

COMPORTAMIENTO DE VIVIENDAS DE ADOBE SOMETIDAS A TERREMOTOS

Marcial Blondet (1); Gladys Villa Garcia(2); César Loaiza (3)

- (1) Ph.D., Ing. Civil, Director de Investigaciones, Pontificia Universidad Católica del Perú, Departamento de Ingeniería, Sección Ingeniería Civil.
- (2) Ing. Civil, Jefa del Laboratorio de Estructuras, Pontificia Universidad Católica del Perú, Departamento de Ingeniería, Sección Ingeniería Civil.
- (3) Ing. Civil, Profesor Contratado, Pontificia Universidad Católica del Perú, Departamento de Ingeniería, Sección Ingeniería Civil.

PALABRAS CLAVE: Terremoto, Adobe, Construcción con tierra.

KEYWORDS: Earthquake, Adobe, Earthen construction.

RESUMEN

Se presentan brevemente las características s micas de las construcciones con tierra tradicionales y construidas actualmente en Perú. Se resumen las principales investigaciones llevadas a cabo en la Pontificia Universidad Católica del Perú sobre el comportamiento de estructuras de tierra sometidas a terremotos, y se discuten propuestas de refuerzo para mejorar la seguridad s mica de viviendas de tierra nuevas y existentes.

1 - INTRODUCCIÓN

Desde que el hombre emplea su inteligencia para protegerse de la agresividad del medio ambiente, utiliza el suelo como el principal componente en la elaboración de sus viviendas. Este material tiene excelentes propiedades de aislamiento térmicas y acústicas, es fácil de trabajar y la naturaleza lo ofrece gratis y en abundancia. La construcción con tierra ha sido y sigue siendo la única alternativa viable de construcción para grandes sectores de la población de países en vías de desarrollo.

Los terremotos constituyen la acción natural más desafiante para la construcción de tierra. El colapso de viviendas de tierra como consecuencia de los sismos ha traído consigo, además de cuantiosas pérdidas materiales, la muerte de miles de seres humanos (Fig. 1). Esto se debe a que, desde el punto de vista estructural, la tierra no es un buen material para la construcción de viviendas en áreas s micas. Los muros de tierra tienen una masa considerable, por lo que atraen fuerzas de inercia grandes; son débiles, por lo que no las pueden resistir; y son frágiles, por lo que se fracturan prácticamente sin aviso.



Fig. 1 – Colapso total de viviendas de tierra.

En Perú, el terremoto de Huaraz (Ancash, Perú) de 1970 produjo aproximadamente 40,000 muertos debido al colapso del 90% de las viviendas adobe de la zona afectada (Fig. 2). Esta tragedia inició una toma de conciencia en la comunidad académica acerca de la magnitud del problema s mico de las construcciones de tierra.



Fig. 2a – Casma (Ancash) antes del sismo de 1970

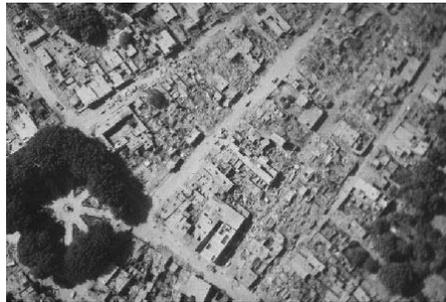


Fig. 2b – Casma (Ancash), después del sismo de 1970.

Desde los años 70, la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP) y otras instituciones del país han desplegado un esfuerzo considerable para estudiar el comportamiento sísmico de las construcciones de tierra y para hallar técnicas sencillas para reducir su vulnerabilidad sísmica. La destrucción ocurrida en viviendas de adobe durante los terremotos peruanos más recientes, como el de Nazca de 1996 y el de Arequipa del año pasado demuestran, sin embargo, que los esfuerzos de investigación realizados no han llegado a beneficiar a los usuarios (Fig. 3). Aunque se han desarrollado técnicas sencillas y confiables para el diseño y construcción de viviendas de tierra, éstas no se utilizan y la mayoría de las construcciones de adobe que se construyen en el Perú son sumamente vulnerables ante los terremotos.



Fig. 3 – Daños en viviendas de adobe. Terremotos de Nazca (1996) y Arequipa (2001).

2 - EL MAESTRO SISMO

Al comparar los efectos destructores de los terremotos sobre las construcciones de adobe de Perú con los producidos por eventos sísmicos en otras regiones del mundo, tales como el sismo de El Salvador en 1982 o el de India en 1987, se aprecia que las formas de falla de las viviendas de tierra son similares (Fig. 4). Las lecciones se repiten independientemente del lugar porque las formas constructivas son semejantes, los errores son los mismos y las consecuencias, lamentablemente, también.



Fig. 4 – Daños en viviendas de tierra. Terremotos de El Salvador (1982) e India (1987).

Los terremotos son, entonces, los grandes maestros de la construcción. Ellos detectan y revelan, implacablemente, los errores cometidos. Un estudio de las construcciones de tierra antiguas, que han sobrevivido a terremotos de gran intensidad, parece ser importante para conocer cuales son las características estructurales deseables para obtener una adecuada seguridad sísmica.

2.1 - Construcciones de tierra antiguas

El Perú tiene una larga tradición de construcción con tierra (actualmente, la tierra es el material de construcción predominante en ese país. Según cifras del último Censo Nacional de Población y Vivienda, en 1993 el 43% de viviendas eran de adobe o tapial; de ellas, aproximadamente el 50% son construcciones rurales [Tejada, 2001]). Muchas construcciones importantes muy antiguas son hasta ahora testimonio de la habilidad de los peruanos para construir edificaciones de tierra sismorresistentes.

Entre los restos arquitectónicos de la cultura Mochica (200 a 600 dC) en la costa norte de Perú, se encuentran la Huaca del Sol y la Huaca de la Luna, ubicadas cerca de la ciudad de Trujillo. Se estima que los mochicas utilizaron 50 millones de adobes para construir la Huaca del Sol, una estructura de 228 por 135 metros de base y de 48 metros de altura. De menores dimensiones (60 m x 80 m de base y 21 m de altura), la Huaca de la Luna se encuentra en mejor estado de conservación, y se pueden ver todavía las hermosas decoraciones de algunos de sus muros (Fig. 5).



Fig. 5 – Huaca de la Luna. Trujillo, Perú. (Fotos: www.huacas.com).

Una muestra impresionante de la tradición de adobe en el Perú la constituye el complejo arqueológico de Chan Chan, ubicado en el valle de Moche, en la costa Norte del Perú. Definido como la ciudadela de adobe más extensa del mundo, ocupó una extensión de 20 km² y fue construido entre los siglos XIII y XV, empleando unidades de adobe rectangulares y trapezoidales dispuestas formando largos muros de hasta 9 metros de altura con una base de 3 metros de espesor. Muchos muros de adobe están decorados con pinturas murales y figuras en relieve de aves, peces y elementos geométricos (Fig. 6).

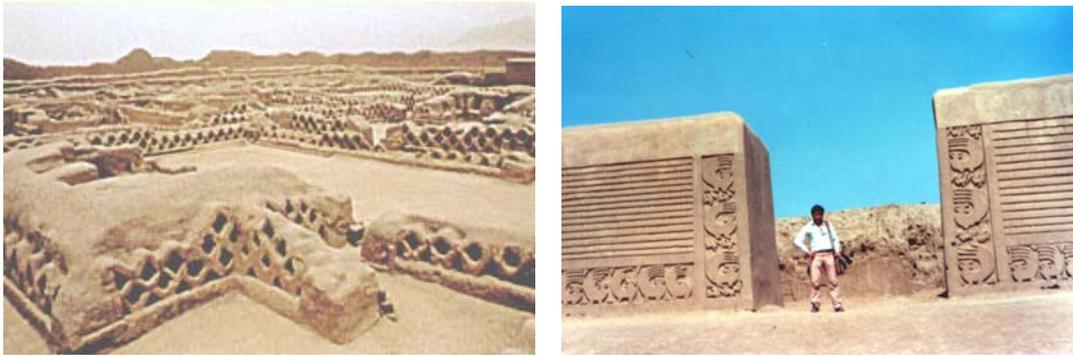


Fig. 6 – Ciudadela de Chan Chan, Perú.

A partir de la época colonial en Perú, al uso ya tradicional del adobe, se agregó la quincha como técnica de construcción. La quincha consiste en marcos de madera con relleno interior de caña entrelazada y revestidos en ambas caras con una mezcla de barro o yeso. Para edificar casas de dos pisos se utilizaba el adobe para el primero, con muros muy anchos y con pocas aberturas, y se construía el segundo piso de quincha, con estructura liviana, resistente y flexible (Fig. 7a). Hasta principios del siglo pasado, se construía casas y mansiones elegantes en adobe (Fig. 7b).



Fig. 7a – Casas coloniales de dos pisos (adobe y quincha). Lima, Perú.



Fig. 7b – Casa de adobe. Siglo XX. Trujillo, Perú.

2.2 - Construcciones de tierra “modernas”

Aun en nuestros días, la forma habitual de construir estas viviendas en las ciudades más pequeñas y en el campo comienza con la fabricación comunal de los adobes, en la que participan varones y mujeres, según la tradición de la “minka” que data del incanato. La construcción de las viviendas se hace por los propios usuarios, sin ninguna asistencia técnica (Fig. 8).



Fig. 8a – La construcción con adobe en el Perú hoy.

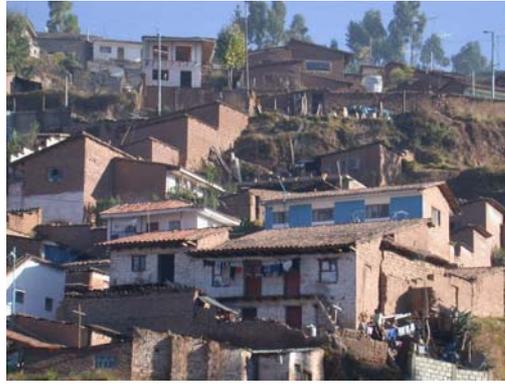


Fig. 8b – La construcción con adobe en el Perú hoy.

La memoria de la gente es corta. A pesar de los terribles daños causados por terremotos pasados, se pueden encontrar construcciones recientes de adobe de hasta tres pisos, con formas arquitectónicas y estructurales más propias de la albañilería de ladrillo (Fig. 9). Estas viviendas son sumamente vulnerables sísmicamente y con toda seguridad colapsarán en el próximo terremoto fuerte.



Fig. 9 – Viviendas de adobe de tres pisos.

2.3 - Fallas estructurales durante terremotos

Las fallas en las construcciones de tierra pocas veces se deben a cargas verticales o de gravedad exclusivamente. Cuando esto ha sucedido, es porque la capacidad resistente de los muros se ha visto disminuida debido a la acción lenta y silenciosa de la humedad, hasta producirse la falla repentina del muro [Vargas, 1986].

Las fallas más comunes en los muros de adobe son producidas por las fuerzas sísmicas horizontales. Estas fuerzas pueden ser perpendiculares al plano de los muros y generar flexión. Los esfuerzos de tracción por flexión tienden a producir grietas verticales en las esquinas o encuentros de muros perpendiculares, ocasionando la separación de los muros y dejándolos libres para desplomarse o voltearse (Fig. 10a y 10b). Una vez que colapsa uno de estos muros, el techo cae indefectiblemente.



Fig. 10a – Agrietamiento de esquina.



Fig. 10b – Falla por volteo.

Cuando las fuerzas horizontales actúan paralelamente al plano del muro, generan fallas por esfuerzo cortante que generalmente presentan un patrón de agrietamiento diagonal que sigue las juntas verticales y horizontales de los adobes (Fig. 11). Este efecto se debe generalmente a que el mortero que une a los adobes está fisurado como consecuencia de la contracción de secado y a la mala técnica constructiva.



Fig. 11 – Grietas diagonales por corte en los muros.

2.4 - Enseñanzas sísmicas

Este recuento sumario de la construcción con tierra en Perú indica que las formas constructivas en tierra han ido modificándose a lo largo de la historia. En las construcciones antiguas que han sobrevivido predominan los muros anchos y aberturas muy pequeñas. En las viviendas actuales, por razones de economía del terreno y por vana imitación de la arquitectura de ladrillo cocido, se presentan muros esbeltos y aberturas cada vez mayores.

Los terremotos recientes, a manera de maestros, se han encargado de evidenciar de la manera más dramática que las construcciones “modernas” de adobe sin refuerzo son sumamente vulnerables a los embates sísmicos. Aunque el Perú cuenta desde hace varios años con una norma para la edificación de viviendas de tierra sismorresistente [ININVI, 1987], ésta casi nunca se aplica, pues los habitantes de viviendas de tierra son muy pobres y no pueden afrontar el gasto de un ingeniero estructural.

Si se acepta que debido al factor económico involucrado, la construcción con adobe es una realidad en Perú y en otros países en desarrollo que se encuentran en áreas sísmicas, es indispensable reducir su vulnerabilidad sísmica reforzando los muros con elementos dúctiles.

3 - INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL

3.1 Trabajos iniciales

A partir del terremoto de Mayo de 1970, la Pontificia Universidad Católica del Perú inició la investigación experimental acerca del comportamiento estructural de las construcciones de adobe ante la sollicitación sísmica.

En 1973, se utilizó por primera vez el método estático de ensayo de estructuras de tamaño natural en una mesa inclinable [Blondet, 1973]. Sobre una plataforma de concreto se construyeron módulos de cuatro paredes de adobe con diferentes disposiciones de vanos. La idea era analizar los tipos de colapso de cada modelo. En este primer estudio se determinaron coeficientes sísmicos estáticos entre 0.23 g y 0.29 g y se logró reproducir los tipos

de colapso observados en estructuras reales. En etapas sucesivas, se probaron distintos tipos de refuerzo, incrementándose el coeficiente sísmico estático hasta 0.42 g (Fig. 12).

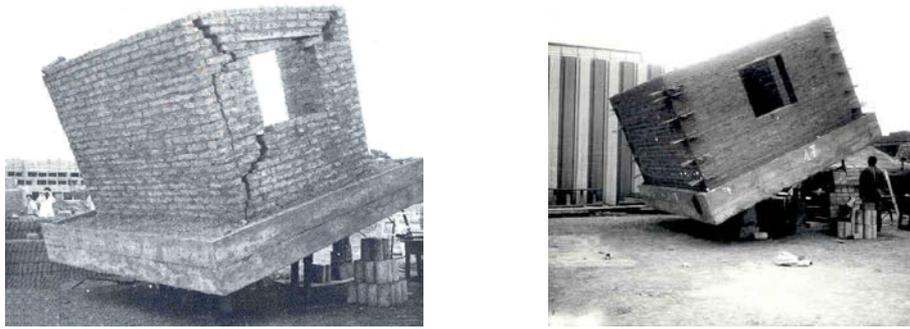


Fig. 12 – Módulos de adobe sin refuerzo y con refuerzo de caña en plataforma inclinable.

Los refuerzos empleados pretendieron mejorar la resistencia y ductilidad de los muros. Se emplearon materiales sencillos y económicos como madera, caña y alambre. Se logró incrementar significativamente la ductilidad de los muros de adobe mediante el empleo de refuerzo vertical y horizontal de caña. La presencia del refuerzo incrementaba a casi el doble la carga horizontal máxima resistida y, lo que es más importante, incrementaba en casi 6 veces la deformación lateral del muro reforzado en comparación con el muro sin refuerzo (Fig. 13). Esto significó dotar de cierta ductilidad a la albañilería de adobe, frágil por naturaleza [Vargas, 1981].

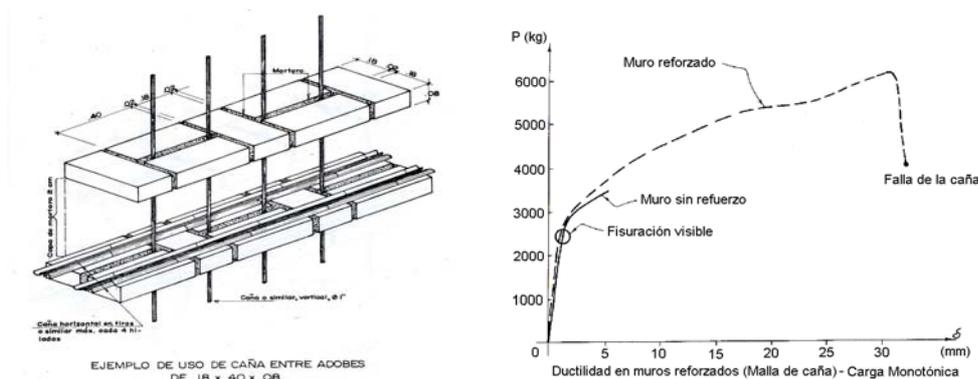


Fig. 13 – Efecto del refuerzo de caña en la resistencia al corte de muros de adobe.

3.2 - Investigaciones en el Laboratorio de Estructuras Antisísmicas

A través de un proyecto de cooperación técnica con el gobierno de los Países Bajos, en 1984 se consiguió la implementación del Laboratorio de Estructuras Antisísmicas de la PUCP. El equipo más importante con el que cuenta el laboratorio es un simulador de sismos unidireccional en el que se pueden ensayar módulos de vivienda a escala natural.

Uno de los primeros proyectos desarrollados para investigar el comportamiento sísmico de las construcciones de adobe fue financiado por la Agencia para el Desarrollo Internacional (USAID). Se recogieron muestras de suelo de seis zonas del Perú con la finalidad de correlacionar sus características físicas, químicas y mineralógicas con la resistencia sísmica de la albañilería de adobe construida con cada suelo. Las principales conclusiones de esta investigación fueron que la arcilla es el componente más importante del suelo ya que provee la ligazón entre mortero y adobes. Sin embargo, el contenido de arcilla también incrementa la contracción por secado, que causa la fisuración del mortero. Se determinó que una manera de controlar la microfisuración debida a la contracción por secado es mediante la adición de ichu o paja y, en menor grado de arena gruesa al mortero (Fig. 14) [Vargas 1983, Bariola, 1985].

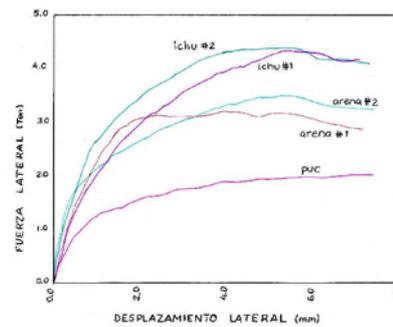


Fig. 14 – Efecto de la adición de arena o paja en el comportamiento ante cargas laterales.

Los proyectos de investigación siguientes realizados en el laboratorio tuvieron como objetivo principal determinar técnicas de refuerzo para reducir la vulnerabilidad sísmica de las construcciones de adobe. A continuación se presentan los resultados más relevantes.

4 - PROPUESTAS DE REFUERZO

4.1 Refuerzo interior de caña

Se realizaron varias investigaciones con el simulador de sismos para corroborar los resultados obtenidos con ensayos estáticos. En una primera etapa se construyeron módulos sin techo, de 3.30 m x 3.30 m en planta, con muros de 2.0 m de altura y 0.30 m de espesor. Los muros estaban reforzados con caña vertical cada 45 centímetros y caña chancada horizontal cada cuatro hiladas. Se colocó una viga solera superior de madera. Los módulos fueron instrumentados con sensores de desplazamiento y de aceleración (Fig. 15).



Fig. 15 – Construcción e instrumentación de módulo de adobe con refuerzo de caña.

Los módulos fueron sometidos a sismos simulados de amplitud máxima creciente. Se ensayaron dos módulos reforzados y uno sin reforzar. En el módulo sin refuerzo durante el sismo de 70 mm (0.4g) la frecuencia natural se redujo de 12 a 8 Hz (o sea que la rigidez lateral se redujo al 40% de la inicial) y luego bajó bruscamente a 1.8 Hz (valor correspondiente a muros vibrando libremente) cuando las paredes se separaron en las esquinas. El módulo colapsó abruptamente durante el sismo de 100 mm (se retiraron los instrumentos antes de este ensayo). En el caso de los módulos reforzados la degradación de la rigidez fue gradual, se llegó a alcanzar el desplazamiento máximo del simulador de 140 mm. Las aceleraciones máximas en la base alcanzaron 1.1 g y 1.6 g y los desplazamientos máximos relativos fueron del orden de 90 mm en el extremo superior de la pared transversal y de 50 mm en el extremo de la pared paralela al movimiento. Ninguno de los módulos reforzados llegó a colapsar, a pesar de las altas aceleraciones y desplazamientos alcanzados. Estos ensayos corroboraron que es indispensable reforzar las construcciones de adobe para evitar su colapso estructural [Bariola, 1985].



Fig. 16 – Ensayos de simulación sísmica de módulos de adobe sin y con refuerzo de caña.

4.2 - Refuerzo exterior de alambre

En 1994 se inicia la búsqueda de soluciones para reducir la vulnerabilidad de viviendas de adobe construidas sin refuerzo alguno. A través de un Convenio con el Centro Regional de Sismología para América del Sur (CERESIS) y con el financiamiento de la fundación GTZ de Alemania se llevó a cabo una investigación para desarrollar técnicas sencillas que permitiesen reforzar externamente viviendas existentes de adobe para tratar de retardar su colapso ante un terremoto severo [Zegarra, 1997 y 1999]. Se probaron distintos materiales de refuerzo como tablas de madera, sogas, malla de alambre tipo gallinero y malla electrosoldada. Para investigar la influencia de los refuerzos sobre el comportamiento sísmico de los muros de adobe, se realizaron ensayos de simulación sísmica en muros en forma de “U”. Con estos ensayos se determinó que la malla electrosoldada con cocada de $\frac{3}{4}$ de pulgada y 1 mm de diámetro, era muy efectiva. La malla fue clavada con chapas metálicas contra el adobe, colocada en franjas horizontales y verticales simulando vigas y columnas. Luego se tarrajeó el área reforzada con mortero de cemento y arena. Este resultado se corroboró posteriormente mediante ensayos de simulación en módulos que representaban viviendas de adobe ubicadas en la Costa y en la Sierra del Perú, comparando el refuerzo propuesto con la construcción tradicional (Figs. 17a e 17b).



Fig. 17a – Refuerzo de malla de alambre electrosoldada.



Fig. 17b – Ensayos de muros en U.

El proyecto concluyó con el refuerzo de 16 viviendas prototipo en diversas localidades. Dos de las viviendas reforzadas, ubicadas en Moquegua, sufrieron los embates del sismo del 2001. En este “ensayo real”, ante el gran Maestro Terremoto, las dos viviendas reforzadas demostraron su eficacia, pues fueron las únicas en sus respectivos pueblos que no sufrieron daño alguno, y fueron empleadas como refugio inicial [Zegarra, 2001]. Esta constatación *in situ* de los resultados experimentales es extraordinariamente importante (Fig. 18).

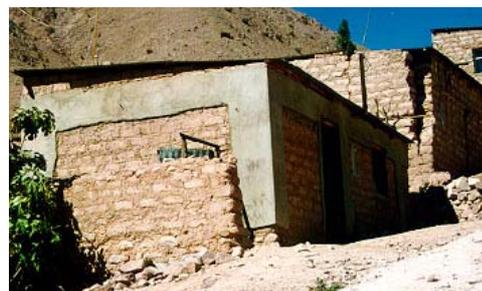


Fig. 18 – Vivienda de adobe en Moquegua antes y después del sismo del 2001.

5 - RETOS A FUTURO

Si bien pareciera que se ha logrado el gran objetivo obtener técnicas de refuerzo sencillas, usando materiales adecuados, para mejorar el comportamiento sísmico de las construcciones nuevas o existentes de adobe, lamentablemente la realidad no confirma este planteamiento. Por una parte está la idiosincrasia del poblador, que persiste en sus métodos de construcción tradicionales y se resiste a incorporar refuerzo en sus construcciones nuevas. Admira la construcción con ladrillo y trata de imitarla y por ello considera que su vivienda de adobe será provisional, sin percibir el peligro de no invertir en la seguridad de esa vivienda que seguramente lo albergará toda su vida.

Por otra parte, el refuerzo propuesto de caña sólo tiene sentido en zonas donde la caña se produce. Además, en programas de construcción masiva, aún en zonas donde existe caña, es imposible disponer de la cantidad suficiente para que constituya una alternativa viable de solución. El refuerzo externo con malla electrosoldada tiene un costo de alrededor de US\$200 por vivienda típica de un piso. Este monto es sumamente elevado, si se considera el nivel de ingreso del poblador que tiene este tipo de vivienda.

Parece por lo tanto que es necesario desarrollar técnicas de refuerzo sísmico usando materiales de producción industrial y de bajo costo, que resulten además aceptables por los usuarios. Se debe seguir investigando la manera de reforzar viviendas a un costo accesible.

Para lograr estos objetivos, no sólo se requiere hacer un gran esfuerzo adicional de investigación experimental, sino también conseguir apoyo gubernamental e internacional para desarrollar e implementar estrategias de difusión y de empleo de las técnicas propuestas.

6 - REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARIOLA, Juan; BLONDET, Marcial; TORREALVA, Daniel; VARGAS, Julio. *Comportamiento Dinámico de Viviendas de Adobe*. Proyecto financiado por la Agencia Internacional para el Desarrollo (US AID), Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima 1985.

BLONDET, Marcial; CORAZAO, Miguel. *Estudio Experimental del Comportamiento Estructural de las Construcciones de Adobe Frente a Solicitaciones Sísmicas*. Publicado por el Banco Peruano de los Constructores, Lima, 1973.

HERNÁNDEZ, Oscar; MELI, Roberto; OTTAZZI, Gianfranco; VARGAS, Julio. *Investigación Cooperativa de Construcciones de Adobe. Perú – México*. Proyecto PNUD-Unesco-Cinda, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, 1980.

ININVI. *Norma Técnica de Edificación E-80*. Instituto Nacional de Investigación y Normalización de la Vivienda, Lima, Julio 1987.

OTTAZZI, Gianfranco; YEP, Juan; BLONDET, Marcial; VILLA GARCIA, Gladys; GINOCCHIO, Juan. *Ensayos de Simulación Sísmica de Viviendas de Adobe*. Publicación DI-89-01, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Marzo 1989.

TEJADA, Urbano. *Buena Tierra*. CIDAP, Lima, Agosto 2001.

VARGAS, Julio; BARIOLA, Juan; BLONDET, Marcial. *Propiedades del Suelo para Elaborar Albañilería de Adobe*. Memorias del Seminario Latinoamericano de Construcciones de Tierra en Áreas Sísmicas, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Mayo 1983.

VARGAS, Julio; HEREDIA, Ernesto; BARIOLA, Juan; MEHTA, Povindar. *Preservación de las Construcciones de Adobe en Areas Lluviosas*. Publicación DI-86-02, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Mayo 1986.

VARGAS, Julio; OTTAZZI, Gianfranco. *Investigaciones en Adobe*. Publicación DI-81-01, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Junio 1981.

ZEGARRA, Luis; QUIUN, Daniel; SAN BARTOLOME, Angel; GIESECKE, Alberto. *Reforzamiento de Viviendas de Adobe Existentes*. Proyecto Ceresis-GTZ-PUCP, XI Congreso Nacional de Ingeniería Civil, Trujillo, 1997.

ZEGARRA, Luis; QUIUN, Daniel; SAN BARTOLOME, Angel; GIESECKE, Alberto. *Reforzamiento de Viviendas Existentes de Adobe*. Proyecto Ceresis-GTZ-PUCP, XII Congreso Nacional de Ingeniería Civil, Huánuco, 1999.

ZEGARRA, Luis; SAN BARTOLOME, Angel; QUIUN, Daniel. *Comportamiento Ante el Terremoto del 23-06-2001 de las Viviendas de Adobe Reforzadas en Moquegua, Tacna y Arica*. DI-CIC-2001-08, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Diciembre 2001.