

# COMPORTAMIENTO SÍSMICO Y ALTERNATIVAS DE REHABILITACIÓN DE EDIFICACIONES EN ADOBE Y TAPIA PISADA CON BASE EN MODELOS A ESCALA REDUCIDA ENSAYADOS EN MESA VIBRATORIA

Luis E. Yamin\* , Ángel E. Rodríguez \*\*, Luis R. Fonseca\*\*\*, Juan C. Reyes\*\*\*\*, Camilo A. Phillips\*\*\*\*\*

## RESUMEN

*El presente artículo resume los resultados principales de una investigación tendiente a determinar las principales características y propiedades mecánicas de los elementos estructurales que conforman las edificaciones en tierra y a partir de esta información plantear alternativas de rehabilitación sísmica acordes con las características y entorno de este tipo de construcciones en Colombia. Las medidas de rehabilitación planteadas que consisten básicamente en reforzamiento con mallas de acero y pañetes a base de cal y reforzamiento con elementos de madera confinantes, fueron sometidas a un programa experimental mediante la realización de ensayos sobre probetas sometidas a diferentes tipos de sollicitaciones, ensayos sobre muros a escala natural sometidos a cargas en el plano y perpendiculares al plano, ensayos de modelos a escala 1:5 sometidos a la acción de mesa vibratoria y ensayos de viviendas a escala 1:1.5 sometidas a carga cíclica horizontal. Los resultados de la investigación permiten establecer las ventajas y desventajas de cada uno de los sistemas de rehabilitación analizados. Se encuentra que, a pesar de la alta vulnerabilidad sísmica de estos sistemas constructivos, el método de rehabilitación con elementos de madera confinantes representa una alternativa viable y atractiva para la disminución del riesgo en este tipo de construcciones.*

## SUMMARY

*This paper summarizes the main results of a research project carried out to determine the main characteristics and mechanical properties of the structural elements that conform the earth made constructions, and to propose seismic rehabilitation alternatives according to the seismic hazard and characteristics of this kind of structures in Colombia. The proposed seismic rehabilitation alternatives consist of reinforcement with wire mesh covered with lime based mortar, and confining reinforcement with wooden elements. These alternatives were subjected to a series of tests on small specimens, full scale walls loaded on both directions, shaking table tests on 1:5 scale models and cyclic horizontal loading on 1:1.5 house models. The results of the research allow to establish advantages and disadvantages for the*

---

\* Director CITEC y Profesor Asociado de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.  
e-mail: lyamin@uniandes.edu.co

\*\* Ingeniero Civil, Magíster en Ingeniería Civil, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. e-mail: ed-rodri@uniandes.edu.co

\*\*\* Ingeniero Civil, Magíster en Ingeniería Civil, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. e-mail:lfonsec@uniandes.edu.co

\*\*\*\* Profesor Instructor e Investigador de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.  
e-mail: jureyes@uniandes.edu.co

\*\*\*\*\* Profesor de Cátedra e Investigador de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.  
e-mail: c-philli@uniandes.edu.co

rehabilitation alternatives studied. Considering the high seismic vulnerability of earth made constructions, the confining reinforcement with wooden elements was found to be a promising alternative to reduce the seismic risk of this type of constructions.

## INTRODUCCIÓN

Muchas de las edificaciones del período colonial español, fueron construidas en mampostería de adobe y/o tapia pisada. Los materiales para la construcción de las iglesias y de las casas de la época se limitaron generalmente a los que estaban disponibles en la región y trabajados comúnmente por artesanos locales. Como consecuencia de su edad, diseño y funciones, los edificios de adobe y tapia son estructuras de tipo histórico y de legado cultural significativo dentro de las comunidades. La alta vulnerabilidad sísmica de estas herencias arquitectónicas ha sido claramente identificada, tanto que muchas de estas han sido reparadas o reconstruidas varias veces en el mismo sitio de la destrucción de la estructura precedente por un terremoto. En diversos terremotos ocurridos en el mundo, estructuras construidas con dichos materiales han demostrado tener un mal comportamiento, colapsando en forma muy rápida, incluso ante los sismos moderados, lo que generalmente provoca la muerte de sus ocupantes y grandes pérdidas económicas, culturales y patrimoniales.

La reducción de la vulnerabilidad sísmica de edificios históricos y culturales involucra consideraciones adicionales a los procesos de rehabilitación de edificios convencionales, tales como la necesidad de mantener lo más

inalterado posible las características históricas y culturales de las mismas.

## PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS MATERIALES

Se realizó una caracterización general de las propiedades mecánicas de los materiales utilizados en las construcciones en tierra en relación al peso y a la resistencia ante diferentes sollicitaciones de esfuerzos actuantes. Se adelantaron ensayos de caracterización sobre probetas a escala natural y sobre probetas a escala reducida 1:5. En la 0 se resumen las principales propiedades mecánicas encontradas a partir de las probetas a escala real y a escala reducida.

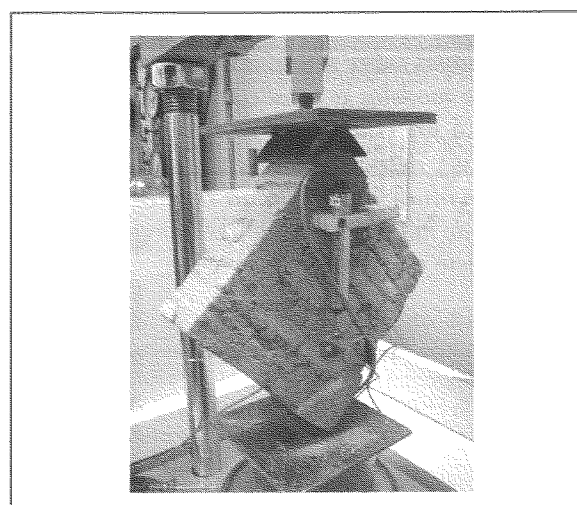


Figura 1. Ensayo de tracción diagonal - muretes a escala 1.5

Tabla 1. Propiedades mecánicas de los materiales estudiados

Parámetro	Unidades	Escala real		Escala 1:5	
		Adobe	Tapia	Adobe	Tapia
Densidad	Ton/m <sup>3</sup>	1.80	1.92	1.87	1.82
Módulo de Elasticidad	kgf/cm <sup>2</sup>	1170	800*	1305	602
Módulo de Rigidez	kgf /cm <sup>2</sup>	302	315	179	109
Resistencia a Compresión	kgf /cm <sup>2</sup>	12.2	3.3	15.8	7.12
Resistencia a Cortante	kgf /cm <sup>2</sup>	0.31	0.37	0.8	0.6
Resistencia a Flexión	kgf /cm <sup>2</sup>	-----	0.15	0.23	0.28

\* modelada

Como se puede concluir de los resultados que se presentan, las propiedades mecánicas principales de los materiales no varían significativamente en función de la escala de las probetas excepto en los casos en que el peso propio del espécimen comienza a afectar los resultados. En dichos casos resulta claro que las resistencias medidas en los modelos a escala reducida presentarán en general valores mayores que los correspondientes a escala real.

## ALTERNATIVAS DE REHABILITACIÓN SÍSMICA

Considerando la alta amenaza sísmica a la que están sometidas las edificaciones de adobe y tapia en Colombia y su gran vulnerabilidad ante eventos de este tipo, es necesario desarrollar alternativas de reforzamiento o rehabilitación que tengan en cuenta no solo los aspectos técnicos relacionados con el comportamiento del material y del tipo constructivo sino las condiciones socioeconómicas y las características histórico culturales de estas edificaciones. Se pretende entonces preservar al máximo la arquitectura original, utilizando en lo posible materiales similares o compatibles con los originales, tratando de conservar el aspecto general de la vivienda y sus terminados. Las alternativas de reforzamiento que se estudian en la presente investigación tienen por objetivo disminuir el riesgo sísmico al que están sometidas este tipo de edificaciones. Se pretende entonces evitar el colapso de la edificación durante el terremoto con el fin de salvaguardar la vida de los ocupantes. Adicionalmente se pretende también minimizar las pérdidas económicas asociadas generalmente a personas de bajos recursos económicos. Las medidas propuestas están dirigidas principalmente a la rehabilitación de viviendas existentes y no a la construcción de nuevas viviendas de construcción sismorresistente.

Luego de una amplia revisión bibliográfica, investigación y análisis sobre el comportamiento de este tipo de edificaciones, se seleccionaron dos alternativas de rehabilitación que cumplen con los criterios de facilidad constructiva,

minimización de intervención del sistema estructural existente y uso de materiales económicos de fácil consecución e instalación. La primera de ellas consistente en el reforzamiento con malla y mortero de cal en sitios estratégicos de la edificación. Esta alternativa está basada en amplios desarrollos de investigación en países como Perú (Zegarra, 2001). La segunda alternativa seleccionada consiste en el reforzamiento mediante elementos confinantes de madera, la cual esta basada en trabajos de investigación adelantados en el Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico, CITEC, de la Universidad de los Andes.

### Reforzamiento con malla y mortero de cal

Esta técnica consiste en instalar malla electrosoldada por franjas horizontales y verticales (simulando vigas y columnas de confinamiento, respectivamente) en las zonas críticas de la vivienda. La malla se sujeta a la pared mediante clavos y tapas de gaseosa cada 30 cm y se instala tanto en la parte externa como en la interna del muro. Adicionalmente se proporcionan anclajes o conectores que atraviesan el muro a espaciamientos aproximados de 50 cm en las dos direcciones. Estos conectores están compuestos por alambre de 8 mm colocado en orificios previamente perforados los cuales se rellenan con mortero de cal y arena en proporción 1:2. Posteriormente la malla se recubre con mortero de cal y arena con el mismo proporcionamiento. Se pretende con esta medida evitar la inestabilidad lateral que se presenta de forma súbita en viviendas no reforzadas cuando se agrietan durante la ocurrencia del terremoto.

Esta propuesta de reforzamiento se ha estudiado ampliamente en el Perú, México y otros países. La técnica se basa principalmente en los resultados del proyecto «Estabilización de las construcciones de adobe existentes en los países andinos» desarrollado por el Centro Regional de Sismología para América del Sur (Ceresis) y la Pontificia Universidad del Perú. En la bibliografía consultada (Zegarra, 2001 y

Universidad de los Andes, 2002) se describe en mejor detalle este tipo de rehabilitación que ha demostrado sus cualidades en algunos eventos sísmicos recientes. Esta alternativa se apli-

có a uno de los modelos de adobe a escala reducida (1:5) en estudio, como se presenta en la Figura 2.

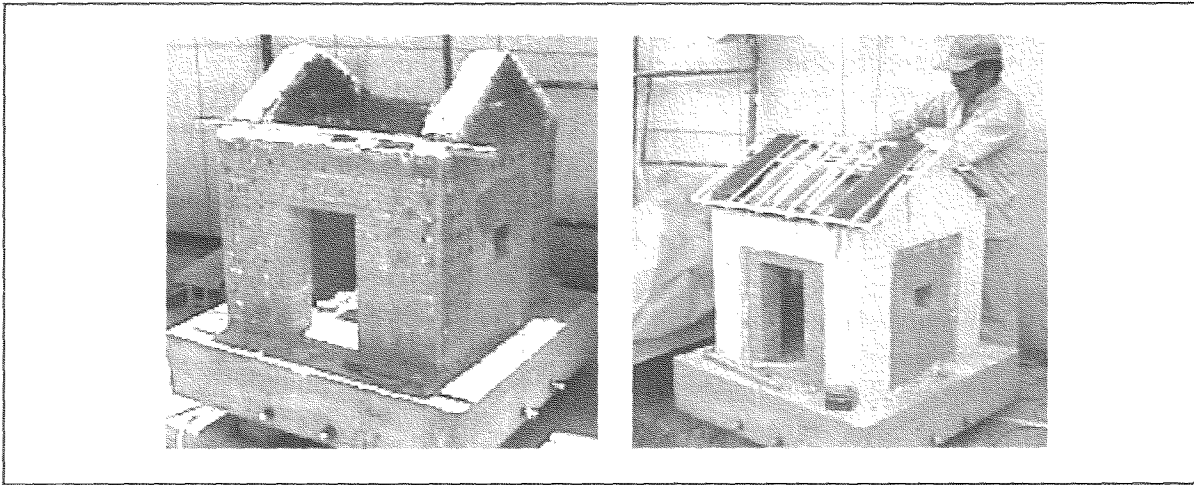


Figura 2. Reforzamiento con malla y mortero

### Reforzamiento con elementos confinantes en madera

Esta alternativa consiste en instalar elementos de madera en el plano del muro, por las dos caras simultáneamente e interconectarlos entre sí mediante pernos pasantes cuyo orificio previamente perforado se rellena con mortero de cemento. La ubicación y las dimensiones de los elementos de madera serán variables según el diseño específico del muro. Sin embargo a continuación se plantean unas especificaciones mínimas tentativas.

Los elementos de madera confinantes para viviendas de uno y dos pisos a escala real deberán tener una dimensión mínima de 15 cm x 2 cm y deben instalarse tanto en sentido horizontal como en sentido vertical. Para su instalación se recomienda abrir regatas con las dimensiones de la madera en los muros de adobe y/o tapia o de un espesor ligeramente superior con el fin de «pañetar» posteriormente el elemento de refuerzo para conservar la apariencia original del muro. La madera será como mínimo de la Clase C según el Título G de la NSR-98.

Horizontalmente deben colocarse elementos cerca a la base de los muros y cerca a la losa de entrepiso y a distancias verticales que no deben sobrepasar en principio los 2.0 m. En el sentido vertical deben colocarse elementos confinantes cerca de las uniones o intersecciones con otros muros perpendiculares, alrededor de aberturas de puertas y ventanas, y a distancias horizontales de máximo 3.0 m. Los elementos verticales y horizontales deben interconectarse siempre entre sí mediante pernos pasantes de  $\frac{1}{4}$  de pulgada colocados en el centro del punto de intersección. Además, los elementos horizontales de muros ortogonales deben conectarse entre sí mediante conectores metálicos tipo platina de  $\frac{1}{4}$  con la forma de la esquina.

Dicha conexión debe realizarse tanto en la cara interna como en la externa. La platina de conexión debe estar anclada al muro y a los elementos de madera mediante pernos pasantes de  $\frac{1}{4}$  de pulgada. Todos los elementos de madera confinantes deben estar firmemente anclados al muro mediante pernos pasantes de  $\frac{1}{4}$  de pulgada cada 50 cm, cuyo orificio previamente perforado debe inyectarse con mortero

de cemento, mínimo del tipo S dado en el Título D de la NSR-98.

Además, todas las maderas utilizadas en el reforzamiento de muros en tierra serán atravesadas con puntillas colocadas cada 15 cm con el fin de garantizar una superficie de contacto rugosa con los muros de tierra, garantizando así la compatibilidad de deformaciones entre los dos materiales.

Cuando el muro presente aberturas tales como ventanas o puertas se deben colocar elementos confinantes de madera en dirección vertical a lado y lado del hueco. Estos elementos deben prolongarse en lo posible hasta las losas de entrepiso superior e inferior en el piso sujeto a reforzamiento o hasta los elementos de madera horizontales más cercanos.

Cuando esta alternativa de rehabilitación se aplique sobre muros de tapia pisada deben rellenarse los agujeros dejados por las agujas (formaletas de construcción) con mortero de cal y arena. Además, se deben clavar cuñas de madera sobre el mortero para garantizar una adecuada adherencia. Este tipo de refuerzo fue aplicado a dos modelos, uno en tapia y el otro en adobe. En la Figura 3 se muestra la aplicación de este esquema de rehabilitación a uno de los modelos a escala reducida.

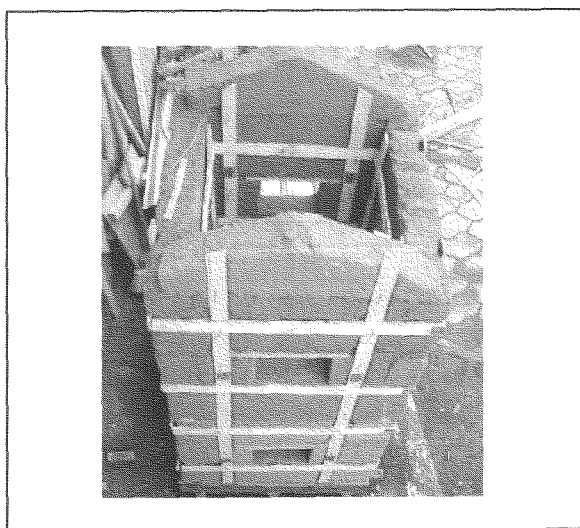


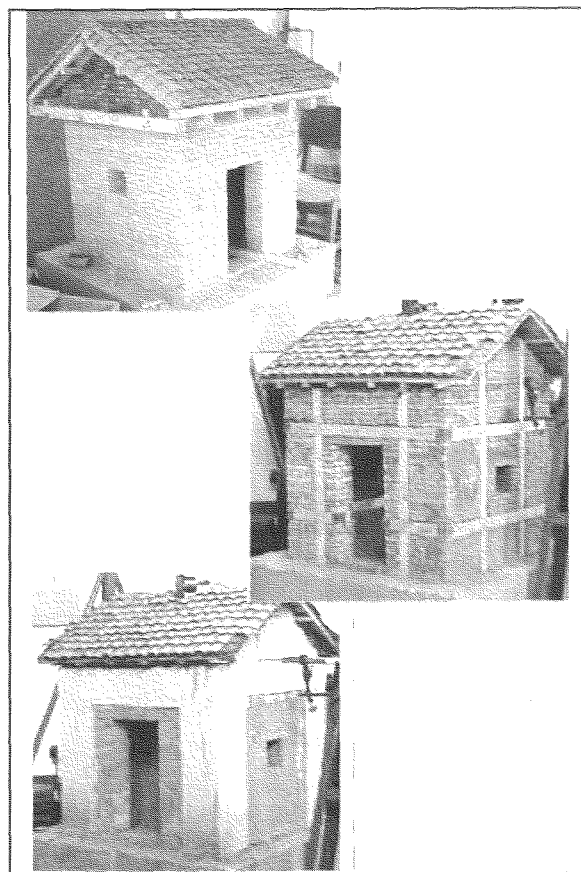
Figura 3. Refuerzo con maderas confinantes

## MODELACIÓN EXPERIMENTAL

### Especímenes para ensayo

Se diseñaron y construyeron una serie de modelos de viviendas a escala 1:5 para ser sometidos a ensayos de excitación en la base mediante mesa vibratoria. Se realizaron un total de cuatro (4) modelos, tres de un solo nivel y uno de dos niveles. Tres de los modelos se construyeron en adobe, implementando en dos de ellos las alternativas de reforzamiento en estudio. El cuarto modelo de dos niveles se construyó en tapia pisada y se reforzó con elementos confinantes de madera.

Los ensayos en mesa vibratoria se utilizan principalmente para identificar formas de falla características y para analizar el posible efecto de las medidas de rehabilitación en forma comparativa con los modelos sin ningún tipo de refuerzo. Las características de cada uno de los modelos ensayados se resumen en la 0.



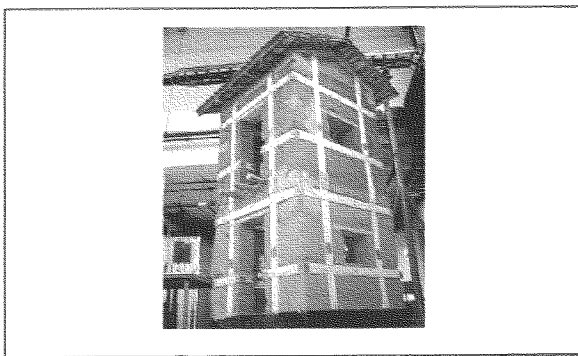


Figura 4. Modelos construidos a escala 1:5.

de a una señal sintética generada a partir de un registro del sismo de Tauramena de 1995 (Estación el Rosal). Este sismo corresponde a una señal característica que puede llegar a presentarse en Bogotá en terreno firme para un sismo que se genere en la falla frontal de la Cordillera Oriental de Colombia.

La señal introducida al sistema de la mesa vibratoria, se especifica en términos de historia de desplazamientos y se determinó mediante integración directa de la señal de aceleración sintética.

Tabla 2. Características de modelos ensayados

ModeloNo.	No. de pisos	Material	Tipo de Refuerzo	Dimensiones	Carga vertical (kg)
I	1	Adobe	Sin refuerzo	Ancho: 60 cm Largo: 60 cm Alto: 90 cm	35 (cubierta)
II	1	Adobe	Madera	Ancho: 60 cm Largo: 60 cm Alto: 90 cm	35 (cubierta)
III	1	Adobe	Malla	Ancho: 60 cm Largo: 60 cm Alto: 90 cm	35 (cubierta)
IV	2	Tapia Pisada	Madera	Ancho: 60 cm Largo: 60 cm Alto: 150 cm	35 (cubierta) 45 (entrepiso)

### Procedimiento de Ensayo

Con el fin de conservar las leyes de la modelación a escala se hace necesario aplicar sobrecargas artificiales a nivel de la cubierta y de entrepisos intermedios cuando existente. Para el presente caso, el escalamiento obliga a la aplicación de una sobrecarga a nivel de la cubierta de 35 kgf. Aún así, resulta imposible modelar la fuerza inercial directa sobre las paredes de la edificación ya que sería necesario incrementar artificialmente la masa de los muros con un factor de 5. Por esta razón, el ensayo de estos modelos a escala reducida representa, en este caso, un análisis cualitativo principalmente y que debe usarse de manera comparativa entre diferentes especímenes con diferentes configuraciones.

Todos los modelos fueron sometidos a la señal que se presenta en la Figura 4, que correspon-

La modelación a escala reducida genera principalmente un cambio en las características dinámicas del modelo por cuanto que a pesar de generar un escalamiento geométrico uniforme, las propiedades de los materiales se mantienen prácticamente inalteradas (ver Tabla 1). Al no conservarse el período de vibración fundamental del modelo, se hace necesario escalar el eje del tiempo de la señal de entrada, para mantener la similitud en la fuerza dinámica de excitación.

En este caso, dado que el factor de escala geométrico es de 5 y que no se puede aumentar la masa del modelo con el fin de simular las fuerzas inerciales, el factor de escala del tiempo aplicado es igual a 5. De esta manera, el movimiento dinámico de estas pruebas dura un poco más de 15 segundos, que es equivalente a 75 segundos en el dominio del prototipo.

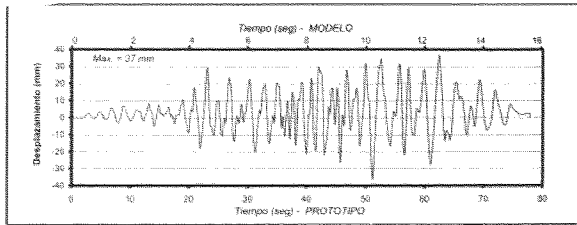


Figura 5. *Solicitud sísmica empleada (Registro sintético sismo de Tauramena, 1995)*

Cada modelo fue sometido a una serie de simulaciones del movimiento sísmico seleccionado. Esto se hizo escalando la señal de entrada, iniciando desde 0.05 g e incrementando cada 0.05 g hasta llegar a la amplitud que conlleve al colapso del modelo. La aceleración máxima del registro varía de esta forma desde un valor de 0.05 g hasta un valor máximo de 2.0 g o hasta que se presentara la falla del espécimen.

Con el fin de tener en cuenta los efectos ortogonales del sismo en una edificación real,

los modelos se colocaron sobre la mesa vibratoria a un ángulo de 45° con respecto a la dirección de aplicación de la señal sísmica, de tal manera que la señal llegue a cada muro de la edificación en un sentido diferente al de sus ejes principales.

La instrumentación de cada uno de los modelos consistió en la colocación de acelerómetros a nivel de la cimentación (mesa vibratoria), entrepiso y cubierta, y transductores de desplazamiento en las dos direcciones principales del modelo a nivel de entrepiso y cubierta.

### Resultados de los ensayos

En las Tablas 3 a 6 se presenta una descripción cuantitativa y cualitativa del comportamiento observado en cada una de las etapas del ensayo. Se indica en cada caso el desplazamiento máximo en la base, la aceleración máxima correspondiente y una breve descripción de los efectos de dicha excitación en cada uno de los modelos.

Tabla 3. *Secuencia del ensayo - Vivienda I*

Prueba No	Escala		Desp. máximo (mm)	Acel. máx. en la base (g)	Observaciones	Fotografía de la falla
	% de Tiempo	% de Desp.				
1	20%	1%	0.37	0.05	No daño	
2	20%	5%	1.85	0.25	Fisuras muy pequeñas	
3	20%	10%	3.70	0.50	Fisuras claramente definidas	
4	20%	15%	5.55	0.75	Desarrollo del sistema de fisuras	
5	20%	20%	7.40	1.00	Aumento del tamaño de fisuras	
6	20%	25%	9.25	1.25	Desprendimiento de bloques pequeños	
7	20%	35%	12.95	1.75	Desprendimiento de bloques considerables	
8	20%	40%	14.80	2.00	Caída de cerca del 50% de muros	
9	20%	40%	14.80	2.00	Perdida de mas del 60% de muros	
10	20%	40%	14.80	2.00	Colapso de la edificación por falta de apoyo	

Tabla 4. Secuencia del ensayo - Vivienda II

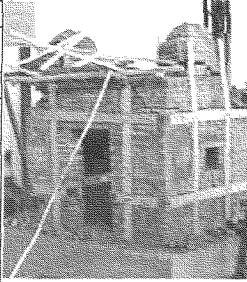
Prueba No	Escala		Desp. máximo (mm)	Acel. máx. en la base (g)	Observaciones	Fotografía de la falla
	% de Tiempo	% de Desp.				
1	20%	1%	0.37	0.05	No daño	
2	20%	5%	1.85	0.25	Fisuras muy pequeñas	
3	20%	10%	3.70	0.50	Fisuras claramente definidas	
4	20%	15%	5.55	0.75	Desarrollo del sistema de fisuras	
5	20%	20%	7.40	1.00	Aumento del tamaño de fisuras	
6	20%	25%	9.25	1.25	Desprendimiento de bloques pequeños	
7	20%	30%	11.10	1.50	Agrietamiento marcado en muros	
8	20%	35%	12.95	1.75	Caída de un lado de la cubierta	
9	20%	35%	12.95	1.75	Colapso total de la cubierta	
10	20%	40%	14.80	2.00	Caída esquinas superiores de muros	
11	40%	120%	44.40	1.50	Falla de culatas y maderas que la confina	

Tabla 5. Secuencia del ensayo - Vivienda III


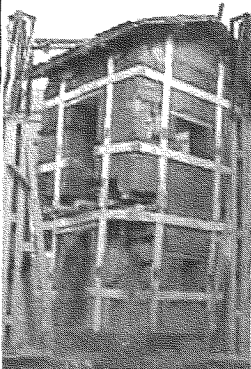
Prueba No	Escala		Desp. máximo (mm)	Acel. en la base (g)	Observaciones	Fotografía de la falla
	% de Tiempo	% de Desp.				
1	20%	1%	0.37	0.05	No daño	
2	20%	5%	1.85	0.25	Fisuras muy pequeñas	
3	20%	10%	3.70	0.50	Fisuras claramente definidas	
4	20%	15%	5.55	0.75	Aumento del tamaño de fisuras - grietas	
5	20%	20%	7.40	1.00	Formación completa de grietas diagonales	
6	20%	25%	9.25	1.25	Desprendimiento de mortero y malla en grietas	
7	20%	30%	11.10	1.50	Desprendimiento de muros de cimentación	
8	40%	60%	22.20	0.75	Rotura de malla de refuerzo en las grietas	
9	40%	120%	44.40	1.50	Deformación excesiva, mecanismo colapso	
10	40%	120%	44.40	1.50	Falla catastrófica	

Tabla 6. Secuencia del ensayo - Vivienda IV

Prueba No	ESCALA		Desp. máximo (mm)	Acel. máx. en la base (g)	Observaciones	Fotografía de la falla
	% de Tiempo	% de Desplaz.				
1	20%	1%	0.37	0.05	No daño	
2	20%	5%	1.85	0.25	Fisuras muy pequeñas	
3	20%	10%	3.70	0.50	Fisuras claramente definidas	
4	20%	15%	5.55	0.75	Formación de fisuras	
5	20%	20%	7.40	1.00	Grietas considerables en el primer nivel	
6	20%	25%	9.25	1.25	Aumento de grietas en el primer nivel	
7	20%	30%	11.10	1.50	Desprendimiento de material primer nivel	
8	20%	35%	12.95	1.75	Caída de bloques de tapia esquina 1er nivel	
9	20%	35%	12.95	1.75	Falta de confinamiento - desprendimiento	
10	40%	60%	22.20	0.75	Caída bloque de muros - 50% muros 1er nivel	
11	40%	120%	44.40	1.50	Perdida de más del 70% de muros	
12	40%	150%	55.50	1.88	Desprendimiento de material del 2º nivel	
13	40%	150%	55.50	1.88	Falla de 1er nivel lo sostiene las maderas	
14	40%	150%	55.50	1.88	Colapso total del modelo	



En la Tabla 7 se presenta un resumen de los resultados principales. Se incluye la aceleración máxima para la cual se genera el primer agrietamiento significativo, la aceleración máxima del registro y el desplazamiento característico en el cual se presenta el colapso. Adicionalmente se indica el rango de períodos de vibración natural al igual que el rango de amortiguamientos medidos. El rango de mediciones incluye el estado no fisurado al igual que

el estado fisurado. Estos parámetros se obtienen a partir de los registros de aceleración y desplazamiento, tomados en los diferentes incrementos de carga. El período se obtiene directamente de la función de transferencia entre el registro en cubierta y el de cimentación mientras que el amortiguamiento se obtiene mediante el método del decremento logarítmico de la señal libre. Finalmente se indica el tipo de falla y el mecanismo de colapso.

Tabla 7. Resumen de resultados de ensayos de vivienda con cargas sísmicas

Modelo No.	Aa agrietamiento (g)	Aa colapso (g)	Desplazamiento max. en la base para colapso (mm)	Rango de períodos de vibración (elástico a fisurado) (seg)	$\xi$ (%)	Mecanismo de colapso
I	0.4	2.0	14.8	0.06 – 0.12	2.8 – 3.4	Falla frágil de muros. Falla Catastrófica. Colapso total.
II	0.5	1.5	44.4	0.05 – 0.09	3.2 – 3.3	Falla de cubierta y parte superior de muros. Falla progresiva. No hay colapso total
III	0.5	1.5	44.4	0.05 – 0.10	3.0 – 3.5	Falla en la unión entre muros, falla de malla y volteo del muro. Falla catastrófica retardada.
IV	0.5	2.0	55.5	0.093 – 0.13	2.7 – 3.1	Falla de muros de primer piso. Reforzamiento y segundo piso intactos. Falla catastrófica retardada

### Interpretación de resultados

Los resultados obtenidos permiten en primera instancia ratificar la alta vulnerabilidad sísmica de las construcciones en tierra, aún luego de verse sometidas a los tipos de rehabilitación seleccionados en el presente estudio. Las fallas se producen por la falta de conexiones monolíticas entre de bloques de la estructura los cuales tienden a separarse por la generación de grietas que normalmente van desde las esquinas o puntos de concentración de esfuerzos hasta las aberturas de puertas o ventanas. Estos sistemas tienden a presentar en general colapsos súbitos generando fallas catastróficas.

La alternativa de rehabilitación basada en mallas de refuerzo adosadas a los muros existentes y recubiertas con morteros de cal proporciona claramente una mayor ductilidad al sistema con lo cual se mejoran las características

de disipación de energía. El sistema prolonga la vida de la estructura durante el terremoto y retarda la ocurrencia del colapso. A pesar de esto el mecanismo de colapso corresponde al de una falla catastrófica con riesgo alto a la vida de los ocupantes.

Por otro lado la alternativa rehabilitación basada en elementos confinantes de madera para edificaciones de un piso presenta igualmente una mejor ductilidad y características generales de disipación de la energía. El colapso en este caso correspondió al colapso de la cubierta ya que los muros mantuvieron su consistencia y estabilidad global a pesar de no haber colocado elemento longitudinal de confinamiento en la corona de las culatas. El sistema evidencia menor riesgo a la pérdida de vida de los ocupantes y variación importante en el mecanismo de colapso esperado. En dicho caso debe realizarse la consideración de que la falla pue-

de no presentarse en la estructura de soporte sino también en la estructura de cubierta la cual debe igualmente someterse a una revisión desde el punto de vista estructura.

Finalmente la construcción en tierra de dos pisos reforzada con elementos confinantes de madera presenta altos niveles de deformabilidad y un comportamiento muy similar al observado para el modelo equivalente de un piso. Sin embargo los altos esfuerzos de flexión producen en este caso sobre la tapia pisada altos esfuerzos cíclicos de compresión

que ante la falta de un confinamiento efectivo conlleva a la falla en las esquinas de los muros del primer nivel y el consecuente colapso catastrófico por efectos de volcamiento. A pesar de la falla la edificación manifiesta cierta ductilidad y capacidad de deformación cíclica que retarda la conformación del mecanismo final de colapso.

A continuación se presenta un registro fotográfico de los mecanismos de falla y colapso en cada una de las estructuras ensayadas (Figuras 6, 7, 8 y 9).



Figura 6. Detalle de grietas - Vivienda I

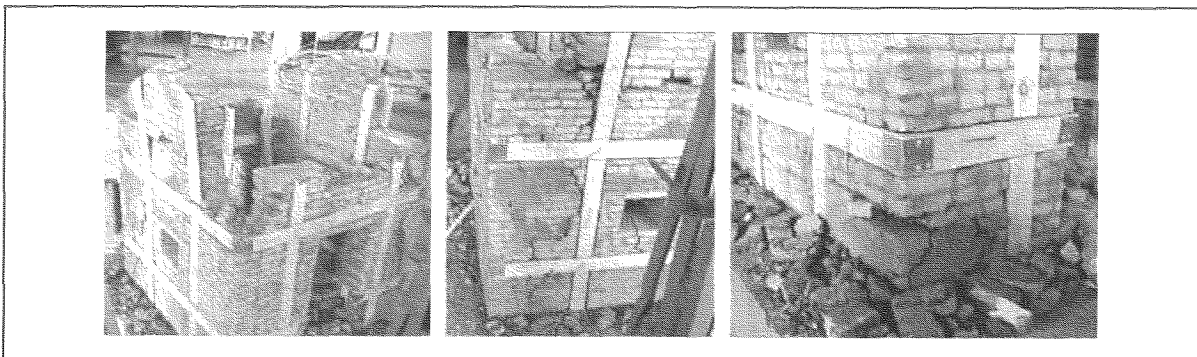


Figura 7. Grietas y daño marcados - Vivienda II

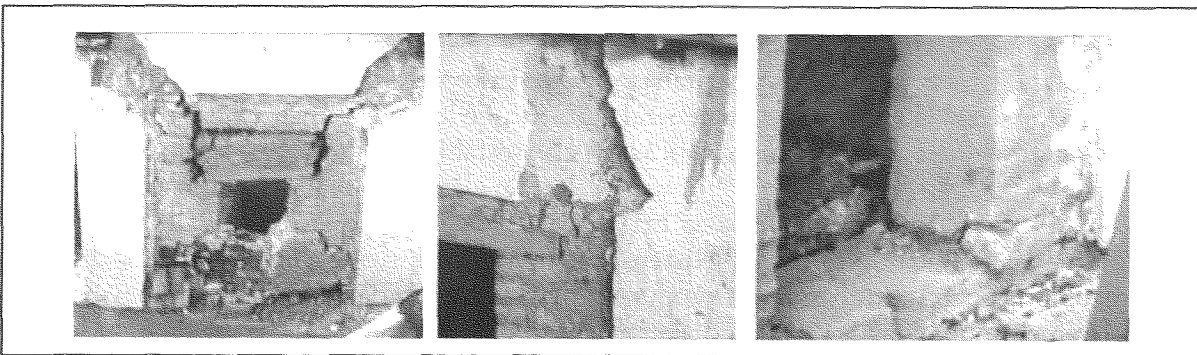


Figura 8. Detalle de grietas principales - Vivienda III

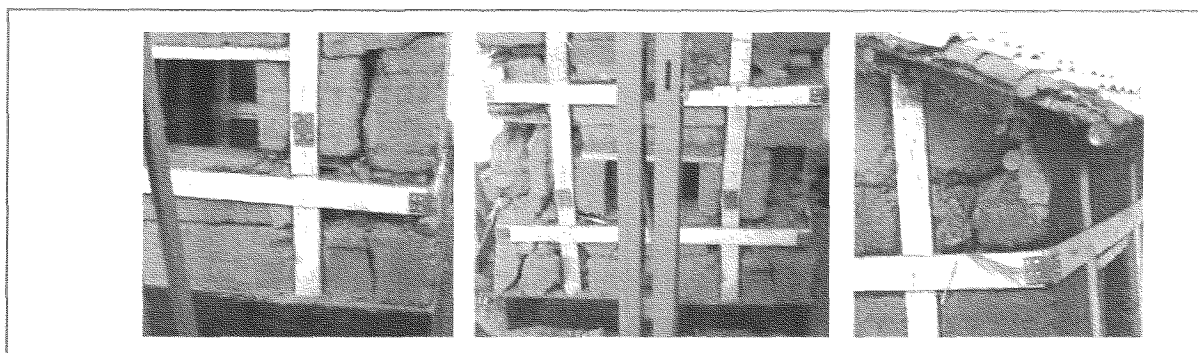


Figura 9. Principales grietas y deterioro de primer nivel – Vivienda IV

## MODELACIÓN ANALÍTICA

Mediante la realización de modelos elásticos de las estructuras, se pueden estimar los niveles de esfuerzos existentes en los diferentes elementos estructurales de la vivienda previamente a la degradación de la rigidez que se presenta con la aparición de zonas de agrietamiento generalizadas. Los modelos se utilizan principalmente para establecer comparaciones entre las diferentes configuraciones de viviendas y para estudiar de manera analítica la incidencia del refuerzo en cada caso o el posible efecto de alternativas de rehabilitación.

## Generalización del comportamiento del material

El comportamiento observado de los materiales en estudio permite proponer la utilización de modelos bilineales para efectos de una modelación analítica aproximada. El comportamiento bilineal estaría caracterizado por dos puntos básicos que son el de agrietamiento inicial (punto en el cual se presenta un cambio de rigidez significativo en el sistema) y el punto de resistencia última. Con base en los resultados de los ensayos de propiedades para cada material se proponen las propiedades del adobe y la tapia indicadas en la Tabla 8 para efectos de la modelación analítica. El módulo de elasticidad para la madera se toma igual a 130.000 kgf/cm<sup>2</sup>.

Material	Densidad (Ton/m <sup>3</sup> )	Horizonte de esfuerzos	Módulo elástico estático (kg/cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo agrietamiento (kg/cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo último (kg/cm <sup>2</sup> )	Deformación agrietamiento %	Deformación última %
Adobe	1.90	Compresión	1150	10	13	1.00	1.50
		Cortante	300	0.15	0.6	0.14	1.2
		Tracción indirecta	1150	0.10	0.21	0.17	1.40
Tapia	1.90	Compresión	800	3.0	6	0.34	0.7
		Cortante	300	0.22	0.5	0.45	1.3
		Tracción indirecta	800	0.20	0.26	0.36	1.50

Tabla 8. Propiedades básicas de los materiales supuestas para el análisis

## Teoría de falla

Con el fin de comparar los esfuerzos actuantes dados por el modelo analítico con los esfuerzos resistentes del material de adobe o tapia se utiliza una teoría de falla del material basada

en el esfuerzo principal de compresión y en el esfuerzo cortante resistente, determinados a nivel de agrietamiento en ensayos de compresión simple y en ensayos de tracción diagonal de muretes. Esta teoría conocida como criterio de falla de Mohr, puede representarse mediante

un diagrama de esfuerzos principales ( $s_1$  vs.  $s_3$ ), tal como se muestra en las Figuras 10 y 11 para el adobe y la tapia respectivamente.

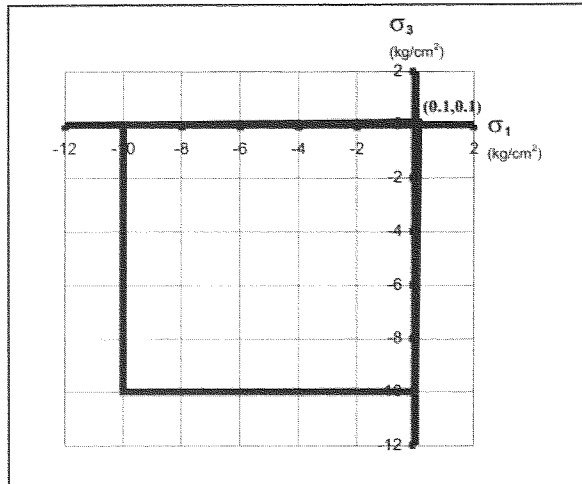


Figura 10. Diagrama de criterio de falla de Mohr para adobe

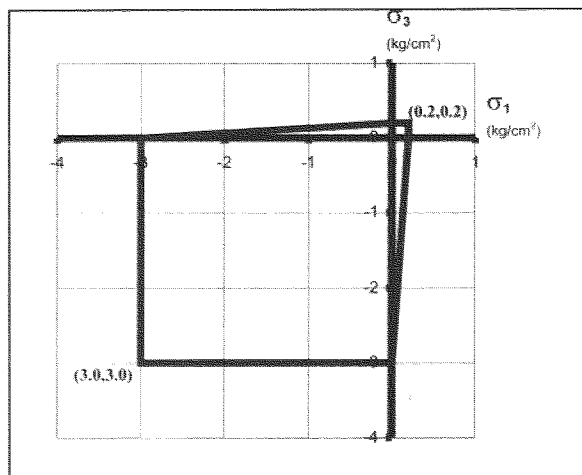


Figura 11. Diagrama de criterio de falla de Mohr para tapia

#### Descripción del modelo de análisis

Para cada uno de los modelos experimentales de vivienda a escala reducida 1:5, se desarrolló un modelo analítico elástico utilizando el programa SAP2000 (C.S.I Inc, 2002). Para el efecto se utilizaron elementos finitos tridimensionales tipo Solid para modelar muros y elementos tipo Frame para modelar vigas y refuerzos. En el caso del refuerzo con mallas se utilizaron

elementos tipo Shell para modelar este tipo de refuerzo. El modelo incluye la cubierta y las masas asociadas al peso propio de los elementos estructurales principales y entepiso, lo cual representa la totalidad de la masa de la edificación. Las propiedades de los materiales se seleccionaron de acuerdo con las recomendaciones dadas anteriormente. En la Figura 12 se presenta un esquema general de los cuatro modelos desarrollados. Para comparar el comportamiento analítico del modelo IV con un modelo equivalente sin refuerzo se plantea en forma hipotética el modelo V, equivalente al IV pero sin refuerzo.

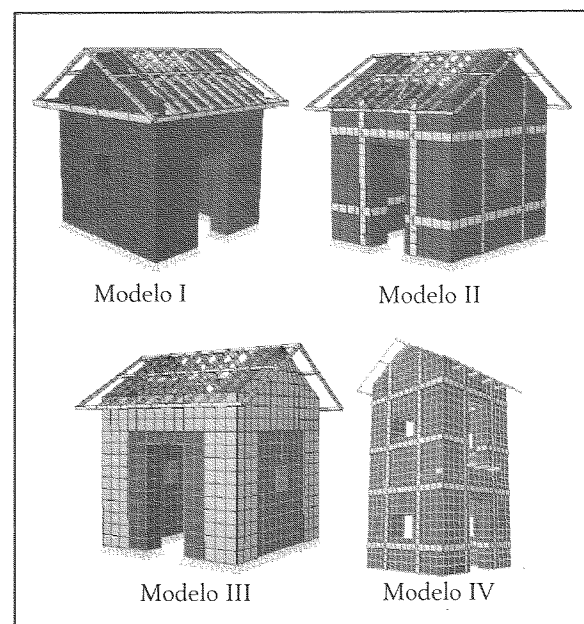


Figura 12. Modelos analíticos de viviendas a escala 1:5

#### Resultados del modelo de análisis

En la Tabla 9 se presenta la comparación del período fundamental de vibración analítico de cada modelo con el obtenido experimentalmente.

Tabla 9. *Períodos fundamentales modelos de vivienda*

Modelo	No. de Pisos	Material	Tipo de Refuerzo	Período fundamental	
				Experimental	Analítico
I	1	Adobe	Sin refuerzo	0.06	0.06
II	1	Adobe	Madera	0.05	0.05
III	1	Adobe	Malla	0.05	0.05
IV	2	Tapia pisada	Madera	0.09	0.11
V	2	Tapia pisada	Sin refuerzo	N.A.	0.15

En las Figuras 13 a 16 se presentan distribuciones características de esfuerzos críticos en cada uno de los modelos en estudio, ante la una sollicitación en la base de 0.5 g.

En el modelo de vivienda I (Figura 13), el cual no posee refuerzo, se observa esfuerzos principales mínimos del orden de  $-0.2$  a  $-0.8$  kg/cm<sup>2</sup> y máximos del orden de  $0.1$  a  $0.36$  kg/cm<sup>2</sup>. Estos últimos exceden la capacidad del material y por esto fácilmente se fisura. Se observa que los máximos esfuerzos se presentan en las esquinas de la base de muros. Una concentración de esfuerzos en las esquinas de puertas y ventanas es notoria. En los muros a nivel de dinteles, se observa un cambio de esfuerzos máximos, lo cual indica una concentración de esfuerzos cortantes correspondiente a una fisura horizontal en los modelos experimentales.

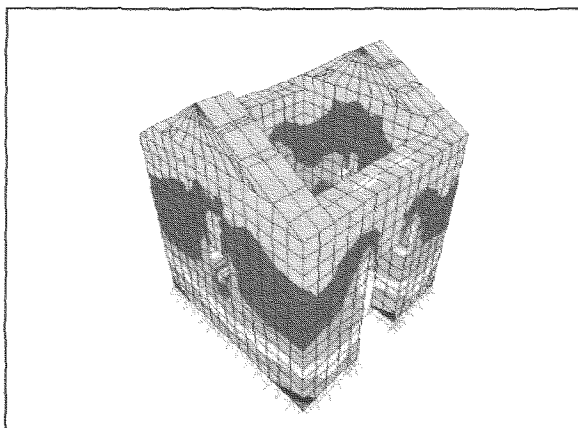


Figura 13. *Distribución de esfuerzos máximos vivienda tipo I*

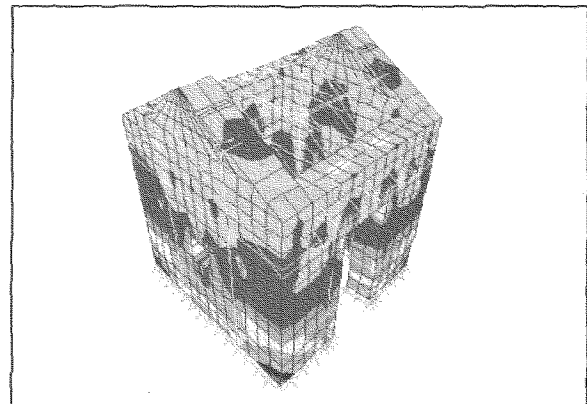


Figura 14. *Distribución de esfuerzos máximos vivienda tipo II*

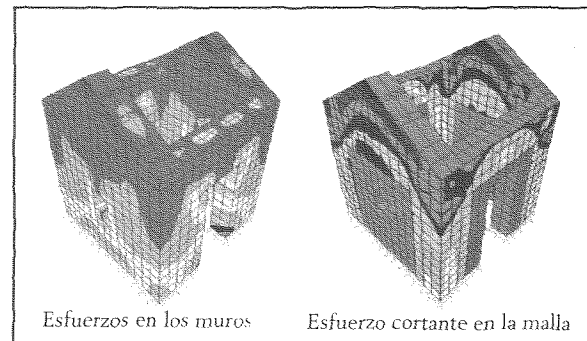


Figura 15. *Distribución de esfuerzos máximos vivienda tipo III*

En el modelo de adobe reforzado con madera, Vivienda II, (Figura 14), se observó una pequeña disminución en el valor de los esfuerzos, comparada con el modelo sin reforzar. Las partes del muro en donde confina la madera se aprecia una reducción de esfuerzos, especialmente esfuerzos de tensión. Además, los elementos de refuerzo unen partes importantes de concentración de esfuerzos, uniendo las posibles grietas. Se observa en este modelo, que los esfuerzos principales mayores se encuen-

tran en esquinas inferiores, lo cual genera deterioro anticipado de estas y concentración posterior de esfuerzos a niveles superiores, como se evidencia en el modelo experimental. Además del efecto anterior, los elementos de refuerzo generan un aumento significativo en los esfuerzos admisibles de los materiales, tanto por los efectos confinantes como por el efecto de refuerzo directo.

En el modelo de refuerzo con malla, Vivienda III (Figura 15), se observa una disminución significativa de esfuerzos en todos los muros de la edificación. Se presentan esfuerzos máximos del orden de  $0.18 \text{ kg/cm}^2$ . De esta forma se presentan fisuras únicamente en esquinas o dinteles de puertas, donde se concentran esfuerzos máximos superiores a los admisibles. En este caso, el refuerzo en malla y mortero de cal, toma gran parte del esfuerzo de los muros generado por las fuerzas sísmicas, transformándolo en esfuerzos de tensión y de corte principalmente (Figura 15). La base de los muros confinada por malla también presenta concentraciones importantes de esfuerzos lo cual conforma en últimas el mecanismo de colapso observado en los experimentos.

La vivienda IV, de dos niveles reforzada con madera (Figura 16), en comparación con la Vivienda V de referencia, evidencia una disminución leve de esfuerzos. Esto se debe en gran parte a que en esta construcción predominan los esfuerzos de flexión, para lo cual los elementos de madera resultan mucho más efectivos. Al igual que en los casos anteriores el principal efecto se traduce en un aumento en los esfuerzos admisibles del material producidos por el confinamiento y por el refuerzo directo generado.

En el modelo de vivienda V, en tapia, sin reforzar, (Figura 17), se observa una alta concentración de esfuerzos en el primer nivel, debido en gran parte a la flexión generada en la construcción por efecto de las fuerzas sísmicas laterales. Los esfuerzos principales máximos son del orden de  $0.1$  a  $0.8 \text{ kg/cm}^2$ . Igualmente se pre-

sentan puntos de altas concentraciones de esfuerzos en las esquinas de marcos de puertas y ventanas del primero y segundo nivel. Las intersecciones de los muros de primer nivel están sometidas a esfuerzos principales considerables de tensión, generados en gran parte por esfuerzos de corte, lo cual conlleva a la falla de estos elementos.

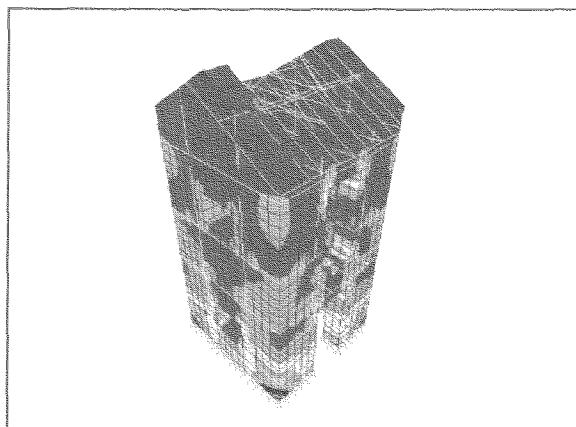


Figura 16. Distribución de esfuerzos máximos vivienda tipo IV

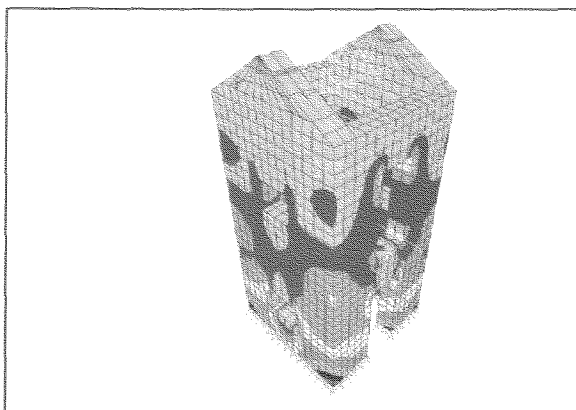


Figura 17. Distribución de esfuerzos máximos vivienda tipo V

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con base en los resultados experimentales y analíticos encontrados se pueden establecer las siguientes conclusiones generales:

- Las viviendas de adobe y tapia representan construcciones de alta vulnerabilidad sísmica principalmente asociada a la falta de resis-

tencia a la tensión de los materiales, a la pobre calidad de las construcciones y a la falta de consideraciones básicas tales como amarres, confinamiento, continuidad y otras.

- Las medidas de rehabilitación estudiadas mejoran sensiblemente el funcionamiento sísmico, por cuanto proporcionan continuidad estructural, previenen inestabilidad y proporcionan confinamiento para reducir o retardar las dislocaciones relativas de las secciones de paredes agrietadas.
- Las medidas de rehabilitación propuestas se pueden utilizar con eficacia para disminuir el riesgo sísmico a que están sometidas las viviendas de adobe y tapia. A esto se asocia una disminución en el riesgo de pérdida de vidas, reduciendo igualmente la probabilidad de derrumbamiento catastrófico, con un impacto limitado en la parte histórica del edificio intervenido. Sin embargo, las alternativas estudiadas no permiten aún garantizar la no ocurrencia de muertes.
- La modelación analítica tridimensional conjuntamente con una teoría de falla acorde con el comportamiento observado del material permiten estimar cargas y deformaciones admisibles y resistentes para diferentes configuraciones de viviendas para efectos del diseño del reforzamiento.
- La alternativa de reforzamiento basada en elementos confinantes de madera parece presentar ventajas comparativas con respecto a la alternativa basada en malla y pañete de mortero con cal. Esta y otras alternativas deben estudiarse en modelos a escala natural para eliminar la incertidumbre asociada a la modelación a escala.
- Las cubiertas evidencian en general un alto grado de vulnerabilidad, por cuanto a pesar de lograr la estabilización de los muros, los movimientos fuertes siguen generando el colapso de la estructura de cubierta con el consecuente riesgo a la vida de los ocupantes.

Por esta razón las cubiertas deben, en general, someterse a reforzamiento, especialmente en las zonas de los apoyos sobre los muros, en los anclajes y las uniones de continuidad.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores desean dar gracias a las entidades participantes del presente proyecto:

Corporación la Candelaria, Centro de Investigaciones y Desarrollo Tecnológico, CITEC, Universidad de los Andes, Centro de Investigación en Materiales y Obras Civiles, CIMOC, Universidad de los Andes y al Fondo de Reconstrucción del Eje Cafetero, FOREC.

## REFERENCIAS

AIS - Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, «Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia». Santa Fe de Bogotá, octubre de 1996.

Bariola J y Vargas J., «Earthquake Resistance Provisions for Adobe Constructions in Peru» 1988.

Corporación la Candelaria y Universidad de los Andes «Estudios de vulnerabilidad sísmica y alternativas de rehabilitación para edificaciones en adobe y tapia pisada». Bogotá, 2002.

CSI Inc. «SAP 2000, Three Dimensional Static and Dynamic Finite Element Analysis Structures. Computer Applications for Structural and Earthquake Engineering». California, 2002.

Euscaticue M., Torres T., «Advances in Seismic Research of Adobe Houses». 1993.

Harris H., Sabnis G., «Structural modeling and experimental techniques». 2ª edición, CRC Press. Florida - USA, 1999.

Hernández O., «Evaluación Experimental de procedimientos para reforzar vivienda de adobe y hacerla resistente ante la acción sísmica». 1983.

Minke G., «Manual de construcción para viviendas antisísmicas». Universidad de Kassel, Alemania, 2ª Ed. 2001.

NICEE Org, Manual NICEE (Internet [www.nicee.com](http://www.nicee.com)).

NSR-98, «Norma Colombiana de Diseño y Construcción Sismo Resistente». Ley 400 de 1997, 1998.

Ottazi G., Yep J., «Ensayos de Simulación Sísmica de Viviendas de Adobe». 1989.

Ottazi G., Yep J., «Shaking Table Tests of Improved Adobe Masonry Houses». 1988.

Rodríguez A., Fonseca L., «Comportamiento sísmico y alternativas de rehabilitación de edificaciones en adobe y tapia pisada con base en modelos a escala reducida ensayados en mesa vibratoria» *Tesis de Maestría en Ingeniería Civil, Estructuras y Sísmica, Universidad de los Andes*. 2003.

Scawthorn C., «Dynamic Test of Adobe building model». 1985.

Tolles L., Kimbro E., «*Seismic Stabilization of Historic Adobe Structures*». 2000.

Vera R., Albiter A., «*Seismic Capacity and retrofitting of Adobe Construction*». 2000.

Zegarra L., Giescke A., «Reconditioning of existing adobe housing to mitigate the effects of earthquakes». 1993.

Zegarra L., San Bartolomé A., «*Manual Técnico para el reforzamiento de las viviendas de adobe existentes en la costa y la sierra*». 2001.