a. Rellenos aligerantes confinados en el interior de las bóvedas, cúpulas u otros elementos de cubrición, a base de un único material conglomerante tipo mortero.
- b. Rellenos aligerantes mixtos confinados en el interior de las bóvedas, cúpulas u otros elementos de cubrición, a base de un material conglomerante y otros elementos adicionales de origen pétreo.
- c. Rellenos aligerantes mixtos confinados en el interior de las bóvedas, cúpulas u otros elementos de cubrición, a base de un material conglomerante y otros elementos adicionales de origen cerámico.
- d. Rellenos aligerantes mixtos confinados en el interior de las bóvedas, cúpulas u otros elementos de cubrición, a base de un material conglomerante y otros elementos de relleno de origen vegetal o animal.

- Utilización de sillares o ladrillos de composición material más ligera

La concepción constructiva de los elementos de cubrición de los edificios históricos tuvo en cuenta en algunos casos la propia composición material de sus fábricas, recurriendo a sillares y ladrillos aligerados, ya fuese a través de las características de dichos materiales o la combinación de varios de éstos con el objetivo de aligerar las fábricas en determinadas secciones o la totalidad del edificio.

Atendiendo a estos criterios, las opciones disponibles en el caso de las fábricas generadas a través de la mezcla de distintos materiales, aditivos y áridos, dio lugar a una variabilidad de soluciones de gran riqueza y diversidad, y con un horizonte de estudio de gran recorrido en aquellas construcciones históricas ubicadas en zonas de gran sismicidad. Para abordar las distintas soluciones de aligeramiento a través de las propias fábricas utilizadas por los constructores de la antigüedad, y también aquellas que se pudieran identificar más adelante, se propone una caracterización basada en las siguientes estrategias de utilización de dichos elementos:

- a. Empleo de fábricas aligeradas, de menor peso que las empleadas en el cuerpo principal de cubrición, dispuestas en continuidad en un nervio o sección parcial de la cubierta.
- b. Empleo de fábricas aligeradas, de menor peso que las empleadas en el cuerpo principal de cubrición, dispuestas en continuidad en varios nervios o secciones parciales de la cubierta y colocadas de manera consecutiva.
- c. Empleo de fábricas aligeradas, de menor peso que las empleadas en el cuerpo principal de cubrición, dispuestas en continuidad en varios nervios o secciones parciales de la cubierta pero alternadas respecto a los nervios de la estructura principal.
- d. Empleo de fábricas aligeradas, de menor peso que las empleadas en el cuerpo principal de cubrición, dispuestas de manera puntual y sin continuidad en un mismo nervio o sección de la cubierta.



Fig. 3.449 Iglesia Compañía de Jesús (Autor)

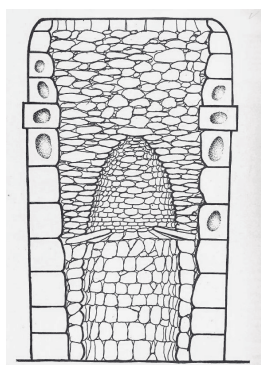


Fig. 3.450 Interior chullpa (G. Gasparini)

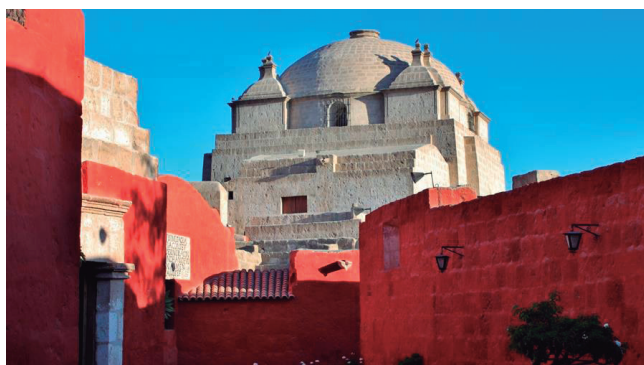


Fig. 3.451 Monasterio Santa Catalina, Arequipa (Autor)

- Distribución gradual de los materiales según su peso

La ubicación de los elementos más pesados o ligeros dentro del apartado de las cubriciones presenta una racionalidad sísmica patente en la distribución gradual de los materiales empleados en cada caso según el peso de los mismos.

Respetando este concepto, es frecuente encontrar este tipo de principios no solo en las cubiertas, sino también en otras secciones parciales de las estructuras de fábrica situadas en zonas de gran sismicidad, tal y como también se ha visto en los bloques anteriores. La concepción estructural de las cubiertas enfatiza esta manifestación constructiva, con los materiales más ligeros en las zonas centrales o superiores, y reservando aquellos más pesados para las zonas exteriores o inferiores en el caso de arranques de bóvedas y cúpulas de grandes dimensiones.

A este respecto se puede establecer la siguiente taxonomía para este subtipo en función de la generalización de su uso en los esqueletos estructurales:

- Distribución gradual generalizada de la totalidad de materiales que conforman la estructura de cubrición en todo el edificio.
- Distribución gradual generalizada de la totalidad de materiales que conforman determinadas estructuras de cubrición del edificio.
- Distribución gradual parcial de algunos de los materiales que conforman determinadas estructuras de cubrición del edificio, ya sea en su arranque, cuerpo y/o coronación.
- Distribución gradual únicamente de los materiales que constituyen el arranque de las estructuras de cubrición del edificio.

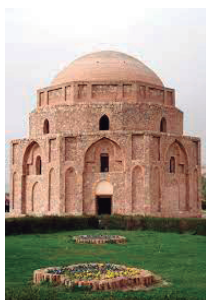


Fig. 3.452 Jabalieh, (Autor)

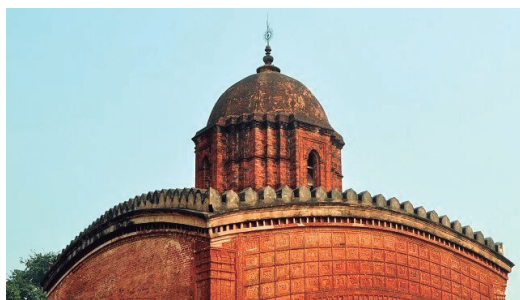


Fig. 3.453 Templo Madana Mohana, Bishnupur (Sahasa)

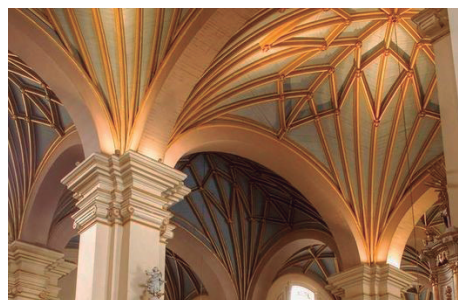


Fig. 3.454 Catedral de Lima (Autor)

- Reducción de decoración no estructural

Tal y como se ha comentado en los grupos anteriores, la reducción de ornamentación estructural también se reprodujo en bóvedas, cúpulas y otros elementos de cubrición utilizados en las construcciones históricas de fábrica.

La austeridad decorativa a través de elementos prominentes o abultados se vio sustituida en las zonas de mayor sismicidad por otros recursos artísticos que conservaron esta faceta estética en los edificios de mayor significación, principalmente gracias a la integración de dichos elementos dentro de las propias estructuras de cubrición. Con el fin de reducir el riesgo que pueden llegar a generar determinadas piezas de gran volumetría sobre partes específicas de la estructura de cubrición la arquitectura de fábrica desarrolló las siguientes medidas:

- a. Supresión de cualquier tipo de decoración no portante, como ornamentación de tipo colgante o exterior.
- b. Sustitución de la decoración no portante por ornamentación y motivos geométricos basados en el uso de distintos materiales integrados en el propio plano de cubrición del edificio.
- c. Sustitución de la decoración no portante por ornamentación y motivos geométricos basados en el uso de distintos formatos de ladrillos y sillares, integrados en el propio plano de cubrición del edificio.
- d. Sustitución de la decoración no portante por ornamentación y motivos geométricos basados en el uso del color sobre los elementos constructivos que conforman el propio plano de cubrición del edificio.
- e. Sustitución de la decoración no portante por ornamentación a base de azulejos sobre el plano exterior del propio plano de cubrición del edificio.
- f. Sustitución de la decoración no portante por ornamentación y motivos geométricos basados en el uso de bajorrelieves resaltados sobre el plano exterior del propio plano de cubrición del edificio.

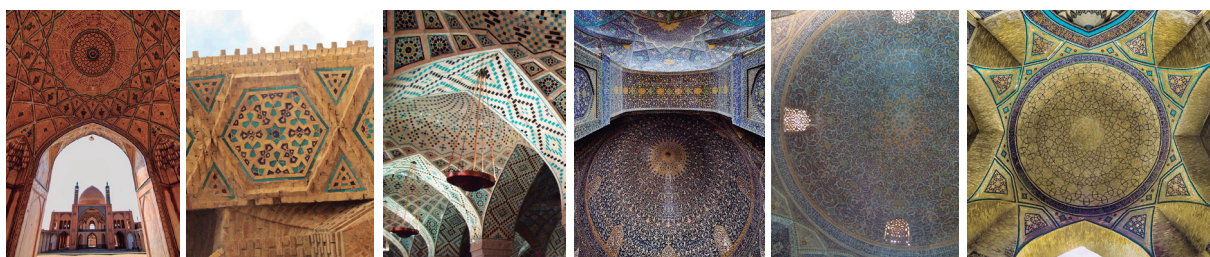


Fig. 3.455 Agha Bozorg (Autor)

Fig. 3.456 Varamin (Autor)

Fig. 3.457 Nasir Al Mulk (Autor)

Fig. 3.458 Mez. Imam (Autor)

Fig. 3.459 Mez. Sayed (Autor)

Fig. 3.460 Mezquita Hakim (Autor)

- Vaciado interior y disminución de los espesores de cubrición

Una de las medidas ensayadas en algunas de las construcciones localizadas en regiones con mayor sismicidad fue la disposición de varias capas de cubrición entre las que se llevó a cabo un vaciado interior con el fin de aligerar el peso total de la cubierta.

Con esta medida los constructores de la antigüedad lograron conservar volumetrías exteriores propias de los estilos o las culturas donde se erigieron algunos de los edificios más monumentales, a la vez que se conservaba un espacio interior de dimensiones adecuadas y se aseguraba un aligeramiento acentuado en estos elementos de gran vulnerabilidad en caso de sismo.

El desarrollo que experimentó este sistema de vaciado experimentó una evolución singular específica en cada una de las regiones donde se implementó, llegando a alcanzar desarrollos verdaderamente esbeltos gracias a este tipo de sistemas constructivos y la conjunción de otro tipo de medidas que favorecieron un comportamiento sismorresistente sobresaliente, tal y como se expone por ejemplo en algunas de las medidas recogidas en el apartado destinado a los sistemas de atado y unión entre elementos.

Las distintas estrategias para conseguir aligerar el espesor total de los elementos de cubrición se manifestaron de las siguientes formas:

- a. Utilización de bóvedas o cúpulas dobles con vaciado interior completo entre ambas capas de cubrición, y reducción gradual del espesor de cubrición en cualquiera de las dos hojas.
- b. Utilización de bóvedas o cúpulas triples con vaciado interior completo entre ambas capas de cubrición, y reducción gradual en altura del espesor de cubrición en cualquiera de las tres hojas.
- c. Utilización de bóvedas o cúpulas con vaciado interior puntual en determinadas áreas de su superficie interna, y reducción gradual en altura del espesor de cubrición.

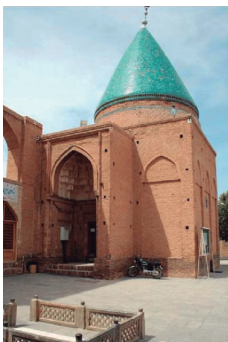


Fig. 3.461 Cúpula Bayazid Bastami, Natanz (T.Kamiya)

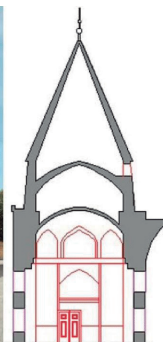


Fig. 3.462 Jameh Mosque Varamin (Autor)

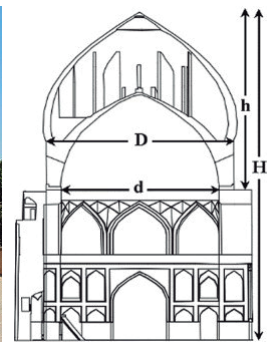


Fig. 3.463 Mez. Imam (M.Gourdazi)

d. Utilización de bóvedas o cúpulas dobles con vaciado interior completo entre ambas capas de cubrición, pero sin presentar reducción gradual del espesor de cubrición en cualquiera de las dos hojas.

e. Utilización de bóvedas o cúpulas triples con vaciado interior completo entre ambas capas de cubrición, pero sin presentar reducción gradual del espesor de cubrición en cualquiera de las tres hojas.

f. Utilización de bóvedas o cúpulas con vaciado interior puntual en determinadas áreas de su superficie interna, pero sin presentar reducción gradual del espesor de cubrición.

g. Utilización de bóvedas o cúpulas sin vaciado interior, pero con reducción gradual en altura del espesor de cubrición.

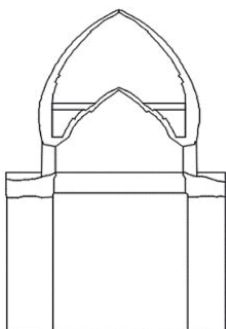


Fig. 3.464 Iglesia Belén (M.Hejazi)

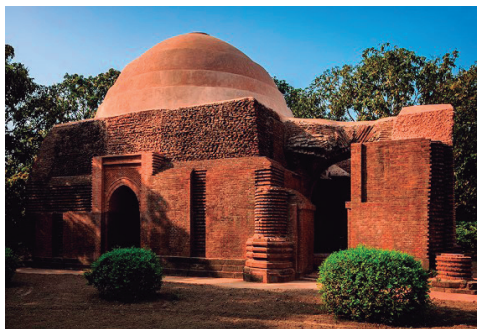


Fig. 3.465 Mezquita de Chamkati (Fragmento postal)



Fig. 3.466 Mezquita en Varamin (ITTO)

3.3.4.3 Sistemas de tipo "Atado y unión de elementos"

En lo que respecta al tercero de los tipos sismorresistentes planteados, correspondiente a aquellos sistemas con función de atado y unión de elementos, se recogen a continuación algunas de las soluciones implementadas en las cubiertas, con el objetivo de favorecer un comportamiento unitario en uno de los elementos más vulnerables de cualquier construcción.

A la hora de enfrentar los violentos temblores de cualquier terremoto de gran entidad, la utilización de refuerzos adicionales supuso uno de los factores clave de cara a asegurar la ansiada estabilidad estructural de todo el esqueleto principal, pero también de todos aquellos elementos complementarios que podrían llegar a ocasionar daños mayores en los propios usuarios o en otros puntos de gran importancia dentro del entramado de la estructura.

La localización de estos sistemas se concibió de distintas formas en función de las posibilidades geométricas, programáticas, constructivas y volumétricas, pudiendo encontrar desde elementos adosados a la estructura de manera interna o externa, hasta soluciones integradas en la propia estructura de fábrica, ocultas a simple vista desde el exterior.

Desde el punto de vista de las bóvedas, cúpulas y otros elementos de cubrición, los sistemas empleados se centraron tanto en el arranque de dichas estructuras como en el propio cuerpo de las mismas, buscando arriostramientos internos a través del uso de arcos, costillas y nervios integrados en la propia cubierta y propiciando desarrollos de gran sofisticación en bóvedas y cúpulas. Este tipo de medidas contribuyó no solo al refuerzo del remate superior de las construcciones de mayores dimensiones, sino que constituyó en sí mismo un recurso compositivo y ornamental adicional desde el interior de estos edificios.

En aquellos elementos de cubrición con un desarrollo en altura acentuado, se dispuso asimismo de otros sistemas adicionales de atado, procurando en la medida de lo posible no proporcionar un peso adicional a toda la estructura gracias a la disposición de sistemas con una naturaleza material que permitiese compatibilizar su uso en las cubiertas más masivas.

Es por ello que, en este tipo de soluciones, las fábricas de piedra, ladrillo y adobe se vieran complementadas con sistemas sismorresistentes de distinta naturaleza, haciendo uso por ejemplo de tirantes y otros elementos de madera para asegurar una correcta conexión de todas sus partes y contribuir a alcanzar un comportamiento lo más unitario posible de cara a posibles movimientos horizontales.

- Refuerzos y armados integrados en las propias cubiertas

El fortalecimiento estructural de las bóvedas, cúpulas y otros elementos de cubrición experimentó un gran desarrollo en las zonas de gran sismicidad, ya fuese mediante refuerzos puntuales incrustados en las propias cubiertas o armados superficiales integrados en la estructura principal, presentando una riqueza y complejidad constructiva que varía en función de distintos factores, como la ubicación, tamaño o materiales empleados.

Con el objetivo de asegurar una correcta conexión y arriostramiento en todo el conjunto de cubrición, se pueden identificar los siguientes sistemas de atado integrados en las cubiertas de fábrica:

- a. Refuerzos puntuales de origen vegetal integrados en la propia estructura de cubrición.
- b. Refuerzos puntuales de origen metálico integrados en la propia estructura de cubrición.
- c. Refuerzos puntuales de tipo pétreo integrados en la propia estructura de cubrición.
- d. Combinación de refuerzos puntuales, dando lugar a refuerzos de tipo mixto integrados en la propia estructura de cubrición, ya sea mediante la combinación de materiales de distinta o de la misma naturaleza.
- e. Refuerzos o armados continuos, de origen vegetal e integrados en la propia estructura de cubrición.
- f. Refuerzos o armados continuos, de origen metálico e integrados en la propia estructura de cubrición.
- g. Refuerzos o armados continuos, de tipo pétreo e integrados en la propia estructura de cubrición.
- h. Combinación de refuerzos o armados continuos, dando lugar a refuerzos de tipo mixto integrados en la propia estructura de cubrición, ya sea mediante la combinación de materiales de distinta o de la misma naturaleza.

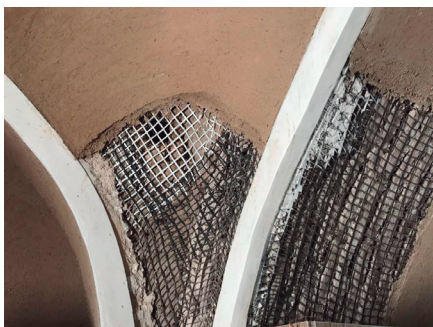


Fig. 3.467 Bam (Autor)



Fig. 3.468 Casa del Hielo, Bam (E.Mokhtari)



Fig. 3.469 Ciudadela de Bam (Autor)

- Arriostramiento interno mediante arcos, costillas y nervios

En el caso de las bóvedas, cúpulas y otros elementos de cubrición hechos en fábrica, la arquitectura histórica ubicada en zonas de alta peligrosidad sísmica desarrolló distintos métodos de arriostramiento interno en estos elementos de cubierta, ya fuese mediante la disposición de arcos, costillas o nervios incrustados en ellos.

De esta forma se logró atar cada uno de estos conjuntos de cubrición, favoreciendo un comportamiento unitario ante situaciones de sismo gracias a la repetición e intersección de estos elementos que articularon bóvedas y cúpulas de determinadas construcciones ubicadas en estas regiones.

De cara a caracterizar de manera genérica este tipo de sistemas nervados se pueden establecer las siguientes situaciones:

- a. Arriostramiento interno de los elementos de cubrición mediante la repetición exacta de dos o más tipos de arcos, costillas o nervios, integrados en el plano curvo que constituye la única superficie de cubrición.
- b. Arriostramiento interno de los elementos de cubrición mediante la repetición variable de dos o más tipos de arcos, costillas o nervios diferentes, integrados en el plano curvo que constituye la única superficie de cubrición.
- c. Arriostramiento interno de los elementos de cubrición mediante la repetición exacta de un arco, costilla o nervio, integrado en el plano curvo que constituye la única superficie de cubrición.
- d. Arriostramiento interno de los elementos de cubrición mediante la repetición variable de un arco, costilla o nervio, integrado en el plano curvo que constituye la única superficie de cubrición.



Fig. 3.470 Mez. Jameh (Amir)

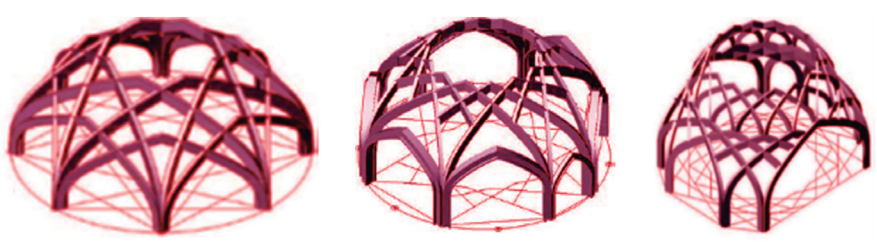


Fig. 3.471 Entramados de nervaduras-arco (A.A.Mohammadi)

e. Arriostramiento interno de los elementos de cubrición mediante la repetición exacta de dos o más tipos de arcos, costillas o nervios diferentes, adaptados e integrados en cada uno de los dos o más planos curvos que constituyen la superficie de cubrición.

f. Arriostramiento interno de los elementos de cubrición mediante la repetición variable de dos o más tipos de arcos, costillas o nervios diferentes, adaptados e integrados en cada uno de los dos o más planos curvos que constituyen la superficie de cubrición.

g. Arriostramiento interno de los elementos de cubrición mediante la repetición exacta de un arco, costilla o nervio, adaptado e integrado en cada uno de los dos o más planos curvos que constituyen la superficie de cubrición.

h. Arriostramiento interno de los elementos de cubrición mediante la repetición variable de un arco, costilla o nervio, adaptado e integrado en cada uno de los dos o más planos curvos que constituyen la superficie de cubrición.



Fig. 3.472 Mez. Jameh (Autor)

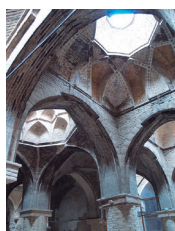


Fig. 3.473 Mez. Jameh (Autor)

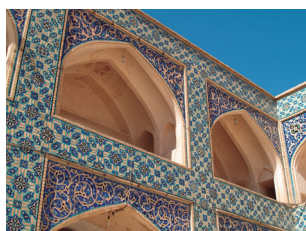


Fig. 3.474 Mezquita Jameh, Isfahan (Autor)



Fig. 3.475 Mezquita Jameh, Isfahan (D. Delso)

- Arriostramiento de las bóvedas y cúpulas y sus arranques

La utilización de distintos mecanismos de atado se llegó a plantear no sólo en los arranques de las propias estructuras de cubrición, como bóvedas y cúpulas, sino también en el propio entramado de fábricas que las conforman y en la relación de cada una de ellas entre sí, favoreciendo así un comportamiento lo más unitario posible.

Para lograrlo, uno de los sistemas más efectivos es la disposición de arcos y bóvedas enjutas, estrategia que puede combinarse fácilmente con distintas vías para fortalecer los arranques de dichas estructuras de cubrición, ya sean arriostramientos puntuales situados intradós o rellenos localizados en el encuentro del extradós con las superficies portantes verticales, afianzando así la estabilidad y correcta distribución de fuerzas hacia el suelo. Para diferenciar los distintos grados de arriostramiento identificados se puede distinguir entre:

- a. Arriostramiento de las cubriciones mediante el enjutamiento de los arcos y bóvedas perimetrales e interiores (formeros+fajones), así como el atado del intradós y del extradós a través de sistemas auxiliares.
- b. Arriostramiento de las cubriciones mediante el enjutamiento de los arcos y bóvedas perimetrales (formeros), así como el atado del intradós y del extradós a través de sistemas auxiliares.
- c. Arriostramiento de las cubriciones mediante el enjutamiento de los arcos y bóvedas perimetrales e interiores (formeros+fajones), así como el atado complementario del intradós o el extradós.
- d. Arriostramiento de las cubriciones mediante el enjutamiento de los arcos y bóvedas perimetrales (formeros), así como el atado complementario del intradós o el extradós.
- e. Arriostramiento de las cubriciones mediante el enjutamiento de los arcos y bóvedas perimetrales e interiores (formeros+fajones).
- f. Arriostramiento de las cubriciones mediante el enjutamiento de los arcos y bóvedas perimetrales (formeros).



Fig. 3.476 S. Francisco (Postal)

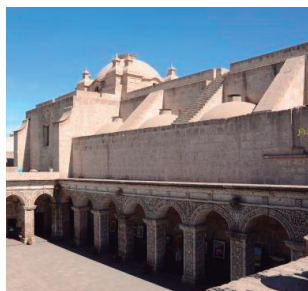


Fig. 3.477 Compañía de Jesús (Autor)



Fig. 3.478 Mezquita Jameh, Isfahan (Harvard College Library)

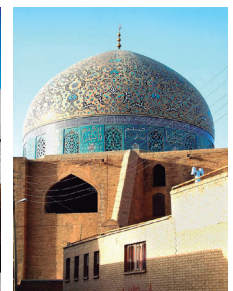


Fig. 3.479 Mez. Lotf Allah (Autor)

- Traba y maclado de fábricas

El gran desarrollo que experimentaron los tallados y maclados de las fábricas que conformaron los entramados murarios erigidos por diversas culturas con gran exposición al sismo, tuvo también su reflejo en las estructuras de cubrición de estas construcciones históricas.

A la compleja disposición de nervios y costillas dentro de estas cubriciones hay que sumarle la gran diversidad formal que se reprodujo en muchas de estas cubiertas, principalmente en lo que respecta a la utilización de distintas leyes de traba utilizadas en una misma bóveda o cúpula.

Con el objetivo de caracterizar estas soluciones se pueden establecer las siguientes situaciones a la hora de plantear la colocación de las fábricas:

- a. Utilización de cuatro o más leyes de traba en una misma superficie de cubrición y dos o más formatos de ladrillo o sillar.
- b. Utilización de cuatro o más leyes de traba en una misma superficie de cubrición y un único formato de ladrillo o sillar.
- c. Utilización de tres leyes de traba en una misma superficie de cubrición y dos o más formatos de ladrillo o sillar.
- d. Utilización de tres leyes de traba en una misma superficie de cubrición y un único formato de ladrillo o sillar.
- e. Utilización de dos leyes de traba en una misma superficie de cubrición y dos o más formatos de ladrillo o sillar.
- f. Utilización de dos leyes de traba en una misma superficie de cubrición y un único formato de ladrillo o sillar.

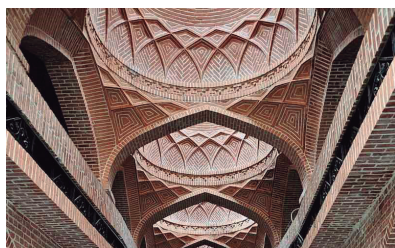


Fig. 3.480 Bazar de Tabriz (Autor)



Fig. 3.481 Chullpa (Autor)



Fig. 3.482 Mezquita del viernes, Isfahan (Autor)

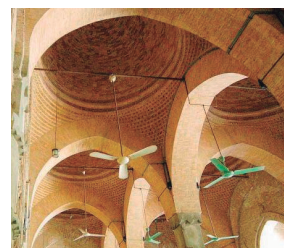


Fig. 3.483 Mezquita Naogaon (D.Tribune)

- Conectores entre sillares y ladrillos

Si bien la utilización de conectores entre sillares y ladrillos constituye una de las medidas específicas de los entramados murarios y otras estructuras portantes verticales, su identificación tiene mucho que ver con la posibilidad de observación de dichos sistemas en las estructuras derruidas o en malas condiciones de conservación, cuyo deterioro ha posibilitado el análisis de estos elementos introducidos en el interior de la propia estructura sin comprometer en exceso la estabilidad de estos elementos.

En el caso de las estructuras de cubrición, como bóvedas y cúpulas, esta observación se complica en tanto en cuanto la propia concepción horizontal y de remate de estos elementos no soporta el mismo grado de deterioro que las estructuras murarias, que resisten al colapso durante un periodo más prolongado que las cubiertas, en caso de mantenimiento nulo o deficiente. La tarea de identificación resulta por tanto algo compleja en aquellas construcciones que se mantienen en buenas condiciones de conservación, reservando a escritos, crónicas y eventos sísmicos recientes la identificación de los ejemplos utilizados en las edificaciones ubicadas en zonas de alta peligrosidad, cuando la exposición continuada a los terremotos ha provocado colapsos parciales o totales de las cubiertas en estos edificios.

A pesar de la condición oculta de este tipo de sistemas, en el caso de las bóvedas, cúpulas y otros elementos de cubrición de las construcciones históricas realizadas en fábrica, se puede reproducir análogamente la caracterización planteada para estas soluciones en el apartado de las estructuras portantes verticales, diferenciando así entre las siguientes soluciones:

- a. Conectores en forma de clavijas y grapas incrustadas en hendiduras realizadas en las caras horizontales y/o verticales de piezas adyacentes.
- b. Conectores en forma de travesaños incrustados en hendiduras realizadas en las caras horizontales y/o verticales de piezas adyacentes.
- c. Conectores en forma de planchas situadas en las caras horizontales y/o verticales de piezas adyacentes.
- d. Conectores en forma de rellenos conglomerantes vertidos y endurecidos sobre hendiduras realizadas en las caras horizontales y/o verticales de piezas adyacentes.
- e. Conectores en forma de fundidos metálicos vertidos y endurecidos sobre hendiduras realizadas en las caras horizontales y/o verticales de piezas adyacentes.
- f. Conectores en forma de elementos de naturaleza pétreo incrustados en hendiduras realizadas en las caras horizontales y/o verticales de piezas adyacentes.

- Disposición de capas dobles o triples de cubrición

Las cubiertas planteadas en gran parte de la arquitectura histórica de fábrica experimentaron un gran desarrollo en algunas culturas, incluidas aquellas ubicadas en zonas de altísima sismicidad.

Para mitigar los efectos que los grandes temblores podían llegar a ocasionar en ellas, los constructores de la antigüedad recurrieron a cúpulas de varias capas con el fin de fortalecer estos elementos y arriostrarlos con las distintas hojas que lo constituyen.

Para diferenciar los distintos desarrollos utilizados en estos elementos, las situaciones más reproducidas son:

- Disposición de bóvedas o cúpulas de triple capa de distinta geometría, con una o más hojas situadas por debajo del plano horizontal de cubrición principal.
- Disposición de bóvedas o cúpulas de triple capa de distinta geometría, con todas las hojas situadas sobre el plano horizontal de cubrición principal.
- Disposición de bóvedas o cúpulas de doble capa de distinta geometría, con una o más hojas situadas por debajo del plano horizontal de cubrición principal.
- Disposición de bóvedas o cúpulas de doble capa de distinta geometría, con todas las hojas situadas sobre el plano horizontal de cubrición principal.
- Disposición de bóvedas o cúpulas de doble capa de igual geometría, superpuestas e interconectadas superficialmente entre sí.
- Disposición de bóvedas o cúpulas de doble capa de igual geometría, superpuestas e interconectadas puntualmente entre sí.
- Disposición de bóvedas o cúpulas de doble capa de igual geometría, superpuestas, pero sin conexión entre sí.

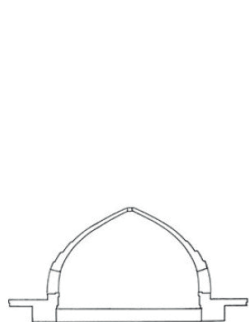


Fig. 3.484 Tipos de cúpulas (M.Hejazi)

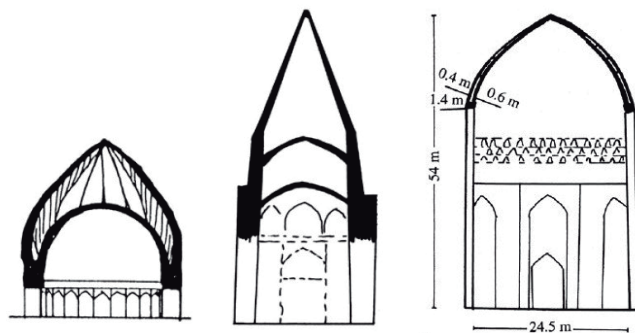


Fig. 3.485 Soltaniyeh (M.Hejazi)

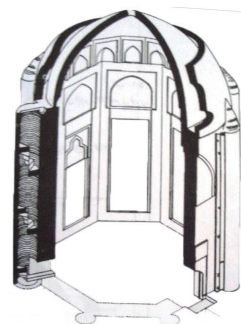


Fig. 3.486 Kharraqan (Autor)

- Núcleo central rigidizador entre las distintas capas de cubrición

La utilización de un núcleo central rigidizador ha sido ampliamente desarrollado en las construcciones históricas de fábrica con alta exposición a los terremotos, ya sea en la concepción estructural de todo el esqueleto estructural como en aquellos elementos parciales que lo conforman, tal y como ya se ha mencionado en el bloque anterior para los casos de columnas y otros elementos de gran verticalidad con función estructural portante.

En el caso de las cubiertas, se pueden identificar los siguientes subtipos de núcleo central entre capas:

- a. Disposición de núcleo central rigidizador, de la misma altura que el hueco entre capas, y compuesto por un elemento continuo a base de fábricas pétreas.
- b. Disposición de núcleo central rigidizador, de la misma altura que el hueco entre capas, y compuesto por un elemento continuo a base de fábricas de ladrillo.
- c. Disposición de núcleo central rigidizador, de la misma altura que el hueco entre capas, y compuesto por un elemento continuo de madera.
- d. Disposición de núcleo central rigidizador, de menor altura que el hueco entre capas, y compuesto por un elemento continuo a base de fábricas pétreas.
- e. Disposición de núcleo central rigidizador, de menor altura que el hueco entre capas, y compuesto por un elemento continuo a base de fábricas de ladrillo.
- f. Disposición de núcleo central rigidizador, de menor altura que el hueco entre capas, y compuesto por un elemento continuo de madera.

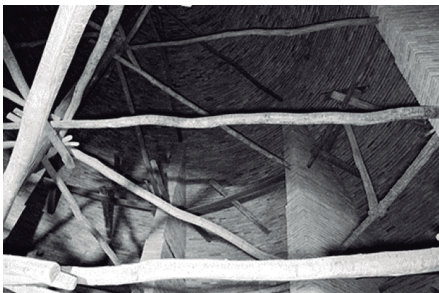


Fig. 3.487 Chahar Bagh, Isfahan (IEStudio)



Fig. 3.488 Mezquita del Shah, Isfahan (N.Valibeig)

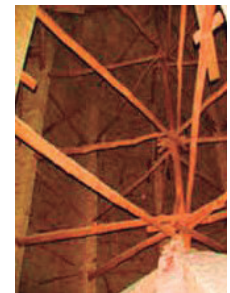


Fig. 3.489 Chahar Bagh (N.Valibeig)

- Conectores de refuerzo y arriostramiento entre distintas capas

De manera complementaria a la utilización de los dos subtipos anteriores, las cubiertas de varias capas recurrieron al empleo de conectores de refuerzo en su interior, atando y arriostrando en la medida de lo posible las distintas capas planteadas en bóvedas, cúpulas y otros elementos de cubrición.

A nivel material, la utilización de este tipo de refuerzos solía reproducirse a través del mismo tipo de ladrillo o sillar empleado en la cubierta, o bien mediante fábricas de menor peso que las empleadas en las hojas principales de cubrición.

Con el fin de recoger las características generales de estos conectores, se plantea la siguiente caracterización y taxonomía a partir de las propiedades constructivas y geométricas de dichos conectores de refuerzo y la posible interconexión entre ellos:

- Utilización de conectores de refuerzo entre las capas de cubrición, con desarrollo radial y uniforme en todo el perímetro, y conectados diametralmente entre sí.
- Utilización de conectores de refuerzo entre las capas de cubrición, con desarrollo radial y uniforme en todo el perímetro, y conectados lateralmente entre sí.
- Utilización de conectores de refuerzo entre las capas de cubrición, con desarrollo radial y uniforme en todo el perímetro, y conectados diametral y lateralmente entre sí.
- Utilización de conectores de refuerzo entre las capas de cubrición, con desarrollo radial y uniforme en todo el perímetro, pero sin conexión aparente entre sí.

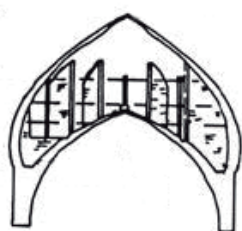


Fig. 3.490 Mezquita del Imam, Isfahán (M.Hejazi)

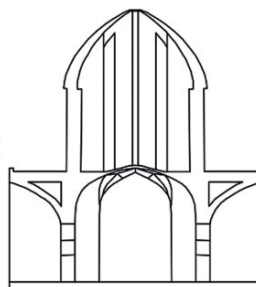
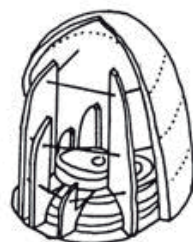


Fig. 3.491 Emamzadeh (M.Hejazi)

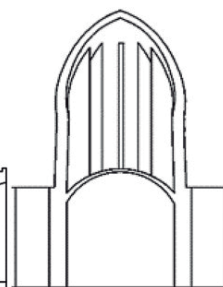


Fig. 3.492 Emamzadeh Hasan (M.Hejazi)

- e. Utilización de conectores de refuerzo entre las capas de cubrición, con desarrollo radial y desigual en todo el perímetro, y conectados diametralmente entre sí.
- f. Utilización de conectores de refuerzo entre las capas de cubrición, con desarrollo radial y desigual en todo el perímetro, y conectados lateralmente entre sí.
- g. Utilización de conectores de refuerzo entre las capas de cubrición, con desarrollo radial y desigual en todo el perímetro, y conectados diametral y lateralmente entre sí.
- h. Utilización de conectores de refuerzo entre las capas de cubrición, con desarrollo radial y desigual en todo el perímetro, pero sin conexión aparente entre sí.

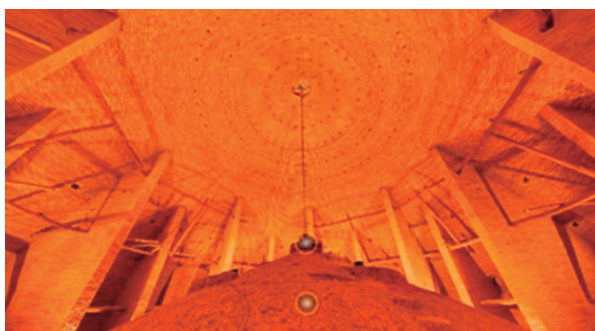


Fig. 3.493 Cúpula mezquita del Imam, Isfahan (A.F.Beigi)



Fig. 3.494 Iglesia de Belén (A.F.Beigi)

En el caso iraní, es posible realizar una subclasificación de los denominados khashkhashi, en función de la disposición y atado interno que presentan en el interior de las cúpulas dobles. Los subtipos identificados en este caso se pueden categorizar utilizando los siguientes códigos alfanuméricos propuestos:

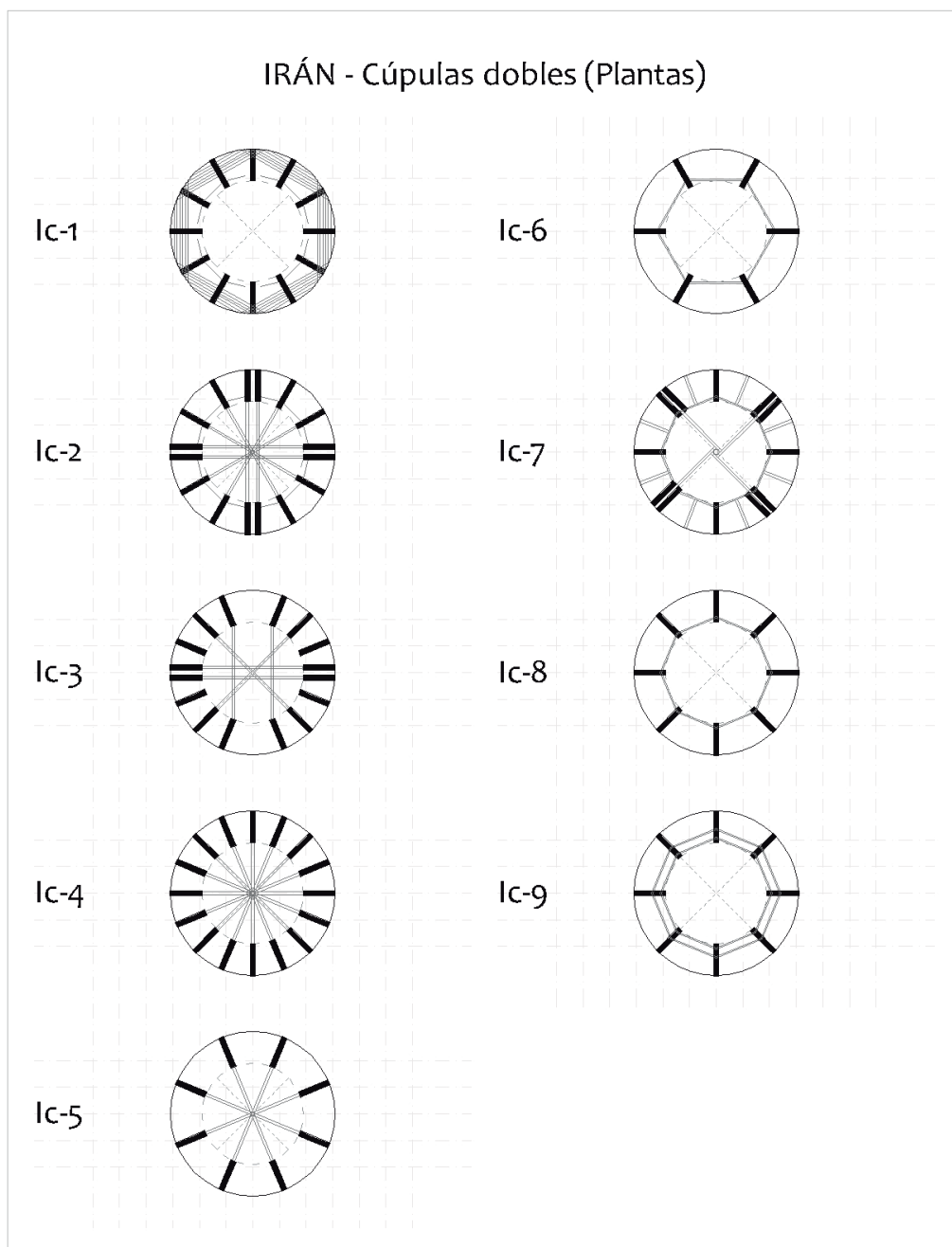


Fig. 3.495 Tipos estables Irán (Autor)

- Incorporación de tirantes

La utilización de tirantes se puede considerar uno de los sistemas de refuerzo más extendidos en toda la arquitectura histórica de fábrica, con reflejo en distintos apartados de la estructura tal y como ya se ha mencionado para el caso de muros y columnas. En el caso de las cubiertas, los tirantes incorporados en bóvedas, cúpulas y otros elementos de cubrición supusieron una de las medidas más efectivas de cara a reducir la vulnerabilidad de estas estructuras, gracias a su función de atado y arriostramiento interno.

Si atendemos a la disposición, material y función de estos elementos, se puede establecer la siguiente caracterización de los mismos:

- Empleo de tirantes de composición vegetal y disposición perimetral (bóvedas).
- Empleo de tirantes de composición vegetal y disposición interna, ya sea puntual o reiterada (bóvedas).
- Empleo de tirantes de composición vegetal y disposición radial (cúpulas).
- Empleo de tirantes de composición vegetal y disposición concéntrica (cúpulas).
- Empleo de tirantes de composición vegetal y disposición mixta.
- Empleo de tirantes de composición metálica y disposición perimetral (bóvedas).
- Empleo de tirantes de composición metálica y disposición interna, ya sea puntual o reiterada (bóvedas).
- Empleo de tirantes de composición metálica y disposición radial (cúpulas).
- Empleo de tirantes de composición metálica y disposición concéntrica (cúpulas).
- Empleo de tirantes de composición metálica y disposición mixta.



Fig. 3.496 Mezquita de Kusumba, en Naogaon (N.Huda)



Fig. 3.497 Bazar de Tabriz (Autor)



Fig. 3.498 Bazar de Isfahan (Autor)

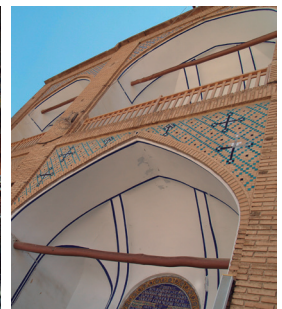


Fig. 3.499 Iglesia de Belén (Autor))

3.3.4.4 Sistemas de tipo "Elasticidad y ductilidad"

El último de los tipos establecidos está relacionado con aquellos sistemas implementados con el objetivo de mejorar la faceta elástica de los elementos de cubrición.

Gracias a la utilización de este tipo de soluciones se logra aportar cierta flexibilidad a determinadas bóvedas, cúpulas y otros elementos estructurales de la cubierta, donde la ductilidad de todo el conjunto puede llegar a evitar el colapso de estas estructuras tan vulnerables, a pesar de los violentos desplazamientos horizontales a los que se han enfrentado durante siglos las construcciones históricas más expuestas a la acción de los terremotos.

Los subtipos que engloba esta categoría recogen los principios planteados en los bloques anteriores, con un enfoque característico en el caso de las cubiertas y desarrollos constructivos que recuerdan a los señalados en otras facetas del edificio.

En este sentido, a continuación se abordan los sistemas incluidos en algunas de las construcciones históricas más vulnerables, compensando con ellos la excesiva rigidez que en determinados casos presentan las estructuras planteadas, donde una importante aceleración sísmica puede llegar a provocar graves daños en otros elementos portantes del esqueleto de fábrica.

Una de las estrategias transversales que encontramos también en los bloques anteriores es el ligado al tratamiento de la junta de mortero. La deformación selectiva de este elemento depende de varios factores como pueden ser la dimensión o materiales empleados, con desarrollos constructivos singulares en algunas de las edificaciones planteadas en territorios con alta presencia de seísmos.

En paralelo a este tipo de soluciones se puede apreciar la incorporación de distintos tipos de elementos de mayor ductilidad que las fábricas empleadas, favoreciendo situaciones de atado que flexibilizan las grandes cubriciones de los edificios más monumentales a través de distintas disposiciones, tamaños y materiales utilizados.

Por último, cabe destacar el papel que juega la composición material de los propios ladrillos o sillares que conforman estos elementos de cubrición, con unas características que pueden posibilitar cierto movimiento de las grandes estructuras de cubrición sin llegar a colapsar.

- Tratamiento singular de las juntas

Dentro de los sistemas que buscan proporcionar una elasticidad y ductilidad adicional, es conveniente señalar el importante papel que desempeñan las juntas de mortero como elemento de unión de las fábricas que constituyen las bóvedas, cúpulas y otros elementos de cubrición. El tratamiento de éstas y la deformación que pueden llegar a proporcionar al conjunto de la cubierta, favorece un comportamiento muy beneficioso en situaciones de sismo, donde las propiedades dúctiles de los materiales empleados en las cubriciones de los edificios proveen de cierta elasticidad y flexibilidad ante situaciones de sismo.

Atendiendo a la dimensión y configuración de las juntas, se pueden identificar las siguientes variantes con comportamiento beneficioso en las regiones de mayor sismicidad:

- Incremento del espesor de junta, con capas de mortero de espesor igual o mayor que la mitad del ancho de la fábrica empleada.
- Disposición de juntas triangulares entre fábricas trapezoidales.
- Utilización de morteros con composición material a base de toba o ceniza volcánica molida.
- Utilización de morteros con composición material a base de fragmentos cerámicos.
- Utilización de morteros con composición material a base de plomo.
- Utilización de morteros con composición material a base de cal.
- Utilización de morteros con composición material a base de barro.
- Utilización de morteros con composición material a base de fibras vegetales.
- Utilización de morteros con composición material a base de teja triturada.

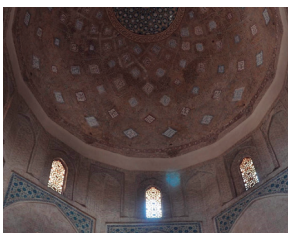


Fig. 3.500 Cúpula Mezzquita de Varamin (Autor)



Fig. 3.501 Mezzquita de Varamin (Autor)



Fig. 3.502 Mezzquita Jameh, Isfahan (Autor)



Fig. 3.503 Rayen (Autor)

- Incorporación de elementos puntuales de mayor ductilidad

La utilización de elementos de mayor ductilidad en el interior de las cubiertas responde a la preocupación de flexibilizar en la medida de lo posible las grandes estructuras de cubrición planteadas en muchas de las construcciones más vulnerables.

En función de la ubicación, disposición y tamaño de estos elementos, podemos establecer la siguiente taxonomía de los sistemas más empleados:

- a. Incorporación de elementos puntuales de mayor ductilidad y tamaño que las fábricas utilizadas en la cubierta, ubicados de manera homogénea en la totalidad de la estructura de cubrición.
- b. Incorporación de elementos puntuales de mayor ductilidad y tamaño que las fábricas utilizadas en la cubierta, ubicados de manera localizada en una determinada sección de la superficie de cubrición.
- c. Incorporación de elementos puntuales de mayor ductilidad y tamaño que las fábricas utilizadas en la cubierta, ubicados en las esquinas y arranques de la estructura de cubrición.
- d. Incorporación de elementos puntuales de mayor ductilidad que las fábricas utilizadas en la cubierta, ubicados de manera homogénea en la totalidad de la estructura de cubrición.
- e. Incorporación de elementos puntuales de mayor ductilidad que las fábricas utilizadas en la cubierta, ubicados de manera localizada en una determinada sección de la superficie de cubrición.
- f. Incorporación de elementos puntuales de mayor ductilidad que las fábricas utilizadas en la cubierta, ubicados en las esquinas y arranques de la estructura de cubrición.



Fig. 3.504 Mezquita de Hakim, Isfahan (Autor)

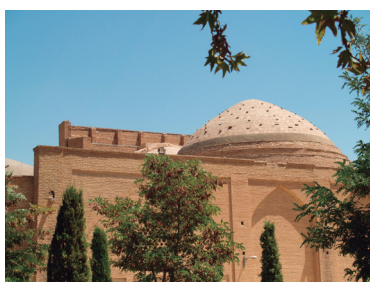


Fig. 3.505 Mezquita Hakim, Isfahan (Autor)

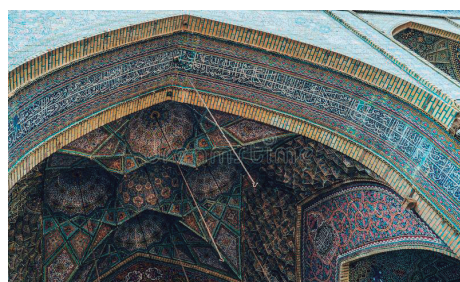


Fig. 3.506 Mezquita Nasir Al Mulk (Autor)

- Integración de elementos lineales de mayor ductilidad

De cara a un tratamiento más amplio de determinadas zonas o elementos que conforman algunas de las cubiertas más expuestas a la acción de los terremotos, se recurrió a piezas lineales de mayor ductilidad que las empleadas en las estructuras de cubrición, con un desarrollo más o menos lineal según el caso y una ubicación que puede variar en función de la configuración general de la estructura.

La variedad de formatos y tamaños de este tipo de elementos queda patente en todo tipo de marcos y travesaños de origen vegetal, ya sean de madera, caña o fibras, dispuestos tanto en arranque de bóvedas y cúpulas como en la propia superficie de cubrición. En este sentido se pueden distinguir las siguientes soluciones constructivas con función estabilizadora:

- a. Integración de piezas lineales de mayor ductilidad que las fábricas empleadas en la cubierta, y dispuestas en varias hiladas consecutivas de la superficie de cubrición.
- b. Integración de piezas lineales de mayor ductilidad que las fábricas empleadas en la cubierta, y dispuestas en hiladas alternas o separadas.
- c. Integración de piezas lineales de mayor ductilidad que las fábricas empleadas en la cubierta, y dispuestas en una única hilada puntual de la superficie de cubrición.
- d. Integración de piezas lineales de mayor ductilidad que las fábricas empleadas en la cubierta, y dispuestas en las esquinas o arranques del elemento de cubrición.
- e. Integración de piezas lineales de mayor ductilidad que las fábricas empleadas en la cubierta, y dispuestas en los refuerzos y conectores de la estructura de cubrición.



Fig. 3.507 Chahar Bagh, Isfahan (N.Valibeig)



Fig. 3.508 Clavos de cubierta (Autor)

- Composición material de mayor ductilidad del propio ladrillo o sillar

Algunas de las fábricas que se utilizaron en las construcciones ubicadas en zonas de gran actividad telúrica recurrieron al desarrollo singular de sus sillares y ladrillos, con unas propiedades dúctiles que conformaron cubiertas de mayor flexibilidad que las empleadas en otras regiones menos expuestas al sismo.

Esta composición material de mayor ductilidad del propio ladrillo o sillar fue explorada por distintas culturas con el paso de los siglos, incorporando en el caso de las fábricas de ladrillo aditivos y áridos de distinto origen y naturaleza.

En el caso de las fábricas pétreas, esta flexibilidad interna viene proporcionada por sillares de mayor composición porosa, permitiendo así cierto grado de movimiento a nivel de cubierta. A este respecto, algunos de los recursos utilizados por los constructores de la antigüedad con el fin de flexibilizar bóvedas, cúpulas y otros elementos de cubrición son los siguientes:

- a. Empleo de sillares completos de naturaleza ígnea.
- b. Empleo de fábricas compuestas de toba volcánica.
- c. Empleo de fábricas compuestas de fibras vegetales.
- d. Empleo de fábricas compuestas de fragmentos cerámicos.
- e. Empleo de fábricas compuestas de fragmentos óseos.
- f. Empleo de fábricas compuestas de dos o más materiales distintos de mayores propiedades dúctiles que las fábricas utilizadas en el elemento vertical principal.

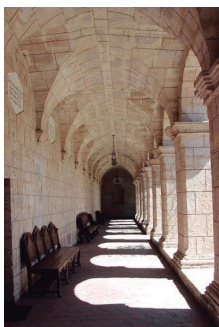


Fig. 3,509 Sta. Teresa, Arequipa (Autor)

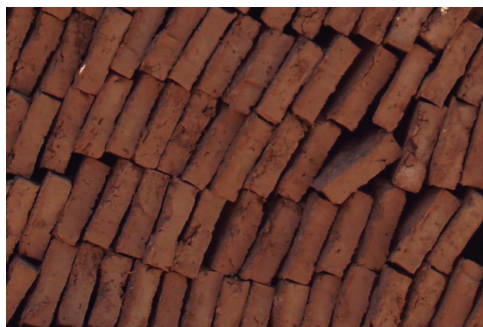


Fig. 3,510 Fábricas de Rayen (Autor)



Fig. 3,511 Sillar de Arequipa (Autor)

Como conclusión del presente apartado se recopilan a continuación los sistemas sismorresistentes identificados en este bloque, incluyendo la estructuración de los subtipos mencionados en función de cuatro grandes tipos de sistemas relacionados con su desempeño estructural y sismorresistente.

Al igual que en apartados anteriores, se resumen a continuación el número de variantes encontradas en este último grupo dedicado a los sistemas ubicados en las diferentes soluciones de cubrición, y que serán tomados como referencia, igual que en los otros tres grandes grupos, en las fichas de cada una de las construcciones recogidas en los anexos ("5.4 Fichas de las muestras seleccionadas"):

GRUPOS	TIPOS	SUBTIPOS	Nº variantes identificadas en cada subtipo
D - Cubiertas (bóvedas, cúpulas y otros elem. cubrición)	01 Aislamiento sísmico	01 Sistemas de deslizamiento en su encuentro con la estructura muraria	6 (a-f)
		02 Arranque de cubiertas mediante materiales de mayor resistencia	5 (a-e)
	02 Aligeramiento	03 Reducción de esbeltez y altura del centro de gravedad	4 (a-d)
		04 Rellenos aligerantes dentro de las cubiertas	4 (a-d)
		05 Utilización de sillares o ladrillos de composición material más ligera	4 (a-d)
		06 Distribución gradual de los materiales según su peso	4 (a-d)
		07 Reducción de decoración no estructural	6 (a-f)
		08 Vaciado interior y disminución de los espesores de cubrición	7 (a-g)
	03 Atado y unión de elementos	09 Refuerzos y armados integrados en las propias cubiertas	8 (a-h)
		10 Arriostramiento interno mediante arcos, costillas y nervios	8 (a-h)
		11 Arriostramiento de las bóvedas y cúpulas y sus arranques	6 (a-f)
		12 Traba y maclado de las fábricas	6 (a-f)
		13 Conectores entre sillares y ladrillos	6 (a-f)
		14 Disposición de capas dobles o triples de cubrición	7 (a-g)
		15 Núcleo central rigidizador entre las distintas capas de cubrición	6 (a-f)
		16 Conectores de refuerzo y arriostramiento entre distintas capas	8 (a-h)
		17 Incorporación de tirantes	10 (a-j)
	04 Elasticidad y ductilidad	18 Tratamiento singular de las juntas	9 (a-i)
		19 Incorporación de elementos puntuales de mayor ductilidad	6 (a-f)
		20 Integración de elementos lineales de mayor ductilidad	5 (a-e)
		21 Composición material de mayor ductilidad del propio ladrillo o sillar	6 (a-f)

