

LA TIERRA ARMADA: 35 AÑOS DE INVESTIGACIÓN EN LA PUCP

Marcial Blondet*, Julio Vargas, Nicola Tarque y José Velásquez

Pontificia Universidad Católica del Perú
Departamento de Ingeniería / Sección Ingeniería Civil
Av. Universitaria cdra. 18 s/n, San Miguel, Lima, PERÚ
Tel.: +511 626 2000; E-mail: mblondet@pucp.edu.pe

Tema 5: Comportamiento y resistencia de los edificios

Palabras clave: Adobe, Tierra, Sismo, Refuerzo, Tradicional, Perú

Resumen

En muchos países en vías de desarrollo la alternativa de vivienda más común para sus pobladores es la construcción con tierra, pues el material es tradicional, abundante y barato. La construcción de viviendas de tierra en estos países es mayormente informal, con poca o ninguna asesoría técnica. En las zonas sísmicas donde se construye con tierra, cada vez que ocurre un terremoto colapsan muchas construcciones de adobe, causando considerables pérdidas económicas y lamentables pérdidas de vidas. Por ejemplo, en los terremotos de Huaraz (Perú) de 1970 y en el de Bam (Irán) del 2003, decenas de miles de personas perecieron trágicamente, aplastadas por sus viviendas de tierra.

Las comunidades académicas y profesionales de algunos países sísmicos donde se construye con tierra no han permanecido impasibles frente a esta grave situación. En el Perú se viene investigando la construcción con tierra en áreas sísmicas. Este artículo describe la evolución del conocimiento de la tierra como material de construcción durante treinta y cinco años de estudio, observación e investigación experimental realizados por un equipo de profesores del Departamento de Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP). En esta trayectoria, va tomando forma el concepto de tierra armada, material compuesto por tierra seca y refuerzos compatibles. Las propiedades mecánicas de la tierra armada permiten lograr construcciones sismorresistentes. Finalmente, se da una mirada al futuro de este material, se comentan sus posibilidades y se mencionan algunas cuestiones por resolver.

1. Introducción

El Perú está ubicado en el centro sísmico de Sudamérica, donde confluyeron sucesivamente tres culturas con tradición de construcción con tierra: la pre-inca, la inca y la española. Las tecnologías imperantes fueron la mampostería de adobe, el tapial, y la quincha.

Desde hace 35 años los profesores del Departamento de Ingeniería de la PUCP complementaron sus labores docentes con tareas de investigación. Desde el principio, ellos tuvieron la preocupación de investigar la estabilidad de las construcciones de tierra en áreas sísmicas y estudiaron experimentalmente las características mecánicas de la tierra simple y las técnicas y materiales de refuerzo para mejorar la seguridad sísmica de las viviendas de tierra. Esta fue la etapa original de la Tierra Armada o SismoAdobe. Este artículo describe brevemente los resultados de la actividad desarrollada e intenta sugerir líneas de acción para el futuro.

2. Tierra simple

La tierra como material constructivo tiene su origen en el descubrimiento que la tierra húmeda se endurece al secarse y alcanza una resistencia importante a la compresión. La construcción con tierra se hace extensiva porque el material es fácilmente accesible y permite lograr espacios con bondades ambientales, pues las casas de tierra tienen una alta capacidad de aislamiento acústico y térmico frente a situaciones extremas de frío o calor. Su construcción sin consumo de energía agotable las convierte en

edificaciones ecológicamente compatibles con la naturaleza. Las casas de tierra bien concebidas y construidas, pueden ser bellas por sus formas rústicas y grandes espesores de muros y también pueden ser perdurables como lo demuestran los numerosos ejemplos de construcciones históricas.

La tierra seca, gracias a la presencia de arcilla, ofrece una resistencia grande a la compresión. Tiene, sin embargo, escasa resistencia a la tracción. Los muros, que son los elementos estructurales más importantes de las construcciones de tierra, poseen buena capacidad resistente a cargas de gravedad y son estables frente al volteo. Cuando ocurre un sismo se generan en ellos esfuerzos sísmicos de tracción que la tierra simple es incapaz de soportar. Los muros se agrietan y se separan en pedazos que luego se caen, arrastrando consigo a los techos. Las fallas sísmicas de los muros de tierra simple son frágiles, súbitas, y fatales para los habitantes (Fig. 1).

La construcción con tierra en el Perú es de tierra simple, sin ningún refuerzo sísmico, y se emplea principalmente en el área rural y en las zonas suburbanas de algunas ciudades. Existen también un importante stock de construcciones de tierra urbanas, construidas en el pasado y en ciudades, como Cuzco, que están creciendo primordialmente construidas en tierra.

3. Tierra armada

Es posible mejorar la resistencia sísmica de los muros de tierra simple si se les incorporan refuerzos compatibles resistentes a la tracción. Este material compuesto es la tierra armada. Hasta ahora se han probado experimentalmente varios materiales compatibles con la tierra: cañas, sogas naturales o artificiales, tubos de PVC y mallas plásticas. Se podría estudiar la posibilidad de utilizar elementos delgados de madera, ramas de árboles u otros materiales sintéticos flexibles y resistentes. Existen testimonios históricos de la durabilidad de los refuerzos de caña en Caral y Chan Chan, donde se han encontrado vestigios de una tecnología que tiene características semejantes a la tierra armada y que han durado hasta la fecha.

Las construcciones en tierra armada deben incluir refuerzos continuos en todos los muros porque las acciones sísmicas podrían causar esfuerzos de tracción en cualquier parte de la estructura. Los refuerzos podrán ser internos o externos, en ambas caras de los muros completamente recubiertos con un enlucido que los integre al muro.

La tierra armada puede conducir a estructuras que poseen gran capacidad de deformación. Se espera que durante un terremoto aunque los muros de tierra armada tengan fisuras apreciables, ellos podrán mantener su capacidad de deformación y continuar soportando las cargas de gravedad y sísmicas.

4. Investigaciones de la PUCP en tierra armada

Desde la década del 70 los profesores del Departamento de Ingeniería de la PUCP han tenido la preocupación de investigar la estabilidad de las construcciones de tierra en áreas sísmicas. Los primeros trabajos se orientaron a determinar las características mecánicas de la mampostería de adobe mediante ensayos estáticos de muros. Entre 1973 y 1978 se utilizó una plataforma inclinable para ensayar estáticamente módulos de vivienda a escala natural y probar distintos materiales de refuerzo, como caña, madera y alambre (Corazao y Blondet 1973). También se estudió el comportamiento mecánico de la mampostería de adobe mediante ensayos de compresión, de tracción (tipo brasilero), de compresión diagonal, y de corte y flexión en muros a escala natural (Blondet y Vargas 1978).

El refuerzo más eficiente fue logrado mediante la colocación de cañas verticales enteras al interior de los muros, espaciadas $1\frac{1}{2}$ veces el espesor de los muros, y amarradas a

franjas de caña chancada colocadas cada cuatro hiladas de mortero. Las mallas de refuerzo interior de caña natural mejoraron la resistencia y la capacidad de deformación de los muros y los módulos de adobe ensayados (Fig. 2).

Para entender mejor la influencia de las propiedades de los materiales en la resistencia de la mampostería de adobe, se desarrolló en 1983 un proyecto con el financiamiento de USAID (Vargas et al. 1983a,b). Se realizaron 246 ensayos de compresión diagonal y cinco muros a escala natural. Las principales conclusiones fueron que el mortero es responsable de la integración de la mampostería, que la arcilla es el componente más importante del suelo para construir con tierra ya que provee la ligazón entre mortero y adobes, que sin embargo la arcilla produce la contracción por secado que causa las fisuras del mortero, y que se puede controlar estas fisuras mediante la adición de paja o arena gruesa al mortero.

También se realizaron los primeros ensayos sísmicos en módulos de viviendas de adobe utilizando la mesa vibradora (Vargas et al 1984). Se ensayaron módulos de vivienda sin techo, con y sin refuerzo interior de caña, según las recomendaciones del Reglamento Nacional de Construcciones (OIN 1977). Los módulos reforzados tuvieron caña vertical colocada cada 0,45 m y caña chancada horizontal cada cuatro hiladas y una viga solera superior de madera. Los módulos fueron instrumentados con sensores de desplazamiento y de aceleración y sometidos a sismos simulados de amplitud creciente. La principal conclusión fue que ante un sismo severo las construcciones no reforzadas colapsan luego de la separación de los muros en las esquinas (Fig. 3a). El refuerzo interior de caña horizontal y vertical, combinado con una viga de coronación de madera, impide la separación de los muros y mantiene la integridad, aún ante repetidos sismos severos (Fig. 3b). Estos resultados ratificaron la eficacia de la tierra armada con mallas internas de caña para evitar la falla frágil de las construcciones de tierra simple.

La caña, sin embargo, es difícil de conseguir en cantidad suficiente para realizar programas masivos de construcción de viviendas.

En 1994 se inició un proyecto financiado por la Cooperación Alemana al Desarrollo (GTZ) para encontrar un refuerzo para las viviendas de tierra existentes. Se buscó aumentar la resistencia sísmica de las viviendas de tierra mediante refuerzos externos, que retardarían el colapso sísmico de las viviendas para así salvar la vida de sus ocupantes. Entre 1994 y 1997 se hicieron ensayos de simulación sísmica en seis muros en forma de C y en cinco módulos de vivienda. Se probaron refuerzos exteriores utilizando sogas, tablas de madera, mallas de gallinero y mallas electrosoldadas de acero. Se desarrolló un sistema de refuerzo exterior colocado en ambas caras de los muros, consistente en franjas de malla electrosoldada embutidas en un tarrajeo de cemento y arena y ubicadas verticalmente en las esquinas y horizontalmente en la parte superior de los muros. El sistema desarrollado aumenta el nivel de seguridad sísmica de las viviendas de tierra, ya que se incrementa la resistencia de los muros, se controla su desplazamiento y se pospone el colapso (Zegarra et al 1997 a, b, 1999, 2001). Se logró, por tanto, el objetivo propuesto. Este sistema de refuerzo permitiría que las casas de tierra puedan resistir sismos leves y moderados. Sin embargo, no se evitaría el colapso de las viviendas en terremotos severos, porque produce fallas súbitas y frágiles.

Recientemente se inició una nueva línea de investigación para desarrollar sistemas de refuerzo de muros de adobe utilizando materiales industriales. Un primer proyecto encontró que los materiales industriales permiten lograr un comportamiento sísmico comparable al obtenido con los refuerzos de caña, con lo que se ha corroborado la posibilidad del uso de refuerzos plásticos para conseguir construcciones sismorresistentes de adobe (Blondet et al. 2004). Con soporte del Instituto Getty de Conservación se realizaron ensayos de simulación sísmica en módulos reforzados: uno con malla de plástico colocada en toda la superficie exterior e interior de los muros y el

otro con refuerzo exterior de caña vertical y soga horizontal. En ambos se colocó estucos sólo a $\frac{1}{2}$ módulo. Este proyecto ha demostrado la importancia de tener los refuerzos embutidos en estucos de barro para lograr el trabajo conjunto de tierra seca y refuerzo, con lo que se consigue un excelente desempeño sísmico de los muros (Torrealva y Acero 2005).

El refuerzo con geomalla ha demostrado ser efectivo y actualmente se está optimizando la cantidad. Se ha obtenido buenos resultados en el módulo parcialmente reforzado con geomalla que fue ensayado durante el Seminario Internacional SismoAdobe2005 en la PUCP (Fig. 4).

5. Comentarios y recomendaciones

Los trabajos realizados en los últimos 35 años en la PUCP han establecido fundamentos sólidos para el futuro desarrollo del material tierra armada con el que se pueden construir muros de tierra sismorresistentes. Las especificaciones técnicas para el diseño sismorresistente en tierra armada deberán terminar de definirse en los siguientes lustros.

En la tierra armada, el trabajo conjunto de la tierra seca con los refuerzos de material compatible, se asegura por la disposición en malla de los refuerzos embutidos en ella. Cuando se trata de dos mallas exteriores embebidas en estucos de tierra, éstas deben envolver completamente los muros y estar unidas entre sí con sogas naturales o artificiales que atraviesen los muros. Los estucos deben tener estar protegidos de la intemperie, tener el espesor suficiente para garantizar la integración del refuerzo y la tierra, y podrán ser realizados con barro con alto contenido de pajas o fibras que no impida la evaporación de la humedad interna del muro.

Durante un sismo, la fase de comportamiento elástico de los muros estructurales de tierra armada es muy breve, porque la tierra se fisura a un nivel muy bajo de esfuerzos de tracción. La integración entre la tierra y los refuerzos permite un comportamiento adecuado de los muros en su fase inelástica. Entonces, los muros trabajan fisurados y las mallas de refuerzo controlan la expansión de las fisuras y el desprendimiento de pedazos de muro. La falla de los muros de tierra armada entonces no es frágil y se produce sin colapso sísmico.

El diseño de edificaciones en tierra armada debe realizarse en muros anchos, poco esbeltos, plantas con habitaciones de preferencia cuadradas, distribución simétrica, y ventanas centradas y pequeñas, tal como se especifica actualmente para la construcción con tierra simple (MTC 2000). El refuerzo de mallas continuas es imprescindible y debe ser adicional a los demás refuerzos recomendados para las construcciones de tierra, como la viga collar superior y los dinteles continuos y flexibles sobre los vanos de puertas y ventanas.

Las mallas de refuerzo deben ser de materiales compatibles con la mampostería de tierra y deben estar embebidas en los muros o en los estucos tierra, de manera que envuelvan todos los muros y los unan entre sí. Las mallas de refuerzo deben también conectar la viga collar superior con la cimentación para confinar verticalmente los muros.

Es factible convertir una construcción existente de mampostería de tierra simple (adobe o tapial), en una de tierra armada, mediante la colocación de mallas exteriores compatibles, embutidas en nuevos estucos de barro.

La construcción con tierra armada permitirá reducir el inaceptable riesgo sísmico de millones de personas en el mundo cuya única alternativa es vivir en casas de tierra.

Bibliografía

Blondet, M.; Vargas, J. (1978): "Investigación sobre vivienda rural". Convenio con el Ministerio de Vivienda y Construcción. PUCP, Lima, Perú.

Blondet, M.; Torrealva, D.; Villa-García, G.; Ginocchio, F.; Madueño, I. (2004): "Reforzamiento de construcciones de adobe con elementos producidos industrialmente: Estudio preliminar". PUCP, Lima, Perú.

Corazao, M.; Blondet, M. (1973): "Estudio experimental del comportamiento estructural de las construcciones de adobe frente a solicitaciones sísmicas". Banco Peruano de los Constructores, Lima, Perú.

MTC (2000): "Reglamento Nacional de Construcciones. Adobe: Norma Técnica de Edificación E-080". Ministerio de Transportes, Comunicación, Vivienda y Construcción (MTC). Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción (SENCICO), Lima, Perú.

OIN (1977): "RNC. Normas de diseño sismo-resistente". Oficina de Investigación y Normalización. Ministerio de Vivienda y Construcción, Lima, Perú.

Torrealva, D.; Acero, J. (2005): "Refuerzo sísmico de vivienda de adobe con malla exterior compatible". Seminario Internacional de Arquitectura, Construcción y Conservación de Edificaciones en Tierra en Áreas Sísmicas, *SismoAdobe2005*. PUCP, Lima, Perú.

Vargas, J.; Bartola, J.; Blondet, M.; Villa-García, G.; Ginocchio, F. (1983a): "Propiedades del suelo para elaborar albañilería de adobe". Seminario Latinoamericano de Construcciones Sismo-Resistentes de Tierra. PUCP, Lima, Perú.

Vargas, J.; Bartola, J.; Blondet, M.; Villa-García, G.; Ginocchio F. (1983b): "Investigación científica innovativa: Edificaciones de adobe en áreas sísmicas". Proyecto AID 936/5542. PUCP, Lima, Perú.

Vargas, J.; Bartola, J.; Blondet, M. (1984): "Resistencia sísmica de la mampostería de adobe". Publicación DI-84-01. PUCP, Lima, Perú.

Zegarra, L.; Quiun, D.; San Bartolomé, A.; Giesecke, A. (1997a): "Reforzamiento de viviendas de adobe existentes. Primera parte: Ensayos sísmicos de muros U". XI Congreso Nacional de Ingeniería Civil. Colegio de Ingenieros del Perú, Trujillo, Perú.

Zegarra, L.; Quiun, D.; San Bartolomé, A.; Giesecke, A. (1997b). "Reforzamiento de viviendas de adobe existentes. Segunda parte: Ensayos sísmicos de módulos". XI Congreso Nacional de Ingeniería Civil. Colegio de Ingenieros del Perú, Trujillo, Perú.

Zegarra, L.; Quiun, D.; San Bartolomé, A.; Giesecke, A. (1999): "Reforzamiento de viviendas existentes de adobe". Proyecto Centro Regional de Sismología para América del Sur (CERESIS) - Cooperación Alemana al Desarrollo (GTZ) - Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP). XII Congreso Nacional de Ingeniería Civil. Colegio de Ingenieros del Perú, Huanuco, Perú.

Zegarra, L.; Quiun, D.; San Bartolomé, A. (2001): "Comportamiento ante el terremoto del 23-06-2001 de las viviendas de adobe reforzadas en Moquegua, Tacna y Arica". XIII Congreso Nacional de Ingeniería Civil. Colegio de Ingenieros del Perú, Puno, Perú.

El Dr. Marcial Blondet es profesor principal del Departamento de Ingeniería y Decano de la Escuela de Graduados de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP). Obtuvo el título de Ingeniero Civil en la PUCP (1973) y los grados de Magister (1979) y de Doctor en Ingeniería Civil (1981) en la Universidad de California, Berkeley. El Dr. Blondet tiene amplia experiencia en el estudio experimental del comportamiento sísmico de edificaciones de tierra.

LA TIERRA ARMADA: 35 AÑOS DE INVESTIGACIÓN EN LA PUCP

Marcial Blondet*, Julio Vargas, Nicola Tarque y José Velásquez

Figuras



Fig. 1 - Casas de adobe destruidas por el sismo de Huaraz, Perú, 1970



Fig. 2 – Refuerzo interior de caña



Fig. 3a - Módulo sin refuerzo

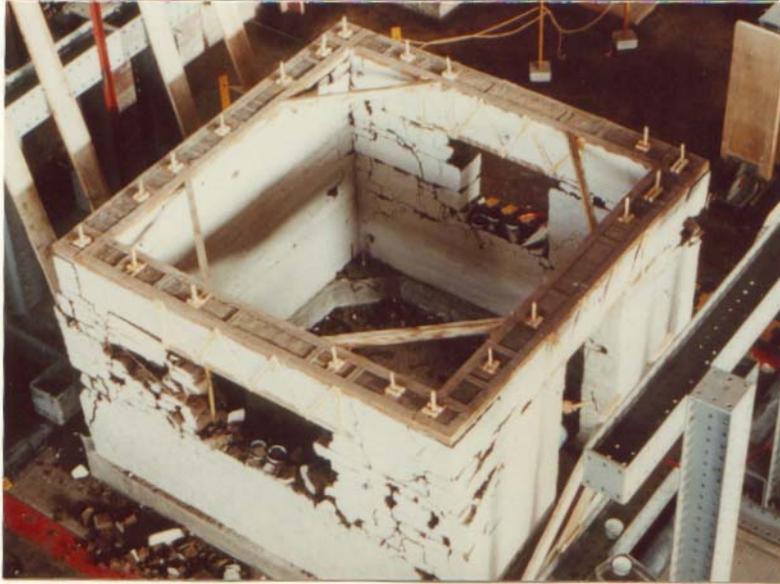


Fig. 3b - Módulo reforzado

Fig. 3 – Ensayos en mesa vibradora de módulos de adobe



Fig. 4 - Módulo reforzado con malla exterior de plástico