

PROPUESTA DE DISEÑO SÍSMICO PARA LA MAMPOSTERÍA DE ADOBE CONFINADO

SEISMIC DESIGN PROPOSAL FOR CONFINED ADOBE MASONRY

Ángel San Bartolomé (1) y Daniel Quiun (1)

1 Profesor Principal de la Pontificia Universidad Católica del Perú

asanbar@pucp.edu.pe, dquiun@pucp.edu.pe

Resumen

En el Perú y en otros países sísmicos, las construcciones de mampostería de adobe son muy vulnerables ante los sismos, afectando sobre todo a pobladores de bajos recursos. Los estudios para mitigar este problema han sido hechos mediante el uso de mallas internas de cañas o mallas externas de alambres electrosoldadas o similares. En los años recientes se ha desarrollado una serie de ensayos de laboratorio para estudiar el uso de confinamientos de concreto armado, tratando al adobe como una mampostería de baja calidad. Para construcciones nuevas de hasta dos pisos, se ha desarrollado una propuesta de diseño sísmico de viviendas de adobe confinado con columnas y vigas de concreto de baja calidad y escaso refuerzo, la cual se basa en el diseño sísmico por desempeño de las edificaciones de mampostería de ladrillo. Se emplea un concreto pobre con refuerzo mínimo, lo cual hace que la propuesta de diseño sea viable para gente de escasos recursos económicos.

Palabras-clave: Adobe, confinamientos, diseño sísmico, mampostería, edificaciones

Abstract

In Peru and other seismic countries, the adobe masonry constructions are very vulnerable under earthquakes, affecting specially to people of less economic resources. To mitigate this problem, studies made have been with the use of internal meshes of cane or external meshes of wire or similar. In recent years a series of laboratory tests have been performed to study the use of reinforced concrete confinements, treating adobe as low quality masonry. For new constructions up to two stories, a seismic design proposal has been developed for adobe houses confined by reinforced concrete columns and beams, which is based on the seismic performance-based design for brick masonry buildings. A poor concrete with minimum reinforcement is employed, so that the design proposal can be viable for people of less economic resources.

Keywords: Adobe, confinements, seismic design, masonry, buildings

1. INTRODUCCIÓN

Las edificaciones de adobe son muy utilizadas en los países andinos desde tiempos antiguos. Según el último Censo Nacional de Vivienda (INEI 2007) el 35% de las viviendas en el Perú (más de 2.2 millones) son de tierra cruda. Los sucesivos terremotos han demostrado la gran vulnerabilidad de las edificaciones de adobe tradicionales, que carecen de refuerzos ante acciones sísmicas. La destrucción masiva con muertes y pérdidas de infraestructura son frecuentes en los terremotos, con especial énfasis en los últimos 40 años.

Después del terremoto de 1970 (M7.8) que afectó la costa centro norte del Perú, se iniciaron diversas investigaciones conducentes a dotar de resistencia sísmica a las construcciones de adobe. En particular, se han estudiado en forma experimental diversos tipos de refuerzo como cañas interiores, mallas de alambre y mallas poliméricas, en las que se tiene el refuerzo distribuido en toda o gran parte de la superficie de los muros. Además, en tiempos recientes se ha investigado experimentalmente el comportamiento sísmico de construcciones de adobe confinadas por elementos de concreto armado, de uno y dos pisos. El buen resultado obtenido de tales ensayos, motivó la redacción de una propuesta de norma para el diseño sísmico y construcción del adobe confinado. Esta propuesta consiste en tratar al adobe como una mampostería de ladrillo de baja calidad.

2. NORMAS PERUANAS DE ADOBE Y REFUERZOS SÍSMICOS

El Perú es uno de los pocos países en el mundo que tiene una Norma para diseño y construcción con adobe. Desde las primeras normas sísmicas peruanas de 1977 se incluyó un capítulo dedicado al adobe, lo mismo que a la mampostería de ladrillos, concreto armado, acero y madera. La primera norma independiente de la mampostería de adobe (ININVI 1987), incluyó como refuerzos sísmicos en los muros solamente a las cañas ubicadas en forma vertical y horizontal (Fig.1). A pesar que los muros y módulos reforzados con caña y ensayados en el simulador de sismos han demostrado un adecuado comportamiento, su implementación en el campo ha sido dificultosa. Los cambios constructivos conducentes a la inclusión de las cañas al interior del muro de adobe son radicales. Entre los más destacados se tiene el tamaño de la unidad, el uso de un aparejo distinto al tradicional y la necesidad de amarrar las cañas horizontales con las verticales. Por tanto, esta propuesta de refuerzo sísmico en adobe sólo ha sido posible en proyectos específicos, muchas veces con control de ingenieros en obra, mientras que en la construcción popular no ha sido utilizada.

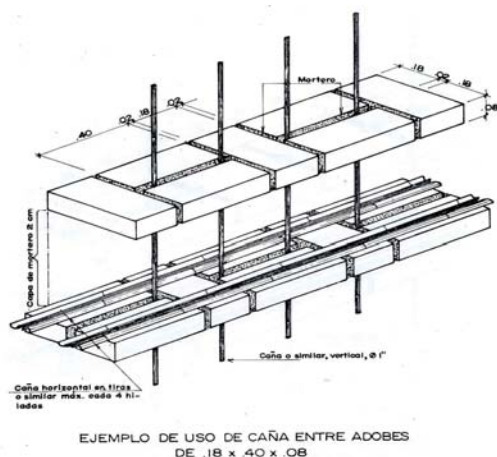


Fig. 1. Uso de cañas como refuerzo en el interior de los muros de adobe.

El terremoto de Nazca, Perú del 12 de noviembre de 1996 (M7.0) trajo consigo mucho daño en construcciones de adobe tradicionales sin refuerzo, afectando a la zona centro sur de la costa peruana (Quiun *et al.* 1997). La reconstrucción de casas de adobe con refuerzo de caña se volvió una tarea imposible. Las cañas por ser materiales naturales, no están disponibles ni en la calidad ni en la cantidad requerida para afrontar programas de construcción masiva. En el recorrido por la zona afectada de Nazca, en cambio se pudo observar una estructura de muros de adobe muy esbelta, que resistió el terremoto sin daños, gracias a una viga de concreto que le proporcionó como arriostre (Fig.2). Este hecho se suma a otras construcciones empíricas de adobe rodeado de confinamientos de concreto armado en el Perú. Además, en México se tuvo también una experiencia exitosa de muros de adobe confinados sin daños (Fig.3), en el terremoto de Ometepec (EERI 1995).



Fig.2. Nazca, Perú, 1996. Adobe confinado sin daños (izq.) y tradicional sin confinar con abundantes daños (der.)



Fig.3. Ometepec, México, 1995. Adobe confinado (izq.) y sin confinar (der.)

Luego, se reformó la norma peruana de adobe. La nueva versión (SENCICO 2000) incorporó tres tipos de refuerzo: cañas, concreto armado y mallas de alambre. Las mallas de gallinero se usaron como refuerzo exterior a los muros en una investigación experimental (Torrealva 1986). Luego, el refuerzo con malla de alambres electrosoldados recubierta con mortero, simulando vigas y columnas de confinamiento, fue muy efectivo en modelos de adobe ensayados en mesa vibradora. Este sistema se empleó en proyectos piloto de refuerzo en 20 viviendas existentes en Perú (Zegarra *et al.*, 1999). Seis de estas viviendas resistieron sin daños el sismo del 2001 (Zegarra *et al.*, 2001), ratificándose este excelente comportamiento en otras 4 viviendas en el sismo de Pisco del 2007 (Quiun *et al.* 2009).

Sobre los confinamientos de concreto armado, no se tenía mayor experiencia más que las observaciones empíricas y el buen criterio de ingeniería. Con ello, en la Norma de Adobe E.080 del 2000 se estableció: la utilización de columnas de concreto armado como confinamiento de muros de adobe para casos en que el espesor del muro no exceda de 25cm y se utilice para unir los adobes un mortero que contenga cemento que permita anclar mechas de alambre de ¼” cada tres hiladas, para conseguir una adecuada transmisión de esfuerzos entre el muro y la columna. La utilización de vigas soleras de concreto armado, en forma de anillos cerrados, tiene como objetivo arriostrar horizontalmente a los muros y contribuir a formar un diagrama rígido en el nivel en que se construya.

3. INVESTIGACIONES EXPERIMENTALES EN ADOBE CONFINADO

La técnica de refuerzo y de construcción que se plantea, es similar a la que se utiliza en la albañilería de arcilla cocida confinada, pero, esta vez empleando concreto de baja resistencia y refuerzo mínimo. El sistema de confinamiento fue empleado con éxito en muros y modelos de adobe ensayados en el Laboratorio de Estructuras Antisísmicas de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP).

3.1. Modelo de Adobe Confinado de un Piso

Matos et al (1997), investigaron el comportamiento sísmico de un modelo de adobe confinado con columnas y vigas de concreto armado, de un piso, mediante un ensayo de simulación sísmica en mesa vibradora. La conexión de las columnas con el muro de adobe fue dentada, excepto en una esquina donde se empleó mechas de anclaje. La Fig.4 muestra las dimensiones del modelo y algunos detalles del refuerzo.

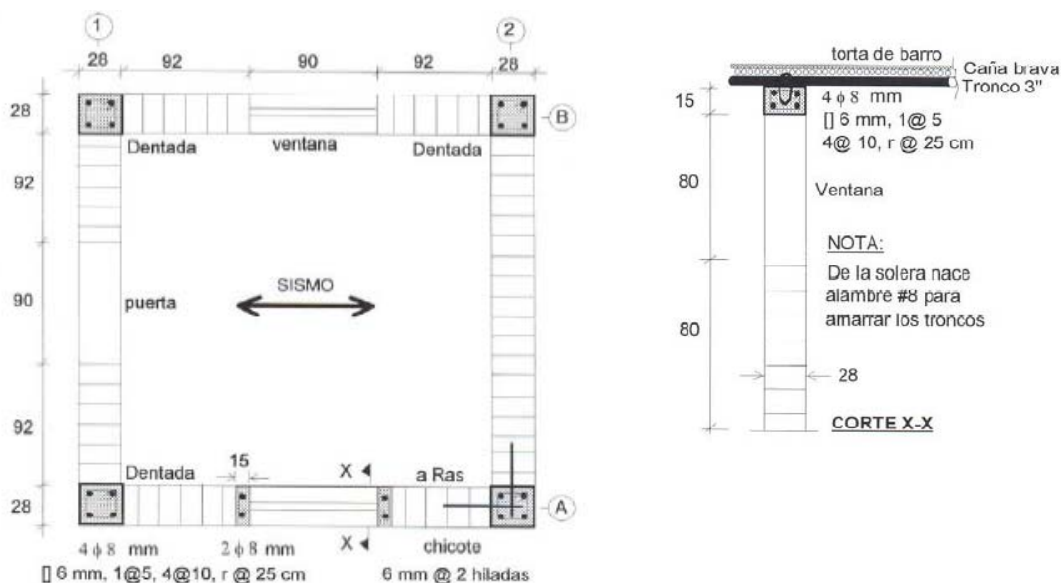


Fig. 4. Geometría y refuerzo de modelo de adobe de un piso ensayado en mesa vibradora en 1997.

El modelo resistió movimientos de gran intensidad en seis fases, hasta de 1.6g de aceleración horizontal en la base (Fig.5). Los daños fueron fisuras finas de orientación diagonal en los muros paralelos al movimiento, mientras que los elementos de confinamiento de concreto no tuvieron daños. Este excelente comportamiento supera ampliamente los de modelos similares de proyectos anteriores sin refuerzo o reforzados con caña. Los modelos similares sin refuerzo colapsaron con aceleraciones de 0.8g, mientras que los reforzados con caña tuvieron daños severos con estado de colapso inminente para aceleraciones de 1.4g.

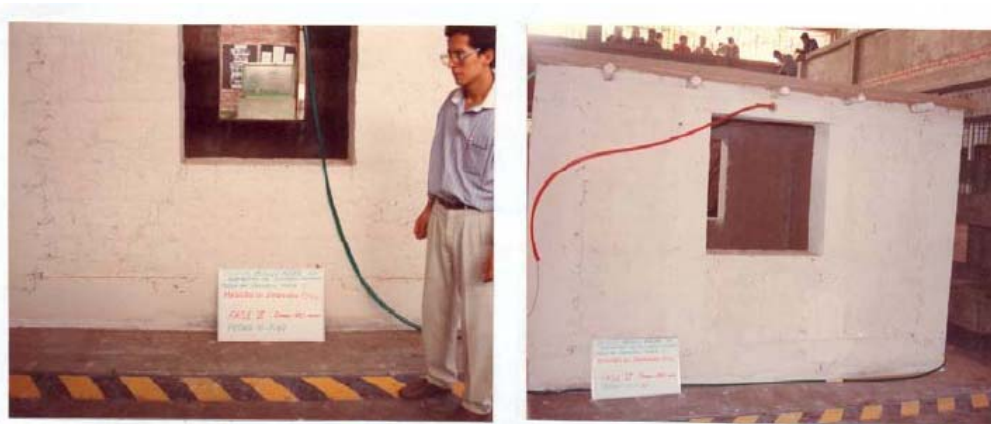


Fig. 5. Daños mínimos en muros al final del ensayo de 1997.

3.2. Muros de Adobe Confinado

San Bartolomé et al (2005), investigaron el comportamiento a carga lateral cíclica de tres muros de adobe confinados por elementos de concreto armado de $f'c = 100 \text{ kg/cm}^2$. Las columnas de los tres muros fueron de sección $0.15 \times 0.24 \text{ m}$, variando el refuerzo: los muros M1 y M3 tuvieron 4 barras de $\frac{1}{4}$ ", mientras que M2 tuvo 2 barras de $\frac{1}{4}$ ". La Fig.6 muestra el muro M1 con conexión dentada y mortero de barro. La Fig.7 muestra los muros M2 y M3, M2 con conexión dentada y mortero de barro, mientras que M3 tuvo conexión a ras y chicotes; allí el mortero fue de cemento con arena gruesa en proporción 1:8.

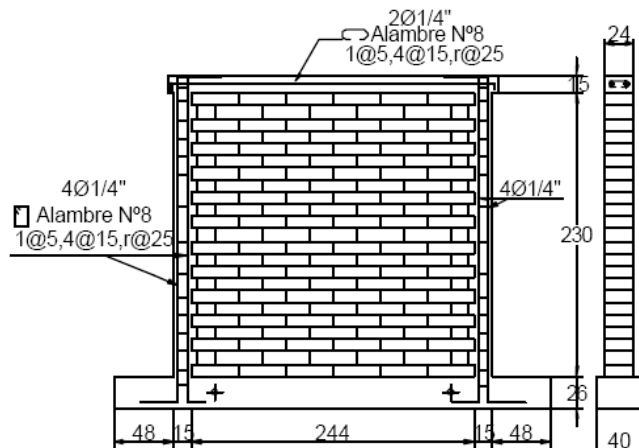


Fig.6. Características del muro 1.

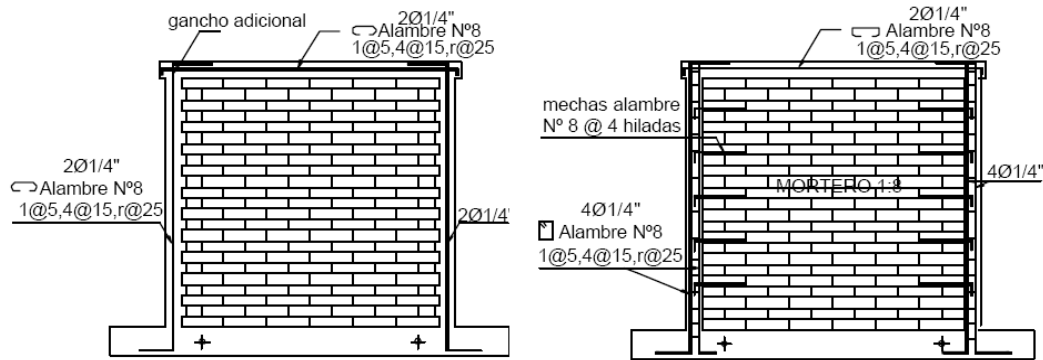


Fig. 7. Características de los muros 2 y 3.

La Fig.8 muestra el estado de los 3 muros al final de los ensayos de carga lateral cíclica. En el caso del muro M1, se retiró la mampostería de adobe dejando el pórtico de concreto armado para un ensayo final. Este pórtico falló por flexión, con rótulas plásticas en los extremos de las columnas.

Se concluyó entre otras cosas, que la resistencia del concreto de $f'_c = 100 \text{ kg/cm}^2$ es adecuada, por no haber presentado fisuras de importancia. Además, al aplicar las expresiones de la Norma de Albañilería (SENCICO 2006) para ladrillos de arcilla cocida al adobe, se pudo predecir con buena aproximación la carga lateral que produjo el agrietamiento diagonal. Asimismo, el diseño de los elementos de confinamiento, columnas y vigas se verificó aceptablemente, empleando las expresiones de ladrillos de arcilla. El factor de reducción $R=3$ se consideró adecuado, similar al empleado en mampostería de ladrillos de arcilla.

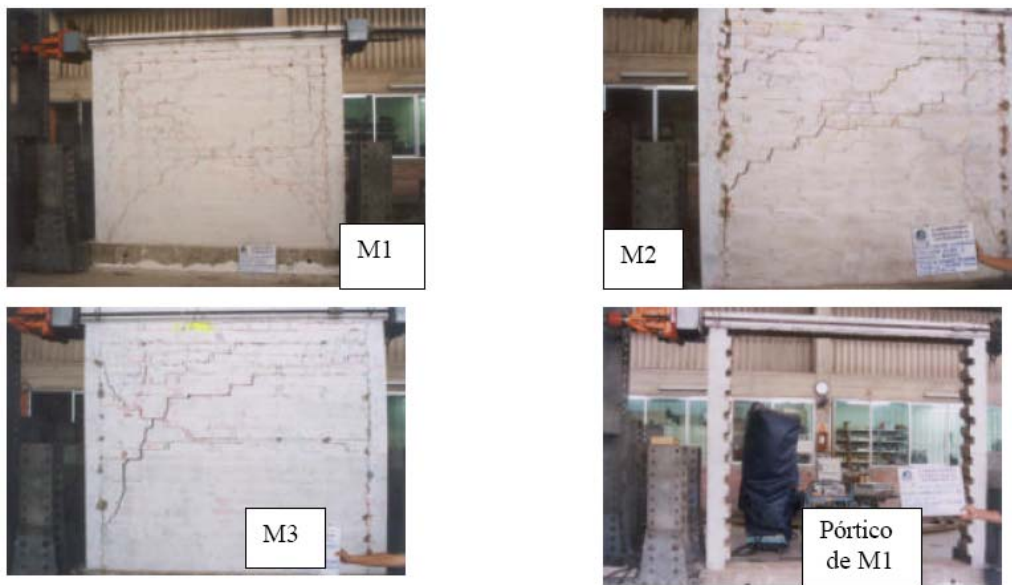


Fig. 8. Muros sometidos a carga lateral cíclica, y pórtico de concreto armado.

3.3. Modelo de Adobe Confinado de dos Pisos

San Bartolomé et al. (2009), analizaron experimentalmente el comportamiento sísmico de un modelo de dos pisos, ensayado en mesa vibradora (Fig.9). Como en ensayos anteriores, el concreto se especificó de baja resistencia $f'c = 100 \text{ kg/cm}^2$. La conexión de las columnas con los muros fue a ras. En el primer piso se adicionó varillas continuas de $\frac{1}{4}$ " cada 5 hiladas, sobre una junta de mortero de cemento 1:5, mientras que el resto de juntas fue de barro. En el segundo piso la conexión fue a ras, el muro no tuvo refuerzos ni chicotes.

El ensayo tuvo 5 fases, con aceleraciones de intensidad creciente. En la fase 2 la aceleración en la base fue 0.4g, y se inició la falla por corte en los muros paralelos al movimiento; en el muro perpendicular del segundo piso se generó por flexión una grieta vertical en su parte superior. En la fase 3, la aceleración en la base fue 0.6g, las fisuras escalonadas presentadas en los muros de corte se magnificaron, presentándose además fisuras finas en las uniones entre estos muros y sus columnas. Además, se formaron fisuras verticales en la unión solera-columna del nivel 1. En la fase 4, con aceleración en la base de 0.8g, colapsó la zona central triangular (en forma de "V") superior del muro de flexión del piso 2 (Fig.10). El muro de flexión del piso 1 quedó en perfecto estado. Las fisuras formadas en los muros de corte se abrieron más, sin que se triture ningún adobe.

La fase 5 fue la última y tuvo una aceleración máxima en la base de 1.0g. Colapsó totalmente el muro de flexión del piso 2 (Fig.11). Se formaron fisuras finas en el muro de flexión del piso 1, mientras que en las columnas del piso 1 se produjeron fisuras finas de tracción por flexión. Se ensancharon las grietas en todos los muros de corte y también en su conexión con las columnas, sin embargo, ningún adobe se trituró. Las grietas verticales en las uniones solera-columna se magnificaron.

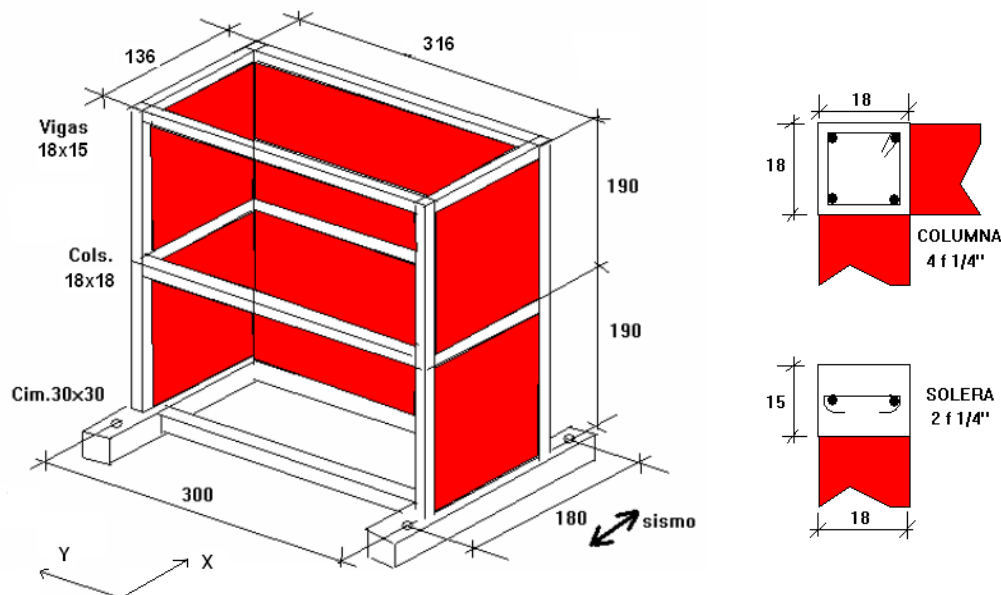


Fig. 9. Características del módulo a escala $\frac{3}{4}$. Sólo en el primer piso existe refuerzo horizontal. Las dimensiones están en centímetros.



Fig.10. Módulo de 2 pisos, durante la fase 4 (izq.) y después de la fase 4 (centro y der.).



Fig.11 Estado del Módulo en la Fase 5, durante el movimiento (arriba izquierda), después de la fase 5 (arriba derecha y abajo).

La falla principal que se obtuvo en este ensayo fue la rotura y caída del muro de flexión del segundo piso (carente de refuerzo horizontal). Al tener el borde superior libre, se generó allí aceleraciones muy altas en su parte central (2.05g). En la fase 4 (asociada a un sismo severo real) bastó que uno de los adobes centrales de la última hilada se desplomara, como para que el resto de adobes se desilvanen, volcándose la región triangular central. Es importante evitar esta forma frágil de falla, por lo que se sugiere el uso de refuerzo horizontal continuo, o la reducción de la distancia entre las columnas de arriostre.

Este ensayo de simulación sísmica sirvió para ajustar la propuesta de diseño en adobe confinado, la cual se había formulado tras los ensayos de carga lateral cíclica descritos en 3.2. En particular se pudo verificar la expresión de la resistencia al agrietamiento diagonal VR, ya que la obtenida en el ensayo coincidió con la fórmula. Por otro lado, la resistencia máxima que debía estar asociada a las grietas diagonales por corte, fue superada, lo que se puede deber a la presencia del refuerzo horizontal, aunque ello debe ser aún investigado.

4. PROPUESTA DE DISEÑO EN ADOBE CONFINADO

En base a los muchos años de investigación en albañilería de ladrillo y a los ensayos realizados en adobe confinado, cuyo resumen se presentó en el acápite 3, fue posible formular una propuesta de diseño en adobe confinado (San Bartolomé 2006).

Esta propuesta trata al adobe como una mampostería de baja calidad con concreto de poca resistencia y refuerzo mínimo. Se aplica al adobe los resultados obtenidos en albañilería de ladrillo (San Bartolomé 2007), cuyo diseño en la Norma E.070 (SENCICO 2006) emplea criterios de desempeño sísmico. Se ha considerado construcciones de hasta 2 pisos ya que en la sierra del Perú abundan estas viviendas (Fig.12) y la sismicidad es moderada.



Fig.12. Viviendas de Adobe en la Sierra del Perú.

Esta propuesta está en etapa de espera para su discusión por el comité peruano de adobe E.080. A continuación se presenta un resumen de la propuesta.

4.1. Consideraciones Generales

Las edificaciones de adobe confinado podrán tener una altura de hasta 2 pisos o 6m. Para efectos de esta propuesta, se considerará que un muro de adobe se encuentra confinado por elementos de concreto armado cuando se cumpla las siguientes especificaciones:

- A. La albañilería de adobe deberá estar completamente bordeada por elementos de concreto armado, vaciado después de haberse construido la mampostería.
- B. Para el primer piso, puede emplearse como elemento de confinamiento horizontal a la cimentación, que deberá ser hecha de concreto ciclópeo. Esta cimentación deberá tener por lo menos un peralte que permita anclar a las varillas verticales de las columnas más un recubrimiento de 7.5cm.
- C. La distancia entre las columnas de confinamiento no deberá ser mayor que dos veces la distancia entre los confinamientos horizontales (vigas soleras), ni mayor que 3.5m.
- D. Los vanos de puertas y ventanas deberán estar bordeados por columnas de concreto armado. Las vigas dinteles en estos vanos, serán de concreto armado y podrán tener la misma sección transversal que las vigas soleras existentes sobre los muros.
- E. El espesor del muro no deberá ser menor que 25cm. El espesor de los confinamientos ("t") podrá ser igual o mayor que el espesor del muro. El área mínima de la sección transversal de los confinamientos será $10t$ (en cm^2).
- F. La conexión mampostería-columna será a ras.
- G. Todos los muros llevarán refuerzo horizontal continuo, consistente por lo menos de una varilla corrugada de $\frac{1}{4}$ " cada 5 hiladas, ubicadas en el eje del muro sobre una capa de mortero en proporción volumétrica cemento-arena gruesa 1:5, y colocadas durante la construcción de la albañilería. Estas varillas anclarán 12cm en el interior de la columna más un dobléz vertical a 90° de 10cm. En caso la columna tuviese un peralte menor que 15cm, el anclaje de estas varillas en las columnas podrá hacerse en forma mecánica, doblándolas sobre un estribo.
- H. El concreto de los confinamientos deberá tener una resistencia a compresión ($f'c$) mayor o igual a 100 kg/cm^2 . La compactación del concreto deberá hacerse con una varilla lisa de $\frac{1}{2}$ " de diámetro o con una vibradora. En caso se detecte cangrejas, se eliminarán las partículas sueltas, para luego humedecer esa zona y compactar mortero, en proporción volumétrica cemento-arena 1:4, a presión manual.
- I. Los elementos de refuerzo en los confinamientos deberán ser varillas corrugadas de acero dúctil, con diámetros mayores a iguales a $\frac{1}{4}$ " y esfuerzo nominal de fluencia (f_y) igual a 4200 kg/cm^2 . Estas varillas tendrán un recubrimiento de 2cm, cuando se aplique un tarrajeo de cemento, y de 3cm cuando el muro carezca de tarrajeo de cemento.
- J. El refuerzo longitudinal mínimo de los confinamientos estará compuesto por 2 varillas de $\frac{1}{4}$ ", mientras que los estribos mínimos estarán compuestos por ganchos de 6mm o $\frac{1}{4}$ " 1 a 5, 4 a 10 y el resto a 25cm. Estos ganchos doblarán 180° sobre las varillas longitudinales.

4.2. Análisis Sísmico

Para el análisis sísmico de las edificaciones de adobe confinado se cumplirán las siguientes especificaciones:

- A. La fuerza sísmica de diseño a la rotura (**V**, para sismos severos) será la proporcionada por la Norma Sismorresistente E.030 (SENCICO 2003), considerando un factor de reducción de las fuerzas sísmicas elásticas **R = 3**.
- B. Se asumirá que las vigas (soleras y dinteles) continuas de concreto armado proporcionan acción de diafragma rígido en cada nivel, pudiéndose emplear techos de madera o metálicos debidamente conectados a las vigas. Además deberá cumplirse que la relación longitud-ancho de la planta de la edificación sea menor que 4.
- C. Se evitará irregularidades en planta y en elevación, dividiendo a la edificación en bloques separados por juntas sísmicas. Cada bloque se analizará independientemente.
- D. Los muros portantes de carga sísmica deberán tener continuidad vertical y una longitud no menor que 1.2m.
- E. El módulo de elasticidad de la albañilería de adobe (E_a) podrá suponerse igual a 6500 kg/cm^2 , y el módulo de corte (G_a) será tomado como $0.4 E_a$. El módulo de elasticidad del concreto será determinado de la expresión $E_c = 15000 \sqrt{f'c}$, en kg/cm^2 .
- F. Para el cálculo de la rigidez lateral de los muros de adobe confinados, deberá transformarse las columnas de confinamiento en áreas equivalentes de adobe, multiplicando al espesor de las columnas por la relación E_c / E_a . Adicionalmente, deberá agregarse la participación de las paredes transversales considerando un ancho efectivo igual a cuatro veces el espesor de la pared transversal. Asimismo, deberá considerarse la participación de los alféizares de ventanas en caso no hayan sido aislados de la estructura principal.
- G. La determinación de las fuerzas internas en cada muro (momentos flectores “**Mu**” y fuerzas cortantes “**Vu**”) ante la acción de sismos severos, se hará mediante métodos racionales de cálculo (manual o computacional), contemplando las excentricidades de las fuerzas sísmicas especificadas por la Norma Sismorresistente E.030.
- H. Se verificará, de acuerdo a lo indicado por la Norma Sismorresistente E.030, que las derivas angulares máximas inelásticas no sean mayores que 0.005; en caso se supere este límite, se deberá rigidizar a la edificación.

4.3. Diseño para Acciones Sísmicas en el Plano de los Muros Confinados

Para el diseño sísmico de los muros de adobe confinados ante acciones coplanares, deberá cumplirse las siguientes especificaciones:

- A. **Resistencia al Corte (VR)**. La resistencia a fuerza cortante en condición de rotura para el caso de adobes asentados con mortero de barro, será obtenida con la ecuación 1:

$$VR = 0.5 L t + 0.2 P \quad [\text{ecuación 1, en kg y cm}]$$

Donde:

L = longitud total del muro (incluyendo columnas)

t = espesor del muro sin tarrajeo

P = carga de gravedad acumulada.

Para el caso en que el adobe sea asentado con mortero de cemento, VR se incrementará por 1.3. Para el caso que se aplique un tarrajeo de cemento sobre una malla debidamente conectada a la mampostería, el espesor “t” incluirá el grosor del tarrajeo.

- B. **Densidad de Muros.** En cada dirección de la edificación y en cada piso, la densidad de muros se medirá a través de la suma de la resistencia a fuerza cortante (ΣVR) de los muros portantes de carga sísmica orientados en la dirección en análisis. Esta suma de resistencias deberá ser mayor o igual que la fuerza cortante actuante en el piso en análisis (ecuación 2), especificada por la Norma Sismorresistente.

$$\Sigma VR \geq V \quad [\text{Ecuación 2}]$$

Para el caso en que se obtenga $\Sigma VR > R V$, donde $R = 3$, los muros se comportarán en el rango elástico ante los sismos severos; estos muros serán diseñados de acuerdo a lo especificado en el acápite 4.3.E.

- C. **Verificación para Sismos Moderados.** Asumiendo que los sismos moderados proporcionan fuerzas laterales iguales al 50% de las correspondientes al sismo severo, se verificará mediante la ecuación 3 que ante los sismos moderados ningún muro sobrepase el 60% de su resistencia al corte; es decir, ante sismos moderados ningún muro debe agrietarse por fuerza cortante.

$$0.5 Vu \leq 0.6 VR \quad [\text{Ecuación 3}]$$

- D. **Diseño de Muros Agrietados por Corte.** Para sismos severos se supondrá que todos los muros se agrietan por corte, alcanzando su nivel de resistencia VR, excepto cuando se cumpla que $\Sigma VR > R V$ (ver el acápite 2). Para los muros que se agrietan por corte, se seguirá el siguiente procedimiento de diseño para los confinamientos.

- D.1 **Determinación de las Fuerzas Internas en los Confinamientos.** En los confinamientos se presentan 3 fuerzas internas: Tracción (**T**), Compresión (**C**) y Fuerza Cortante (**Vc**), no existe momento flector ya que la columna no puede flexionarse al estar conectada al muro. Para efectos de diseño, se desprecia la compresión (C), debido a que los muros son de baja altura (máximo 2 pisos) y la dimensión mínima de la columna de concreto es capaz de absorber esta compresión. Estas fuerzas internas se determinarán con las expresiones que aparecen en la Tabla 1.

Tabla 1. Fuerzas Internas en las Columnas.		
COLUMNA	V_c (fuerza cortante)	T (tracción)
Interior	$\frac{VR.L_m}{L(N_c + 1)}$	$VR \frac{h}{L} - P_t$
Extrema	$1,5 \frac{VR.L_m}{L(N_c + 1)}$	$F - P_t$

Donde:

$F = M / L$ = fuerza axial en las columnas extremas producidas por "M"

$M = Mu_1 (VR / Vu)$ = momento flector asociado al agrietamiento del muro

L_m = longitud del paño mayor o 0.5 L, lo que sea mayor

L = longitud total del muro, incluyendo el peralte de las columnas

N_c = número total de columnas en el muro en análisis

h = altura del entrepiso en análisis

P_t = carga vertical tributaria proveniente del muro transversal a la columna

Nota: en muros de 1 paño existen 2 columnas extremas ($N_c = 2$) y $L_m = L$

D.2 Diseño de Columnas. El área de concreto (A_c) y el refuerzo vertical (A_s) deberán ser capaces de absorber la acción combinada de la tracción (T) y el corte-fricción (V_c):

$$A_c = \frac{V_c}{0,2 f_c \phi} \geq 10 t (cm^2) \quad A_{sf} = \frac{V_c}{f_y \cdot \mu \cdot \phi} \quad A_{st} = \frac{T}{f_y \cdot \phi}$$

$$A_s = A_{sf} + A_{st} \geq \frac{0,1 f_c A_c}{f_y} \dots (\text{mínimo : } 2 \phi 1 / 4") \quad \boxed{\text{Ecuación 4}}$$

Donde:

$\phi = 0.85$

μ = coeficiente de fricción concreto-concreto = 0.8

Los estribos en las columnas serán mínimos y estarán compuestos por estribos cerrados o ganchos de 6mm o 1/4", espaciados 1 a 5, 4 a 10, resto a 25cm.

D.3 Diseño de Soleras. El refuerzo a colocar en la solera será calculado con la ecuación 5. El área de concreto A_{cs} será mínima (10 t, en cm^2) y los estribos estarán compuestos por estribos cerrados o ganchos de 6mm o 1/4", espaciados 1 a 5, 4 a 10, resto a 25cm.

$$T_s = VR \frac{L_m}{2L}; \quad A_s = \frac{T_s}{\phi f_y} \geq \frac{0,1 f_c A_{cs}}{f_y} \dots (\text{mínimo : } 2 \phi 1 / 4") \quad \boxed{\text{Ecuación 5}}$$

Donde: $\phi = 0.9$

Este refuerzo será anclado en los nudos, pudiéndose adicionar ganchos en el refuerzo vertical para doblar a 90° las varillas de la solera.

D.4 Diseño del Refuerzo Horizontal. En los muros agrietados, se colocará refuerzo horizontal continuo, anclado en las columnas. Este refuerzo será colocado sobre juntas horizontales hechas con mortero de cemento. El refuerzo horizontal (A_{sh}) se calculará con la ecuación 6 y como mínimo se utilizará 1 ϕ 1/4" cada 5 hiladas.

$$A_{sh} = \frac{VR \cdot s}{f_y \cdot L} \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

s = espaciamiento vertical entre los refuerzos horizontales

E. Diseño de Muros No Agrietados. Esta disposición se aplica cuando en la vivienda se tenga exceso de resistencia al corte: $\Sigma VR > R V$. En las columnas internas y en las soleras de los muros no agrietados, se utilizará refuerzo mínimo, asimismo, en estos muros no será necesario adicionar refuerzo horizontal, ni refuerzo por corte-fricción en las columnas. Sólo se diseñarán las columnas extremas empleando la ecuación 7.

$$T = F - P_t \quad A_s = \frac{T}{\phi f_y} \geq \frac{0,1 f_c A_c}{f_y} \dots (\text{mínimo } 2 \phi 1/4") \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

F = Mu / L = fuerza axial en las columnas extremas producidas por "Mu"
 $\phi = 0.9$

F. Diseño de Vigas Dinteles. Las vigas dinteles deberán soportar la acción combinada de las cargas de gravedad y las cargas sísmicas. Estas vigas serán diseñadas de tal forma que fallen dúctilmente por flexión, según se especifica en la Norma de Concreto Armado E.060 (2009).

4.4. Diseño para Sismos Perpendiculares al Plano del Muro

La albañilería de adobe confinada y reforzada horizontalmente, tal como se indica en el acápite 4.1, no necesitará ser diseñada ante cargas sísmicas perpendiculares al plano. Sólo se diseñarán los arriostres utilizando las siguientes especificaciones.

A. La carga sísmica perpendicular al plano del muro, "w" (en kg/m², ecuación 8), será la proporcionada por la Norma Sismorresistente E.030.

$$w = Z.U.C_1 \gamma e \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde:

Z = factor de zona especificado en la NTE E.030.

U = factor de importancia especificado en la NTE E.030.

C₁ = coeficiente sísmico especificado en la NTE E.030.

e = espesor bruto del muro (incluyendo tarrajeos), en metros
 γ = peso volumétrico de la mampostería de adobe = 1600 kg/m³

- B. Los confinamientos de concreto armado, actuarán esta vez como arriostres del muro.
- C. Para calcular la carga proveniente del muro (“w”) sobre los arriostres, se podrá utilizar la denominada “regla del sobre”, consistente en trazar rectas a 45° desde los vértices del muro que se interceptan con una línea horizontal trazada a la mitad de la altura del muro.
- D. En todo arriostre que pueda deformarse por flexión (por ejemplo: solera no restringida por el techo, o columna perteneciente a un borde libre del muro), las cargas (trapezoidales o triangulares) actuantes sobre los arriostres originarán momentos flectores y fuerzas cortantes que deberán ser absorbidos por el refuerzo y la sección transversal, evaluados según se especifica en la Norma de Concreto Armado E.060.
- E. El refuerzo o la sección transversal que se obtenga en los elementos de concreto armado actuando como arriostres, no deberán sumarse con aquellos valores obtenidos en esos elementos actuando como confinamientos, sino que se adoptará el mayor de ellos.

5. CONCLUSIONES

En el Perú una gran parte de la población habita en viviendas de adobe de uno y de dos pisos. La inmensa mayoría de estas construcciones es tradicional, sin refuerzos, por lo que son muy vulnerables ante sismos moderados y severos. Las fallas y destrucción indican que es indispensable dotar a estas construcciones con algún tipo de refuerzo.

Las pocas viviendas de adobe confinado existentes en el Perú (Fig.13), han sido construidas sin ninguna técnica de diseño estructural, colocándose refuerzo excesivo, usando concreto de mediana calidad y secciones transversales de los confinamientos muy grandes, lo cual encarece innecesariamente al adobe confinado.



Fig.13. Viviendas de Adobe Confinado en el Perú.

En la Pontificia Universidad Católica del Perú, se han hecho una serie de ensayos de simulación sísmica en modelos y de carga lateral cíclica en muros de adobe confinado con elementos de concreto armado, en los que se ha tratado al adobe como una mampostería de baja calidad y el concreto es de baja resistencia, obteniéndose resultados satisfactorios. En base a estos ensayos y a otros realizados en albañilería de ladrillo, ha sido posible elaborar la presente propuesta de diseño sísmico para las edificaciones de adobe confinado. Se confía que la próxima edición de la Norma de Adobe E.080 pueda incorporar esta propuesta.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

EERI (1995) *The September 14, 1995, Ometepec, Mexico, Earthquake*

http://www.eeri.org/lfe/pdf/mexico_ometepec_eeri_preliminary_report.pdf

INEI, Instituto Nacional de Estadística e Informática (2007), XI de Población y VI de Vivienda, <http://proyectos.inei.gob.pe/Censos2007/>

ININVI (1987). *Norma E.080 Adobe*. Reglamento Nacional de Construcciones, Lima, Perú.

Matos G., Quiun D. y San Bartolomé (1997) Ensayo de Simulación Sísmica en un módulo de adobe confinado con elementos de concreto armado, *Ponencias XI Congreso Nacional de Ingeniería Civil, Colegio de Ingenieros del Perú*, Trujillo, Perú.

Quiun, D., San Bartolomé, A., Torrealva, D., Zegarra, L. (1997) *El terremoto de Nasca del 12 de noviembre de 1997*. Publicación DI-SIC-97-01, Departamento de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú.

Quiun, D., San Bartolomé, A., Zegarra, L. Giesecke A. (2009) Comportamiento exitoso de construcciones de adobe reforzadas en Ica ante el Terremoto de Pisco 2007. *Ponencias XVII Congreso Nacional de Ingeniería Civil, Colegio de Ingenieros del Perú*, Chiclayo, Perú.

San Bartolomé, A. y Pehovaz, R. (2005) Comportamiento a carga lateral cíclica de muros de adobe confinados. *Ponencias XV Congreso Nacional de Ingeniería Civil, Colegio de Ingenieros del Perú*, Ayacucho, Perú.

San Bartolomé A. (2006) *Propuesta de diseño en adobe confinado*, Documento en revisión por el Comité Peruano de Adobe E.080, Lima, Perú.

San Bartolomé, A. (2007) *Blog de Investigaciones en Albañilería*, <http://blog.pucp.edu.pe/albañilería>, Lima, Perú. Contiene la Propuesta y los Comentarios a la Norma E.070.

San Bartolomé, A., Delgado E., Quiun D. (2009) Seismic Behavior Of A Two Story Model of Confined Adobe Masonry, *11th Canadian Masonry Symposium*, Toronto-Ontario, Canada.

SENCICO (2000). *Norma E.080 Adobe*. Reglamento Nacional de Edificaciones, Lima, Perú.

SENCICO (2003). *Norma E.030 Diseño Sismorresistente*. Reglamento Nacional de Edificaciones, Lima, Perú.

SENCICO (2006). *Norma E.070 Albañilería*. Reglamento Nacional de Edificaciones, Lima, Perú.

SENCICO (2009). *Norma E.060 Concreto Armado*. Reglamento Nacional de Edificaciones, Lima, Perú.

Torrealva (1986) Técnica Probada en el campo y laboratorio para reparar viviendas de adobe en áreas sísmicas, *Ponencias VI Congreso Nacional de Ingeniería Civil, Colegio de Ingenieros del Perú*, Cajamarca, Perú.

Zegarra, L., San Bartolomé, A., Quiun, D. (1999) Reforzamiento de viviendas existentes de adobe. Proyecto CERESIS-GTZ-PUCP, *Ponencias, XII Congreso Nacional de Ingeniería Civil, Colegio de Ingenieros del Perú*, Huánuco, Perú.

Zegarra, L., San Bartolomé, A., Quiun, D. (2001) Comportamiento ante el terremoto del 23-06-2001 de las viviendas de adobe reforzadas en Moquegua, Tacna y Arica. Proyecto GTZ-CERESIS-PUCP, Etapa 3, *Ponencias, XIII Congreso Nacional de Ingeniería Civil, Colegio de Ingenieros del Perú*, Puno, Perú.