



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA

ENSAYOS DE SIMULACION SISMICA DE VIVIENDAS DE ADOBE

Gianfranco Ottazzi P.
Juan Felipe Yep L.
Marcial Blondet S.
Gladys Villa-García M.
Juan F. Ginocchio C.

**PROYECTO FINANCIADO POR EL
CENTRO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIONES
PARA EL DESARROLLO (CANADA)**

**PUBLICACION DI-89-01
MARZO 1989**



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA

ENSAYOS DE SIMULACION SISMICA DE VIVIENDAS DE ADOBE

Gianfranco Ottazzi P.
Juan Felipe Yep L.
Marcial Blondet S.
Gladys Villa-García M.
Juan F. Ginocchio C.

**PROYECTO FINANCIADO POR EL
CENTRO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIONES
PARA EL DESARROLLO (CANADA)**

PUBLICACION DI-89-01
MARZO 1989

ENSAYOS DE SIMULACION SISMICA DE VIVIENDAS DE ADOBE

Gianfranco Ottazzi P.
Juan Felipe Yep L.
Marcial Blondet S.
Gladys Villa-García M.
Juan F. Ginocchio C.

Pontificia Universidad Católica del Perú

RESUMEN

Se presentan los principales resultados de un proyecto de investigación en el que se realizaron ensayos de simulación sísmica en construcciones de adobe a escala natural. Los especímenes fueron representativos de viviendas rurales de un piso. Las señales de excitación dinámica, derivadas de un registro obtenido durante un terremoto en el Perú, simularon movimientos sísmicos de intensidad creciente.

El principal objetivo de la investigación fue evaluar la influencia de mejoras en las técnicas constructivas y del empleo de sistemas de refuerzo en el comportamiento sísmico de las edificaciones de adobe.

Se comprobó que, aunque es recomendable mejorar la calidad de los materiales y las técnicas de construcción, es indispensable incluir sistemas de refuerzo adecuados para garantizar la seguridad de las viviendas de adobe en zonas de alta sismicidad.

RECONOCIMIENTO

El presente trabajo fue posible gracias al financiamiento del Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo del Canadá, al cual agradecemos el apoyo brindado para estudiar y poner en práctica nuevas y más seguras formas de construir con adobe.

Agradecemos al Profesor Cedric Marsh del "Centre for Building Studies" de la Universidad de Concordia - Canadá, quien participó en el planeamiento de la etapa experimental y en la interpretación de los resultados.

Para la realización de este trabajo se contó con la valiosa colaboración del personal del Laboratorio de Estructuras de la Pontificia Universidad Católica del Perú.

INTRODUCCION

El adobe es empleado como material de construcción por un gran porcentaje de los habitantes de los países en desarrollo. Se estima que en el Perú el 65% de la población rural y el 31% de la población urbana viven en construcciones de tierra (Ref. 1). A nivel mundial, las dos terceras partes de la población continúan viviendo en casas de tierra.

Las construcciones de tierra deben su popularidad a su bajo costo, fácil disponibilidad, buen aislamiento térmico y a la posibilidad de autoconstrucción. Sin embargo, las viviendas de adobe -y de tierra en general- han demostrado ser sumamente inseguras en zonas sísmicamente activas, debido a la deficiente tecnología de construcción, a la falta de refuerzos apropiados y a las limitaciones mecánicas propias del material: los muros de adobe son masivos, frágiles y poco resistentes.

Este hecho se corrobora cada vez que ocurre un sismo, aun de intensidad moderada; la mayoría de las construcciones de tierra colapsan, ocasionando un gran número de lesiones, muertes y enormes pérdidas materiales. Por lo tanto, es imprescindible y urgente encontrar formas -consistentes con la realidad de los países en desarrollo- de evitar el colapso de las construcciones de adobe sujetas a la acción de los terremotos.

Durante los últimos 15 años, el Departamento de Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP) ha realizado importantes esfuerzos por encontrar formas de mejorar la seguridad sísmica de las construcciones de adobe. Como resultado, se han propuesto métodos para mejorar las técnicas constructivas de las edificaciones de tierra y se han diseñado sistemas de refuerzo para garantizar su seguridad frente a los terremotos (Refs. 2, 3 y 4). Una severa limitación de estas propuestas, es que provinieron principalmente de resultados de ensayos estáticos y monotónicos, mientras que las solicitaciones sísmicas son, por el contrario, de naturaleza dinámica y cíclica.

OBJETIVOS

El principal objetivo de esta investigación fue verificar la eficacia de las recomendaciones constructivas y de refuerzo, consideradas más eficientes y adecuadas para la construcción de adobe en zonas sísmicas.

Dicho objetivo solamente puede lograrse a cabalidad mediante ensayos a escala natural de estructuras de adobe, sometidas a solicitaciones similares a las que se producen durante los terremotos (Ref. 5). Por lo tanto, este proyecto consistió en la ejecución e interpretación de una serie de ensayos de módulos de adobe representativos de viviendas rurales de un piso, realizados en el simulador sísmico del Laboratorio

de Estructuras de la PUCP, con el propósito de estudiar la influencia de los materiales, del sistema de refuerzo, del techo y las técnicas constructivas en el comportamiento sísmico de las viviendas de adobe.

CARACTERISTICAS DE LOS ESPECIMENES DE ENSAYO

Se diseñaron y construyeron ocho módulos de vivienda de adobe a escala natural (M1 a M8), de 3.25 x 3.25 m en planta por 2.40 m de altura. Las principales características de los módulos se resumen en la Tabla 1.

El diseño de los módulos fue simétrico para evitar efectos indeseables de torsión durante los ensayos dinámicos. Los vanos consistieron de una ventana de 0.80 x 0.90 m en cada muro longitudinal (paralelo al movimiento del simulador) y una puerta de 0.80 x 1.80 m en uno de los muros transversales. Las únicas excepciones fueron los módulos M6 y M7, que no tuvieron ventanas, con la finalidad de estudiar el efecto de los vanos en la resistencia de los muros de adobe.

Se usó como cimentación una viga de concreto armado, diseñada también como medio de transporte y de anclaje al simulador sísmico.

Las unidades de adobe y el mortero se prepararon con suelo del campus de la PUCP, una arcilla de baja plasticidad. Las dimensiones nominales de los adobes fueron 0.30 x 0.13 x 0.08 m, y fueron fabricados con una mezcla, en volumen, de ocho partes de suelo y una parte de paja.

Se utilizaron dos técnicas constructivas, representativas del método tradicional de construcción y de la tecnología mejorada propuesta en la Referencia 4. Esta última difiere de la tradicional en el uso de adobes más resistentes y uniformes, en el tratamiento de las juntas durante el asentado y en la adición de paja (y en algunos casos arena gruesa) al mortero de barro, con el propósito de reducir su fisuración debida a la contracción por secado. El mortero de barro empleado en esta investigación para los módulos con tecnología mejorada, consistió en una mezcla de dos partes de suelo, una de paja y una de arena gruesa, en volumen.

La efectividad de la tecnología mejorada fue evidente a los pocos días de construir los especímenes. El mortero de los módulos M1 y M3, construídos con tecnología tradicional, se agrietó completamente (tal como sucede en la mayoría de las viviendas de adobe), mientras que en los módulos construídos con tecnología mejorada, la fisuración fue casi imperceptible.

El sistema de refuerzo consistió en una malla de caña colocada en el interior de los muros de adobe. El refuerzo vertical, de cañas enteras del tipo conocido en el Perú como "caña brava", fue anclado a la cimentación y a una viga de coronación, hecha de troncos de eucalipto, colocada en el borde superior de los muros. El refuerzo horizontal consistió de una serie de capas de caña partida del tipo llamado "carrizo",

colocadas cada cuatro hiladas y entretrejidas en los encuentros de los muros. La Figura 1 muestra la disposición de los adobes y del refuerzo de caña. El módulo M5 fue construido siguiendo una variante del sistema de refuerzo, con adobes de forma diferente, como se muestra en la Figura 2. Las Figuras 3 y 4 muestran detalles de la colocación del refuerzo durante la construcción de los módulos.

El módulo M8 no tuvo refuerzo horizontal, en un intento por simplificar el proceso constructivo, ya que la colocación de este refuerzo es laboriosa.

Los ocho módulos tuvieron el mismo tipo de techo, formado por vigas de eucalipto y una cubierta de cañas y barro. En los módulos reforzados, las vigas del techo fueron fijadas a la viga de coronación de los muros; en los módulos M1, M2 y M7 (sin refuerzo de caña y sin viga de coronación), las vigas del techo se apoyaron directamente sobre los muros.

Durante la construcción de cada módulo se prepararon especímenes pequeños (pilas, muretes, muestras de mortero, etc.), empleando los mismos materiales y técnica constructiva. Estos especímenes se ensayaron estáticamente para determinar las propiedades y características de los materiales utilizados. Los resultados de estos ensayos se resumen en el Apéndice

EQUIPO EXPERIMENTAL E INSTRUMENTACION

El simulador de sismos de la PUCP es una plataforma de 4.4 x 4.4 m diseñada para moverse en una única dirección horizontal. Las especificaciones de máximo desplazamiento, velocidad y aceleración son 150 mm, 500 mm/seg y 1 g, respectivamente. Es posible ensayar especímenes de hasta 160 kN de peso.

El movimiento de la plataforma se controla a través de una señal de desplazamiento. La amplitud deseada del movimiento se especifica como una fracción del desplazamiento máximo de la plataforma (150 mm). Por consiguiente, es factible usar la misma señal para simular eventos sísmicos de diferente intensidad, variando la amplitud del movimiento.

La instrumentación consistió en transductores de desplazamiento (LVDT) y aceleración (acelerómetros) colocados en la plataforma y en lugares específicos de los módulos ensayados, para medir tanto la excitación sísmica como la respuesta estructural. La Figura 5 presenta el esquema de un módulo típico reforzado, en el que se indica la ubicación de los instrumentos.

EJECUCION DE LOS ENSAYOS

Se usó la misma señal de desplazamientos para todos los ensayos. Esta señal fue derivada del registro (componente longitudinal) del sismo del 31 de Mayo de 1970, captado en el Instituto Geofísico del Perú (Ref. 6), correspondiente a las condicio-

nes de suelo de la ciudad de Lima (grava densa). La parte del movimiento fuerte del registro de aceleraciones se filtró, integró numéricamente y normalizó de acuerdo a las especificaciones del sistema de control del simulador.

El ensayo de cada módulo se realizó en varias fases o etapas, tratando de representar una serie de eventos sísmicos de intensidad creciente. La secuencia de ensayo fue básicamente la misma para todos los módulos, es decir, se empezó con un movimiento de poca amplitud y se aumentó la intensidad del mismo hasta producirse el colapso parcial o total de la estructura.

Los registros de desplazamiento y aceleración de la plataforma, medidos en las diferentes fases de los ensayos, no mostraron distorsiones en la forma de la señal. La Figura 6 muestra registros típicos de desplazamiento y aceleración de la plataforma, para un desplazamiento máximo de 80 mm. El espectro de respuesta de aceleraciones, normalizado a la máxima aceleración de la plataforma, puede apreciarse en la Figura 7.

La Tabla 2 describe las características del movimiento de la plataforma en cada fase del ensayo. El Potencial Destructivo PD (Ref. 7) y la Intensidad de Arias IA (Ref. 8) fueron calculados como medidas adicionales de la intensidad de la excitación sísmica simulada. Cabe mencionar, con fines de comparación, que el terremoto de El Centro de 1940, tuvo un Potencial Destructivo total de 84 mm-seg y una Intensidad de Arias total de 3367 mm/seg, ambos valores menores que los correspondientes a los de la Fase 4 de los ensayos.

Antes de cada fase del ensayo, se realizó una prueba de vibración libre para medir la frecuencia natural de los módulos. Para ello, se utilizó como excitación en la plataforma, una onda cuadrada de pequeña amplitud.

RESPUESTA DINAMICA DE LOS MODULOS

A continuación se presentan las observaciones más importantes de los ensayos de simulación sísmica. La información completa y detallada se encuentra en la Referencia 9.

Los módulos sin refuerzo (M1, M2 y M7) no pudieron ser sometidos a la secuencia completa de ensayos pues colapsaron durante la fase 4a o antes. Su comportamiento fue similar al observado en las viviendas tradicionales de adobe durante terremotos reales, es decir, aparecieron grietas verticales en las esquinas, por las cuales se separaron los muros, produciéndose el colapso. El estado del módulo M1 luego de la fase 4a puede apreciarse en la Figura 8.

Los módulos reforzados tuvieron un comportamiento diferente. A pesar que fueron sujetos a solicitaciones más intensas (los módulos M4 y M6 pudieron ser sometidos

a la fase 6 del ensayo), la viga de coronación y el refuerzo de caña lograron mantener la integridad de la estructura, a pesar del fuerte daño sufrido, y no se produjo en ningún caso el colapso. El agrietamiento se inició en las esquinas de las ventanas y los daños se concentraron en los muros de corte (paralelos a la dirección del movimiento). La Figura 9 muestra al módulo M4 luego de la fase 5.

El módulo reforzado M3, a pesar de haber sido construido con tecnología tradicional, tuvo un comportamiento, después de la fisuración de los muros, superior al de los módulos sin refuerzo. La Figura 10 muestra este módulo luego de la fase 5.

En contraste, el módulo M8, sin refuerzo horizontal, sufrió severos daños durante la fase 4 y colapsó durante la fase 5, lo que corrobora la importancia de utilizar refuerzo tanto vertical como horizontal.

En los módulos con tecnología tradicional, el agrietamiento ocurrió en la zona débil de las juntas, generada por la fisuración existente antes del ensayo, producto de la contracción de secado del mortero. Los módulos con tecnología mejorada se agrietaron en forma súbita, siguiendo el esquema diagonal típico de la falla por fuerza cortante.

La Figura 11 muestra el coeficiente sísmico, definido como la máxima fuerza cortante en la base por unidad de peso. Hasta la fase 3, el coeficiente sísmico fue prácticamente el mismo para todos los módulos. A partir de la fase 4, aún cuando las sollicitaciones dinámicas fueron similares, los módulos con tecnología tradicional (M1, sin refuerzo y M3, reforzado) exhibieron coeficientes sísmicos menores. Esto sugiere que la rigidez de la estructura depende más de la calidad de la construcción que del refuerzo.

La Figura 12 presenta la frecuencia natural de vibración de los módulos después de cada fase. Es claro que la tecnología mejorada provee una mayor rigidez. No se notó un cambio importante de la frecuencia de vibración hasta la fase 3. En la fase 4 se produjo en todos los módulos una reducción drástica en la frecuencia de vibración, lo cual indica una pérdida generalizada de rigidez, asociada a los severos daños observados en esta fase.

El efecto beneficioso del refuerzo puede apreciarse en la Figura 13, en la que se presenta la evolución en el tiempo de los desplazamientos laterales (relativos a la base) de los muros de corte durante la fase 4. El módulo M2, con tecnología mejorada pero sin refuerzo, experimentó deformaciones pequeñas hasta los 11 segundos del inicio de dicha fase, cuando ocurrió súbitamente una gran deformación, indicativa de daños severos. El módulo M3, hecho con tecnología tradicional y reforzado, fue capaz de mantener un alto nivel de deformaciones durante todo el ensayo sin llegar al colapso. El módulo M4, reforzado y con tecnología mejorada, mostró un nivel de deformaciones comparable al del módulo M2 antes de la fisuración de los muros de corte; sin embargo, el refuerzo logró controlar la deformación luego de la fisuración.

La Figura 14 muestra relaciones típicas de cortante basal versus desplazamiento lateral en los muros de corte de los módulos M3 y M4 durante la fase 3. Puede apreciarse que el módulo M3 ya presenta ciclos de deformación inelástica, lo que indica la ocurrencia de daños y pérdida general de rigidez. En contraste, el módulo M4, construido con tecnología mejorada, muestra una mayor rigidez lateral y comportamiento prácticamente lineal. Esto confirma que las estructuras construidas con tecnología mejorada poseen mayor resistencia y rigidez que aquellas construidas con tecnología tradicional.

El refuerzo de caña no tiene una influencia significativa en la rigidez y resistencia de las estructuras en la etapa previa a la fisuración. Luego de ocurrir el agrietamiento de los muros, el efecto del refuerzo es notorio, tal como se observa en la Figura 15, que muestra relaciones cortante basal versus desplazamiento lateral del módulo sin refuerzo M2 y del reforzado M4 (ambos de tecnología mejorada) durante la fase 4. Es evidente que el refuerzo controla los desplazamientos, reduciendo el nivel de daño en la estructura y así evitando el colapso.

RECOMENDACIONES PARA EL DISEÑO DE VIVIENDAS DE ADOBE

Todos los módulos ensayados en este proyecto se ajustaban a las especificaciones de las Normas Técnicas de Edificación en Adobe (Ref. 10) en lo referente a la altura máxima de los muros, distancia máxima entre muros transversales, espesores mínimos; empleo de refuerzo de caña, etc. En los ensayos de simulación sísmica se ha comprobado que el cumplimiento de estas especificaciones conduce a un comportamiento aceptable de las viviendas de adobe ante sismos severos. El refuerzo evita la falla más grave de las viviendas de adobe, que es la separación de los muros en las esquinas.

Si las dimensiones de los muros cumplen las especificaciones del Código y se utilizan vigas de coronación y refuerzo de caña, la falla por flexión de los muros es controlada, y por lo tanto, el diseño de las viviendas de adobe consistirá básicamente en verificar que los esfuerzos cortantes actuantes en los muros paralelos a la dirección de análisis, no sobrepasen valores admisibles.

Para evaluar la distribución en altura de la fuerza cortante en los muros, se sugiere emplear un diagrama triangular de fuerzas de inercia.

La Tabla 3 muestra los máximos esfuerzos cortantes que se produjeron en los muros laterales durante las fases 3 y 4, tanto en la base como a nivel del alféizar de las ventanas ubicadas en los muros de corte. Estos esfuerzos han sido obtenidos dividiendo la fuerza cortante máxima entre el área nominal de los muros de corte.

En base a la información de esta Tabla, y considerando que la fase 3 de los ensayos no produjo daños de consideración en los módulos, se propone que los esfuerzos que se presentaron en ella sean considerados esfuerzos admisibles para el diseño. Si-

milarmente, ya que la fase 4 produjo severos daños en todos los módulos, los esfuerzos que se presentaron en esta fase pueden utilizarse para verificar la capacidad última de las viviendas de adobe.

Se recomiendan los siguientes valores admisibles:

En la base de los muros : $\tau_{adm} = 30 \text{ kPa}$
 En la base de las ventanas : $\tau_{adm} = 25 \text{ kPa}$

Y los siguientes valores de resistencia última:

En la base de los muros : $\tau_u = 50 \text{ kPa}$
 En la base de las ventanas : $\tau_u = 35 \text{ kPa}$

Los valores indicados son válidos para viviendas hechas con tecnología mejorada y refuerzo de caña horizontal y vertical. Los esfuerzos admisibles recomendados son cercanos a los especificados en el Código (Ref. 10).

El refuerzo vertical y horizontal y la viga de coronación son esenciales para las estructuras ubicadas en zonas de alto riesgo sísmico. El refuerzo horizontal mínimo consistirá en dos cañas chancadas cada cuatro hiladas. La separación máxima entre cañas verticales será de 0.60 m, y es indispensable colocar al menos una caña en cada esquina, y otra tan cerca a los bordes libres de puertas y ventanas como sea posible.

RECOMENDACIONES PARA LA CONSTRUCCION DE VIVIENDAS DE ADOBE

Los adobes no requieren tener una elevada resistencia a la compresión. Los adobes hechos en forma tradicional son adecuados siempre y cuando sean de calidad aceptable, lo que implica que sean manipulables, de tamaño uniforme y están libres de rajaduras. Con el fin de prevenir el agrietamiento de los adobes, se requiere agregar una pequeña cantidad de paja al barro, y si fuera necesario, secarlos a la sombra.

Por el contrario, la calidad del mortero de barro es determinante en la resistencia al corte de los muros de adobe. El mortero debe contener la cantidad suficiente de paja para evitar su agrietamiento durante el secado. Si para lograr ello se requiriere una cantidad tan grande de paja que haga intrabajable al mortero, dicha cantidad puede reducirse agregando arena gruesa a la mezcla. Para establecer las proporciones de barro, paja y, eventualmente, arena, es necesario hacer pruebas, las que pueden consistir en especímenes del tipo "emparedado" (dos adobes unidos con mortero, los cuales son separados luego de 48 horas de secado, Ref. 4); la proporción adecuada será aquella en la cual no se presenten rajaduras en el mortero. El "dormido" del barro es recomendable para obtener un mortero más uniforme con menos agua.

Debe tenerse cuidado al momento de asentar los adobes. Estos deben estar libres de polvo, e inmediatamente antes de asentarse, las superficies deben humedecerse para evitar el secado prematuro del mortero y así mejorar la adherencia. Las paredes deben estar aplomadas y las juntas tanto horizontales como verticales deben ser uniformes y llenarse completamente con mortero.

Las cañas verticales deben estar ancladas firmemente a la cimentación y a la viga de coronación. El refuerzo horizontal debe ser amarrado a las cañas verticales y al refuerzo horizontal de los muros transversales, para ayudar a prevenir la separación de los muros en las esquinas.

Las vigas del techo deben fijarse firmemente a la viga de coronación.

Se recomienda que la cimentación sea de concreto ciclópeo, con el fin de proteger al muro de la lluvia y la humedad, y evitar asentamientos diferenciales. Asimismo, utilizar un sobrecimiento que eleve al muro sobre el nivel del suelo.

COSTO ESTIMADO DE LOS MATERIALES DE REFUERZO

En la construcción de viviendas de adobe en zonas rurales, el uso de tecnología mejorada no debería representar un costo adicional significativo, ya que esta tecnología requiere únicamente el uso de paja y, en algunos casos, arena en el mortero de barro, además de exigir mayor cuidado en la construcción de los muros. El techo, muros, acabados de la casa, etc. no influyen en el costo adicional de la tecnología mejorada, ya que estos elementos son comunes tanto para viviendas de adobe reforzadas como sin refuerzo.

El costo adicional proviene de los materiales de refuerzo: eucalipto para la viga de coronación, caña, cordel plástico (tipo "rafia") para amarrar las cañas en las esquinas, clavos, alambre y pequeñas piezas de madera para fijar la caña vertical a la viga de coronación.

A continuación se presentan las cantidades y costos estimados de estos materiales, para uno de los módulos reforzados ensayados en este Proyecto:

	CANT.	DENOMINACION	COSTO US\$
Caña vertical	24 u.	Caña Brava	4.40
Caña horizontal	40 u.	Caña Carrizo	3.40
Cordel plástico	3 Rollo	Rafia	3.00
Clavos	1 Kg.		1.30
Alambre	1 Kg.	Alambre # 16	1.20
Piezas de madera	6 pie ²	Madera Tornillo	3.40
Eucalipto	8 u.	Rollizo 3"x4 m	11.00
		COSTO TOTAL	27.70 US\$

El área techada de los módulos fue de 10.60 m², por lo que el costo por metro cuadrado de los materiales de refuerzo resulta ser alrededor de 2.60 US\$. En una vivienda real, este costo se reduciría ligeramente, porque existirían muros comunes a varias habitaciones.

Estos precios corresponden a la ciudad de Lima en Setiembre de 1988, y pueden variar significativamente con la ubicación y la situación económica del momento.

El costo de la cimentación, la cual forma parte del sistema de refuerzo, no ha sido considerado, ya que dependerá de la disponibilidad de materiales locales (cemento, cal, agregados, etc.), de las condiciones del subsuelo y del clima de la zona. Este costo puede ser significativo debido al precio del cemento en la actualidad.

CONCLUSIONES

- 1- En la técnica de construcción tradicional es común que el mortero de barro se fissure debido a la contracción por secado. En consecuencia, las viviendas tradicionales de adobe tienen poca rigidez y resistencia. Aun ante sismos de mediana intensidad, el daño que se produce es importante.
- 2- La mejora de los materiales, técnicas constructivas, calidad de la mano de obra, etc., incrementa la resistencia y rigidez de los muros antes de que ocurra el agrietamiento causado por un sismo severo. Sin embargo, luego que se agrietan los muros, estos beneficios se pierden. Por lo tanto, no es suficiente mejorar la tecnología constructiva para las estructuras de adobe ubicadas en zonas de alto riesgo sísmico.
- 3- Las construcciones no reforzadas de adobe mostraron en los ensayos un comportamiento inadecuado frente a sismos severos, independientemente de la tecnología usada. El mecanismo de falla consistió en la separación de los muros en las esquinas, ocasionando el colapso de los mismos debido a la falta de estabilidad en la dirección transversal al movimiento.
- 4- El refuerzo de caña horizontal y vertical, combinado con una sólida viga de coronación, impide la separación de los muros en las esquinas, manteniendo la integridad de la estructura luego del agrietamiento de los muros resistentes. Por lo tanto, su presencia es indispensable para evitar el colapso aún en el caso de eventos sísmicos severos.
- 5- Si las dimensiones y espesores de los muros cumplen con los mínimos especificados en las Normas Técnicas de Edificación en Adobe (Ref. 10), y se provee refuerzo adecuado, se controla la falla de flexión ocasionada por las fuerzas de inercia perpendiculares al muro, y por lo tanto, la resistencia de la vivienda de adobe dependerá básicamente de la resistencia al corte de los muros.

TABLA 1. CARACTERISTICAS DE LOS MODULOS ENSAYADOS

Módulo	Tecnología	Refuerzo	Ventanas
M1	Tradicional	No	Sí
M2	Mejorada	No	Sí
M3	Tradicional	Horizontal y Vertical	Sí
M4	Mejorada	Horizontal y Vertical	Sí
M5	Mejorada	Horizontal y Vertical	Sí
M6	Mejorada	Horizontal y Vertical	No
M7	Mejorada	No	No
M8	Mejorada	Vertical	Sí

TABLA 2. SECUENCIA DE ENSAYOS

Módulos	Fase	Desp.Máx. mm	Acel.Máx. g	PD mm-seg (1)	IA mm/seg (2)	Vo l/seg (3)
M1 @ M5	1	10	0.10	2	193	9.8
M1 @ M8	2	20	0.21	9	791	9.4
M1 @ M8	3	40	0.46	34	3131	9.7
M1 @ M8	4	80	0.88	156	12294	8.9
M1 y M2	4a	100	1.09	251	19068	8.7
M3 @ M6,M8	5	120	1.36	341	26870	8.9
M4 y M6	6	140	1.71	482	34815	8.5

(1) Potencial Destructivo (Ref. 7)

(2) Intensidad de Arias (Ref. 8)

(3) Intensidad de cruces por cero de la señal

TABLA 3. MAXIMOS ESFUERZOS CORTANTES

Módulo	Fase 3		Fase 4	
	Base kPa	Alféizar kPa	Base kPa	Alféizar kPa
M1	30.1	21.0	28.7	(1)
M2	33.1	27.1	50.6	35.7
M3	30.2	21.4	31.7	29.6
M4	32.5	25.9	54.9	37.7
M5	27.0	25.4	47.8	43.4
M6	36.8	(2)	66.8	(2)
M7	40.0	(2)	57.2	(2)
M8	34.9	26.1	50.5	(1)

(1): Se retiró la instrumentación antes de la fase.

(2): Módulo sin ventanas.

APENDICE - ENSAYOS ESTATICOS

Durante la construcción de cada módulo se prepararon especímenes pequeños, empleando los mismos materiales y técnica constructiva que el módulo correspondiente. Estos se ensayaron estáticamente para determinar las propiedades y características de los materiales utilizados.

Los especímenes preparados fueron los siguientes:

- Cubos de 80x80x80 mm cortados de un adobe, ensayados a compresión.
- Muestras de mortero de 80x80x80 mm ensayadas a compresión.
- Pilas formadas por seis adobes asentados con mortero, ensayadas a compresión.
- Especímenes para ensayos de corte directo.
- Muretes de 600x600x130 mm ensayados a compresión diagonal.
- Especímenes para determinar la adherencia entre la albañilería de adobe y la caña (ensayo de extracción).

La Tabla A1 resume los resultados de los ensayos estáticos realizados en esta investigación. La descripción detallada de los especímenes y resultados se encuentra en la Referencia 9.

El término "calidad" de la albañilería de adobe debe relacionarse con su capacidad de resistir fuerzas cortantes, ya que éstas serán las solicitaciones más severas que la estructura deberá soportar bajo la acción de los sismos.

De los resultados de estos ensayos pueden extraerse las siguientes conclusiones:

- 1- La resistencia a la compresión del adobe depende principalmente del suelo utilizado. La resistencia a la compresión determina la calidad del adobe en sí, mas no la calidad de la albañilería que se puede obtener usando estos adobes.
- 2- El uso de un mortero de barro de alta resistencia a la compresión no produce necesariamente albañilería de buena calidad. La paja y la arena gruesa que se añaden al mortero disminuyen la resistencia a la compresión del mismo, pero aumentan la resistencia al corte de la albañilería, al controlar la fisuración que se produce durante el secado del mortero.
- 3- El ensayo de compresión en pilas de adobe no proporciona una medida adecuada de la calidad de la albañilería de adobe.
- 4- El ensayo de compresión diagonal es el más apropiado para determinar la resistencia al corte de la albañilería de adobe.

TABLA A1
RESULTADOS DE ENSAYOS ESTATICOS

Ensayo	Tecnología	Promedio kPa	Número espec.	Coef. Var. %
σ adobe	Trad.	2400	10	8.7
	Mej.	2540	10	10.0
σ mortero	Trad.	3490	20	5.2
	Mej.	1960	52	14.0
σ pila	Trad.	1640	10	11.0
	Mej.	1630	23	7.1
E pila	Trad.	181000	10	15.0
	Mej.	222000	23	8.0
τ comp.diag.	Trad.	(1)	(1)	(1)
	Mej.	70	15	20.0
Adherencia	Trad.	20	8	39.0
	Mej.	33	20	22.0

(1): La resistencia de estos especímenes fué tan baja que no resistieron el manipuleo durante el transporte.

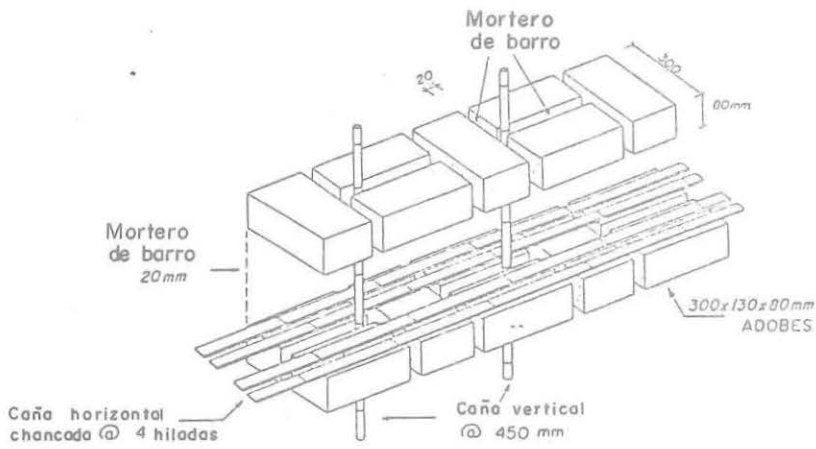


Figura 1.
Refuerzo interior de caña.

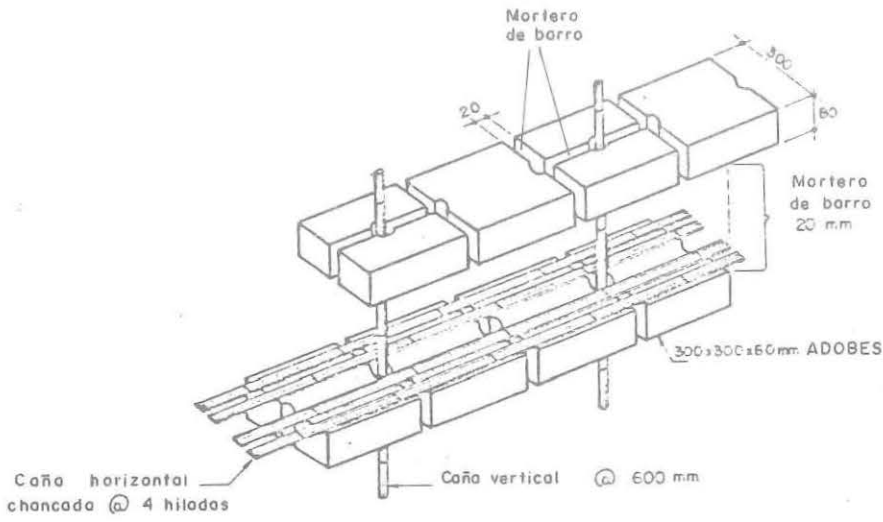


Figura 2.
Refuerzo del módulo M5.



Figuras 3 y 4.
Colocación del refuerzo de caña.

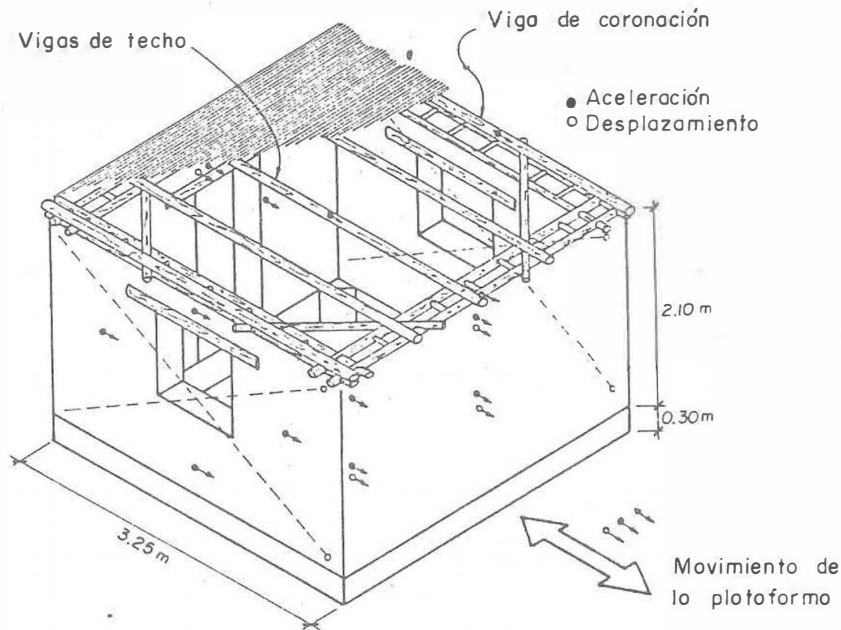


Figura 5.
Instrumentación de
módulos reforzados.

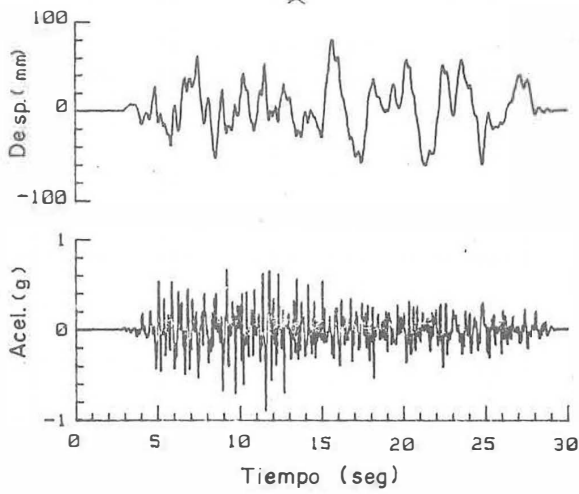


Figura 6.
Fase 4, registro típico del movimiento
de la plataforma.

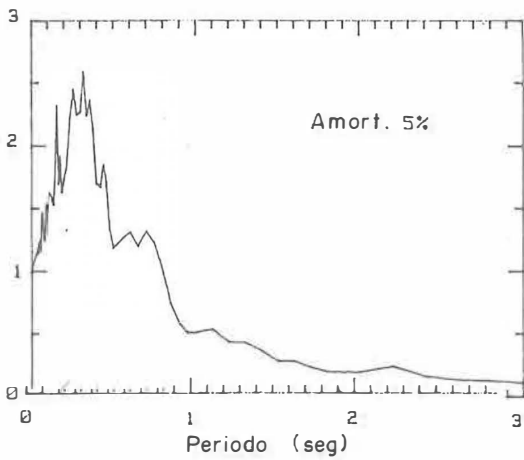


Figura 7.
Espectro de aceleraciones normalizado.

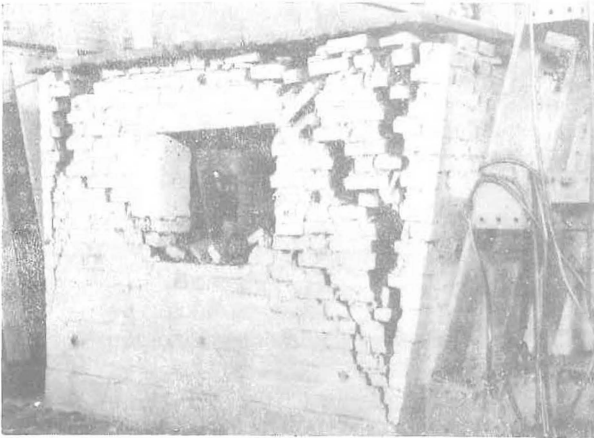


Figura 8.
Módulo M1 después de la fase 4a.

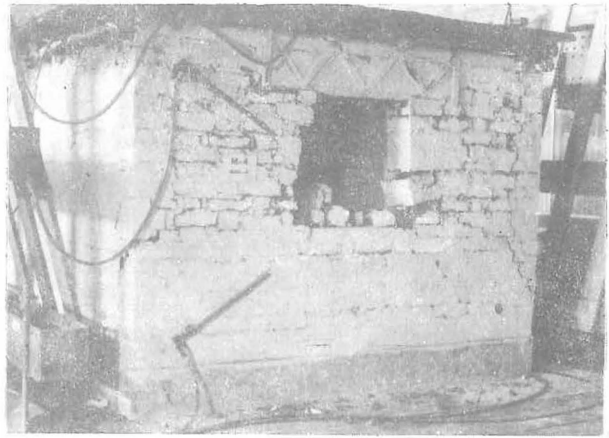


Figura 9.
Módulo M4 después de la fase 5.

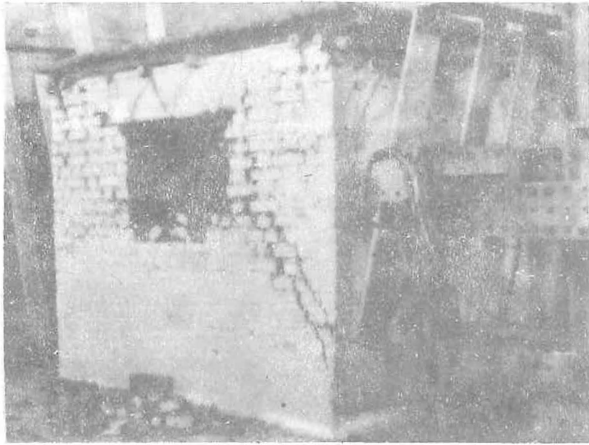


Figura 10.
Módulo M3 después de la fase 5.

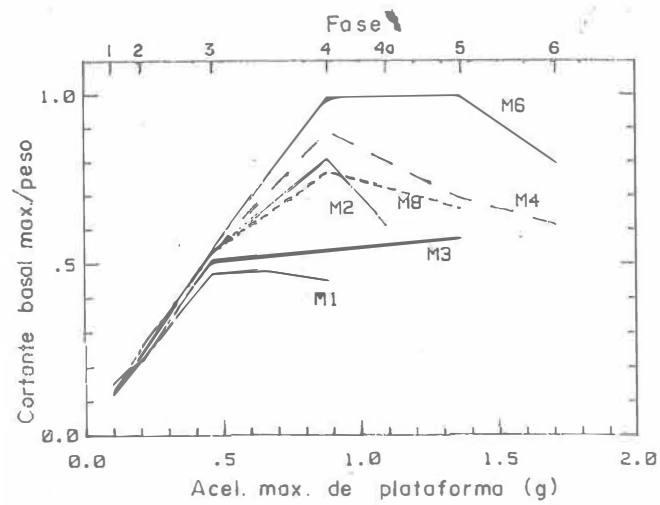


Figura 11.
Coeficientes sísmicos.

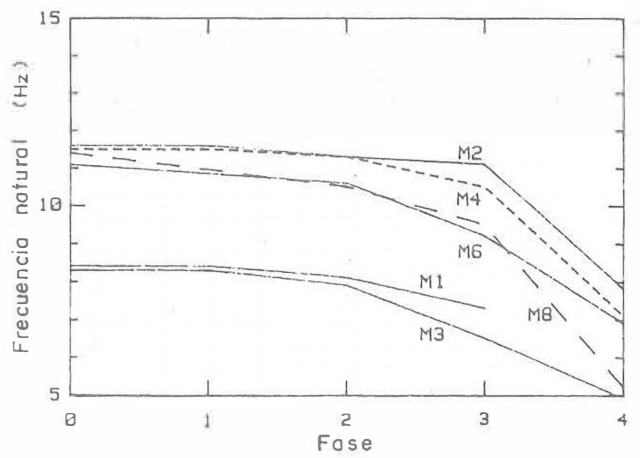


Figura 12.
Frecuencias naturales.

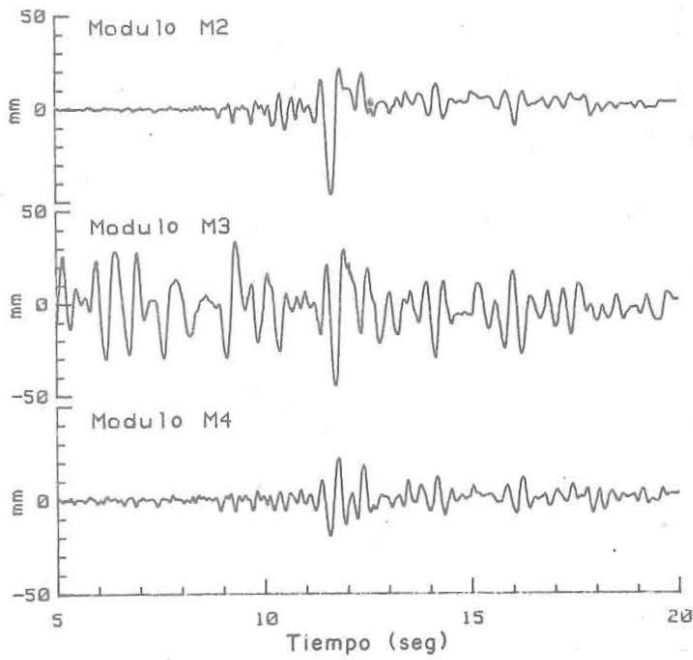


Figura 13.
Desplazamientos laterales. Muros de corte, fase 4.

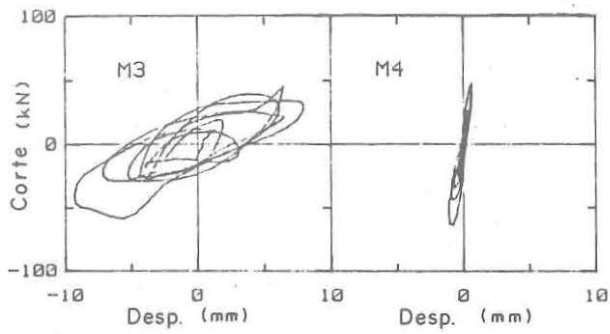


Figura 14.
Cortante basal vs. desplazamiento lateral,
fase 3.

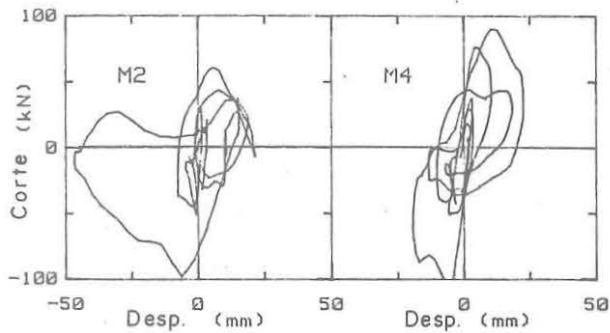


Figura 15.
Cortante basal vs. desplazamiento lateral,
fase 4.

REFERENCIAS

1. "Estudio de la Industria de la Vivienda en el Perú", Instituto Nacional de Investigación y Normalización de la Vivienda, Lima, Perú, 1985.
2. M. Corazao y M. Blondet, "Estudio Experimental del Comportamiento Estructural de las Construcciones de Adobe frente a Solicitaciones Sísmicas", Premio Sayhuite, Banco Peruano de los Constructores, Lima, Perú, 1973.
3. M. Blondet y J. Vargas, "Investigación sobre Vivienda Rural", Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú, 1978.
4. J. Vargas, J. Bariola y M. Blondet, "Resistencia Sísmica de la Mampostería de Adobe", PUCP, Lima, Perú, 1984.
5. M. Blondet y G. Ottazzi, "A Proposal for a Standard Test to Evaluate the Seismic Strength of Adobe Masonry", Proceedings of CIB 86, Advancing Building Technology, Washington DC., 1986.
6. A. G. Brady y V. Perez, "Strong-Motion Earthquake Accelerograms, Digitization and Analysis. Records from Lima, Perú: 1951 to 1974", Open File Report No. 77-587, U.S. Geological Survey, 1977.
7. G. R. Saragoni y R. Araya, "Earthquake Accelerogram Destructiveness Potential Factor", Proceedings of the Eight World Conference on Earthquake Engineering, San Francisco, USA, 1984.
8. A. Arias, "A Measurement of Earthquake Intensity", Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, 1969.
9. Proyecto "Viviendas de Adobe Resistentes a los Sismos", Reporte Técnico, Período Junio 1986 - Agosto 1988, Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo - PUCP, Lima, Perú, 1988.
10. ININVI, Normas Técnicas de Edificación. Norma E-080 Adobe, Lima, Perú, 1985.