

TÉCNICAS DE ESTABILIZACIÓN SÍSMORRESISTENTE PARA MEJORAR EL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE EDIFICIOS HISTÓRICOS DE TIERRA

Tim LG Michiels¹, Carina Fonseca Ferreira²

¹The Getty Conservation Institute, Los Angeles, USA, tmichiels@getty.edu

²University College London, London, United Kingdom, c.ferreira.12@ucl.ac.uk

Palabras claves: técnicas de estabilización sismorresistentes, arquitectura de tierra, conservación, sismos

Resumen

En los últimos veinte años, una serie de investigaciones han contribuido a profundizar el conocimiento acerca del comportamiento y subsecuente estabilización de los edificios de tierra durante un sismo. Esta ponencia tiene como objetivo el presentar las técnicas existentes para la estabilización sismorresistente de edificios históricos de tierra. Se analizan tanto las técnicas tradicionales utilizadas durante siglos, así como los métodos desarrollados más recientemente. Esta investigación es parte del *Earthen Architecture Initiative – Seismic Retrofitting Project in Peru*, un proyecto de colaboración entre el Getty Conservation Institute, la University College London, la Pontificia Universidad Católica del Perú y el Ministerio de Cultura del Perú.

Desde el punto de vista estructural, las técnicas de estabilización son evaluadas según cómo mejoran el comportamiento estructural de una edificación histórica de tierra. De igual manera se estudia el impacto de dichas técnicas en el material histórico de estas edificaciones. Las técnicas aquí estudiadas no se limitan a una región geográfica específica, y se concentran en las intervenciones orientadas al aumento de la estabilidad de las estructuras en general, ya que el consenso académico sostiene que éstas son las más aplicables para los edificios de tierra.

Las técnicas tradicionales investigadas van desde la adición de contrafuertes y vigas collares, a los mecanismos utilizados para mejorar la unión estructural entre los muros. También se consideran variantes de estas técnicas, empleando materiales no tradicionales y a veces no compatibles, como hormigón, acero o polímeros. Se estudian también otras técnicas desarrolladas más recientemente, tales como el uso de mallas y correas hechas de bambú, acero, nailon o materiales menos conocidos como neumáticos reciclados. Mientras que la mayoría de las técnicas de reforzamiento aquí mencionadas tiene como objetivo principal el mejorar la estabilidad general del edificio, este documento aborda también las técnicas desarrolladas para mejorar las características de resistencia de la mampostería de adobe mediante, por ejemplo, la inyección de lechadas a base de tierra. La forma en que estas técnicas son implementadas es también revisada; dado que en algunos casos, a pesar de contar con técnicas efectivas su aplicación tiene un impacto negativo en la preservación del material original.

La diversidad de técnicas de construcción de tierra, bien como de las tipologías de los edificios, entre otros aspectos, impide definir una única solución para toda estructura. Sin embargo la presente ponencia puede ser un instrumento útil para profesionales durante el proceso de toma de decisiones para la conservación de edificaciones históricas de tierra.

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Proyecto y contexto

Durante casi dos décadas, el Getty Conservation Institute (GCI) ha desarrollado metodologías para la conservación del patrimonio de tierra en California y otras regiones alrededor del mundo. Durante la década de los 90 el *Getty Seismic Adobe Project* (GSAP por sus siglas en inglés), desarrolló una serie de técnicas para mejorar el comportamiento sísmico de estructuras históricas de adobe mediante un programa exhaustivo de investigaciones y pruebas de laboratorio cuyos resultados se difundieron en una serie de publicaciones (Tolles, 1996; Tolles et al, 2000; Tolles; Kimbro; Ginell, 2002). Durante un coloquio de expertos internacionales en el 2006, los participantes concluyeron que la

metodología GSAP era fiable y eficaz. Sin embargo, la dependencia del uso materiales de alta tecnología y de experiencia profesional para la implementación de las técnicas desarrolladas era un impedimento para el uso de las mismas en otros contextos (Hardy, Cancino, Ostergren, 2009).

Para resolver este dilema, el GCI, la *University College London*, la Pontificia Universidad Católica del Perú y el Ministerio de Cultura del Perú se unieron para desarrollar el Proyecto de Estabilización Sismorresistente o *Seismic Retrofitting Project* (SRP por sus siglas en inglés). El proyecto tiene como objetivo diseñar y ensayar técnicas tradicionales y modernas de estabilización sismorresistente, a través de modelos numéricos, así como pruebas estáticas y dinámicas de elementos estructurales específicos. También intenta proporcionar guías para los responsables de la implementación de dichas técnicas. Cuatro edificios de tierra de importancia histórica en el Perú, representativos de las tipologías constructivas en la región, han sido seleccionados para un profundo estudio estructural. El proyecto ha completado las evaluaciones constructivas iniciales de estas edificaciones prototipo. La simulación numérica utilizando análisis de elementos finitos y el programa de pruebas se encuentran actualmente en una fase bastante avanzada.

El siguiente paso del SRP es el diseño de soluciones de estabilización efectivas, e idealmente con tecnología simple, que sustancialmente preserven la autenticidad de las edificaciones históricas de tierra y que puedan ser aplicadas en países donde equipo, materiales y conocimientos técnicos avanzados no están a disposición de los que están al cuidado de dichas edificaciones. Es en el contexto de esta etapa que la presente ponencia ofrece un resumen y análisis de las técnicas disponibles.

1.2 Filosofía de intervención

Cuando el patrimonio sufre daños graves, por ejemplo, a causa de fenómenos naturales extremos como los terremotos; una intervención estructural es, generalmente, necesaria. Cualquier intervención en una edificación con valor histórico debe tener en cuenta las siguientes consideraciones: i) la seguridad de los usuarios, ii) la generación de daños a futuro, iii) el significado cultural y los valores de la edificación, iv) el uso previsto de la misma, v) la durabilidad esperada de la intervención, y vi) el contexto económico en la que se diseña e implementa.

Los profesionales que se dedican al estudio de edificaciones patrimoniales necesitan contar con conocimientos tanto ingenieriles como de construcciones tradicionales, así como una clara metodología que refleje dichos conocimientos para la realización de una adecuada evaluación de la seguridad de las estructuras patrimoniales (D'Ayala; Forsyth, 2007). El conocimiento de métodos constructivos tradicionales es la base de un análisis histórico y cualitativo de la estructura, según la definición de los principios de ISCARSAH ICOMOS (2003). Sin este último, todo entendimiento posterior de la estructura, utilizando métodos más sofisticados, es insuficiente.

La Carta de Burra publicada en 1979 (ICOMOS, 2004a) define la importancia cultural de los edificios patrimoniales según el valor estético, histórico, científico, social o espiritual para generaciones pasadas, presentes o futuras. Una conservación responsable debe valorar el sistema estructural, que a menudo no es visible y por ende descartado (Hume, 2007). Por otro lado, códigos modernos (por ejemplo, E.030, 2003 y EN 1998-3, 2005) utilizan apenas factores de importancia relacionados solamente al uso previsto de una estructura patrimonial, y no consideran su significado cultural. Tener en cuenta solo el uso a futuro lleva a requisitos de control de daños más exigentes que implican intervenciones más intrusivas. Por ello, considerar el significado cultural es crucial para preservar la autenticidad de la edificación.

A través del tiempo los valores de conservación han variado mucho. Sin embargo, los principios de conservación difundidos por la Carta de Venecia emitida en 1964 (ICOMOS, 2004b) siguen siendo aceptados universalmente. Los principios de autenticidad, mínima intervención, reparaciones con material histórico o equivalente (que desde ahora llamaremos similar¹), compatibilidad, re-intervención y durabilidad están actualmente bien

establecidos y aplicados ampliamente. Su aplicación en cada caso, sin embargo, puede variar dependiendo de las expectativas y percepciones de los propietarios, ciudadanos y autoridades, contexto económico y el significado cultural percibido de la estructura a preservar.

Teniendo en cuenta el artículo 10 de la Carta de Venecia: *Cuando las técnicas tradicionales se muestran inadecuadas, la consolidación de un monumento puede ser asegurada valiéndose de todas las técnicas modernas de conservación y de construcción cuya eficacia haya sido demostrada con bases científicas y garantizada por experiencia*; es claro que la primera actividad debe ser el considerar técnicas de estabilización tradicionales porque las mismas, implican una intervención económica, compatible y en algunos casos, utilizando el material original. Si estas técnicas no son suficientes, se pueden utilizar otras, mientras que su funcionalidad haya sido comprobada previamente. Finalmente, como acentuado por D'Ayala y Forsyth (2007), el parámetro del tiempo es también un factor importante que afecta todos los aspectos al decidir por una técnica de estabilización sismoresistente. Al decidir qué técnica utilizar, se debe tener en cuenta el tiempo de vida estimado de la estructura, el tiempo considerado hasta la evaluación siguiente, la durabilidad asumida de la intervención y el riesgo asociado a la ocurrencia de desastres naturales.

Es posible formular la filosofía de intervención estableciendo un equilibrio entre las consideraciones mencionadas anteriormente. Por ejemplo, según Tolles et al (2002), el primer objetivo de las medidas de estabilización sismorresistente es reducir al mínimo la posibilidad de pérdida de vidas humanas y una vez logrado esto, los principios de conservación de mínima intervención y reversibilidad deben ser satisfechos. Además, los mismos autores sugieren que sólo cuando se han cumplido todos estos criterios, se deben implementar medidas para limitar el daño a un nivel reparable durante los terremotos más severos y para reducir la cantidad de daño superficial durante sismos moderados; reconociendo que el orden de estos dos objetivos puede variar. Por otro lado, el NRC-CNRC (1995) sugiere que una intervención estructural mínima puede ser considerada solo cuando los requisitos para asegurar la vida de los usuarios y el control de daños se hayan cumplido. Estos dos enfoques por ejemplo dan un diferente nivel de prioridad al control de daños.

1.3 Resistencia versus estabilidad

El proyecto del GSAP distingue dos tipos de conceptos de diseño de estabilización sismorresistente: a base de resistencia y a base de estabilidad (Tolles; Kimbro; Ginell, 2002). Al considerar estos dos conceptos, es importante diferenciar los diferentes tipos de muros portantes en el que pueden ser aplicables: el GSAP categoriza los muros portantes de adobe según su esbeltez o relación altura-espesor (AE). Los muros portantes son así clasificados como gruesos ($AE < 6$), moderados ($AE = 6-8$) y delgados ($AE > 8$). Los muros portantes delgados pueden volverse inestables inmediatamente después de la presencia de grietas o fisuras. Un edificio con muros portantes de adobe gruesos, sin embargo, aún está lejos de perder su estabilidad cuando las primeras grietas ocurren. El diseño basado en la incrementación de la fuerza, recurre a las propiedades elásticas del material y puede pronosticar con precisión cuando las grietas se producen. Más importante que el momento cuando se forman las grietas o fisuras es, sin embargo, la ductilidad estructural de un edificio; es decir, su disposición para mantener su capacidad de carga y deformarse de manera segura después de que el límite elástico del material ha sido excedido. Los muros gruesos de adobe pueden exhibir significativa ductilidad estructural, a pesar de que el material en sí mismo es considerado frágil. Por ello, el segundo enfoque, el diseño basado en la incrementación de la estabilidad, resulta más útil. Emplea las características del comportamiento postelástico de adobe, teniendo en cuenta que los muros portantes de adobe gruesos no son inestables después de la fisuración o agrietamiento de los mismos. Las medidas de estabilización sismorresistente –en lugar de reforzamiento– pueden mejorar enormemente la estabilidad en general y reducen la cantidad de daño al limitar grandes desplazamientos. Los atributos importantes del diseño basado en la incrementación de la estabilidad son que (i) permite el movimiento fuera de plano, (ii) limita movimientos fuera de plano en la parte superior de los muros, (iii) proporciona conexiones flexibles entre muros

perpendiculares y (iv) proporciona conexiones que limitan el desplazamiento relativo y permanente de los bloques agrietados adyacentes (Tolles; Kimbro; Ginell 2002).

2 TÉCNICAS BASADAS EN LA INCREMENTACIÓN DE LA ESTABILIDAD

2.1 Técnicas para obtener estabilidad general

Estas son técnicas cuyo objetivo es estabilizar el edificio en su conjunto. Generalmente consisten en la implementación de elementos continuos conectados alrededor del edificio que hacen que todos los componentes del mismo trabajen en conjunto.

La introducción de una **viga collar** es considerada a menudo como una de las técnicas más importante y eficaz para estabilizar las edificaciones de tierra. Una viga continua es colocada en la parte superior de los muros portantes para evitar su volteo, el cual es uno de los principales modos de falla en muros portantes de adobe delgados. Inhibiendo el volteo y aumentando la resistencia a cargas horizontales, las vigas collares proporcionan resistencia y rigidez ante el movimiento fuera de plano. Adicionalmente, establecen continuidad dentro del plano como elemento continuo a lo largo de los muros portantes (Tolles; Kimbro; Ginell 2002).

Hay dos tipos de vigas collares: vigas collares de madera y de hormigón. La **viga collar de madera** es utilizada tradicionalmente. Una placa de madera relativamente delgada en la parte superior del muro puede ser más que suficiente. Es crucial que la placa vaya alrededor del edificio y que las vigas en los muros perpendiculares estén bien conectadas en las esquinas (figura 1). Los muros portantes de adobe medios y gruesos, típicos en edificios históricos de adobe, son más estables al movimiento fuera de plano y en consecuencia pueden ser estabilizados simplemente incrementando un poco su rigidez horizontal, lo que permite una intervención menos invasiva. Como las vigas collares de madera son flexibles, no afectan significativamente el comportamiento elástico de la estructura de adobe y la fisuración ocurre de manera similar a una estructura no reforzada. Esta técnica contribuye principalmente al comportamiento postelástico del edificio. La conexión de la viga a la pared es importante y puede lograrse de varias maneras como con conexiones tipo caja y espiga, correas de acero o pernos centrales.

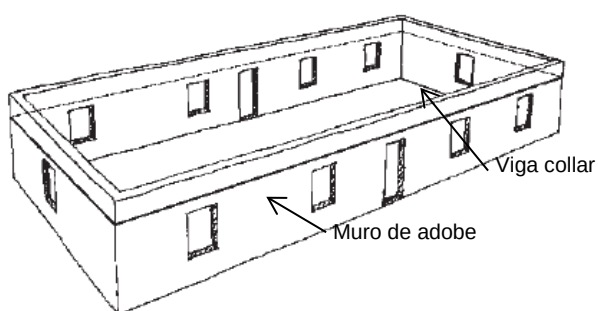


Figura 1 – Izquierda: Esquema de viga collar (Tolles; Kimbro; Ginell 2002). Derecha: Implementación en Las Flores Adobe National Historic Landmark en California (Barrow et al, 2006)

La integración de vigas collares de madera es una práctica común en la rehabilitación de edificios históricos construidos en tierra. La madera es un material compatible con la tierra gracias a sus características físicas como su permeabilidad. Obtener madera es relativamente fácil, incluso en zonas rurales y el costo de la misma es bajo. Además esta intervención cumple con los requisitos de re-intervención. Sin embargo, es importante mencionar que medidas adecuadas para mantener la madera seca son necesarias para reducir el posible deterioro de la misma. Otra consideración importante es que la instalación de una viga collar puede implicar del remover la cubierta original y con ello causar la pérdida de material histórico en la edificación.

Una **viga collar de hormigón armado** es una alternativa que ha sido utilizada en muchos proyectos de estabilización sismorresistente en California y en otras ciudades como Cusco,

Perú, durante los años setenta y ochenta (Samanez Argumedo, 1983; Earthen Building Technologies, 1995; Webster, 2006). Aunque la introducción de una viga de hormigón armado tiene efectos de estabilización similares a los de las vigas de madera, la diferencia principal es que una viga de hormigón es mucho más rígida. Una viga muy rígida causa daños a los muros portantes de adobe debido al golpeo vertical de la misma contra el adobe durante un terremoto y, en particular, a los muros en plano porque reciben carga adicional de los muros fuera de plano². Tolles, Kimbro y Ginell (2002) enfatizan que, a pesar de que los movimientos fuera de plano pueden fácilmente hacer que el muro portante de adobe se balancee hasta 0,15 m sin voltearse, un desplazamiento de 0,0125 m a 0,025 m en plano puede producir daños bastante considerables. Es más, las diferencias de rigidez entre la mampostería de adobe y la viga de hormigón armado pueden causar que la conexión entre la viga y la mampostería falle durante sismos moderados. Finalmente y sobre la base de evidencia pasada sobre la efectividad de técnicas de reforzamiento, una viga de hormigón armado es una intervención no aconsejada (D'Ayala; Benzoni, 2012) dado que: 1) requiere la extracción de una cantidad significativa del techo original, 2) es raramente reversible, ya que la fijación a las paredes debe ser muy rígida (Tolles; Kimbro; Ginell 2002); 3) no es compatible con el adobe dada la rigidez excesiva del hormigón armado; y 4) es ineficaz, especialmente a largo plazo por que se pierde la conexión entre el adobe y el hormigón.

El objetivo de un **diafragma tradicional** es la transferencia de cargas de la cubierta y muros fuera de plano a los muros en plano (figura 2). Esta es una técnica de estabilización sismorresistente típica para mampostería no reforzada de ladrillo. La mampostería de ladrillo tiene mucho más resistencia en el plano, y por lo tanto las cargas del techo pueden ser dirigidas hacia dichos muros y transmitidas hacia la base de los mismos. Esto se logra mediante la instalación de un sistema de transferencia de carga, generalmente hecho de madera o de acero. Techos o entrepisos diseñados específicamente con este objetivo, son ejemplos de esta técnica.

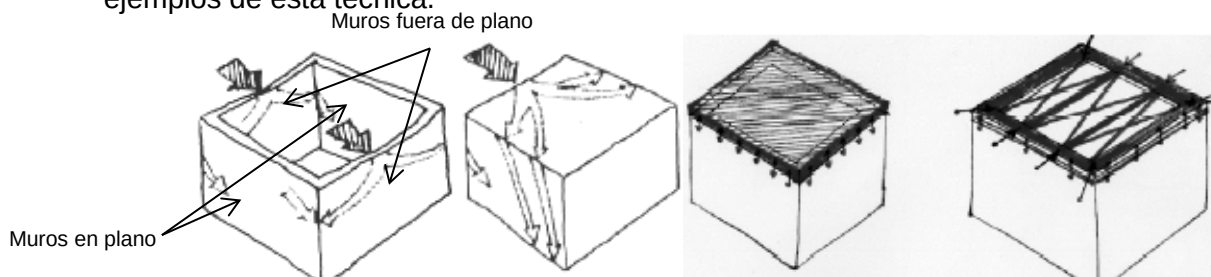


Figura 2 – Funcionalidad de los diafragmas tradicionales (Miltiadou-Fezans, 2011)

Los diafragmas no son aconsejables en edificios con muros de adobe gruesos. Como se mencionó anteriormente, las paredes gruesas tienen suficiente estabilidad fuera de plano, dado que la misma está directamente relacionada con la proporción de altura-espesor del muro. Un diafragma rígido puede generar una sobrecarga en los muros en plano debido a las fuerzas transferidas por los muros fuera del plano. Esta sobrecarga podría dañar gravemente los muros en plano. Sin embargo, para un edificio con muros delgados de adobe, un diafragma podría ser útil. Es importante mencionar que el cálculo de la distribución de cargas entre las paredes fuera de plano y en plano es la parte más delicada del diseño. En resumen, es importante que la rigidez del diafragma sea bien analizada y suficientemente baja para que limite las cargas transferidas de los muros fuera de plano a los muros en plano.

Un diafragma de madera contraplacada es una **variante parcial y flexible de los diafragmas rígidos** tradicionales. Un diafragma de 1,20 m de ancho de madera contraplacada es clavado encima de las viguetas. Elementos de amarre similar a los utilizados en el diseño de un diafragma rígido estándar son necesarios. La ventaja de tener un diafragma flexible y parcial como el de madera contraplacada es su limitada rigidez, ya que evita la transferencia de carga excesiva a los muros fuera de plano que pueden fallar en corte. Los elementos de amarre (vigas collares, por ejemplo) ofrecen una continuidad a lo largo del muro y actúan como portadores de cargas en los extremos del diafragma parcial y

flexible de madera contraplacada. Esta intervención sólo requiere una conexión en la parte superior del muro o al nivel del suelo y puede ser fácilmente integrada al techo o piso de la edificación. El material de la intervención armoniza con el contexto y gracias a su posición, el deterioro del mismo no es muy factible, haciendo que la intervención sea duradera.

Otra técnica investigada durante el proyecto GSAP consiste en enlazar las partes superiores de los muros con **cables horizontales de acero**. Se colocan en una ranura alrededor del edificio y se pueden ajustar ligeramente para pretensar los muros. Una ventaja importante de esta técnica es que solo se pierde una pequeña parte del revestimiento histórico y la extracción del techo no es necesaria durante su instalación. Conectando los muros entre ellos, las varillas inhiben el volteo y aumentan así la resistencia a las cargas horizontales. Estableciendo una zona continua horizontal que trabaja en conjunto se obtiene también una continuidad en plano considerable. Como las varillas añaden muy poca rigidez adicional a la estructura, se pueden combinar con un diafragma de parcial y de baja rigidez, como por ejemplo el techo de madera contraplacada descrito anteriormente. Esto puede ser una intervención sutil y económica, aplicable debajo del revestimiento exterior, y por eso, mínimamente invasiva si los muros no contienen pinturas murales valiosas. Gracias a que las propiedades del acero son rigurosamente conocidas, se pueden resolver fácilmente problemas comunes como la corrosión y el desgaste. Se podría argumentar, sin embargo, que la introducción del acero en un edificio de tierra y madera no es recomendable porque podría causar la pérdida de su autenticidad. *Las Flores Adobe National Historic Landmark* en el sur de California sirve como un ejemplo de la aplicación de esta técnica (Barrow et al, 2009).

La aplicación de un sistema más elaborado de **correas de acero o nylon** ha sido analizada durante el proyecto GSAP. Es una combinación de correas horizontales y verticales alrededor de los muros portantes. Pretensar las correas no es necesario, pero se debe ajustar para eliminar el deslizamiento del sistema. Deben ser conectadas al techo, el piso o a la cimentación de la edificación para establecer continuidad. Las correas horizontales se pueden colocar en los muros exteriores y son necesarias en la zona superior e inferior de los mismos. En la zona superior tienen un efecto similar al de las varillas de acero horizontales descritas anteriormente. En la sección inferior de los muros evitan que el muro falle fuera de plano en esa sección. Las correas horizontales en la zona inferior de los muros requieren una conexión especial en las esquinas, por ejemplo con recurso a varillas centrales descritas más adelante.

Las correas verticales pueden ser muy eficaces para estabilizar muros delgados porque pueden aumentar la estabilidad fuera de plano del mismo. Las correas verticales deben ser conectadas tanto a la superficie interior como a la superficie exterior del muro y deben ser combinadas con elementos horizontales en la zona alta y baja del muro, tales como barras de acero o cables horizontales (Figura 3).

Las correas horizontales resisten a grandes cargas ofreciendo una mayor rigidez a los muros. Además, pueden ser utilizadas sobre una longitud de muro más larga que la utilizada por las correas verticales. Por otro lado, se pueden construir con nylon ya que así se adaptan a curvaturas de radio pequeño, y por lo tanto ofrecen una mayor flexibilidad de implementación.

Los muros gruesos de adobe pueden ser estabilizados fácilmente con una cantidad limitada de correas, que facilite luego la reversibilidad de la intervención. Sin embargo, agujeros deben ser perforados a través de las paredes y los revestimientos tienen que ser reemplazados, lo que lleva a una pérdida del material original. El coste de esta intervención es relativamente alto y la disponibilidad de material en regiones remotas puede ser un impedimento para su implementación.

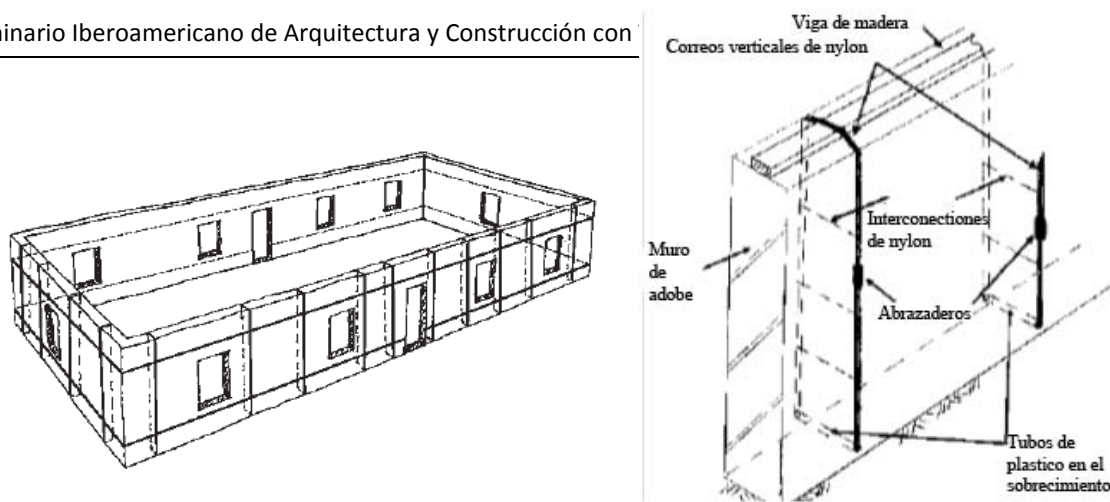


Figura 3 - Izquierda: Esquema de correas. Derecha: detalle de correa vertical combinada con viga collar. (Tolles; Kimbro; Ginell 2002)

Las **varillas centrales** son una alternativa a las correas verticales. Son utilizadas como elementos para prevenir el volteo de muros fuera de plano. Estas varillas son colocadas en orificios sujetos con la inyección de una resina epóxica, poliéster, o lechadas de cemento. Las varillas lechadas se conectan bien con la mampostería de adobe porque, cuando implementadas apropiadamente, el material de la lechada se adhiere adecuadamente al adobe. El uso de estos elementos verticales puede aumentar la ductilidad de los muros y es especialmente útil para muros delgados. En los muros más gruesos de adobe las varillas centrales suelen contribuir más a la resistencia de corte en lugar de aumentar la flexión de los mismos. El diámetro de estas varillas puede variar de 0,012 m a 0,025 m. Es importante de utilizar varillas de diámetro pequeño y agujeros de menos de 0,05 m. porque varillas más grandes pueden actuar como elementos rígidos y dañar el muro de adobe. La instalación de las varillas en el núcleo central no afecta los aspectos visuales del edificio, pero es una intervención poco reversible y difícil de monitorear. Sin embargo, si las varillas son lo suficientemente delgadas, la combinación de varillas de acero adheridas al muro con lechadas o productos epóxicos es una solución duradera, ya que la lechada de cemento o epóxico protege las varillas contra la corrosión. Aunque esta técnica es cara, una amplia investigación sobre su aplicación se encuentra disponible (Tolles; Kimbro; Ginell, 2002). Podría ser interesante, sin embargo, el utilizar materiales tradicionales, más económicos y accesibles como caña, madera y lechadas de tierra, pero esta técnica con materiales tradicionales necesita aun mayor investigación.

Otra técnica que ha sido investigada, es la aplicación de diferentes tipos de **mallas**. Se pueden aplicar mallas de diferentes materiales en el exterior, al interior o en ambos lados de los muros de la edificación que requieren ser sísmicamente estabilizados. Se puede cubrir todo el muro, pero la aplicación en varias tiras es también posible (Torrealva et al, 2009) sugieren que mínimo 50% de la superficie del muro debe ser cubierta con la malla para que la técnica sea efectiva. Se puede aplicar la malla en tiras de aproximadamente 0,45 m. de ancho, simulando vigas y columnas con este material (Torrealva; Vargas Neumann; Blondet, 2006). El objetivo es crear una malla como una matriz adherida a la edificación proporcionando restricción al movimiento fuera de plano y evitar el volteo de secciones de muros. Como la malla crea zonas reforzadas continuas, proporciona también continuidad en plano. La malla se fija a la pared con clavos o tapas de gaseosas (o refrescos) y es más eficaz cuando las mallas interior y exterior están conectadas transversalmente a través de la pared. Cubriendo la pared con un revestimiento aumenta la resistencia al corte inicial y la rigidez del muro. Si la malla no está cubierta, la técnica trabaja solamente cuando la pared ya está agrietada, limitando el desplazamiento de los bloques generados por estas grietas. Aplicar un revestimiento compatible es de vital importancia; por ello y por razones de compatibilidad, un revestimiento de tierra es recomendable. Los revestimientos de cal son también aceptables, ya que son también permeables. Por el contrario, se deben evitar revestimientos de cemento en cualquier caso porque pueden ocasionar daño a la pared de adobe dado su poca permeabilidad.

La malla puede ser de diferentes materiales. Se han realizado investigaciones que emplean mallas de acero soldado, mallas de polímero o la combinación de bajo costo de bambú con alambre de acero soldado (Torrealva, 2008; Dowling, 2006; Dowling, 2004). Las mallas de polímeros han sido investigadas a fondo en el Perú y han sido aplicadas, por ejemplo, en la Iglesia de San Pedro de Esquiña en Chile. Estas parecen tener gran potencial debido a su gran durabilidad y compatibilidad con la tierra (Torrealva, 2008; Torrealva; Neumann; Blondet, 2006; Heinsen et al, 2012). En términos generales, la aplicación de malla es una solución que no cambia el sistema estructural original, ni afecta a la disposición general o a la percepción del edificio. Tienen que remover y luego volver a aplicar el revestimiento, lo que puede ser problemático cuando se cuenta con pinturas murales de valor histórico. La disponibilidad de los materiales y su costo dependen de los materiales elegidos para la malla.

Otra técnica de estabilización sismoresistente basada en la estabilidad del edificio es la aplicación de una malla de **correas de goma (o neumáticos)** alrededor del edificio. Estas correas poseen una gran ductilidad que permite que el adobe reforzado se someta a grandes desplazamientos horizontales sin colapsar (Charleson, 2009). Sin embargo, estas correas son tan flexibles que no reducen los daños ni siquiera durante sismos de baja o moderada intensidad, causando daños irreparables a la estructura. Si se utiliza esta técnica los edificios tendrían que ser reconstruidos completamente después de un terremoto, lo que es inaceptable desde el punto de vista de la conservación del patrimonio.

Yamin et al (2004) presentan una investigación que promueve el uso de **elementos de contorno de madera**. Placas de madera con una sección de 0,15 m por 0,20 m. se colocan interna y externamente sobre los muros y son interconectadas con pernos que atraviesan los mismos. Los orificios para los pernos se rellenan con mortero de cemento. Los elementos horizontales están conectados con placas de acero en las esquinas. Las placas son clavadas a los muros cada 0,15 cm para crear superficies rugosas. El esqueleto de madera totalmente nuevo incrementa significativamente la rigidez y resistencia de los muros, limitan el movimiento y el volteo fuera de plano y proporcionan continuidad en el plano, mientras que las placas de acero son una buena conexión entre los muros. Sin embargo, la técnica no es tan adecuada para edificios históricos, ya que no sólo afecta gravemente los revestimientos sino que además se perfora y daña la base de sustrato de la edificación y cambia el sistema estructural del edificio. En práctica un sistema estructural de tierra se sustituye por uno de madera actuando la tierra solo como relleno y con poca contribución estructural. Esto es un cambio radical que afecta la autenticidad del edificio. Por último, es importante mencionar que la durabilidad de la técnica depende de la madera seleccionada para su implementación.

El mismo concepto de un **esqueleto de madera independiente** de la mampostería fue aplicada tradicionalmente en el pasado (Karababa; Guthrie, 2006; Makarios; Demosthenous, 2006; Myrto, 2010). Un sistema de postes de madera es instalado soportando los techos y pisos para que estos elementos no sean afectados al fallar la mampostería. El concepto de esta técnica puede ser incorporado en edificios existentes como una intervención temporal y completamente reversible. Sin embargo, la adaptación de esta técnica como una solución permanente para la estabilización sismorresistente de edificaciones históricas no construidas con este concepto, podría severamente afectar la autenticidad de las mismas.

Finalmente el **aislamiento de la base** es una técnica de adaptación compleja, pero basada en un principio muy simple: el edificio se desconecta de los movimientos del suelo mediante la introducción de capas de aislamiento y con ello, los desplazamientos durante un sismo se producen solo en el sistema de insolación. Alargando el período de la estructura y aumentando la amortiguación, la respuesta sísmica disminuye y esto permite que la estructura se mantenga casi sin deformación. Es una técnica eficaz, pero costosa, no solo para su instalación sino también para su mantenimiento; y requiere el uso de alta tecnología. La gran ventaja es que la estructura es solamente afectada al nivel de la base, permitiendo que el edificio histórico se mantenga prácticamente intacto, excepto por la introducción de sistemas flexibles para acomodar los desplazamientos relativos de la estructura con

respecto al suelo (ver sistemas de disipación de energía más adelante). Debido a la falta de aplicaciones de esta técnica para edificios de tierra, más investigación es necesaria para considerar el aislamiento de la base en el contexto de esta investigación.

2.2 Técnicas para estabilizar elementos constructivos

Todas las técnicas que se detallan en esta sección describen cómo estabilizar o soportar elementos constructivos, o conectar muros entre sí, en contraste con los métodos presentados anteriormente que estabilizan un edificio en su conjunto. Una combinación de estas técnicas, obviamente, mejorará la estabilidad general del edificio, pero la inserción de un solo tipo de estos elementos normalmente es insuficiente para proporcionar una estabilización sísmorresistente satisfactoria.

Las técnicas para estabilizar conexiones muro-muro son las más comunes dentro de esta categoría las cuales se puede clasificar en dos tipos. El primer tipo contiene **elementos horizontales que conectan muros paralelos** para mejorar el apoyo lateral y evitar el volteo. Estos elementos son normalmente aplicados en espacios más largos que anchos con pocas paredes transversales dentro de los mismos. Ejemplos típicos son iglesias y graneros (figura 4). Comúnmente tirantes de madera o varillas de acero han sido instalados en edificios históricos de adobe, ya sea antes o después de terremotos. Tolles et al (2002) enfatizan que un elemento fundamental en la instalación de estos tirantes o varillas de acero es el anclaje de los mismos a los muros. Este es el punto más delicado ya que el anclaje puede concentrar tensiones alrededor del mismo causando grietas. Se pueden utilizar tuercas y placas al exterior de y adosadas a los muros para asegurar los anclajes y distribuir tensiones. La instalación de tirantes puede servir de soporte adicional y algunas veces necesario, pero también pueden crear daño no previsto debido a las tensiones concentradas en los anclajes o a secciones de muros adyacentes. Se han aplicado tirantes de madera en varias edificaciones históricas en el Perú. El hecho de que la técnica se haya utilizado tradicionalmente, que se pueda implementar con material compatible y sin afectar el techo, son condiciones que hacen que esta técnica cumpla con los principios de la conservación. Actualmente los socios del SRP estudian esta técnica para mejorar la comprensión de la misma.



Figura 4 - Izquierda: tirantes en la iglesia de Kuño Tambo, uno de los edificios prototipo del proyecto SRP (Foto Claudia Cancino, 2010) Derecha: Vista exterior de conexiones de tirantes en Cuzco (Foto Sara Lardinois, 2012 © J. Paul Getty Trust).

El segundo tipo de estabilización de las conexiones muro-muro **une los muros perpendiculares por medio de lechadas y clavijas**. Según Tolles, Kimbro y Ginell (2002) las conexiones entre muros perpendiculares pueden tener suficiente resistencia para soportar sismos moderados si la construcción original consiste en o contiene adobes o refuerzos interconectados. La lechada o enclavijado de las grietas existentes dan a la estructura una cierta capacidad para resistir movimientos sísmicos moderados. Las clavijas pueden impedir en cierto grado la separación de los muros, tarea complicada dado la diferencia de movimientos en plano o fuera del plano, especialmente en muros de adobe gruesos durante sismos fuertes, haciendo la separación de los mismos casi eminente. Así,

aunque la lechada o enclavijado trabajen durante movimientos sísmicos moderados, tendrán poco efecto durante movimientos sísmicos fuertes, produciendo daño en o cerca de la esquina. Las grietas que se han producido en las esquinas cuando hay clavijas es probable que se hayan generado más allá de la ubicación de las mismas. Tolles, Kimbro y Ginell (2002) concluyen que los anclajes locales podrían ser un medio eficaz para limitar el daño, pero que como son propensos a fallar durante grandes terremotos, su utilización se debe combinar con una solución que proporcione estabilidad global a la edificación. Por ejemplo, una viga collar podría ser empleada para que el conjunto completo de medidas sea eficaz durante grandes eventos sísmicos. Bajo los principios de conservación, la lechada podría ser considerada como técnica de mantenimiento (véase sección de inyección en técnicas basadas en la resistencia). El enclavijado sólo requiere la perforación de pequeños agujeros en el tejido histórico, pero se debe considerar que las clavijas inyectadas son muy difíciles de remover, impidiendo la reversibilidad de la introducción del acero, que es un elemento poco compatible con el adobe.

Los muros perpendiculares también se pueden interconectar con una técnica tradicional que implica la inserción de elementos de madera a diferentes alturas comúnmente denominados **llaves o tirantes de esquina**. Es común que las juntas entre muros ortogonales se agrieten durante los terremotos, por lo cual, las llaves suministran refuerzos para que los muros sigan trabajando en conjunto (Figura 5). Angulo-Ibáñez et al. 2012 presenta una visión general de los diferentes tipos de refuerzos que se utilizan tradicionalmente en los edificios históricos de adobe. Como en la técnica previamente descrita de enclavijado, existe la misma preocupación de las diferencias de comportamiento de los muros perpendiculares al estar uno sujeto al movimiento fuera del plano y el otro en plano. De igual manera, durante grandes terremotos esta diferencia de movimiento entre muros perpendiculares puede ser tan grande que las paredes se terminan agrietando justo al costado del refuerzo. No se ha podido encontrar ninguna investigación detallada del comportamiento de estos elementos; pero ya que la técnica que se ha aplicado tradicionalmente en Perú, utiliza materiales compatibles y de fácil acceso, y es relativamente fácil de implementar, sin duda alguna una investigación más detallada es necesaria. La Pontificia Universidad Católica del Perú, como parte del SRP, ha realizado pruebas para entender el comportamiento de esta técnica y los resultados estarán disponibles muy pronto.

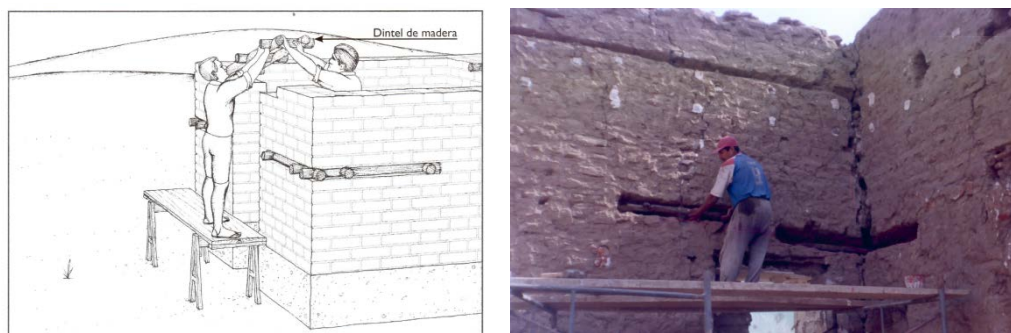


Figura 5- Ilustraciones de tirantes de esquina. Izquierda: se muestra la instalación en construcciones nuevas (Instituto Nacional de Cultura de Perú, 2002). Derecha: Instalación de tirantes de esquina en Casa Garci Holguin, Trujillo, Perú (1999 © J . Paul Getty Trust).

El uso de **contrafuertes** es otra técnica tradicional de estabilización ampliamente difundida en la región andina. Estas masivas adiciones de mampostería en lugares puntuales proporcionan una resistencia adicional a los empujes laterales durante un sismo. Normalmente y en la arquitectura tradicional estos empujes son generados por bóvedas o cúpulas interiores. Durante un sismo y si son bien contruidos, los contrafuertes actúan como soporte para restringir movimientos fuera de plano siendo aun más eficaces en puntos intermedios de muros largos. Si no se conectan a la mampostería, actúan de forma independiente (Roselund, 1995). En ese caso y durante un sismo, sólo proporcionan contención cuando las paredes se mueven en dirección al contrafuerte; pero, en la dirección opuesta, imponen una carga adicional a la pared y puede oscilar en su contra. Por lo tanto, es importante “atar” los contrafuertes a los muros para limitar los movimientos fuera del

plano y reducir el impacto de los mismos contra dichos contrafuertes. Otra opción es unir el contrafuerte a una viga tirante o diafragma para estabilizar el edificio (Figura 6). La conexión también puede ser ejecutada con llaves de esquina. En la práctica, no siempre está claro si un contrafuerte está conectado o no a la mampostería. En la región andina el uso de contrafuertes se hizo común después del terremoto de 1746, cuando un decreto del virreinato español los hizo obligatorios (Walker, 2008). El hecho de que los contrafuertes suelen ser adiciones posteriores a las iglesias, indica que estos no siempre están conectados a los muros que están destinados a soportar.

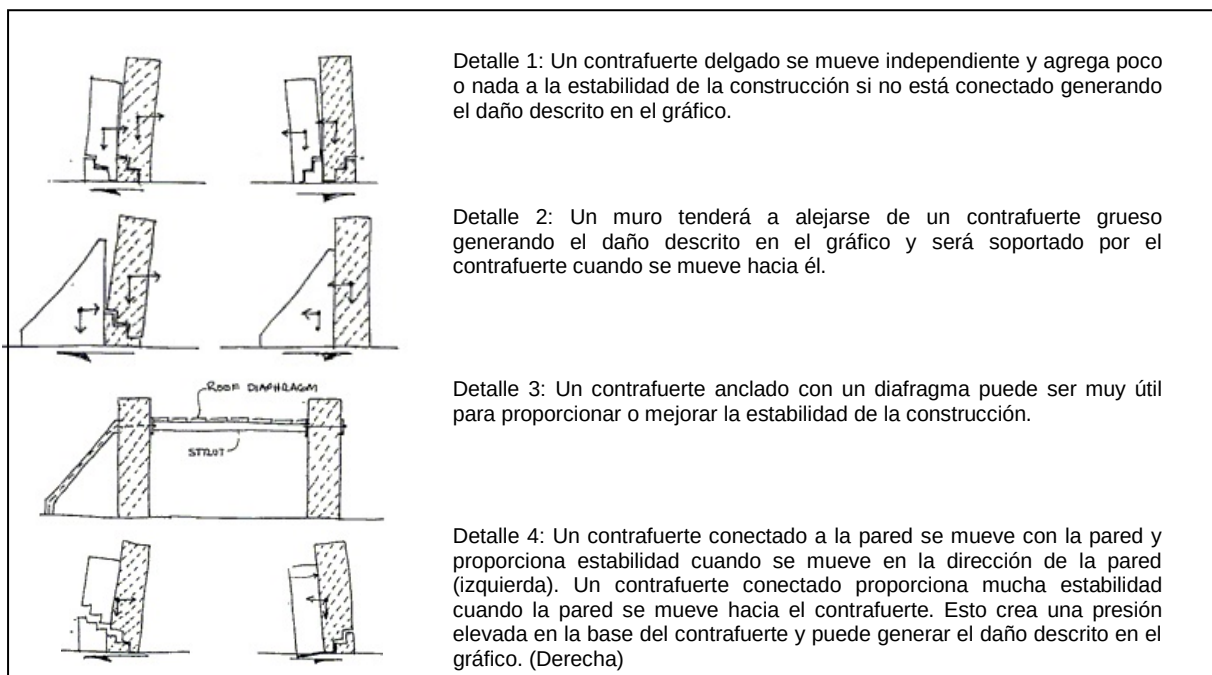


Figura 6 – Representaciones esquemáticas de contrafuertes y su comportamiento dependiendo de sus conexiones. Basado en Roselund (1995).

La ventaja en el uso de contrafuertes es que se pueden hacer del mismo material que los muros y se pueden remover fácilmente puesto que no interfieren con la estructura original. Eso los convierte en una técnica compatible, de bajo costo y fácil aplicación que no requiere de amplios conocimientos técnicos para su implementación. Sin embargo, el inapropiado desmontaje de los mismos puede generar daños a la estructura original. Por otro lado, la conexión a la estructura original es difícil de inspeccionar o mantener y podría haber sido pasado por alto en los edificios antes estabilizados. Otro punto importante señalado por Roselund (1995) es que la ejecución de contrafuertes, generalmente sobre niveles de suelo diferentes, podría dar lugar a asentamientos diferenciales.

Un aparato de dispersión de energías específicamente diseñado para la protección sísmica de edificios de valor patrimonial fue desarrollado por Paganoni y D'Ayala (2009, 2010), en el marco de una *Knowledge Transfer Partnership* (KTP) entre la Universidad de Bath y Cintec International Ltd. El impacto sísmico en los muros portantes se reduce al permitir pequeños desplazamientos y la disipación de energía para reducir el daño. Esto se logra ya sea con las propiedades de histéresis de un elemento de acero inoxidable moldeado para optimizar su comportamiento post elástico, o con un mecanismo de fricción preparado para ejercer un cierto nivel de fuerza de tracción (D'Ayala; Paganoni, 2011). Los anclajes son diseñados para ceder (ancla con un dispositivo de rendimiento) o activar el mecanismo de fricción (anclaje con un dispositivo de fricción) antes del agrietamiento en el material. Logran mayores desplazamientos que los anclajes tradicionales de fuerza concentrada reduciendo o anulando el daño en el sustrato de base. Si bien esta técnica es prometedora, hay que señalar que fue diseñada para edificios de mampostería de ladrillo y nunca se ha aplicado ni investigado para edificios de tierra. Además, la falta de conocimientos técnicos y de disponibilidad de material en zonas remotas, hacen que sea difícilmente aplicable.

3 TÉCNICAS BASADAS EN LA RESISTENCIA

Un último grupo de técnicas se dedica a mejorar la resistencia de la mampostería de adobe.

Revestimientos de cemento reforzados con alambre de acero, fibras de polímeros o fibras de vidrio se aplican a veces a la mampostería de adobe. Los revestimientos reforzados pueden ser incorporados internamente, externamente o combinados, pero son más eficaces cuando se aplican a ambos lados de la pared y son interconectados. La conexión puede fijarse con cintas metálicas. Este sistema aumenta la resistencia de las paredes de adobe y tiende a absorber las fuerzas sísmicas. Falla de forma frágil cuando llega a su límite elástico, lo cual puede llevar al colapso repentino del edificio. Este tipo de falla ha sido reportado por D'Ayala y Benzoni (2012) en las iglesias parroquiales de Lolol y Curepto en Chile después del terremoto de Maule del 2010. Por otra parte, el recubrimiento de hormigón hace al muro impermeable, atrapando la humedad en el interior, lo que compromete la resistencia mecánica de la mampostería de adobe. Dado que esta técnica ha demostrado ser ineficaz y el cemento es un material no compatible con la tierra, su aplicación se debe evitar o revertir siempre que sea posible.

A menudo, la mampostería de adobe se encuentra agrietada debido a terremotos anteriores, asentamientos de la cimentación, falta de mantenimiento o por los efectos de contracción. Esto va disminuyendo la continuidad de la mampostería y para volver a crear un comportamiento monolítico, las pequeñas grietas pueden ser llenadas por **inyección**. Esto permite de nuevo la transferencia de tensiones a través de las grietas. Por otra parte, la reparación de grietas también previene el deterioro causado por otros agentes, como la filtración de agua y la presencia de elementos biológicos (Silva; Schueremans; Oliveira, 2009). Lechadas de tierra se pueden inyectar, y varios intentos de investigación se han hecho para diseñar lechadas de consistencia apropiada (Silva; Schueremans; Oliveira, 2009; Silva et al, 2012; Vargas et al, 2011; Roselund, 1990). La durabilidad y la compatibilidad de la intervención es un punto importante a considerar al momento de intervenir. Una lechada exitosa debe ser más débil que la cohesión de la mampostería de modo que el material original no se vea comprometido durante un movimiento sísmico y una nueva intervención por inyección sea posible. La inserción de una lechada de tierra es difícilmente reversible, pero por otro lado no se remueve material original, convirtiendo la inyección de lechadas en una intervención no invasiva con materiales similares y compatibles.

Grandes grietas en la mampostería de adobe se pueden reparar mediante la técnica de **costura suave** que consiste en el apisonamiento de tierra estabilizada con refuerzos metálicos o de madera en incisiones pre-cortadas. Estas incisiones reforzadas se construyen tanto interna como externamente y se ubican transversalmente a la dirección de las grietas cada 0,50 m. Keefe (1993) y Hurd (2009) proporcionan descripciones detalladas y gráficos que explican la implementación de esta técnica. Mientras que el rendimiento ingenieril de esta intervención no ha sido examinado técnicamente en el conocimiento de los autores, este método ha sido aplicado durante siglos en las regiones sísmicas del Asia Central y Trans-Himalaya (Hurd, 2009). Aunque la técnica es invasiva ya que requiere remover material original, permite la reutilización de los materiales originales, ha demostrado en la práctica ser una técnica de reparación duradera, compatible, de fácil acceso y económica.

4 CONCLUSIONES

El trabajo presentado ofrece una visión general de la gran variedad de técnicas existentes para la estabilización sismorresistente de los edificios de tierra. Se tiene en cuenta los principios de conservación del patrimonio arquitectónico, como la re-intervención, compatibilidad y el a veces difícil compromiso entre la preservación de la autenticidad de la edificación y su estabilización sismorresistente; no contando esta última, con soluciones estándares para edificaciones de tierra, y sobre todo, históricas. Esta ponencia se basa en el principio de conservación que las técnicas de estabilización aplicadas tradicionalmente, que

utilizan materiales similares, compatibles y de bajo costo como la madera y/o la tierra, son probablemente las mejores soluciones para los sitios de tierra.

Tradicionalmente, la estabilidad adicional de una edificación se obtiene mediante el uso de vigas collar de madera, tirantes de madera que conectan muros paralelos, llaves de esquina o a través la edificación de contrafuertes. Es posible y algunas veces necesario combinar estas técnicas para proporcionar estabilidad total a un edificio histórico. Cada una de estas técnicas requieren de una correcta implementación: una viga collar debe estar conectada alrededor de todo el edificio, los tirantes de madera deben ser cuidadosamente conectados a los muros, y los contrafuertes deben estar conectados a los muros y no sólo adosados a los mismos para ser eficaces.

Mientras que el éxito de una técnica de estabilización sismorresistente se puede lograr mediante la combinación de las técnicas tradicionales mencionadas anteriormente, es posible que el uso de otras técnicas sea inevitable para cumplir ciertos criterios de rendimiento o para preservar ciertos valores de la edificación. En ese caso, las técnicas menos invasivas, tales como la introducción de un diafragma de madera contraplacada, barras horizontales de acero, una geomalla con revestimiento de tierra o un sistema de correas se deben tomar en cuenta; una vez que las técnicas tradicionales han sido estudiadas, descartadas o implementadas. Sin embargo, el considerar técnicas no-tradicionales requiere conocimiento especializado y un análisis de su efectividad caso-por-caso.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Angulo-Ibáñez, Q.; Mas-Tomás, A.; Galvañ-Llopis, V.; Sántolaria-Montesinos, J.L. (2012). Traditional braces of earth constructions. *Construction and building materials* 30, pp. 389-399.
- Barrow, J.M.; Porter, D.; Farneth, S.; Tolles, E.L. (2009). Evolving methodology in seismic retrofit: Stabilizing the Las Flores Adobe. In *Proceedings of the Getty Seismic Adobe Project 2006 Colloquium: Getty Center, Los Angeles, April 11-13, 2006* Los Angeles: Getty Conservation Institute, pp. 165–173. Disponible en http://www.getty.edu/conservation/publications_resources/pdf_publications/pdf/gsap_part4c.pdf
- Charleson, A.W. (2009). Research on used car tyre strap reinforced adobe construction in Peru. In *New Zealand Society for Earthquake Engineering "Why Do We Still Tolerate Buildings That Are Unsafe in Earthquakes" 2009 Conference: 2-5 April 2009, Christchurch* Wellington, NZ: New Zealand Society for Earthquake Engineering, pp. Paper 34. <http://www.nzsee.org.nz/db/2009/Paper34.pdf>
- D'Ayala, D.F.; Forsyth, M. (2007). What is conservation engineering? In: *Structures & Construction in Historic Building Conservation*, Forsyth, M. (ed.), Blackwell Publishing, UK.
- D'Ayala, D.; Benzoni, G. (2012). Historic and traditional structures during the 2010 Chile earthquake: Observations, codes, and conservation strategies. *Earthquake Spectra* 28 (S1), pp. S425-S451. Disponible en <http://dx.doi.org/10.1193/1.4000030>
- Dowling, D. (2006). Seismic strengthening of adobe-mudbrick houses. PhD thesis, University of Technology, Sydney, Faculty of Civil Engineering.
- Dowling, D.M. (2004). Adobe housing in El Salvador: Earthquake performance and seismic improvement. In *Natural Hazards in El Salvador*. edited by William I. Rose, Julian J. Bommer, Dina L. López, Michael J. Carr and Jon J. Major. Special Paper, 375 Boulder, Colo.: Geological Society of America, pp. 281-300.
- E.030 (2003). National Building Code, Technical standard of building – earthquake-resistant design, Lima, Peru.

EN 1998-3 (2005). Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance, Part 3: Assessment and retrofitting of buildings. European Committee for Standardization (CEN), Brussels.

Hardy, M.; Cancino, C.; Ostergren, G., eds. 2009. *Proceedings of the Getty Seismic Adobe Project 2006 Colloquium: Getty Center, Los Angeles, April 11-13, 2006*. Los Angeles, CA: Getty Conservation Institute. Disponible en http://www.getty.edu/conservation/publications_resources/pdf_publications/gsap.html

Heinsen, C.; Perreira, M.; Maino, J.; Caicedo, R. (2012). *Manual de restauración y conservación de construcciones patrimoniales de tierra*. Arica, Chile: Fundación Altiplano. Disponible en <http://fundacionaltiplano.cl/archivo/publicaciones/>

Hume, I. (2007). The philosophy of conservation engineering. In: *Structures & Construction in Historic Building Conservation*, Forsyth, M. (ed.), Blackwell Publishing, UK.

Hurd, J. (2009). Observing and applying ancient repair techniques to pisé and adobe in seismic regions of Central Asia and Trans-Himalaya. In *Proceedings of the Getty Seismic Adobe Project 2006 Colloquium: Getty Center, Los Angeles, April 11-13, 2006*, Los Angeles: Getty Conservation Institute, pp. 101-108. Disponible en http://www.getty.edu/conservation/publications_resources/pdf_publications/gsap.html

ICOMOS (2004a). *The Burra Charter: the Australia ICOMOS Charter for Places of Cultural Significance (1979, revisions 1981, 1988, 1999)*. In: International Charters for Conservation and Restoration, Monuments and Sites I, 2nd edition, ICOMOS, München.

ICOMOS (2004b). *The Venice Charter, International charter for the conservation and restoration of monuments and sites (1964)*. In: International Charters for Conservation and Restoration, Monuments and Sites I, 2nd edition, ICOMOS, München.

ICOMOS-ISCARSAH (2003). *Recommendations for the analysis, conservation and structural restoration of architectural heritage*. International Council on Monuments and Sites (ICOMOS), International Scientific Committee on the Analysis and Restoration of Structures of Architectural Heritage (ISCARSAH).

ISRCHB (2006). *Guidelines for the conservation of historical masonry structures in seismic areas*. University of Minho, Technical University of Catalonia, Central Building Research Institute, Università degli Studi di Padova, Project "Improving the Seismic Resistance of Cultural Heritage Buildings (ISRCHB).

Karababa, F.V.; Guthrie, P.M. (2006). Vulnerability reduction through local seismic culture: The case study of Lefkada, Greece. In *IEEE Internaional Symposium on Technology and Society, ISTAS'06 - Disaster Preparedness and Recovery, Flushing, NY, 9 June - 10 June 2006*, Piscataway, N.J.: Institute of Electrical and Electronics Engineers, pp. 1-16.

Keefe, L. (1993). *The Cob Buildings of Devon 2: Repair and Maintenance*. Devon: Devon Historic Buildings Trust. Disponible en http://www.devonearthbuilding.com/leaflets/the_cob_buildings_of_devon_2.pdf

Makarios, T.; Demosthenous, M. (2006). Seismic response of traditional buildings of Lefkas Island, Greece. *Engineering Structures* 28 (2), pp. 264-278.

Myrto, S. (2010). Seismic Behavior of Vernacular Greek Architecture: The Development of Earthquake-Resistant Structural Systems: The Case of Lefkada Island. Master's thesis, Conservation of Historic Buildings, University of Bath.

NRC-CNRC (1995). *Guideline for seismic upgrading of building structures*. National Research Council Canada, Institute for Research in Construction, Canada.

Paganoni, S. ; D'Ayala, D. (2009). Development and testing of dissipative anchor devices for the seismic protection of heritage buildings. In: *ANCER Workshop 2009, 2009-08-13 - 2009-08-14*, University of Illinois, Urbana-Champaign, IL.

Paganoni, S.; D'Ayala, D. (2010). Dissipative device for the protection of heritage structures: a comparison of dynamic tests and FE models. *Proceedings of the XIV European Conference on Earthquake Engineering – 14th ECEE*, Ohrid, Republic of Macedonia

Roselund, N. (1990). Repair of cracked adobe walls by injection of modified mud. In *6th International Conference on the Conservation of Earthen Architecture: Adobe 90 Preprints: Las Cruces, New Mexico, U.S.A., October 14-19, 1990*, Los Angeles: Getty Conservation Institute, pp. 336- 341. Disponible en http://www.getty.edu/conservation/publications_resources/pdf_publications/adobe90.html

Roselund, N. (1995). Buttresses, pilasters and adobe wall stability. In *Workshop on the Seismic Retrofit of Historic Adobe Buildings: March 10, 1995, at the J. Paul Getty Museum Pasadena: Earthen Building Technologies*, pp. 89-90.

Samanez Argumedo (1983). *Los sismos y la conservación de los monumentos en la zona andina del Perú*. In *La protección de monumentos históricos en áreas sísmicas: documentos y conclusiones: Seminario Internacional, La Antigua, Guatemala 4 al 11 de noviembre 1979 / organizado por el Centro Nacional para la Protección de La Antigua Guatemala con la colaboración de UNESCO - PNUD - UNDRO - ICOMOS y la OEA*. [Lima, Perú]: Proyecto Regional de Patrimonio Cultural PNUD-UNESCO

Silva, R.; Schueremans, L.; Oliveira, D.; Dekoning, K.; Gyssels, T. (2012). On the development of unmodified mud grouts for repairing earth constructions: Rheology, strength and adhesion. *Materials and Structures* 45 (10), pp. 1497-1512. Disponible en <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-012-9853-y>

Silva, R.; Schueremans, L.; Oliveira, D. (2009). Grouting as a repair/strengthening solution for earth constructions. In *1st WTA International PhD symposium München WTA: Wiss.-Techn. Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege*.

Tolles, E.L. (1996). *Survey of damage to historic adobe buildings after the January 1994 northridge earthquake*, GCI Scientific Program Report. Los Angeles: Getty Conservation Institute. Disponible en http://www.getty.edu/conservation/publications_resources/pdf_publications/pdf/adobe_northridge.pdf

Tolles, E.L.; Kimbro, E.E.; Webster, F.A.; Ginell, W.S. (2000). *Seismic Stabilization of Historic Adobe Structures: Final Report of the Getty Seismic Adobe Project*. Los Angeles: Getty Conservation Institute. Disponible en http://www.getty.edu/conservation/publications_resources/pdf_publications/seismicstabilization.pdf

Tolles, E.L.; Kimbro, E.E.; Ginell, W.S. (2002). *Planning and Engineering Guidelines for the Seismic Retrofitting of Historic Adobe Structures*, GCI Scientific Program Report. Los Angeles: Getty Conservation Institute. Disponible en http://www.getty.edu/conservation/publications_resources/pdf_publications/seismic_retrofitting.pdf

Torrealva, D. (2008). Shear and out of plane bending strength of adobe walls externally reinforced with polypropylene grids. In *14th World Conference on Earthquake Engineering, October 12-17, 2008, Beijing, China: Innovation, Practice, Safety* Beijing: World Conference on Earthquake Engineering.

Torrealva, D.; Vargas-Neumann, J.; Blondet, M. (2009). Earthquake resistant design criteria and testing of adobe buildings at Pontificia Universidad Católica del Perú. In *Proceedings of the Getty Seismic Adobe Project 2006 Colloquium: Getty Center, Los Angeles, April 11-13, 2006*, Los Angeles, CA: Getty Conservation Institute, pp. 3-10. Disponible en http://www.getty.edu/conservation/publications_resources/pdf_publications/gsap.html

Vargas-Neumann, J.; Dandona, B.; Blondet, M.; Cancino, C.; Iwaki, C.; Morales, K. (2011). An experimental study of the use of soil-based grouts for the repair of historic earthen walls and a case study of an early period Buddhist monastery. In *Terra 2008: Proceedings of the*

10th International Conference on the Study and Conservation of Earthen Architectural Heritage, Bamako, Mali, February 1-5, 2008. edited by Leslie H. Rainer, Angelyn Bass Rivera and David Gandreau, Los Angeles: Getty Conservation Institute, pp. 301- 306.

Disponible en

http://www.getty.edu/conservation/publications_resources/pdf_publications/terra_2008.pdf

Walker, C. F. (2008). *Shaky colonialism: The 1746 earthquake-tsunami in Lima, Peru, and its long aftermath.* Durham: Duke University Press.

Webster, F. (2006). Development and application of stability-based retrofits of historic and older adobe buildings in California. In *Proceedings of the 8th US National Conference on Earthquake Engineering*, Berkeley: Earthquake Engineering Research Institute, pp. 8049-8057.

Workshop on the Seismic Retrofit of Historic Adobe Buildings: March 10, 1995, at the J. Paul Getty Museum (1995). Pasadena: Earthen Building Technologies.

Yamin, L.E.; Phillips, C.A.; Reyes, J.C.; Ruiz, D.M. (2004). Seismic behavior and rehabilitation alternatives for adobe and rammed earth buildings. In *13th World Conference on Earthquake Engineering Conference Proceedings, Vancouver, British Columbia, Canada, August 1-6, 2004* Vancouver, B.C.: 13th WCEE Secretariat.

Notas

¹ Cuando intervenciones sean necesarias lo ideal es que sean realizadas con los mismos materiales utilizados en la construcción original, es decir, históricos. En algunos casos, sin embargo, esto puede ser intrusivo y provocar la pérdida de material original poniendo en riesgo la autenticidad de la edificación. Materiales compatibles (siguiente principio) pueden ser una solución adecuada en este caso.

² Esta ponencia considera muros fuera de plano y en plano a los muros perpendiculares y paralelos (respectivamente) a la dirección principal de carga generada por un sismo (Figura 2).

Agradecimientos

Los autores quieren dar gracias a Sara Lardinois del Getty Conservation Institute, a Daniel Torrealva y Erica Vicente de la Pontificia Universidad Católica del Perú, y a Dina D'Ayala y Natalie Quinn de la *University College of London* por el aporte de ideas durante el desarrollo de esta ponencia. Un agradecimiento especial a Claudia Cancino del GCI por sus comentarios y revisiones, y al Arq. Gerardo Hernández Septién por su ayuda con la traducción.

Currículo

Tim Michiels es bachiller y magister en Ingeniería Civil de la Universidad de Lovaina (KULeuven, Bélgica) y está terminando actualmente una Maestría Avanzada en Conservación de Monumentos y Sitios Históricos en el "*Raymond Lemaire International Centre for Conservation*", también en Lovaina. En el 2012, le fue otorgado una pasantía (*Graduate Internship*) en el Getty Conservation Institute, y es parte del equipo del "*Earthen Architecture Initiative – Seismic Retrofitting Project (SRP)*"

Carina Fonseca Ferreira es estudiante de doctorado en Ingeniería Sísmica en la *University College London*. Investiga la respuesta sísmica de edificios eclesiásticos históricos construidos en tierra y madera para estabilizarlos sísmicamente. Su investigación es parte del "*Earthen Architecture Initiative – Seismic Retrofitting Project (SRP)*". Obtuvo el título de magister en Ingeniería Civil, donde estudió la vulnerabilidad sísmica de edificios tradicionales de adobe, por la Universidad de Aveiro, en Portugal.