



Ángel San Bartolomé, Daniel Quiun y Luis Zegarra¹

Artículo XIV-18**RESUMEN**

Se plantea un sistema de reforzamiento para viviendas de adobe existentes y una adaptación del mismo para viviendas nuevas, con el objetivo de evitar su colapso ante terremotos severos. El proyecto de investigación experimental fue desarrollado entre 1994 y 1999, con el financiamiento de GTZ de Alemania, la administración de CERESIS y la ejecución por parte de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP). Se estudiaron diversas técnicas de reforzamiento, llegándose a la conclusión que la más apropiada consistía en reforzar los muros con franjas horizontales y verticales de malla electrosoldada, recubiertas con mortero de cemento. La técnica se aplicó con éxito en seis viviendas existentes que fueron sometidas al terremoto del 23 de junio del 2001 ($M_s=7.9$), en tanto que viviendas vecinas de adobe no reforzado tuvieron fuertes daños o colapsaron. Esto dio lugar a varios proyectos de reconstrucción de viviendas nuevas de adobe reforzado en la zona andina del departamento de Arequipa.

ABSTRACT

A reinforcement system for existing adobe houses is presented, as well as an adaptation for new houses, with the objective to prevent their collapse under severe earthquakes. The experimental research project was developed between 1994 and 1999, with the financial support of GTZ of Germany, the administration of CERESIS, and the execution of the Catholic University of Peru (PUCP). Several reinforcement techniques were studied, and it was concluded that the most appropriate was to reinforce the walls with horizontal and vertical strips of wire mesh electrically welded, covered with mortar. The technique was successfully applied in six existing houses that were subjected to the earthquake of June 23, 2001 ($M_s=7.9$), while neighboring dwellings of unreinforced adobe suffered heavy damage or collapsed. This motivated several reconstruction programs of new reinforced adobe houses in the Andean zone of the department of Arequipa.

INTRODUCCIÓN

La década para la Reducción de los Desastres Naturales (1990-2000) declarada por Naciones Unidas, propició el desarrollo de un proyecto de investigación con la participación del Centro Regional de Sismología para América del Sur (CERESIS) y la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP), con el

(1) Departamento de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica del Perú, Av. Universitaria Cdra. 18 s/n Lima 32, PERU, asanbar@pucp.edu.pe, dquiun@pucp.edu.pe, lzegarr@pucp.edu.pe

financiamiento de la Cooperación Técnica Alemana (GTZ). En síntesis, se buscaba dar solución práctica al problema del colapso súbito de las construcciones tradicionales de adobe durante los terremotos, que muchas veces ocasionan pérdidas humanas y materiales (fig. 1). El objetivo más importante era dotar a la vivienda de adobe la resistencia sísmica suficiente para que, ante un terremoto, los pobladores pudieran salir de sus casas antes del colapso.



Fig.1. Destrucción de viviendas de adobe no reforzado en el Perú: sismo de 1970 (izquierda) y de 1996 (derecha).

El problema se centró en las viviendas tradicionales de adobe existentes, que en el Perú suman casi 2 millones según el Censo Nacional de Vivienda de 1993 (INEI, 1993). Dichas viviendas tienen una serie de deficiencias que las hacen vulnerables, como son: material de baja capacidad resistente, ausencia de refuerzos sísmicos, muros y techos de construcción deficiente, falta de mantenimiento, entre otras.

Experimentalmente, mediante ensayos de simulación sísmica en mesa vibradora hechos en el Laboratorio de Estructuras de la PUCP, se estudiaron diversas técnicas de reforzamiento, llegándose a la conclusión que la más apropiada consistía en reforzar los muros con franjas horizontales y verticales de malla electrosoldada, recubiertas con mortero de cemento. Esta malla está compuesta por alambre de 1 mm de diámetro, con espaciamiento de $\frac{3}{4}$ ". La técnica se aplicó con éxito en seis viviendas existentes que fueron sometidas al terremoto del 23 de junio del 2001 ($M_s=7.9$), en tanto que viviendas vecinas de adobe no reforzado tuvieron fuertes daños o colapsaron. Esto dio lugar a varios proyectos de reconstrucción de viviendas nuevas de adobe reforzado en la zona andina del departamento de Arequipa.

REFORZAMIENTO DE VIVIENDAS DE ADOBE EXISTENTES

El proyecto sobre viviendas existentes fue desarrollado entre 1994 y 1999, con el financiamiento de GTZ, la administración de CERESIS y la ejecución por parte del Laboratorio de Estructuras de la PUCP.

Durante la primera etapa, se hicieron ensayos de simulación sísmica en mesa vibradora tanto de muros como de módulos de vivienda, buscando técnicas de reforzamiento externo a los muros de adobe que sean sencillas, económicas y que prevengan el colapso de los muros. Los ensayos preliminares están descritos en Zegarra, Quiun, San Bartolomé, Giesecke (1996). Se probaron distintos tipos de refuerzo: tablas, sogas, malla de gallinero y malla electrosoldada. Se concluyó que para viviendas existentes de un piso se podía lograr el objetivo, reforzando las zonas más débiles (fig.2) que son las esquinas o encuentros entre muros, así como la parte superior de los muros. Para esto, se clavan franjas de malla electrosoldada en forma vertical y horizontal (simulando columnas y vigas) en ambas caras del muro, y se interconectan con alambres que atraviesan los muros a través de perforaciones hechas en la pared, para luego tarrajear las mallas con mortero de cemento: arena 1:4, como se indica en Zegarra *et. al.* (1997) y en la fig.3.

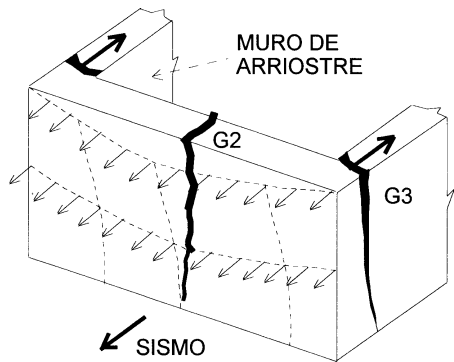


Figura 2. Fallas típicas en viviendas de adobe por acción sísmica perpendicular al plano de los muros: desgarramiento vertical en las esquinas y grieta vertical por flexión en la zona central del muro.



Figura 3. Etapas del reforzamiento en viviendas existentes. Eliminación del tarrajeo y perforaciones en el muro (izquierda), instalación de conectores y malla (centro) y tarrajeo final (derecha).

Por otro lado, debido a que los esfuerzos sísmicos se incrementan con la cantidad de pisos, en las viviendas de dos pisos es necesario enmallar toda la superficie de los muros del primer piso y utilizar franjas de malla en los muros del segundo piso, como se muestra en la fig.4.



Figura 4. Reforzamiento en viviendas existentes de 2 pisos.

En la segunda etapa se buscaron zonas con abundancia de construcciones de adobe en seis departamentos del Perú: Tacna, Moquegua, Ica, Ancash, La Libertad y Cusco, en las que se seleccionaron veinte viviendas existentes a las que se aplicó el sistema de reforzamiento. Esta etapa se cumplió entre setiembre de 1998 y enero de 1999 según Zegarra *et. al.* (1999). Más adelante, el sistema se aplicó similarmente en otros países andinos: Chile, Bolivia, Ecuador y Venezuela, como indica CERESIS (2000).

COMPORTAMIENTO DE LAS VIVIENDAS REFORZADAS EN UN TERREMOTO

El terremoto del 23 de junio del 2001 (magnitud $M_s=7.9$) produjo daños importantes, en especial en las construcciones tradicionales de adobe ubicadas en la zona sur del Perú. En cambio, las seis viviendas reforzadas con el sistema propuesto en este trabajo: 3 en Moquegua, 2 en Tacna y una en Arica (Chile) soportaron el terremoto y sus réplicas sin sufrir ningún daño (fig.5), mientras que viviendas vecinas tuvieron fuertes daños y sus muros colapsaron (fig.6), dejando desprotegidos a sus moradores como se indica en Zegarra *et. al.* (2001).



Figura 5. Viviendas reforzadas en 1998 en Moquegua, después del sismo del 2001. Las viviendas vecinas con fuertes daños carecían de refuerzo.



Figura 6. Colapso total y daños severos producidos por el sismo del 2001 en las viviendas de adobe carentes de refuerzo en Moquegua.

PROGRAMAS DE RECONSTRUCCIÓN DE VIVIENDAS DE ADOBE

El éxito del sistema de reforzamiento ante el terremoto del 2001, dio lugar a varios proyectos de reconstrucción de viviendas nuevas de adobe reforzado en poblados altoandinos del departamento de Arequipa, según GTZ (2002). El más importante se desarrolló en zonas de geografía accidentada. El

proyecto fue financiado por COPASA-GTZ. Dentro de este programa, se han construido más de 350 casas de adobe reforzado para las personas afectadas por el terremoto y 16 módulos de difusión.

La propuesta arquitectónica para el módulo básico empleado en la reconstrucción fue hecha por SENCICO-Arequipa, teniendo en consideración la tipología de las viviendas existentes, particularmente en que los ambientes sean multiusos, de 3.2m en planta como máximo y 2.2m de altura en la parte más baja hasta 3.0m en la parte más alta, con muros de 0.4m de espesor y techo inclinado ligeramente. El módulo es de 2 ambientes, con unos 36m² de área en planta, e incluye la puerta principal y ventanas metálicas, techo de viguetas de madera, cobertura de calamina o teja de microconcreto, atada a las viguetas para evitar su desprendimiento por la acción vibratoria de los sismos.

La arquitectura del módulo básico se aprecia en la fig. 7, en la que se nota la ubicación de las franjas verticales de malla electrosoldada cubiertas de mortero de cemento, mientras que la viga solera de concreto pobre ($f'c = 100 \text{ kg/cm}^2$) hace las veces de dintel en puertas y ventanas. Este módulo se concibió de modo que puede adaptarse a los diferentes terrenos y que en las futuras etapas de ampliación puedan hacerse réplicas de este módulo básico. La ubicación del vano de puerta es intercambiable con un vano de ventana, de acuerdo a las características del terreno donde se ubique el módulo.



Figura 7. Arquitectura de las viviendas reforzadas construidas por COPASA en Arequipa.

Las mejoras estructurales, indicadas en la fig.8, incluyeron: 1) el uso de cimientos corridos y sobrecimientos, ambos de concreto ciclópeo; 2) la mejora en el procedimiento constructivo, como el humedecimiento de las adobes al asentarlos, el uso de escantillón para controlar el grosor de las juntas en 2 cm, la instalación de los conectores en las juntas verticales cubriéndolos con mortero de cemento; y, 3) la introducción de una viga solera de concreto armado reforzado con 2 varillas de diámetro 3/8". En los extremos de esta viga solera, coincidentes con el encuentro entre muros ortogonales, se incluyeron unos "dientes" de concreto simple con la finalidad de evitar el deslizamiento de la viga durante movimientos

sísmicos. Esta viga tiene el propósito de conectar los muros, y en caso que en un sismo severo colapsen las zonas del muro sin reforzar, la viga continúe soportando el techo, al apoyarse sobre las esquinas de la casa que están reforzadas con malla electrosoldada.



Humedecimiento en el asentado



Instalación de conectores



Uso de escantillón



Refuerzo en solera



Cimentación y sobrecimiento de concreto ciclópeo



Diente de concreto

Figura 8. Mejoras estructurales en viviendas nuevas de adobe.

En base a los planos de arquitectura y de estructuras, COPASA se encargó de producir un manual técnico didáctico para apoyar las labores de construcción (fig.9). Este manual explica paso a paso las actividades a seguir en la construcción de la vivienda, pasando por la ubicación adecuada de la casa, el trazado y replanteo, la selección de la tierra para el adobe, la elaboración de las unidades, el asentado de

los adobes, la ubicación de los conectores, la preparación y corte de la malla, su colocación, el modo de construir la viga solera, la inclinación y el armado del techo, la cobertura, la colocación de puertas y ventanas, el tarrajeo de la zona con mallas, los pisos, etc.



Figura 9. Manual para la construcción de viviendas de adobe reforzado, CTAR/COPASA (2002).

En el año 2002, GTZ-COPASA contrató los servicios del Laboratorio de Estructuras de la PUCP, para ensayar en mesa vibradora un módulo de un ambiente, construido por personal de COPASA, empleando materiales provenientes de Arequipa, bajo las especificaciones indicadas en Manual indicado en la fig.9. Este módulo presentó la misma densidad de muros que una vivienda real y fue sometido a la acción de sismos leves, moderados, severos y catastróficos.

El módulo soportó con daños moderados la acción del sismo severo, establecido por la Norma Sismorresistente peruana E-030 (SENCICO, 1997) y quedó al borde del colapso después del sismo catastrófico (fig.10), que generó la rotura por cizalle del diente de concreto ubicado en las esquinas.



Figura 10. Comportamiento del módulo durante el movimiento sísmico catastrófico (izquierda), después del ensayo (centro) y rotura del diente de concreto (derecha).

De este ensayo se obtuvo como conclusión que el comportamiento sísmico del sistema propuesto de adobe reforzado incluso puede mejorarse aún más, para que la vivienda pueda soportar sismos catastróficos, introduciendo espigas verticales que conecten la cimentación con las mallas electrosoldadas

para reducir el balanceo observado en la fig. 10 (izquierda), y por otro lado, reforzando los dientes también con espigas verticales, para controlar la falla por corte-fricción observada en la fig. 10 (derecha).

En forma paralela, el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) suscribió un contrato con el Servicio Nacional de Normalización, Capacitación e Investigación para la Industria de la Construcción (SENCICO), para la ejecución de las obras de reconstrucción en la zona oriental de la Provincia de Arequipa. Se obtuvo financiamiento del gobierno de la República de Italia a través del PNUD, y el apoyo de instituciones locales como la Municipalidad de Arequipa y la Universidad Nacional San Agustín (SENCICO, 2003). En este proyecto se han construido casi 100 viviendas, la mayoría con techos a una agua y en menor cantidad con techo a dos aguas, con cobertura de calamina, manteniendo el esquema arquitectónico de la fig 7.

La fig. 11 muestra vistas de las viviendas construidas por el proyecto SENCICO-PNUD, donde cabe destacar la correcta disposición de las instalaciones eléctricas por el exterior de los muros y techos, a fin de mantener la estructura de los muros intacta.



Figura 11. Vivienda construida por el Convenio PNUD-SENCICO.

CONCLUSIONES

Mediante soluciones sencillas y económicas, este proyecto ha demostrado que es posible dotar a las viviendas de adobe existentes y nuevas de refuerzo que permita atenuar los efectos destructivos provocados por los sismos severos, protegiendo la vida de los pobladores de bajos recursos económicos.

Para las viviendas existentes, es necesario que antes de reforzarlas con el sistema propuesto, éstas cumplan con las limitaciones que se indican en CERESIS (2000), como por ejemplo, que las bases de los muros no estén socavadas por intemperismo; que los techos no estén muy deteriorados, etc.

Para el caso de viviendas nuevas, se recomienda una serie de condiciones para su correcta ubicación, como por ejemplo, que no estén en zonas de deslizamientos de cerros, que no estén cerca de barrancos, y que no se construyan al lado de casas vecinas con daños.

Si bien COPASA y SENCICO han acogido la difusión de esta técnica construyendo casi quinientas viviendas en Arequipa, los esfuerzos son aún pequeños para los millones de viviendas de adobe existentes en zonas sísmicas del mundo, por lo que es necesario contar con apoyo de gobiernos e instituciones de todo nivel para difundir técnicas como la presentada en este artículo.

RECONOCIMIENTOS

Los autores desean agradecer el apoyo financiero brindado por la Agencia de Cooperación Alemana GTZ, a COPASA por haber recogido la propuesta de reforzamiento de viviendas existentes y aplicarla con mejoras en la reconstrucción postsismo de viviendas de adobe, y a SENCICO-Arequipa por su participación en la elaboración del proyecto de las viviendas nuevas.

Mención especial debemos hacer reconociendo la labor del Ing. Alberto Giesecke, director de CERESIS, quién concibió la idea de darle seguridad sísmica a las viviendas de los pobladores de menores recursos económicos.

REFERENCIAS

CERESIS (2000), “Reforzamiento Sismo-Resistente de Viviendas de Adobe Existentes en la Región Andina”, <http://www.ceresis.org/proyect/padobe.htm>

CTAR/COPASA, GTZ, PUCP y SENCICO (2002) “Terremoto? ¡Mi casa sí resiste! – Manual de construcción para viviendas sismo resistentes en adobe”, 2da. Edición, mayo.

GTZ (2003) “Perú – Proyecto de reconstrucción con inclusión de la gestión de riesgo”, Eschborn, Alemania, marzo.

INEI (1993) “Censos Nacionales: IX de Población y IV de Vivienda”, Instituto Nacional de Estadística e Informática, Lima, Perú.

SENCICO (1997) “Reglamento Nacional de Construcciones, Norma Técnica de Edificación E.030 – Diseño Sismorresistente”, Lima, Perú, octubre.

SENCICO (2003) “Construcción de Módulos Básicos de Vivienda en Adobe Reforzado”, Convenio PNUD-SENCICO, Arequipa, Perú, enero.

Zegarra L, Quiun D, San Bartolomé A y Giesecke A (1996), “Reconditioning of Existing Adobe Houses to Mitigate Earthquake Effects”, *Memorias, 11th World Conference on Earthquake Engineering*, Acapulco, Mexico, junio.

Zegarra L, Quiun D, San Bartolomé A y Giesecke A (1997), “Reforzamiento de viviendas de adobe existentes. 1ra. Parte: Ensayos sísmicos de muros U” y “Reforzamiento de viviendas de adobe existentes. 2da. Parte: Ensayos sísmicos de módulos” Colegio de Ingenieros del Perú, *Ponencias, XI Congreso Nacional de Ingeniería Civil*, Trujillo, Perú, noviembre, Artículo No. E-36 y E-37.

Zegarra L, Quiun D, San Bartolomé A y Giesecke A (1999), “Reforzamiento de viviendas existentes de adobe – Proyecto Ceresis-GTZ-PUCP”, Colegio de Ingenieros del Perú, *Ponencias, XII Congreso Nacional de Ingeniería Civil*, Huanuco, Perú, noviembre, Artículo No. EC-13.

Zegarra L, Quiun D, San Bartolomé A (2002), “Comportamiento ante el terremoto del 23-06-2001 de las viviendas de adobe reforzadas en Moquegua, Tacna y Arica”, *VIII Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica*, Valparaíso, Chile, CDROM Vol. 1, abril.