

INVESTIGACIONES EXPERIMENTALES Y PROPUESTA DE DISEÑO SÍSMICO PARA LA MAMPOSTERÍA DE ADOBE CONFINADO

Ángel San Bartolomé

Pontificia Universidad Católica del Perú
Av. Universitaria Cda.18. San Miguel, Lima, Perú
E-mail: asanba@pucp.edu.pe

Daniel Quiun

Pontificia Universidad Católica del Perú
Av. Universitaria Cda.18. San Miguel, Lima, Perú
E-mail: dquiun@pucp.edu.pe

Tema 6: Investigación sobre materiales y tecnologías para la conservación.

Palabras claves: Ensayos. Adobe Confinado. Sismos. Diseño.

Resumen

Las construcciones tradicionales de adobe no reforzado son muy vulnerables ante los sismos, afectando sobre todo a pobladores de bajos recursos económicos. Las investigaciones experimentales para mitigar este problema se han orientado a reforzar el adobe con 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 la posibilidad de emplear confinamientos de concreto armado, obteniéndose buenos resultados. En base a los resultados de estos experimentos, se desarrolló una propuesta de diseño sísmico de viviendas de adobe confinado de hasta dos pisos. La teoría de la propuesta utiliza los criterios de diseño a la rotura y por desempeño que se emplean en las edificaciones de albañilería confinada hecha con ladrillos de arcilla cocidos, reconociendo la baja calidad y resistencia del adobe. La aplicación de esta teoría permite obtener columnas y vigas de concreto armado de baja resistencia y escaso refuerzo, lo cual hace que la propuesta de diseño sea viable para la gente de escasos recursos económicos.

1. INTRODUCCIÓN

Aunque en poca cantidad, en el Perú existen viviendas de adobe confinado por elementos de concreto armado de 1 y 2 pisos (Fig.1); sin embargo, estas viviendas carecen de un diseño estructural racional, lo que conlleva a emplear refuerzo en exceso que conducen a un encarecimiento innecesario de estas viviendas. Por otro lado, los experimentos realizados en el Laboratorio de Estructuras de la Pontificia Universidad Católica del Perú, indican que es posible diseñar racionalmente al adobe confinado ante sismos severos, aparte que existen evidencias del buen comportamiento que ha tenido este tipo de viviendas ante sismos reales (Fig.2). De esta manera, el propósito de este artículo es presentar una propuesta de diseño sísmico de las estructuras de adobe confinado, mostrando las bases experimentales que permitieron su formulación.

2. INVESTIGACIONES EXPERIMENTALES

2.1 Ensayo de Simulación Sísmica en un Módulo de 1 Piso [1].

Este módulo (Fig.3) presentó 4 columnas de confinamiento reforzadas con 4 varillas de 8mm. En la dirección de ensayo (ejes A y B), los muros tuvieron ventanas que fueron confinadas con columnetas reforzadas con 2 varillas de 8mm solo en el eje A. El módulo fue sometido al sismo ocurrido el 31 de mayo de 1970 en Perú, variándose las

aceleraciones máximas en 6 fases, hasta llegar a una aceleración de 1.6g. El comportamiento del módulo fue elástico, sin que se produzca ninguna fisura, por lo que para conocer si el pórtico de concreto era el elemento que proporcionaba la resistencia, los muros de adobe de los ejes A y B fueron removidos, volviéndose a ensayar al sistema. Esta vez se aplicaron 2 fases, y en la fase 2 (0.6g) se formaron rótulas plásticas en los extremos de las columnas. En la Fig.3 puede apreciarse que la albañilería de adobe fue el elemento que aportó la mayor parte de la resistencia y rigidez.



Fig.1. Viviendas de adobe confinado en Perú.

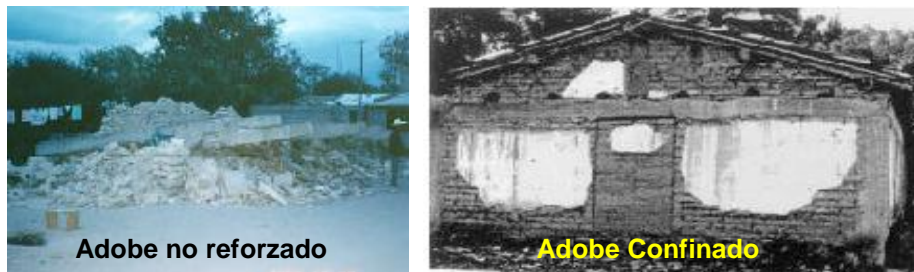


Fig.2. Sismo de Omotepec, México, 1995.

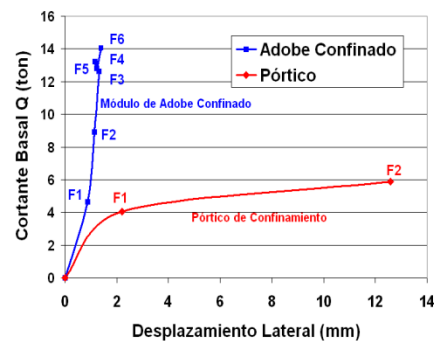
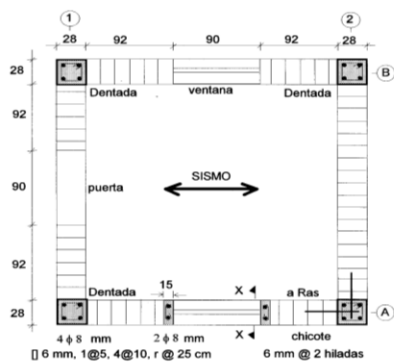


Fig.3. Ensayo sísmico de un módulo de 1 piso [1].

2.2 Ensayo de Carga Lateral Cíclica. Efectos del Refuerzo Vertical [2].

En este proyecto los confinamientos de los muros a escala natural (Fig.4) fueron diseñados como para que soporten la carga de agrietamiento diagonal, siguiéndose las especificaciones indicadas en la sección 3 de este documento. Se requirió de solo 2 varillas de $\frac{1}{4}$ " en cada columna (muro M2); sin embargo, con el objeto de estudiar el efecto del refuerzo vertical, se duplicó la cantidad de varillas en el muro M1. Estos muros fueron sometidos a carga lateral cíclica con desplazamiento horizontal controlado. En la Fig.4 se aprecia que la envolvente de los lazos histeréticos de M1 y M2 no mostró mayor diferencia, ya que la deformación que prevaleció en ambos muros fue por fuerza cortante.

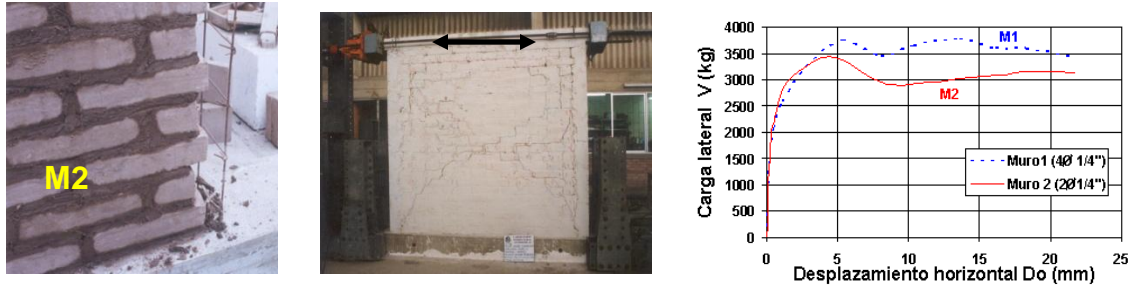


Fig.4. Ensayo de Carga Lateral Cíclica y Envolvente V-D [2].

2.3 Ensayo de Simulación Sísmica en un Módulo de 2 Pisos [3].

El refuerzo en los confinamientos de este módulo a escala $\frac{3}{4}$ (Fig.5) fue obtenido siguiéndose las especificaciones de la sección 3 de este documento, excepto que en el segundo piso no se utilizó el refuerzo horizontal requerido, asimismo, el espaciamiento entre columnas fue un tanto mayor que el exigido por la propuesta de diseño. En las columnas se obtuvo 4 varillas de $\frac{1}{4}$ " y en las soleras 2 varillas de $\frac{1}{4}$ ". El módulo fue sometido al sismo ocurrido el 31 de mayo de 1970 en Perú, escalado y variándose las aceleraciones máximas en 5 fases, hasta llegar a una aceleración de 1g. En la fase 4 (0.8g) se produjo el desplome de varios adobes del muro de flexión del segundo piso, formándose una falla en forma de "V", y en la fase 6 se desplomó totalmente este muro por acción sísmica perpendicular al plano y por la ausencia de refuerzo horizontal, mientras que los muros de corte presentaron pequeñas fisuras.

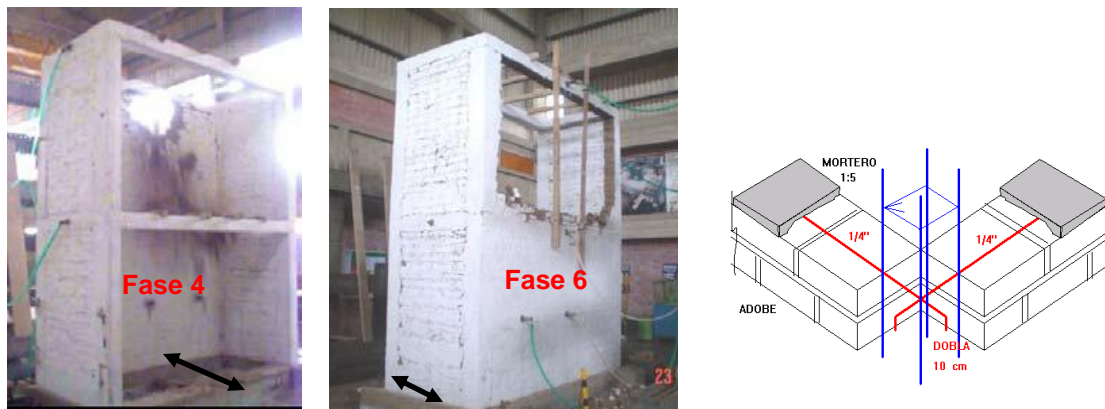


Fig.5. Ensayo de simulación sísmica. Fases 4 y 6 y refuerzo horizontal sugerido [3].

2.4 Ensayos de Carga Lateral Cíclica. Efectos del Refuerzo Horizontal [4]

Se ensayaron a carga lateral cíclica, hasta alcanzar un desplazamiento lateral de 20mm, a dos muros de adobe confinados y diseñados de acuerdo a la formulación indicada en la sección 3. Ambos muros (M1 y M2) tuvieron en sus columnas y soleras 2 varillas de $\frac{1}{4}$ ", la diferencia radicó en que M1 careció de refuerzo horizontal, mientras que en M2 se utilizó 1 varilla de $\frac{1}{4}$ " cada 5 hiladas anclada en las columnas y embutidas en mortero cemento-arena 1:8, en tanto que en el resto de hiladas se usó mortero de barro. En la rama negativa de la envolvente cortante-desplazamiento (Fig.6) no existió influencia del refuerzo horizontal sobre la resistencia a corte; sin embargo, este refuerzo cerró las grietas convirtiéndolas en fisuras finas, haciendo que todo el muro se comporte como una sola unidad. Para $D = 20\text{mm}$, la grieta vertical en la interfase columna-muro tuvo un grosor máximo de 3.5mm en M1, mientras que en M2 fue 0.5mm.

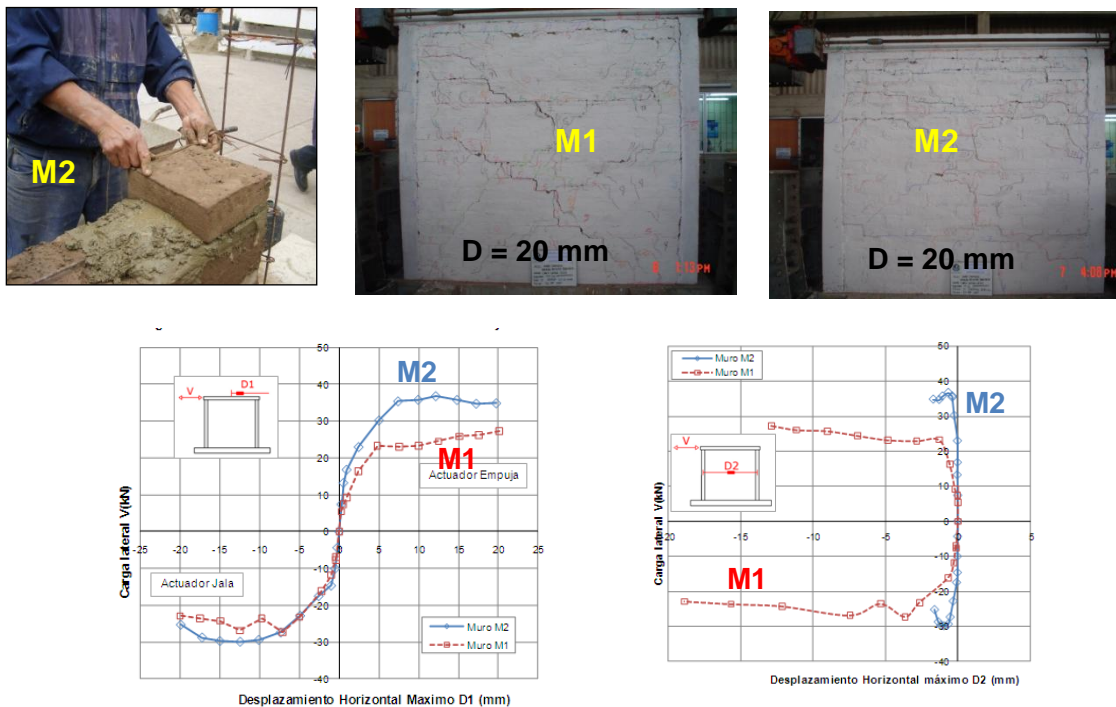


Fig.6. Ensayo de carga lateral cíclica en M1 (sin refuerzo horizontal) y M2 (con refuerzo horizontal). Envoltura V-D y desplazamiento horizontal intermedio relativo entre columnas. [4].

3. PROPUESTA DE DISEÑO EN ADOBE CONFINADO

En base a los resultados de los experimentos efectuados y reconociendo que el adobe confinado presenta un comportamiento sísmico similar a la albañilería de arcilla cocida, pero con baja resistencia sísmica, deformándose predominantemente por fuerza cortante ante acciones coplanares, mientras que ante acciones perpendiculares al plano presenta debilidad principalmente en las uniones con los confinamientos, se presenta la siguiente propuesta de diseño sísmico.

3.1 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 con más de 1m de longitud, 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 $10 t$ (en cm^2).
- f. La conexión albañilería-columna será a ras.
- g. Todos los muros llevarán refuerzo horizontal continuo, consistente por lo menos de 1 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: 8, y colocadas durante la construcción de la albañilería. Estas varillas anclarán 12cm en el interior de la columna más un doblaje 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 o un gancho.
- h. El concreto de los confinamientos deberá tener una resistencia a compresión ($f'c$) mayor o igual que 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. El refuerzo en los confinamientos deberán ser varillas corrugadas de acero dúctil, con diámetros mayores a iguales que 6mm 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 3cm cuando el muro carezca de tarrajeo de cemento.
- j. El refuerzo longitudinal mínimo de los confinamientos estará compuesto por 2 varillas de 6mm, mientras que los estribos mínimos estarán compuestos por ganchos de 6mm 1 a 5, 4 a 10 y el resto a 25cm. Estos ganchos doblarán 180° sobre las varillas longitudinales.

3.2 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, 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 4 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 “ M_u ” y fuerzas cortantes “ V_u ”) 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.

3.3 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 multiplicándolo 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 entrepiso 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 “e” de esta sección.

- 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.

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

- 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 $\Sigma VR > R V$ (acápites “b” de esta sección). Para los muros que se agrietan por corte, se seguirá el siguiente procedimiento de diseño para los confinamientos.
- **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 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

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

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

- **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 (Vc):

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

$$A_s = A_{sf} + A_{st} \geq \frac{0,1f_c A_c}{f_y} \dots (\text{mínimo: } 2 \phi \ 6mm)$$

Ecuación 4

Donde:

$\phi = 0.85$ (para acción combinada T-Vc)

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, espaciados 1 a 5, 4 a 10, resto a 25cm.

- **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, espaciados 1 a 5, 4 a 10, resto a 25cm.

$$T_s = VR \frac{L_m}{2L}; \quad A_s = \frac{T_s}{\phi f_y} \geq \frac{0,1f_c A_{cs}}{f_y} \dots (\text{mínimo: } 2 \phi \ 6mm)$$

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.

- **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. Como mínimo se utilizará en todos los pisos (agrietados o sin agrietar): 1 ϕ 6mm cada 5 hiladas.

$$A_{sh} = \frac{VR \cdot s}{f_y \cdot L}$$

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 por corte-fricción en las columnas. Sólo se diseñarán las columnas extremas empleando la ecuación 7.

$$T = F - P_t \quad A_s = \frac{T}{\phi f_y} \geq \frac{0,1 f_c A_c}{f_y} \dots (\text{mínimo: } 2 \phi 6mm)$$

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.080.

3.4 Diseño para Sismos Perpendiculares al Plano del Muro

La albañilería de adobe confinada y reforzada horizontalmente, 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.

$$w = Z.U.C_1 \gamma e$$

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 albañilería 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

4. CONCLUSIONES

Si bien es cierto que falta ejecutar más investigaciones experimentales que permitan mejorar la propuesta de diseño para el adobe confinado presentada en este artículo, el comportamiento sísmico observado hasta la fecha indica que es posible utilizarlo en las estructuras de las viviendas de hasta 2 pisos. Una investigación importante de realizar, consiste en verificar el comportamiento ante cargas sísmicas perpendiculares al plano de los muros ubicados en el segundo piso, reforzándolos como se especifica en la propuesta.

5. BIBLIOGRAFÍA

1. Matos, G.; Quiun, D.; San Bartolomé, A.; (1998). *Ensayo de simulación sísmica de un módulo de adobe confinado por elementos de concreto armado*. Sección “Adobe Confinado”, Capítulo “Albañilería de Tierra Cruda” del blog <http://blog.pucp.edu.pe/albanileria>.
2. San Bartolomé, A.; Pehovaz, H. (2003). *Comportamiento a carga lateral cíclica de muros de muros de adobe confinados*. Sección “Adobe Confinado”, Capítulo “Albañilería de Tierra Cruda” del blog <http://blog.pucp.edu.pe/albanileria>.
3. San Bartolomé, A.; Delgado, E. (2006). *Comportamiento sísmico de un módulo de adobe de dos pisos con refuerzo horizontal y confinamiento mínimo*. Sección “Adobe Confinado”, Capítulo “Albañilería de Tierra Cruda” del blog <http://blog.pucp.edu.pe/albanileria>.
4. Torres, A. (2011). *Comportamiento sísmico del adobe confinado. Variable: refuerzo horizontal*. Tesis de la Pontificia Universidad Católica del Perú en ejecución, asesor: San Bartolomé, A.