

INTERVENCION SISMORRESISTENTE DE ESTRUCTURAS HISTORICAS DE ADOBE. GETTY SEISMIC ADOBE PROJECT

Julio Vargas Neumann*

Pontificia Universidad Católica del Perú
Departamento de Ingeniería / Sección Ingeniería Civil
Av. Benavides 1480, Lima 18, PERÚ
Tel.: +511 445 1927; E-mail: jhvargas@pucp.edu.pe

Tema 2: Conservación y Patrimonio

Palabras clave: Adobe, Intervención, GSAP, Reforzamiento, California, Perú

Resumen

Se presenta los conceptos fundamentales de la investigación multidisciplinar que desarrolló Getty Conservation Institute: "Getty Seismic Adobe Project" (GSAP) en los 90s, para encontrar medidas efectivas de reforzamiento para monumentos históricos de adobe, que produzcan un mínimo impacto en su significado histórico.

Se expone resumidamente sus principales actividades: levantamientos de edificios históricos de adobe existentes en el área de California (para encontrar prototipos representativos), del tipo de reforzamiento tradicional, de daños sísmicos reportados y revisión de la bibliografía técnica.

Mientras se desarrollaba el proyecto ocurrió el sismo de Northridge 1994, que permitió revisar más de una docena de monumentos históricos afectados, reportándose sus daños que recogen los patrones típicos de las fisuras (Tolles et al,1996).

Adicionalmente se realizó un amplio programa experimental de modelos a escala reducida de edificaciones de adobe, consistente en 9 modelos (escala 1:5 ensayados en Stanford University) y dos modelos finales (escala 1:2 ensayados en el IZIIS de Skopje, Macedonia). Se evaluó la eficacia de refuerzos como los tirantes horizontales y verticales, barras verticales centrales, anclajes del techo y entrepiso a los muros, utilizando vigas collar.

Finalmente se desarrolló guías de intervención estructural para el reforzamiento de los monumentos históricos de adobe, que abarcan lineamientos para el diseño de ingeniería y planeamiento de la intervención, que fueron publicadas hace unos años.

Existe ya un buen número de iglesias o misiones de adobe en California que están siendo reconstruidas con los criterios de "Desempeño" en vez de los tradicionales de "Resistencia" que presenta el GSAP. En este trabajo se presenta un ejemplo de aplicación en Latino América: El proyecto de la iglesia San Cristóbal de Rapaz ubicada en el altiplano de Perú.

1. Antecedentes

El Getty Seismic Adobe Project, GSAP, fue un proyecto multidisciplinar para desarrollar soluciones de reforzamiento estructural para los monumentos históricos de adobe, teniendo simultáneamente presente la eficacia estructural y el carácter de mínima y reversible intervención respetando el valor patrimonial de la obra.

El proyecto se ejecutó en varias etapas, primero se realizó un levantamiento de las edificaciones históricas de adobe existentes en California, área de severa actividad sísmica, que sirvió para desarrollar prototipos de estudio y conocer las soluciones tradicionales de reforzamiento; también se hizo una revisión de la bibliografía técnica existente en el país y fuera de él; y adicionalmente una recolección de daños sísmicos reportados que resultó ser muy escasa. Finalmente se preparó unas guías de planeamiento e ingeniería para el reforzamiento de monumentos históricos de adobe, con la información extraída de un programa experimental de modelos a escala reducida sobre mesas vibratorias simuladoras de sismos. También se contó con el estudio de más de una docena de edificaciones históricas que fueron dañadas o deterioradas por el sismo de Northridge, 1994, que circunstancialmente ocurrió durante las tareas de recopilación de información sobre el comportamiento de ese tipo de monumentos. Se hicieron nueve ensayos con modelos a escala 1:5 en la mesa de la Universidad de Stanford y dos

ensayos comprobatorios con modelos a escala 1:2 en la mesa del IZIIS en Skopje, Macedonia.

Como miembro del Comité Asesor del **GSAP**, el autor se siente honrado de presentar la información de esta ponencia, que ha sido recogida de exposiciones y publicaciones del grupo de investigadores que lideró E. Leroy Tolles, y a través de ello, rendir el más sentido homenaje póstumo a la historiadora y restauradora Edna E. Kimbro, miembro esencial de dicho grupo.

2. Experiencias de investigación

El objetivo de programa de investigación fue determinar soluciones de reforzamiento sismorresistente para los monumentos históricos de adobe, cuidando de que la intervención tenga efectos mínimos y reversibles para respetar el valor patrimonial de las obras.

Las base teóricas del programa de investigación se reducen a dos puntos :

Criterios basados en la estabilidad: El desempeño sísmico de edificaciones de adobe simple (sin reforzar), puede mejorarse notablemente utilizando elementos que proporcionen mínimas restricciones y continuidad para controlar los desplazamientos de los segmentos de muros formados por las fisuras y previniendo los principales modos de falla.

Relación de esbeltez y grosor de los muros: La relación (altura – espesor) de esbeltez (S) es de importancia fundamental en la determinación del comportamiento de la mampostería sin reforzar en general y la de adobe en particular. La relación de esbeltez afecta la propensión de una edificación de adobe a dañarse y el tipo de reforzamiento apropiado.

Ambos puntos han sido analizados a través de los ensayos en mesa vibradora con especímenes a escala reducida, del estudio de los daños observado después del terremoto de Northridge y de la confirmación con ensayos de modelos de las edificaciones a mayor escala.

3. Criterios de Estabilidad vs. Resistencia

Los diseños basados en criterios de resistencia, que son los tradicionales, mejoran el comportamiento de las construcciones de adobe, incrementando la resistencia del material, perfeccionando las conexiones entre las paredes y cambiando la configuración estructural general, como por ejemplo añadiendo muros de corte. Se asume un comportamiento elástico de la estructura, recurriendo a métodos tradicionales para demorar la aparición de fisuras.

Los diseños basados en criterios de estabilidad o desempeño, se preocupa del comportamiento global de la obra, asegurando fundamentalmente la estabilidad estructural durante la fase inelástica y el comportamiento último sin colapsos súbitos o frágiles. Este criterio apunta a reducir el potencial de daño estructural severo y los colapsos, después de iniciada la fase inelástica o de fisuras.

Este último criterio de diseño, se maneja sobre bases realísticas de comportamiento inelástico no lineal, requiere de un conocimiento de las características dinámicas de las estructuras dañadas de adobe y la aplicación de técnicas que controlando el desplazamiento, evitan daños severos y colapsos. Estos conceptos consideran el desarrollo de daños severos con estabilidad de las paredes rajadas para evitar el colapso. Ambos criterios no son incompatibles y pueden ser complementarios, dirigidos a dos etapas diferentes del comportamiento, la elástica y la inelástica. La primera no es suficiente para determinar el comportamiento de edificios de paredes gruesas. Solo es

válido si conoce con precisión la relación entre los niveles de inicio del agrietamiento y de colapso y se sabe que no es clara ni simple la relación entre estos dos eventos.

La figura 1, muestra un croquis generalizado con las diferencias de comportamiento respecto al daño sísmico, de una edificación de tierra diseñada con ambos criterios de estabilidad y resistencia. Mientras el de resistencia incursiona en zonas no reparables, el de estabilidad controla los desplazamientos y el daño en zonas reparables.

4. Evaluación de daños sísmicos en Monumentos Históricos de Adobe

El proyecto **GSAP** desarrolló una evaluación de daños en los edificios históricos de adobe afectados durante el terremoto de Northridge, 1994, estudiando y documentando el comportamiento real de más de una docena de monumentos. El conjunto global de daños fue tipificado para presentarlos como aquellos que le podrían ocurrir a un monumento histórico de adobe. Ellos se muestran en la figura 2.

5. Investigación de laboratorio

La investigación de laboratorio del **GSAP** incluyó sofisticados ensayos en mesas vibratoras simuladoras unidireccionales de terremotos en modelos a escalas reducidas y naturales. Las mesas fueron comandadas por señales grabadas de terremotos ocurridos en California.

Los primeros ensayos de escala reducida (1:5) fueron orientados al primer punto: Desarrollar y comprobar medidas de reforzamiento eficaces con criterios de estabilidad. Desde un inicio demostraron que es posible mejorar sustancialmente el desempeño de edificaciones de adobe, con reforzamientos mínimos basados en la estabilidad de los muros y del conjunto.

Ensayos posteriores se orientaron a analizar el segundo punto: la influencia de la esbeltez (S) de los muros. Los resultados indicaron que el grosor de los muros tiene un efecto positivo sobre el comportamiento sismorresistente, pero que este hecho es de una importancia secundaria frente a la mejora en el desempeño debida a las medidas de reforzamiento basado en la estabilidad. Se utilizó dos relaciones de esbeltez (S) 5 y 11, para estudiar la sensibilidad de esta variable.

También se ensayó modelos con tímpano en las paredes cortas y las medidas de refuerzo probadas, intentaban evaluar los problemas esperados en el comportamiento del espécimen y los que podrían presentarse en edificaciones más complejas. Se comparaban modelos sin reforzar y reforzados con criterios de estabilidad, al mismo tiempo que se estudiaban detalles de reforzamiento.

Las herramientas de reforzamiento más útiles fueron los tirantes horizontales (superiores o inferiores) y verticales, la viga collar superior y las barras verticales centrales. Estas últimas son las más sofisticadas pero son las más eficientes y por ello son recomendadas para edificaciones críticas, como por ejemplo las que tienen muros delgados o esbeltos.

La continuidad que otorga una buena conexión entre el techo y los muros es muy importante.

El reforzamiento del 7mo modelo fue muy interesante pues utilizó las medidas de refuerzo que habían tenido éxito en los ensayos precedentes. Se usó tirantes horizontales y verticales en los muros y diafragmas actuando en el entrepiso del ático y el techo. La importancia de su comportamiento se puede describir como sigue:

- Buen comportamiento global del modelo, tal como se esperaba por la experiencia con los anteriores ensayos, revelando un reforzamiento claramente exitoso.
- Aceptable predicción de los patrones de fisuras, salvo algunas sorpresas. La existencia de tirantes verticales y horizontales unidas a través del muro con sogas, se comportó adecuadamente aun cuando las fisuras ocurrían donde no eran esperadas.

- El diafragma del techo fue suficiente para evitar el colapso fuera del plano de las paredes altas que conforman los tímpanos. Grandes desplazamientos ocurrieron en la parte superior de los muros, debido a la relativa flexibilidad del sistema de diafragmas, pero estos proporcionaron la restricción suficiente para prevenir el colapso.
- La rigidez del diafragma horizontal a nivel del ático fue bastante mayor que la del techo. Las conexiones a través del muro funcionaron bien durante el ensayo. Aparecieron fisuras horizontales en los dos tímpanos debido al movimiento fuera del plano.
- Ocurrió desplazamientos permanentes considerables en las fisuras horizontales de los muros, pero se pudo evitar el colapso.
- Los tirantes horizontales inferiores fueron adecuados para prevenir el deterioro de los segmentos de muro bajo las ventanas y las fisuras diagonales que aparecen en sus esquinas.

Los siguientes modelos fueron variaciones de este 7mo. modelo, por ejemplo la esbeltez (S) fue de 7.5 o sea intermedia entre las anteriormente ensayadas.

Los modelos de mayor escala realizados en Skopje, fueron semejantes a los últimos modelos de escala reducida realizados en la Universidad de Stanford, California. Uno era sin refuerzo y el otro reforzado como el último de la serie de los de escala reducida.

6. Guías de Planeamiento y Diseño de Ingeniería

El producto final del proyecto **GSAP** fue la preparación y publicación de “Las Guías para la Intervención Sismorresistente de Estructuras Históricas de Adobe”.

El proceso del diseño de reforzamiento requirió de una etapa previa de reflexión en la que se define la filosofía de diseño, los niveles de mínima intervención que garantice la vida de los ocupantes y otros objetivos de comportamiento estructural. En general el diseño debe dirigirse a evitar el colapso y así el riesgo de vida durante los movimientos sísmicos más fuertes, pero también debe orientarse a evitar o disminuir el daño durante movimientos leves y moderados.

Diseño global

El punto de partida en el proceso de diseño, es el entendimiento de los elementos básicos necesarios para un diseño global. Restringir los desplazamientos en la parte superior de los muros para evitar el colapso, es la primera consideración del diseño del reforzamiento. Un diafragma flexible u otras medidas para prevenir la falla fuera del plano, como las vigas collar, pueden ser todo lo que se necesita para evitar el colapso en edificaciones de muros gruesos. Para edificaciones de paredes delgadas en cambio, será necesario elementos verticales en los muros para evitar el colapso. Los elementos verticales añaden ductilidad a todo tipo de muros (de cualquier espesor). Los elementos horizontales inferiores pueden mejorar la capacidad de tracción de un muro de adobe, para controlar las fallas progresivas. Las figuras 3a y 3b muestran croquis del sistema de reforzamiento.

Predicción de Fisuras

La realización de esquemas de predicción de ubicación de fisuras, considerando posibles variantes, puede ser muy útil para determinar las posibilidades de fallas locales, como el caso que se presenta en la figura 3c. El volteo de cada segmento de muro formado entre fisuras puede ser potencialmente peligroso para los ocupantes. Por ello, el diseño de reforzamiento debe estabilizar cada segmento de muro que prediga formarse.

Medidas específicas de reforzamiento

Las medidas específicas de reforzamiento podrían orientarse a varios puntos diferentes. Estos puntos incluyen el diseño fuera del plano de los muros, el diseño en el plano, el diseño del diafragma flexible y los detalles de conexión. Estos últimos son complicados por la debilidad del material que convierte a las conexiones en fuentes de grietas. Las conexiones debieran diseñarse de tal suerte que la falla local del adobe no ocasione un daño mayor. Debe intentarse convertir las tracciones en compresiones con dispositivos adecuados que atraviesen los muros y compriman el lado opuesto al ser jalados.

7. Aplicaciones en Latino América

Al igual que en el Estado de California, en Latino América se ha iniciado la ejecución de proyectos utilizando diseños con criterios de desempeño en vez de resistencia, como sugiere el **GSAP**. En el Perú se vienen ejecutando muchos proyectos, uno de los cuales presentaremos:

Iglesia de San Cristóbal de Rapaz. Intervención estructural

Datos generales

La Iglesia de de San Cristóbal de Rapaz, es uno de los más valiosos ejemplares de las 40 iglesias doctrinales de los andes occidentales peruanos, que figuran en la lista de World Monuments Fund de sitios históricos en peligro, ubicadas en la cuenca Oyón, a más de 4000m de altitud. Posee extraordinarias pinturas murales, así como imponentes y antiguos altares construidas en piezas de madera bañadas con pan de oro, y obras de arte moldeadas en yeso. Data del siglo XVI, época de la colonia y ha sido declarado patrimonio monumental del Perú. La cuenca de Oyón esta considerada como zona sísmica de alta peligrosidad. La figura 4 muestra una vista interior de la iglesia.

La iglesia es de una nave que culmina en el altar desde donde se proyecta la sacristía. Su planta es por tanto irregular y posee varios contrafuertes, construidos en distintas épocas y una escalera hacia el coro sobre la zona de la portada.

La estructura tiene una cimentación de piedra asentada con barro y la mampostería es mixta con franjas de adobe y piedra, lo que la convierte en una construcción vulnerable. El mortero de asiento es de tierra de baja resistencia. La torre del campanario es exenta. Los techos son de madera con tijerales de par y nudillo, en buen estado de conservación en general. Actualmente posee una cubierta metálica reciente.

Estado actual

Es posible observar un agrietamiento general en los muros de leve a moderado, cuyas fisuras se concentran mayormente en los encuentros de los muros, son verticales y de origen sísmico. Hay algunas grietas mayores, antiguas y probablemente crecientes con cada nuevo movimiento sísmico. Los contrafuertes de mampostería de adobe presentan menos fisuras que los de piedra, en las zonas de contacto con los muros largos de la nave. Hay también fisuras que se inician en las esquinas de las puertas o ventanas.

Existen tres fuentes de humedecimiento de los muros, cuya acumulación se produce en la parte inferior de los muros por efectos de capilaridad y que no están resueltos aún.

La condición de agrietamiento es moderada, como lo es también el estado de humedecimiento.

La esbeltez de los muros largos es de 4.5, es decir bastante baja y asociada a una buena estabilidad. En la zona de los tímpanos extremos alcanza una esbeltez de 7.0, que siendo alta no constituye un problema mayor de estabilidad. Los vanos más grandes son las puertas de acceso frontal y lateral.

El comportamiento dinámico de la mampostería habrá de ser muy deficiente debido no solo a la baja calidad de bloques y mortero, sino mayormente a la mezcla de materiales rígidos y blandos en los muros (piedras y tierra).

Propuesta de intervención estructural

Los objetivos de la intervención son:

- Mínimo intervención para respetar su valor patrimonial, especialmente en las paredes, que hacia el interior, conservan un valor pictórico excepcional.
- Soluciones de reforzamiento reversibles, sin efectos permanentes para el patrimonio.
- Reforzamiento que controle las fisuras finas asociadas a sismos leves y grietas mayores propias a sismos fuertes.

La selección de refuerzos está influida por la sismicidad moderada del área de Oyón, el grosor y baja esbeltez de los muros y la muy baja calidad de los materiales. De acuerdo a ello, se ha decidido las siguientes intervenciones:

- Colocación de viga collar de madera, semi rígida, en forma de escalerilla horizontal, bien conectada a la parte superior de los muros, concediéndoles continuidad y evitando su volteo.
- Cable superior de acero inoxidable (no galvanizado), para confinar los muros entre sí, controlar los desplazamientos de la fase inelástica o última, que permita una fuerte disipación de energía por fricción.
- Reparación de fisuras mayores.
- Reconstrucción de la caja de la escalera y los contrafuertes, con mampostería de piedra hasta la altura del primer cambio y a partir de ese nivel con mampostería de adobe de buena calidad.
- Reparación de las zonas afectadas en la estructura de techo de madera y reemplazo de la cobertura actual.

Las decisiones anteriores se enmarcan en un diseño basado en criterios de estabilidad, como los desarrollados en el **GSAP**.

Se evitó los refuerzos verticales para no afectar el valor cultural de la pintura mural. El sistema estructural intenta ser redundante.

8. CONCLUSIONES

El esfuerzo de investigación realizado por el proyecto **GSAP** constituye posiblemente el más importante de los realizados en el campo del comportamiento de monumentos históricos de adobe. El carácter multidisciplinar del proyecto, constituye un mérito único en el campo del reforzamiento de monumentos históricos de adobe.

Sin embargo, este trabajo podría no haberse configurado sin la existencia previa de importantes investigaciones como las realizadas en Perú, México y California.

Existen continuos esfuerzos para desarrollar el conocimiento de las estructuras de adobe y necesidad de mayor investigación para entender el comportamiento de las edificaciones de adobe y de mayor difusión para su empleo. Actualmente se está traduciendo al castellano la referencia bibliográfica # 4 para su difusión en Latino América. La mayor urgencia para lograr el reforzamiento de construcciones de adobe, es el logro de la difusión de la información a través de sistemas masivos y universales.

Referencias bibliográficas

1. Casaverde L. y Vargas-Neumann Julio, 1980. Zonificación Sísmica del Perú, PUCP.
2. Vargas-Neumann J. et al. 1984. Resistencia Sísmica de la Mampostería de Adobe. USAID. DI-84. 01, PUCP.
3. Tolles E. Leroy et al. 2000. Seismic Stabilization of Historical Adobe Structures. Final Report of The Getty Seismic Adobe Project. GCI.
4. Tolles E. Leroy et al. 2003. Planning and Engineering guidelines for the Seismic Retrofitting of Historical adobe Structures. GSAP. GCI.
5. Blondet M. y Vargas-Neumann J. 1978. Investigaciones sobre Vivienda Rural. PUCP.
6. Ginell W. and Tolles L. 1999. Preserving Safety and History: The Getty Seismic Adobe Project at work.
7. Vargas-Neumann J. Earthquakes and Earthen Structures. Report. ICCROM. Rome.

Nota:

***Julio Vargas Neumann**. Profesor Principal de la Pontificia Universidad Católica del Perú. Consultor de intervención estructural de monumentos históricos. Cátedra de Cursos Internacionales sobre Conservación Patrimonial. Premio Nacional de Cultura, 1986.

INTERVENCION SISMORRESISTENTE DE ESTRUCTURAS HISTORICAS DE ADOBE. GETTY SEISMIC ADOBE PROJECT

Julio Vargas Neumann*

Figuras

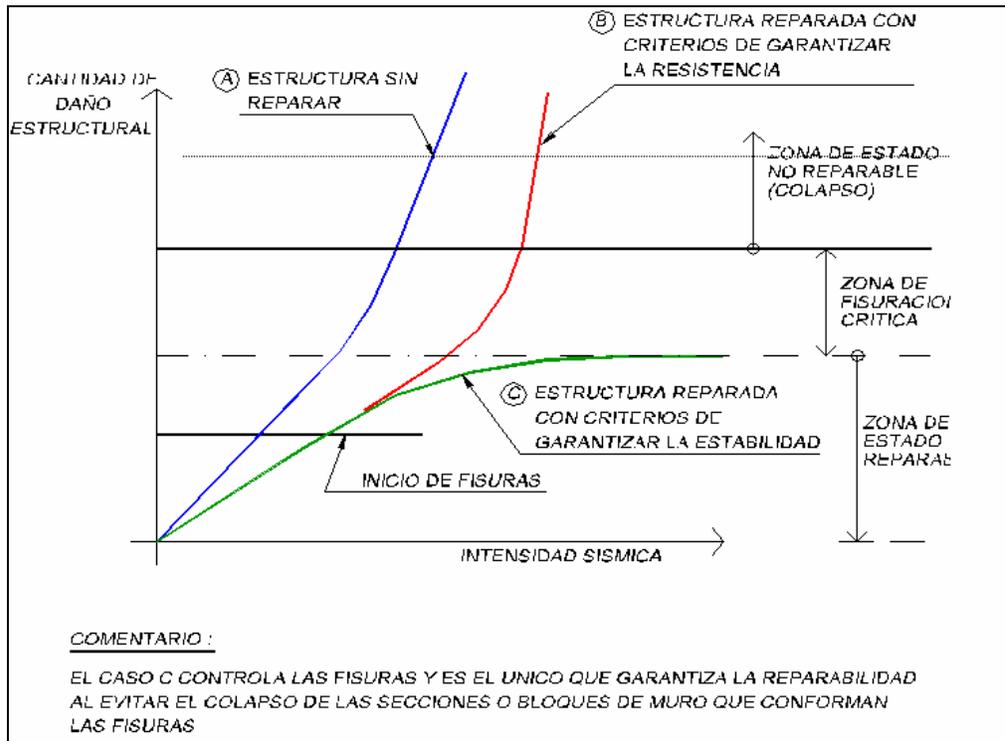


Fig. 1 - Croquis de índice de daño vs. severidad sísmica para estructuras sin refuerzo, diseñadas en base a resistencia y diseñadas en base a estabilidad.

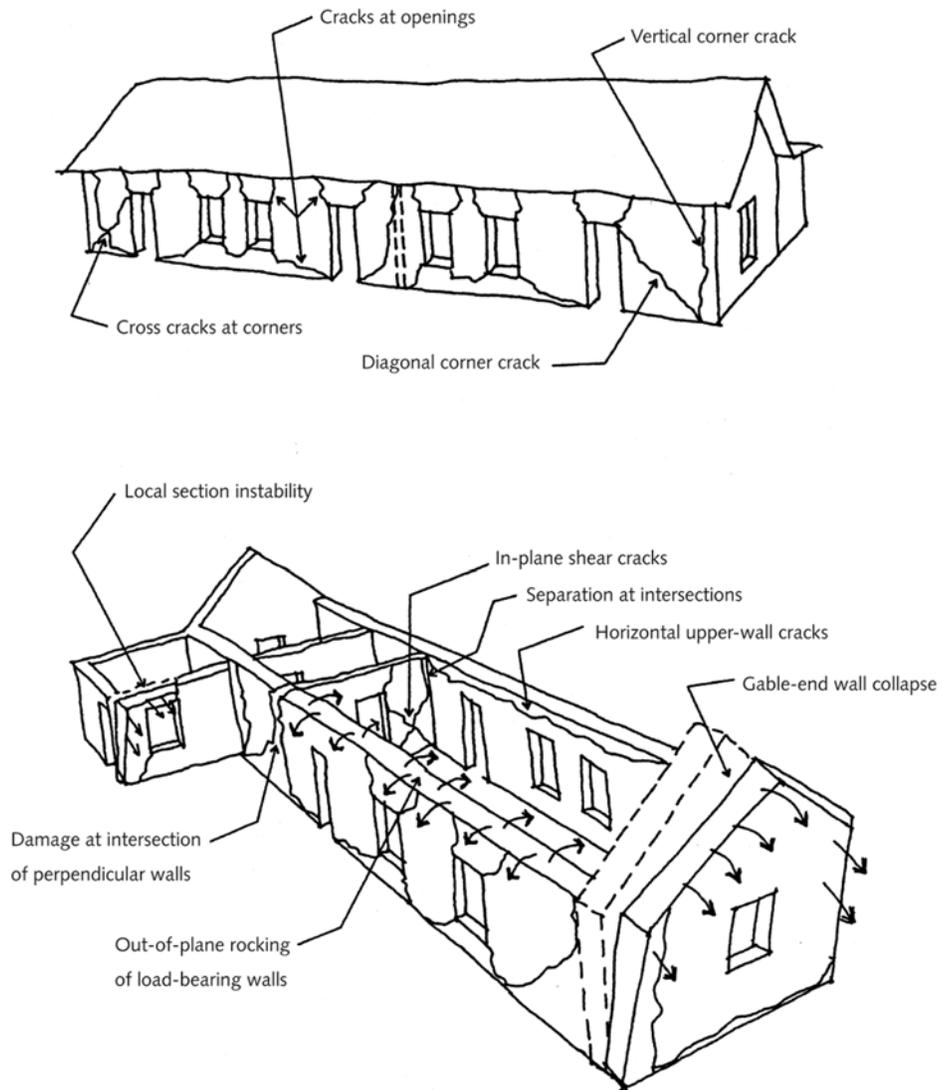


Fig. 2 – Patrones de daño típico observado en los monumentos históricos de adobe en el terremoto de Northridge en 1994.

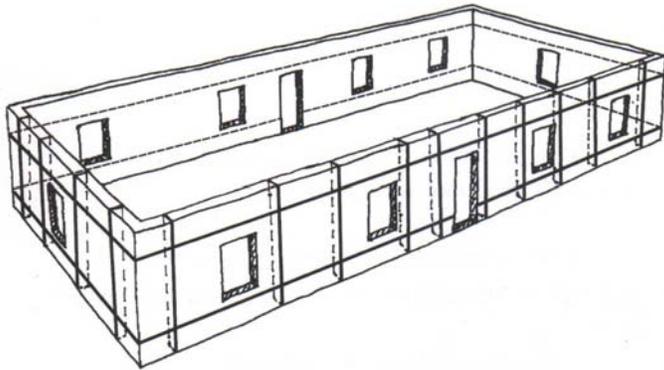


Fig. 3a – Esquema de refuerzos verticales y horizontales que controlarán los desplazamientos de los segmentos de muro entre fisuras.

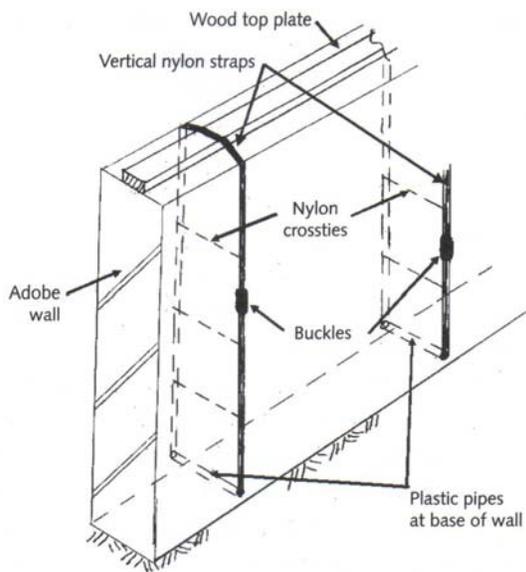


Fig. 3b – Detalle de la unión de los tirantes verticales con sogas de nylon.

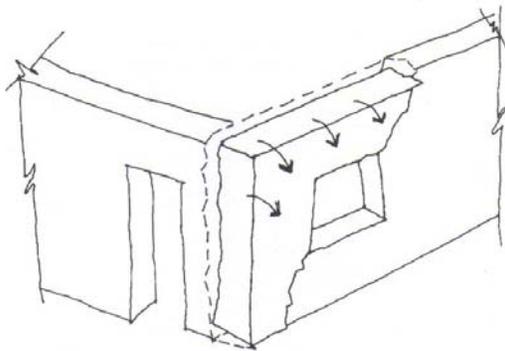


Fig. 3c – Ejemplo de inestabilidad local en un segmento de muro, entre fisuras.

Fig. 3 – Inestabilidad y reforzamiento para el control de desplazamientos.

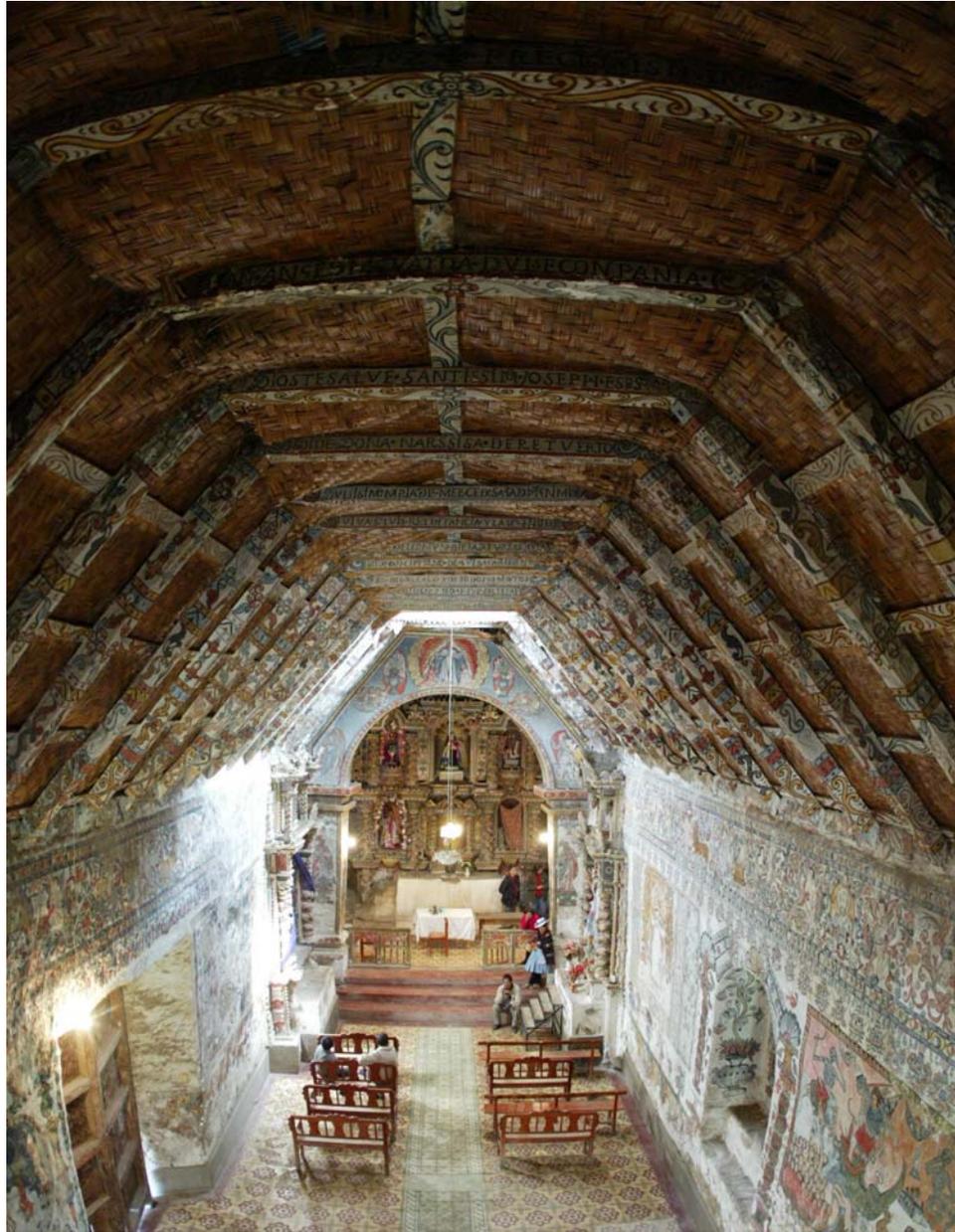


Fig. 4 – Vista interior de la Iglesia de San Cristóbal de Rapaz.