

Este artículo presenta los principales resultados de los proyectos de investigación "Estudio de vulnerabilidad sísmica de las edificaciones construidas en técnicas tradicionales de adobe y tapia pisada", realizado por el Centro de Investigación en Materiales y Obras Civiles, CIMOC, de la Universidad de los Andes y financiado por la Corporación Barrio La Candelaria; y "Estudio de vulnerabilidad sísmica, rehabilitación y refuerzo de casas de adobe y tapia pisada a nivel nacional", realizado por el Centro de Estudios de Desastres y Riesgos, CEDERI, de la Universidad de los Andes y financiado por la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica y el Fondo para la Reconstrucción Social del Eje Cafetero, FOREC. Todas las imágenes son propiedad conjunta de la Corporación Barrio La Candelaria y el Fondo para la Reconstrucción Social del Eje Cafetero, FOREC.

Estudios de vulnerabilidad sísmica, rehabilitación y refuerzo de casas en adobe y tapia pisada

*Luis Eduardo Yamín Lacouture,
Camilo Phillips Bernal,
Juan Carlos Reyes Ortiz,
Daniel Ruiz Valencia*

Introducción, justificación y antecedentes

La tierra es uno de los materiales más antiguos usados en la construcción de edificaciones. La construcción con tierra tiene miles de años de historia y existe evidencia arqueológica que sugiere la existencia de ciudades construidas enteramente en tierra: Jericó, Çatal Huyuk en Turquía, Harappa en Pakistán, Akhlet-Aton en Egipto, Chan-Chan en Perú, Babilonia en Iraq, Duheros en España, entre otras. Todas las grandes civilizaciones del Medio Este –los asirios, los babilonios, los persas y los sumerios– construyeron con tierra apisonada y con bloques de barro. Por otro lado, cuando los españoles empezaron su conquista del Nuevo Mundo, trajeron consigo el conocimiento de la construcción con adobe y tapia pisada. Fue así como se inició la construcción de las principales ciudades capitales del reino de la Nueva Granada. Las casas urbanas del común de la gente eran edificadas en uno o dos pisos en adobe y tapia pisada. Así mismo, en las ciudades se edificaron las construcciones religiosas levantadas en piedra, en tapia pisada o en ladrillo cocido sentado en argamasa. Con el avance de los siglos, el ladrillo cocido desplazó las técnicas de construcción con tierra y estos sistemas tradicionales han ido desapareciendo. Hoy en día sobreviven diversas edificaciones en tierra que deben ser preservadas.

Esquemas de falla y patrones de agrietamiento ante terremotos de las edificaciones en tierra

Las edificaciones de adobe y tapia pisada presentan usualmente unas características constructivas que contribuyen a aumentar su vulnerabilidad sísmica. Frecuentemente la edad de estas edificaciones y el deterioro de las propiedades mecánicas de sus materiales llevan a una disminución adicional de su capacidad de soportar un terremoto.

Los principales factores que contribuyen a aumentar la vulnerabilidad sísmica de viviendas en adobe y tapia pisada son: irregularidades en planta y en altura, distribución inadecuada de los muros en planta, pérdida de la verticalidad –o plomo– de los muros, problemas de humedad, filtraciones, conexión inadecuada entre muros, pérdida de recubrimiento de muros, uso de materiales no compatibles, entresijos pesados y ausencia de diafragmas, apoyo y anclaje inadecuado de elementos de entresijo y cubiertas sobre muros, entresijos muy flexibles, luces muy largas y estructuración de cubierta deficiente.

Con base en las anteriores características, las edificaciones de dos pisos construidas en tierra presentan una mayor vulnerabilidad ante la acción de las fuerzas horizontales inducidas por un evento sísmico, tal como se presenta en la figura 1.



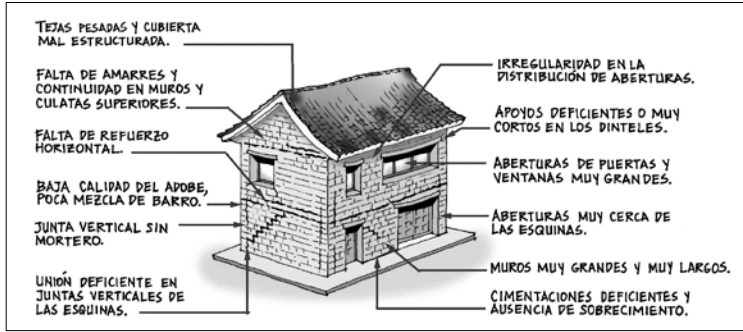


Figura 1:
Deficiencias estructurales en las edificaciones de dos pisos.

Debido a las deficiencias anteriormente mencionadas, las edificaciones construidas en mampostería de adobe y tapia pisada presentan mecanismos de colapso y patrones de agrietamiento que pueden ser agrupados de acuerdo con la Tabla 1.

Alternativas de rehabilitación sísmica

Generalidades

Las alternativas de rehabilitación propuestas conforman una serie de recomendaciones que buscan disminuir el riesgo sísmico al que está sometido este tipo de edificaciones. Se pretende en lo posible evitar la ocurrencia del colapso de la edificación durante el evento sísmico o en lo posible retardar dicho colapso para permitir la salida de los ocupantes. El objetivo de estas medidas de rehabilitación no está centrado en la protección de la propiedad ni en la minimización de los daños, ya que debido a las características mismas de estos materiales y técnicas constructivas, esto requeriría mayores niveles de intervención que los propuestos. Por otro lado, también debe

Figura 2:
Plaqueta de concreto.

Figura 3:
Entablado complementario.

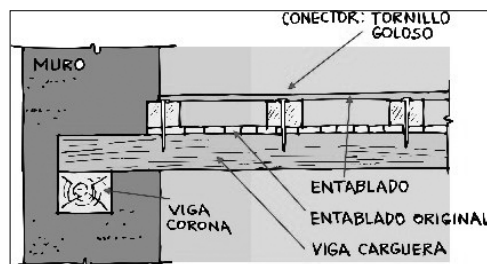
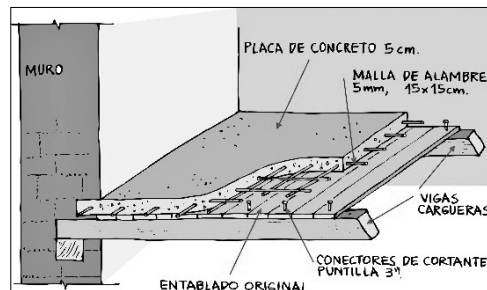


Figura página anterior:
Edificaciones de adobe en el barrio La Candelaria, Bogotá, Colombia.
Autor:
Maarten Goossens.

advertirse que las medidas propuestas están dirigidas únicamente a la rehabilitación de viviendas existentes y no a la construcción de nuevas viviendas. No obstante, a escala mundial existen diferentes normativas para la construcción de viviendas nuevas de adobe; por ejemplo, en Perú se cuenta con una normativa (Norma Técnica de Edificación, NTE, 1999). De la misma manera, en Europa hay documentos como los presentados en Minke (2001).

Las edificaciones en adobe y tapia pisada presentan dos grandes deficiencias que las hacen altamente vulnerables frente a la acción de los sismos. La primera de ellas es la falta de un diafragma rígido –y adecuadas conexiones de éste con los muros de soporte– en el plano de los entrepisos y de la cubierta, el cual, de existir, podría garantizar que las cargas horizontales sean absorbidas por los elementos más rígidos en cada plano de la edificación. La segunda consiste en que la capacidad a flexión de los muros de tierra sin carga vertical es prácticamente nula.

De otro lado, las cargas dinámicas producen una importante degradación de las propiedades de cohesión entre las partículas que conforman los muros de tierra, que ya de por sí son bajas al compararlas con las propiedades mecánicas de otros materiales. Cuando los muros se agrietan en sus extremos laterales, se pierde el trabajo de la edificación como un conjunto y cada muro tiene que absorber el sismo de manera independiente. Teniendo en cuenta estas consideraciones, es necesario proporcionarles capacidad a la flexión tanto en la dirección del plano del muro como en su dirección perpendicular. Con estas disposiciones, las medidas de rehabilitación propuestas son:

- Disminuir la masa de las edificaciones.
- Proporcionar, en la medida de lo posible, un diafragma rígido con adecuadas conexiones y contactos a los muros perimetrales.
- Proporcionar capacidad a la flexión a los muros estructurales principales de la edificación tanto en el plano del mismo como fuera del plano.

Diafragmas rígidos

La rigidez del diafragma en su plano se puede lograr de diferentes maneras, aunque se debe tener en cuenta que se debe garantizar una adecuada unión de éste con los muros de la edificación. Se

han analizado dos alternativas: la primera consiste en una plaqueta de concreto y la segunda en un entablado complementario tal como se presenta en las figuras 2 y 3.

Alternativas de reforzamiento de muros

Con base en las referencias citadas al final de este documento, se propone una serie de alternativas para reforzar los muros y proporcionarles resistencia a la flexión para acciones tanto en el plano como fuera de éste. No obstante, existen

otras alternativas de rehabilitación como las presentadas por Ginell y Tolles (2000).

REFUERZO CON MALLAS

Esta alternativa de refuerzo ha sido estudiada de manera exhaustiva por los profesores e investigadores de la Pontificia Universidad Católica del Perú, tal como lo presentan Vargas y Blondet (2005). Esta alternativa consiste en instalar mallas con vena por franjas horizontales y verticales en las zonas críticas de los muros principales. Los

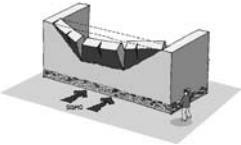
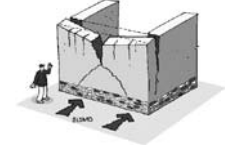
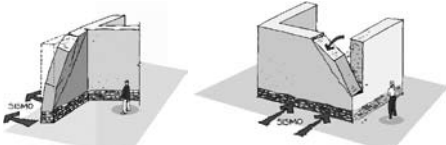
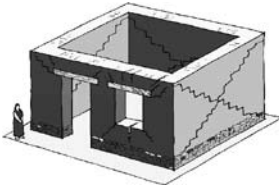
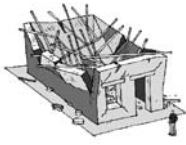
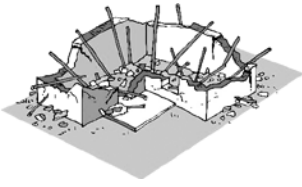
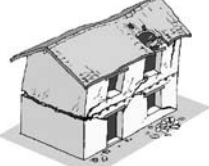
| TIPO DE FALLA | ESQUEMA |
|---|--|
| <p>Flexión perpendicular al plano del muro. Agrietamiento horizontal en la base o a una altura intermedia y agrietamientos verticales adicionales. Esto se presenta frecuentemente en muros largos.</p> |  |
| <p>Falla por flexión perpendicular al plano del muro con agrietamiento vertical en la zona central. Agrietamiento diagonal que constituye el mecanismo de falla y fisuración en la parte superior.</p> |  |
| <p>Falla por flexión perpendicular al plano en las esquinas no confinadas de muros sueltos, o en esquinas no conectadas efectivamente con los muros transversales.</p> |  |
| <p>Falla por cortante en el plano del muro asociada a altos empujes horizontales. En muchos casos estos agrietamientos están asociados a entresijos o cubiertas muy pesadas y se ven magnificados con las aberturas correspondientes a las puertas y ventanas en los muros.</p> |  |
| <p>Caída de la cubierta hacia el interior de la vivienda, por encontrarse mal apoyada sobre los muros. Se genera una falla en la zona superior de los muros.</p> |  |
| <p>Falla generalizada de la cubierta por ausencia de un apoyo adecuado o por mala estructuración de ella. Este tipo de mecanismo de falla es frecuente en edificaciones con cubiertas muy pesadas, mal concebidas estructuralmente o con alto grado de deterioro</p> |  |
| <p>Falla que se presenta por mala conexión de los muros del primer piso con los del segundo. En este mecanismo de falla el entresijo rompe los muros principales en forma casi horizontal, generando la inestabilidad del segundo piso</p> |  |

Tabla 1:
Tipos de falla y agrietamientos asociados con fuerzas sísmicas.

Figura 4:
Esquema de
reforzamiento en muro
esquinero.

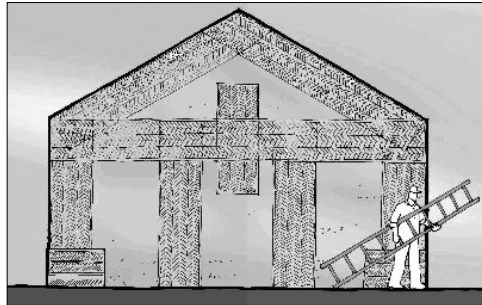


Figura 5:
Detalle de reforzamiento
de muro y cuchilla.

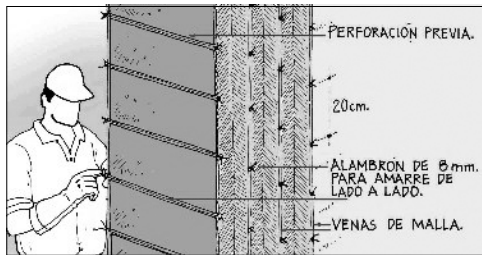


Figura 6:
Muro reforzado con
malla de vena pañetado.



Figura 7:
Realizar las perforaciones
para los tornillos.

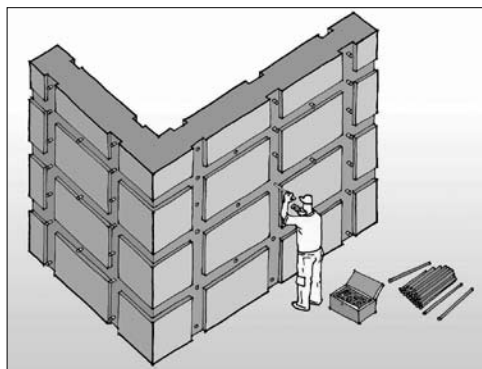
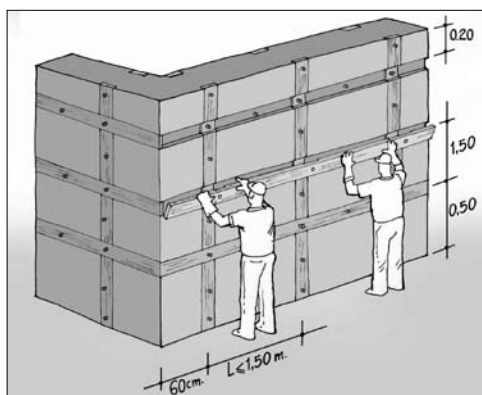


Figura 8:
Instalación de las
maderas de refuerzo.



tramos de malla se instalan en la cara interna y externa del muro en forma simultánea. Las mallas de las dos caras se interconectan con alambrones de 8 mm colocados en orificios previamente perforados, los cuales se rellenan con mortero de cal y arena. El amarre del alambro y la malla se realiza únicamente en las venas de la malla. Los alambrones van espaciados cada 20 cm en promedio en las dos direcciones y posteriormente la malla se recubre con mortero de cal y arena. En las figuras 4 a 6 se muestra el proceso de instalación.

REFUERZO CON MADERAS DE CONFINAMIENTO

Consiste en la instalación de refuerzos horizontales y verticales en madera con el fin de aumentar la resistencia a la flexión de los muros y mantener la unidad de la estructura. Los elementos deben colocarse tanto por la cara externa como por la cara interna del muro. Los elementos horizontales de los muros se unen mediante platinas de acero de manera que se evite la desarticulación de los diferentes muros y se mantenga siempre unida la edificación. En principio no se pretende rigidizar los muros sino reforzarlos de manera que la sección del muro trabaje como una sección compuesta de tierra y madera. La compatibilidad de deformaciones entre los dos materiales se garantiza mediante pernos colocados cada 50 cm y mediante puntillas convencionales clavadas sobre las tablas para proporcionar una superficie de contacto rugosa. En las figuras 7 a 10 se presentan esquemas del proceso de instalación de esta alternativa de reforzamiento. Es importante mencionar que los aspectos técnicos de esta alternativa de rehabilitación fueron ideados por los autores del presente documento.

Instalación de vigas de coronación

En aquellos casos en donde no existen vigas “corona” sobre los muros, se recomienda la colocación de una viga en la parte superior del muro y alrededor de todo el perímetro de la casa de adobe o de tapia pisada. Esta viga corona puede ser de madera o de concreto. Dado que pueden presentarse efectos de contracción de fraguado en la viga, se puede correr el riesgo de que la conexión entre el muro de adobe y la viga corona se pierda en el caso de que esta sea de concreto. Por esta razón se recomienda que esta viga posea un elemento de borde en las inmediaciones de las

esquinas de los muros con el fin de garantizar un mejor comportamiento. Esta alternativa va acompañada de elementos de confinamiento verticales embebidos en el muro. Para efectos de la investigación llevada a cabo, se estudian numérica y experimentalmente las dos primeras alternativas para evaluar sus fortalezas y debilidades.

Metodología y resultados

Con el fin de abordar la problemática de la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones en tierra colombianas, se llevó a cabo un trabajo de campo y un trabajo experimental en el laboratorio. En campo se realizaron visitas técnicas de inspección para establecer el sistema constructivo de estas edificaciones y para recopilar material –adobes y tierra para construir muros en tapia pisada y en adobe-. Posteriormente se reconstruyeron en el laboratorio probetas para someterlas a diversas condiciones de carga y determinar de esta manera las propiedades mecánicas de los materiales y del sistema estructural. A continuación se describirá en detalle cada una de estas actividades.

Trabajo de campo: descripción del sistema constructivo y estructural

Con base en una serie de visitas de inspección a diferentes edificaciones en Bogotá y en el eje cafetero, se establecieron algunas características típicas del sistema constructivo y estructural de las edificaciones en tapia pisada y adobe. En total se visitaron seis edificaciones en la zona de La Candelaria (Universidad de los Andes, Centro de Investigación en Materiales y Obras Civiles, CIMOC, 2002) y cinco en zonas del eje cafetero (Universidad de los Andes, Centro de Estudios de Desastres y Riesgos, CEDERI, 2002). En varias de las edificaciones de La Candelaria se extrajeron bloques de adobe, muestras de mortero, se hicieron apiques para establecer la conformación de la cimentación, se tomaron muestras de maderas así como de la tierra de los muros de tapia pisada. A continuación se presenta una breve descripción de cada uno de los elementos del sistema constructivo encontrado.

CIMENTACIONES

Los tipos de cimentaciones están constituidos en general por vigas corridas en piedra y material

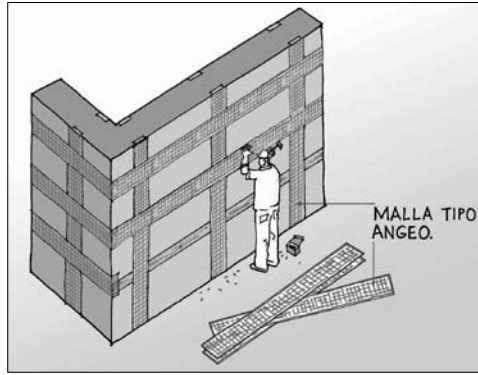
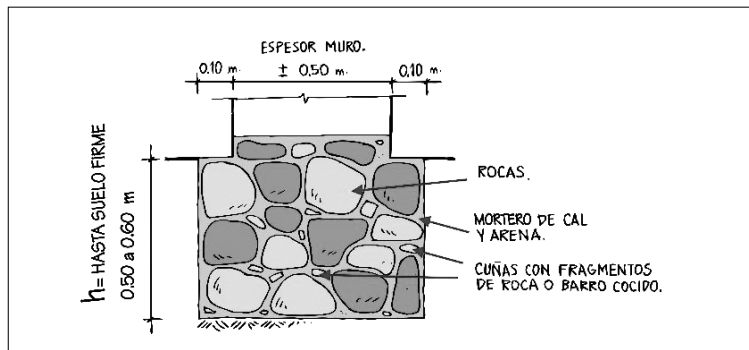
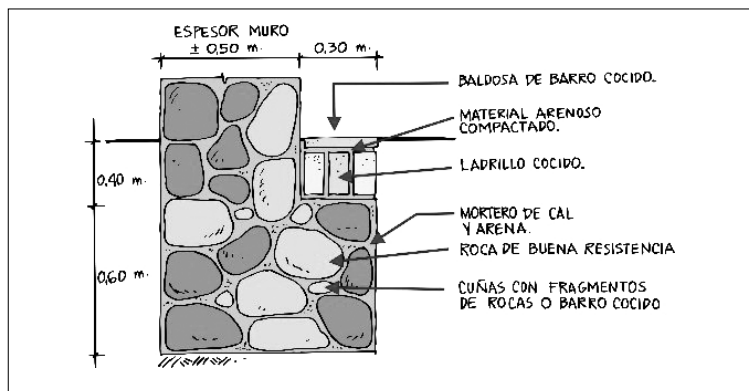
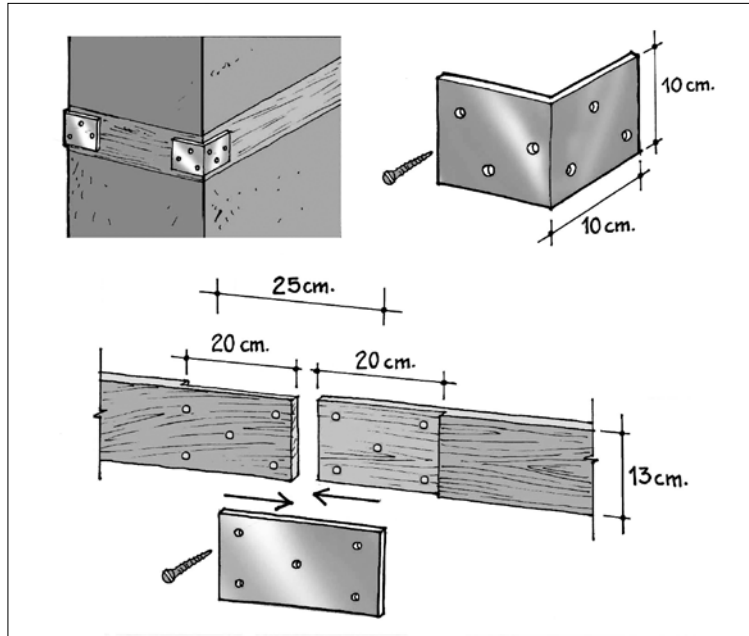


Figura 9: Aplicación del recubrimiento.

Figura 10: Platinas de unión y traslapes.

Figura 11: Cimentación en L.

Figura 12: Cimentación en T invertida.



Figuras 13 a 15:
Ladrillo de adobe.

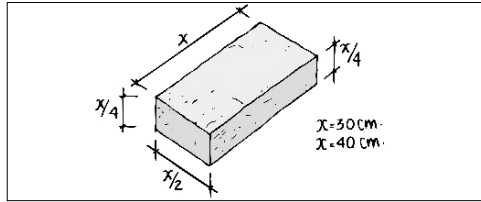


Figura 16:
Aparejo compuesto por dos adobes en tizón y la siguiente de tres en soga con dos medios adobes entre ellos.

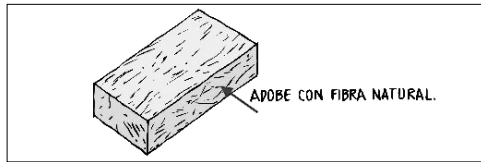


Figura 17:
Foto tomada durante las visitas de inspección.

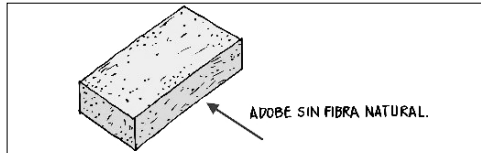
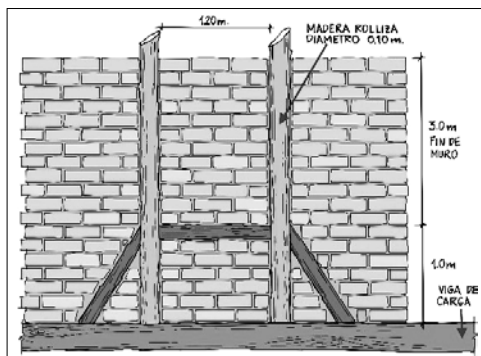
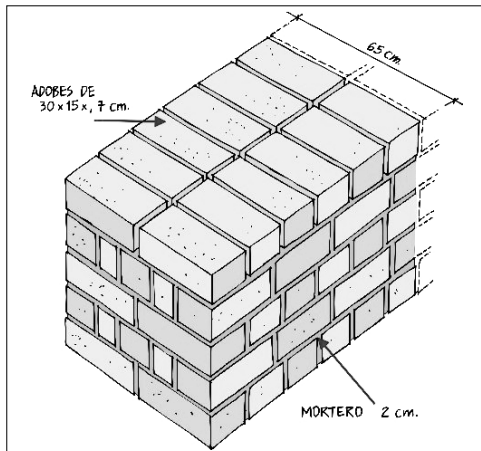


Figura 18:
Refuerzo interno encontrado en algunos muros divisorios. Esquema del refuerzo.



llenante conformando un entramado de vigas de cimentación bajo los muros principales de la edificación. En general, la profundidad de las cimentaciones inspeccionadas alcanza el suelo firme por debajo de la capa de tierra negra u orgánica. Las formas dominantes de la viga de cimentación encontradas son en “L”, en “T” invertida o una sección prismática del mismo ancho del muro (figuras 11 y 12).

Los apiques realizados evidencian la utilización de diferentes tipos de llenantes tales como suelo arenoso o lleno de cal y canto. Las rocas encontradas son de tipo angulosa, redondeada o una mezcla de las dos. Por otro lado, entre la cimentación y los muros se encuentra el sobrecimiento en material rígido y resistente, el cual tiene como propósito proteger el muro de tierra de la humedad, de la acción del agua superficial y de otras acciones que ocurren al nivel de piso. Así mismo, estos sobrecimientos conforman la base definitiva de asiento de los muros. Los sobrecimientos presentan una altura promedio de 50 cm.

MUROS DE ADOBE

Las dimensiones de las piezas en los muros de adobe son muy variables y responden tanto a la tradición como a criterios constructivos. Las dimensiones promedio de las piezas de adobe varían desde 0.30 m de largo x 0.15 m de ancho y 0.07 m de alto hasta dimensiones del orden de 0.40 m de largo x 0.20 m de ancho x 0.10 m de alto (figuras 13 a 15).

Con respecto a las dimensiones globales de los muros de adobe se encuentran espesores que varían entre 40 cm y 1 metro; las alturas de entrepiso son inferiores a 3.5 m y las longitudes de los muros son bastante variables. Al nivel del aparejo de las piezas, el más representativo para muros cargueros –aquellos que soportan las cargas gravitacionales– se presenta en las figuras 16 y 17.

Adicionalmente, para los muros no cargueros se presentan en general hiladas compuestas de adobes en soga.

Por otro lado, en algunas edificaciones inspeccionadas en la ciudad de Bogotá, se presenta un tipo de refuerzo interno en los muros divisorios que no tienen vínculos con los muros principales de la edificación. Al parecer, este refuerzo se coloca con la intención de mejorar la estabilidad del

muro en dirección perpendicular al plano. Este refuerzo se presenta en la figura 18.

MUROS DE TAPIA PISADA

Los muros de tapia pisada están constituidos en general por capas de tierra compactada con espesores del orden de 0.10 m. Normalmente la compactación se hace dentro de un tapial cuyas dimensiones no son estándar y varían de una región a otra (figuras 19 y 20). Las secciones de tapia se traban de la misma manera como se levanta un muro con adobes pero de gran tamaño. En general, para realizar las juntas horizontales se escarifica con un punzón la superficie del muro que recibiría la nueva hilada sin colocar ningún tipo de elemento de conexión. En otros casos se presentan diferentes tipos de elementos colocados en las juntas horizontales tales como adobes, trozos de teja, de ladrillo cocido, caña o tendidos de esterilla de guadua, todo con el fin de proporcionar una superficie de fricción entre las dos hiladas.

Para la conexión de muros en las esquinas (figura 21), generalmente los dos muros principales se levantaban con disposiciones de trabe similares a las utilizadas en esquinas de muros de adobe. Por lo general, el refuerzo y confinamiento de estos muros se limita al eventual efecto de conexión que pueden proporcionar los elementos de madera que reciben las vigas de piso o los elementos de madera que sirven de soporte a la cubierta.

En varias de las construcciones inspeccionadas, los muros de tapia incluyen refuerzos horizontales (figura 22) consistentes en madera, caña o guadua atravesando en general las juntas verticales.

Por otro lado, los vanos de las puertas y ventanas incluyen en general un gran dintel constituido por dos o más vigas de madera de sección aproximada 0.20 m x 0.15 m, las cuales se empotran en los muros al menos 0.40 m a cada lado del vano.

ENTREPIOS

Los entrepisos típicos están conformados por vigas cargueras que se extienden de muro a muro carguero conformando la plataforma de apoyo del entrepiso. Estas vigas se encargan de transmitir la carga a las vigas corona de entrepiso, las cuales

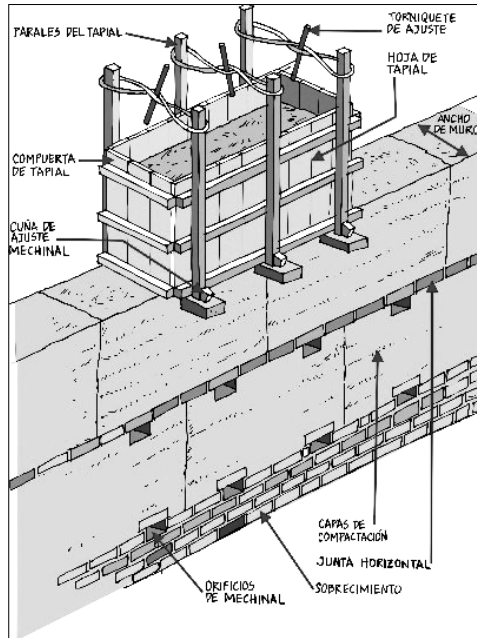


Figura 19:
Técnica constructiva tapia pisada.

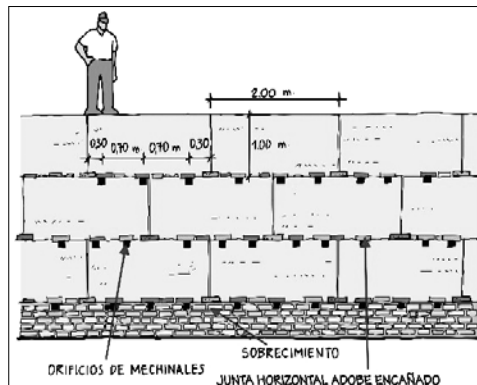


Figura 20:
Aparejo de tapia.

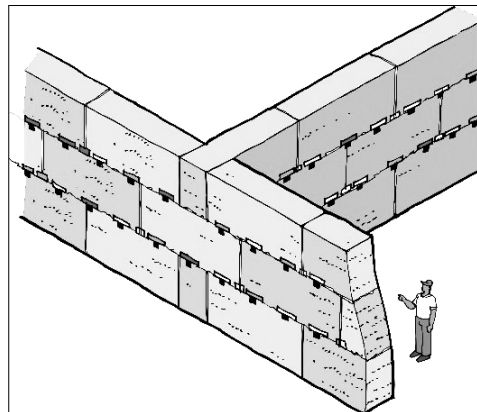


Figura 21:
Construcción de esquinas en tapia.

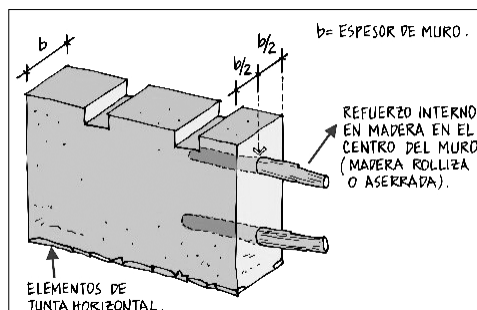


Figura 22:
Refuerzos internos de muros de tapia.

Figura 23:
Viga corona sencilla con vigas de carga.

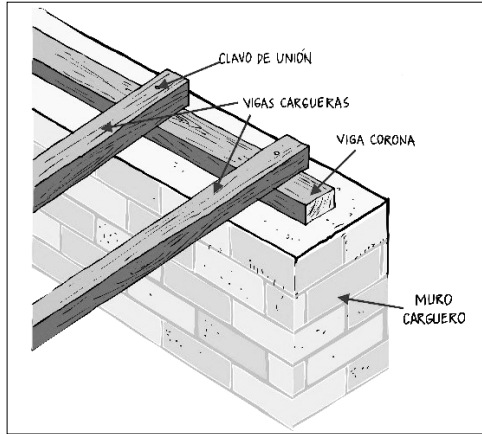


Figura 24:
Viga corona doble con vigas de carga.

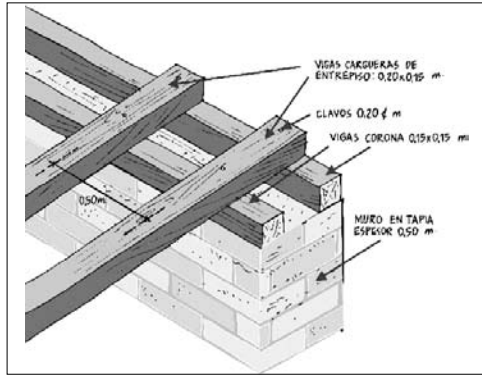
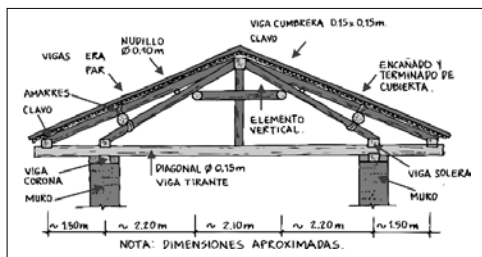
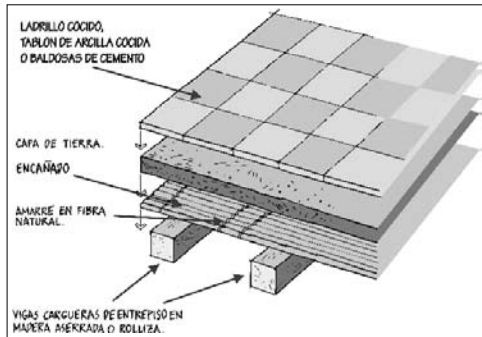


Figura 25:
Estructura del entrepiso.

Figura 26:
Elementos principales de las cubiertas.



a su vez se apoyan directamente sobre los muros cargueros. La sección de estas vigas puede ser en maderas rollizas (0.25m de diámetro) o madera de sección rectangular o cuadrada con secciones transversales en el orden de 0.20m x 0.20m. La separación típica entre estas vigas cargueras está en el orden de los 0.50 m, aunque puede llegar hasta valores del orden de 1 m o más. El detalle de las vigas de carga y las vigas de coronación se puede observar en las figuras 23 y 24.

Por otro lado, los acabados de entrepiso están conformados por lo general de listones de madera apoyados directamente sobre las vigas cargueras. También se encuentran acabados de piso compuestos por madera, una capa de tierra y un elemento rígido de acabado. Sobre las vigas cargueras se instalan directamente los listones de madera (figura 25).

CUBIERTAS

En general se presenta gran variedad en las estructuras de cubierta, pero en forma típica éstas están conformadas por elementos de madera rollizos y/o aserrados. Uno de los sistemas de cubierta más utilizados corresponde con la conocida tradicionalmente como de "par y nudillo", la cual incluye los elementos cuya ubicación se muestra en la figura 26: viga cumbrera, vigas correas, elementos diagonales o pares, vigas de madera que atraviesan el vano y descansan en las soleras -tirantes- y vigas instaladas en las cajas de los tirantes -soleras- que reciben las correas. A nivel del entechado son comunes las capas de tierra sobre el encañado y sobre este último las típicas tejas de arcilla cocida.

Ensayos de laboratorio e interpretación del comportamiento experimental

Con el fin de validar las alternativas de rehabilitación propuestas, se adelantó una serie de ensayos de laboratorio sobre especímenes de diferentes dimensiones y configuraciones. En general se caracterizó el material que compone el adobe y la tapia pisada -compresión, flexión y compresión diagonal- y posteriormente se llevaron a cabo pruebas sobre elementos principales -muros a escala real y viviendas a escala reducida-. Tanto para los ensayos de muros como para los ensayos de viviendas a escala, se estudiaron experimentalmente las dos alternativas de rehabilitación propuestas -mallas y elementos de madera-. Todos los materiales usados para la construcción de las probetas y de los especímenes de ensayo fueron elaborados en su totalidad con los materiales y los procesos constructivos típicos encontrados en el país. La tierra para la elaboración de las probetas de tapia fue traída en volquetas de Cajamarca y los adobes fueron extraídos de edificaciones existentes en el barrio La Candelaria de Bogotá.

ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

Para la caracterización de los materiales se efectuaron los ensayos detallados en la tabla 2, en donde adicionalmente se presentan las normas técnicas de referencia usadas.

De la misma manera, en la tabla 3 se resumen los resultados de los ensayos de caracterización efectuados sobre la tierra extraída de las diferentes fuentes. Por su parte, para caracterizar la densidad de los materiales se efectuaron cerca de treinta ensayos sobre unidades de adobes, diez sobre pilas -muretes- de adobe y doce sobre muretes de tapia pisada. Los resultados promedio de densidad se presentan en la tabla 4.

| Descripción del ensayo | Norma |
|---|---------------|
| Densidad | ASTM C 642-97 |
| Resistencia a la compresión y a la flexión de peizas individuales | NTC 4017 |
| Resistencia a la compresión de muretes | NTC 3495 |
| Comportamiento esfuerzo deformación a la compresión de muretes | NTC 3495 |
| Resistencia a la flexión en dirección perpendicular a las juntas horizontales | NTC 4109 |
| Resistencia a la flexión en dirección perpendicular a las juntas verticales | NTC 4109 |
| Resistencia a la tracción diagonal | |
| Resistencia a la compresión y a la tensión de morteros de cal | NTC 220 |

Tabla 2:
Ensayos de caracterización de materiales.

| | G _s | LL % | LP % | IP % | Clasificación | Pasa Tamiz 200 | Pasa Tamiz 50 | Pasa Tamiz 4 | Densidad seca máxima | Contenido humedad óptimo | Límite de contracción | Relación de contracción |
|-------------------------------|----------------|------|------|------|---------------|----------------|----------------|---------------|----------------------|--------------------------|-----------------------|-------------------------|
| Suelo casa Venados | 2.72 | 22.9 | 12.5 | 10.3 | CL | 44.67 | 59.54 | 73.46 | 1.88 | 13.8 | 2.65 9.82 | 1.91 1.89 |
| Suelo casa Fernández | 2.61 | 22.2 | 14.6 | 7.6 | CL | 35.95 | 55.56 | 79.05 | 1.81 | 15.9 | 3.11 5.43 | 2.03 1.69 |
| Suelo Clínica Santa Bárbara | 2.59 | 45.6 | 27.9 | 17.7 | ML | 87.52 83.92 | 89.39 95.56 | 100 99.79 | 1.58 | 21.5 | 9.63 12.95 | 1.95 1.68 |
| Suelo de archivo | 2.64 | 32.3 | 11.1 | 21.2 | CL | | | | | | 7.02 | 1.77 |
| Mortero casa Venados | 2.64 | 29.1 | 13.6 | 15.4 | CL | 70.68 | 82.5 | 94.04 | 1.69 | 18.5 | 5.11 | 1.74 |
| Mortero casa Fernández | 2.68 | 29.7 | 13.8 | 15.9 | CL | 76.52 | 86.77 | 94.39 | 1.66 | 20.5 | 5.85 | 1.84 |
| Mortero Clínica Santa Bárbara | 2.58 | 33.8 | 12.7 | 21.1 | CL | 82.01 | 93.74 | 99.17 | 1.74 | 11 | 7.84 | 1.73 |
| Adobe casa Venados | 2.71 | 33 | 11.1 | 21.9 | CL | 98.54 | 99.68 | 100 | 1.83 | 13 | | |
| Adobe casa Fernández | 2.61 | 30.2 | 12.7 | 17.5 | CL | 94.57 81.59 | 96.44 91.7 | 99.7 100 | 1.88 | 11 | | |
| Adobe Clínica Santa Bárbara | | 32.3 | 11.1 | 21.2 | CL | | | | 1.96 | 11.69 | | |
| Tapia casa Venados | | | | | CL | 64.98 | 76.3 | 86.4 | | | | |
| Tapia casa Fernández | | | | | CL | 41.32 | 47.84 | 55.31 | | | | |
| Tapia Clínica Santa Bárbara | 2.50 | 32.2 | 21.1 | 11.1 | CL | 77.91 71.82 | 85.68 81.84 | 91.35 87.8 | 1.71 | 18.5 | 10.93 | 1.56 |
| Tapia Cajamarca | | | | | CL | 75.54 | 91.43 | | | | | |

G_s=Peso específico de sólidos. LL= Límite líquido. LP=Límite plástico. IP=Índice de plasticidad.

Por otro lado, se realizaron pruebas de resistencia a la compresión sobre piezas individuales de adobe, compresión sobre pilas de adobe (figura 27), compresión sobre pilas de tapia pisada (figura 29), flexión sobre muretes de adobe (figura 28), flexión sobre elementos de tapia pisada y tracción diagonal sobre muretes tanto de tapia como de adobe (figura 30). Es importante mencionar que este último ensayo ha demostrado ser un método sencillo para determinar las características y parámetros de comportamiento al corte de los muros de mampostería. Este ensayo desarrollado en paneles relativamente cuadrados, consiste en aplicar dos fuerzas de compresión opuestas que

| Espécimen | γ_{PROM} (Ton/m ³) |
|-------------------------|---|
| Unidades de adobe | 1.82 |
| Muretes de adobe | 1.78 |
| Muretes de tapia pisada | 1.93 |

Tabla 4:
Valores promedio de densidad de los materiales.

actúan sobre una de las diagonales del murete. Los muretes usados en este ensayo tanto para el adobe como para la tapia pisada fueron cuadrados, con espesores variables entre 14.5 cm y 40 cm y con un lado variable entre 75 cm y 1.0 m. En general todas las probetas se instrumentaron con celdas de carga y con deformímetros.

En total se realizaron 33 pruebas de compresión y siete pruebas de flexión sobre piezas

Figura 27:
Ensayo de compresión de adobe.



Figura 28:
Ensayo de flexión en adobe.



Figura 29:
Ensayo de compresión de tapia pisada.

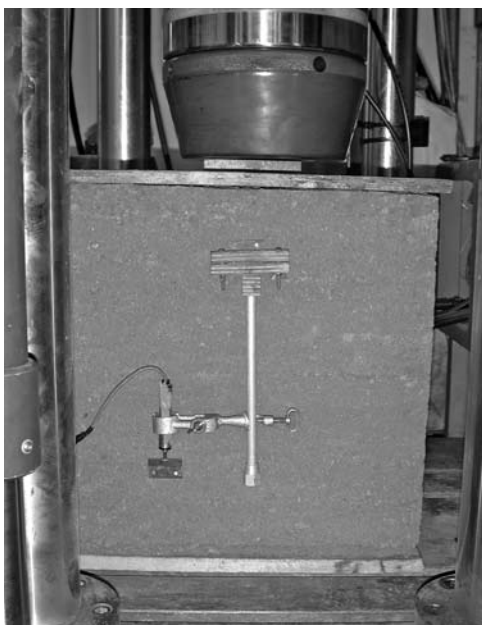


Figura 30:
Ensayo de tracción diagonal.



individuales extraídas de la zona de La Candalaria. Desde el punto de vista de la mampostería de adobe y tapia se llevaron a cabo quince pruebas de compresión sobre pilas –conformadas por cinco piezas y cuatro pegas– y diez pruebas sobre elementos de tapia. Por otro lado, se realizaron diez pruebas de tracción diagonal sobre muretes de adobe y trece pruebas sobre muretes de tapia y algunos ensayos de flexión (5) sobre muretes elaborados para tal fin. En la tabla 5 se resumen

los principales resultados encontrados en los experimentos de caracterización.

Es importante mencionar que en los ensayos de flexión de muretes de adobe se generaron colapsos de las probetas con la aplicación de su peso propio sin ningún tipo de sobrecarga. Esto demuestra que para efectos prácticos, la resistencia a la tensión por flexión y a la tensión directa de los elementos de adobe es nula. Lo anterior confirma la observación relativa a la alta vulnerabilidad

Tabla 5:
Valores promedio de las pruebas mecánicas de caracterización de los materiales.

| Material | Prueba | Valor promedio (MPa) | Desviación estándar (Mpa) |
|--------------|---|----------------------|---------------------------|
| ADOBE | Resistencia a la compresión de unidades de adobe | 2.84 | 0.855 |
| | Resistencia a la flexión de unidades de adobe | 0.49 | 0.188 |
| | Resistencia a la compresión de muretes de Adobe | 1.1 | 0.256 |
| | Módulo elástico de muretes de Adobe (E) | 98.1 | 35.9 |
| | Esfuerzo de tracción diagonal de muretes de adobe | 0.028 | 0.008 |
| | Módulo de cortante (G) | 27.4 | 10.6 |
| TAPIA PISADA | Resistencia a la compresión de muretes de tapia | 0.55 | 0.184 |
| | Módulo elástico de muretes de tapia | 66.6 | 31.2 |
| | Esfuerzo de tracción diagonal de muretes de tapia | 0.037 | 0.014 |
| | Módulo de cortante (G) | 31.2 | 13.0 |

de elementos tales como los muros de adobe, los cuales ante la aplicación de cargas que generan momentos perpendiculares a su plano, no presentan prácticamente ninguna resistencia, excepto por el efecto estabilizante que producen en este sentido las cargas gravitacionales actuantes. Con respecto a los especímenes en tapia pisada, se encontró una resistencia a flexión por tensión cercana a 0.02 MPa –muy bajo al compararlo con otros materiales como el concreto o la mampostería de ladrillo cocido–, lo cual demuestra el mejor comportamiento de este material.

ENSAYO DE MUROS CON CARGA CÍCLICA PARALELA AL PLANO

El objetivo del ensayo fue determinar las características generales del comportamiento del muro ante cargas cíclicas horizontales actuando en su plano, tales como rigidez inicial y degradación de la rigidez con la deformación horizontal, capacidad máxima horizontal, ductilidad, resistencia al corte residual después de la primera falla, un estimativo de la capacidad de disipación de energía y del amortiguamiento y el mecanismo de falla.

En la figura 31 se presenta un esquema detallado del montaje para adelantar los ensayos sobre muros a escala natural sometidos a una carga vertical constante y a una carga simultánea cíclica horizontal. La carga horizontal se aplica

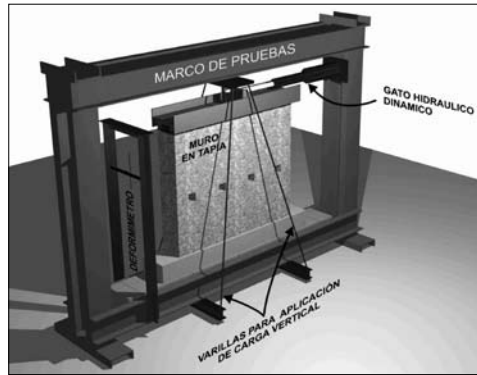


Figura 31: Esquema del montaje para ensayos de muros con carga paralela al plano.

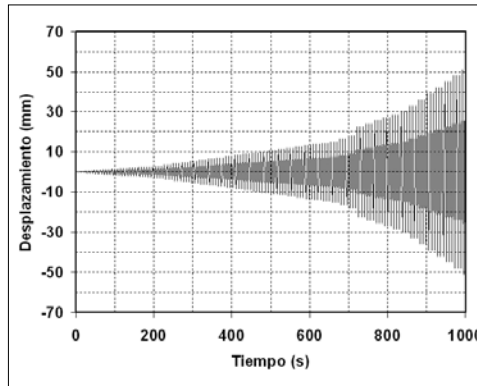


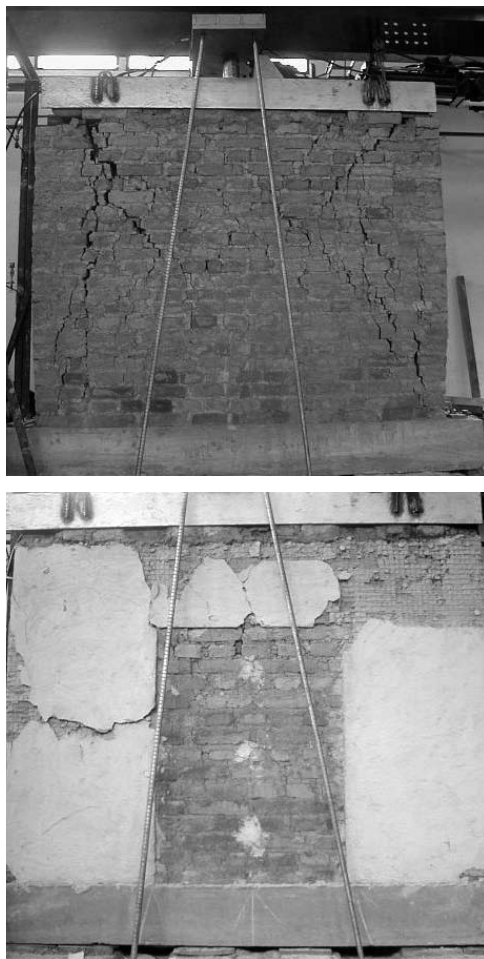
Figura 32: Historia de desplazamientos en la parte superior del muro.

con desplazamientos horizontales controlados iniciando en desplazamientos muy pequeños hasta llegar a desplazamientos que generen la inestabilidad y falla del muro. En la figura 32 se presenta la historia de desplazamientos relativos a la cimentación que se aplica en la parte superior de cada uno de los especímenes.

| No | Muro No | Material | Dimensiones Alto(cm)xEspesor(cm)xAncho(cm) | Carga vertical (kN) | Tipo de Refuerzo |
|----|-----------|----------|---|---------------------|------------------|
| 1 | M-PA-A-01 | Adobe | 250 x 40 x 200 | 70 | Ninguno |
| 2 | M-PA-A-02 | Adobe | 250 x 40 x 200 | 50 | Ninguno |
| 3 | M-PA-A-03 | Adobe | 250 x 40 x 200 | 20 | Ninguno |
| 4 | M-PA-A-04 | Adobe | 250 x 40 x 200 | 70 | Malla |
| 5 | M-PA-A-05 | Adobe | 250 x 40 x 200 | 50 | Malla |
| 6 | M-PA-A-06 | Adobe | 250 x 40 x 200 | 20 | Malla |
| 7 | M-PA-A-07 | Adobe | 250 x 50 x 200 | 50 | Malla |
| 8 | M-PA-A-08 | Adobe | 250 x 50 x 200 | 70 | Madera |
| 9 | M-PA-A-09 | Adobe | 250 x 50 x 200 | 20 | Madera |
| 10 | M-PA-T-01 | Tapia | 250 x 40 x 200 | 70 | Ninguno |
| 11 | M-PA-T-02 | Tapia | 250 x 40 x 200 | 50 | Ninguno |
| 12 | M-PA-T-03 | Tapia | 250 x 40 x 200 | 20 | Ninguno |
| 13 | M-PA-T-04 | Tapia | 250 x 40 x 200 | 70 | Malla |
| 14 | M-PA-T-05 | Tapia | 250 x 40 x 200 | 50 | Malla |
| 15 | M-PA-T-06 | Tapia | 250 x 40 x 200 | 20 | Malla |
| 16 | M-PA-T-07 | Tapia | 250 x 50 x 200 | 50 | Malla |
| 17 | M-PA-T-08 | Tapia | 250 x 50 x 200 | 70 | Madera |
| 18 | M-PA-T-09 | Tapia | 250 x 50 x 200 | 20 | Madera |

Tabla 6: Características principales de los muros ensayados.

Figuras 33 y 34:
Fotografía de patrones
de fisuración de los
ensayos ante carga
paralela al plano. Muro
sin refuerzo y muro
reforzado con malla.



Cada uno de los muros fue instrumentado con una celda de carga en la cabeza del actuador dinámico, deformímetro para control de las deflexiones horizontales en la parte superior del muro y una celda de carga para las cargas verticales. Las cargas verticales aplicadas que se seleccionaron corresponden a los niveles de cargas usuales encontrados en muros de viviendas típicas, considerando un máximo de dos pisos y luces aferentes máximas en el orden de los 4 m. De esta manera se seleccionaron niveles de carga vertical de 20, 50, y 70 kN como las más representativas de los rangos de carga vertical típica. Se realizaron un total de doce ensayos en diferentes configuraciones de muros y todos los muros ensayados tenían dimensiones de 250 cm x 40 cm x 180 cm. En la Tabla 6 se presenta un resumen de las características de cada uno de los muros ensayados.

La tabla 7 resume los resultados obtenidos. La forma de falla dominante en los diferentes ensayos realizados se inició por la formación de grietas en diagonal, siguiendo por lo general las pegas en el caso de los muros de adobe. En el caso de los muros de tapia, las grietas se iniciaban en las agujas debido a la concentración de esfuerzos y se propagaban a lo largo del muro siguiendo una línea con inclinación cercana a los 45 grados. En

Tabla 7:
Resultados de los
ensayos en el plano.

| Muro No. | P (kN) | s_v (MPa) | V_y (kN) | t_v (MPa) | V_u (kN) | t_u (MPa) | d_v (mm) | d_u (mm) |
|----------|-----------|----------------|---------------|----------------|---------------|----------------|---------------|---------------|
| 1 | 70 | 0.07 | 20 | 0.020 | 25 | 0.029 | 0.5 | 1.2 |
| 2 | 50 | 0.05 | 18 | 0.018 | 22 | 0.022 | 0.8 | 1.3 |
| 3 | 20 | 0.02 | 10 | 0.010 | 12 | 0.012 | 0.7 | 1.4 |
| 4 | 70 | 0.07 | 30 | 0.030 | 36 | 0.036 | 2.2 | 14.5 |
| 5 | 50 | 0.05 | 21 | 0.021 | 36 | 0.036 | 2.7 | 16.2 |
| 6 | 20 | 0.02 | 20 | 0.020 | 32 | 0.032 | 2.1 | 14.4 |
| 7 | 50 | 0.04 | 12 | 0.010 | 32 | 0.026 | 2.3 | 7.0 |
| 8 | 70 | 0.06 | 20 | 0.016 | 47 | 0.040 | 1.5 | 6.5 |
| 9 | 20 | 0.02 | 15 | 0.012 | 25 | 0.020 | 1.1 | 6.2 |
| 10 | 70 | 0.07 | 15 | 0.022 | 28 | 0.028 | 2.2 | 10.3 |
| 11 | 50 | 0.05 | 16 | 0.016 | 26 | 0.026 | 1.4 | 8.1 |
| 12 | 20 | 0.02 | 8 | 0.008 | 13 | 0.013 | 1.6 | 11.6 |
| 13 | 70 | 0.07 | 21 | 0.027 | 43 | 0.043 | 1.5 | 14.4 |
| 14 | 50 | 0.05 | 19 | 0.025 | 36 | 0.036 | 1.4 | 18.0 |
| 15 | 20 | 0.02 | 12 | 0.012 | 20 | 0.020 | 2.0 | 12.5 |
| 16 | 50 | 0.04 | 25 | 0.020 | 39 | 0.031 | 1.8 | 14.6 |
| 17 | 70 | 0.06 | 26 | 0.021 | 46 | 0.037 | 2.1 | 18.3 |
| 18 | 20 | 0.02 | 16 | 0.013 | 27 | 0.022 | 1.1 | 16.1 |

Donde:
P=Carga vertical aplicada al muro
 s_v =Esfuerzo vertical aplicado al muro
 V_y =Fuerza cortante de fisuramiento del muro
 t_v =Esfuerzo cortante de fisuramiento del muro

V_u =Fuerza última resistente del muro
 t_u =Esfuerzo último resistente del muro
 d_v = Desplazamiento de fisuramiento del muro
 d_u = Desplazamiento del muro para la resistencia última

las figuras 33 y 34 se presentan fotografías de la falla de los muros.

De acuerdo con los resultados presentados anteriormente, el refuerzo con tablas de confinamiento mejora notablemente el comportamiento de los muros ante cargas en el plano del muro ya que incrementa tanto el desplazamiento último –hasta en un 400%– como el esfuerzo cortante promedio resistente –hasta en un 100%–. Por su parte, el reforzamiento con malla de vena también genera incrementos en resistencia y en desplazamiento; sin embargo, durante el proceso de carga y descarga de los muros reforzados con este sistema se generan desprendimientos de la malla, lo cual trae como consecuencia que el muro colapse igual que el muro sin ningún tipo de refuerzo una vez se ha desprendido la malla.

A manera de ejemplo, para los ensayos con carga paralela al plano del muro se presenta en las figuras 35 a 37 la respuesta en fuerza y desplazamiento de un muro adobe con carga axial de 70 kN sin ningún tipo de refuerzo (figura 35), con refuerzo en malla (figura 36) y con refuerzo en maderas de confinamiento (figura 37).

ENSAYO DE MUROS CON CARGA MONOTÓNICA PERPENDICULAR AL PLANO

El objetivo de este ensayo consiste en determinar la resistencia del espécimen a una aceleración uniforme que actúa en dirección perpendicular al plano e identificar el mecanismo de colapso más probable del elemento en esta dirección. Para adelantar estas pruebas se utilizó un montaje especial mediante el cual cada espécimen para ensayar se coloca dentro de un marco metálico de soporte el cual se encargará de transmitirle las acciones (figura 38). Cada espécimen se sometió a un proceso de volcamiento lento para generar de esta manera una carga uniformemente distribuida sobre el muro. El ensayo termina cuando se detecta alguna grieta o algún comportamiento anómalo en cualquiera de los componentes del ensayo. En caso de alcanzar el colapso antes de llegar a la posición horizontal, se registra el ángulo para el cual se genera el colapso y el mecanismo de falla observado. En caso de que el elemento llegara hasta la posición horizontal sin ningún tipo de daño, el espécimen de ensayo se somete a una sobrecarga adicional a la de su peso propio.

En total se efectuaron ocho ensayos sobre muros de adobe y de tapia pisada con dimensio-

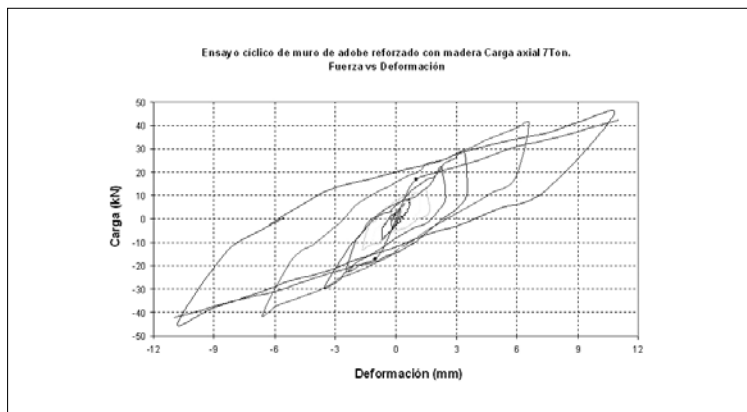
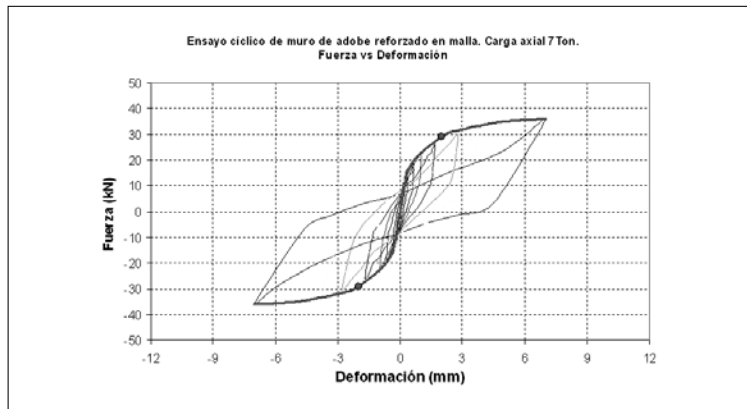
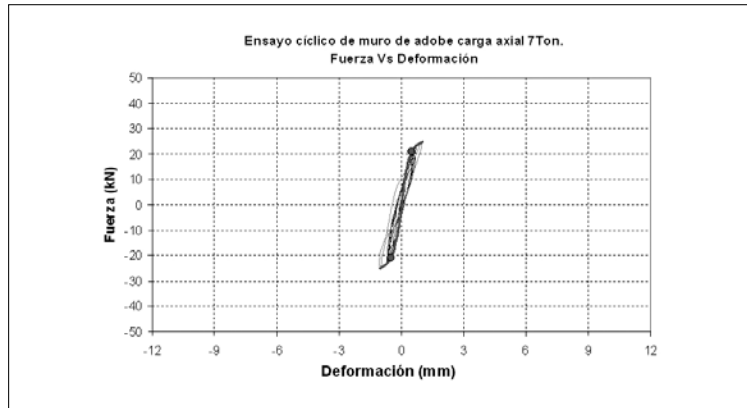


Figura 35:
Ciclos de histéresis para un muro de adobe sin refuerzo.

Figura 36:
Ciclos de histéresis para un muro de adobe reforzado con malla.

Figura 37:
Ciclos de histéresis para un muro de adobe reforzado con maderas de confinamiento.

Figura 38:
Montaje ensayo de carga perpendicular al plano.

Tabla 8:
Resultados ensayos de carga perpendicular al plano.

| Muro No | Tipo de refuerzo | Material | Carga vertical (kN) | Angulo (deg) | Sobrecarga (kN) | Estado |
|---------|------------------|----------|---------------------|--------------|-----------------|---------------------------|
| 1 | Ninguno | Adobe | 50 | 71 | 0.0 | Colapso |
| 2 | Ninguno | Adobe | 20 | 66 | 0.0 | Colapso |
| 3 | Ninguno | Tapia | 50 | 90 | 2.0 | Colapso |
| 4 | Ninguno | Tapia | 20 | 90 | 25 | Colapso |
| 5 | Maderas | Adobe | 50 | 90 | 32 | Agrietamiento sin colapso |
| 6 | Maderas | Adobe | 20 | 90 | 32 | Agrietamiento sin colapso |
| 7 | Maderas | Tapia | 50 | 90 | 42 | Agrietamiento sin colapso |
| 8 | Maderas | Tapia | 20 | 90 | 58 | Agrietamiento sin colapso |
| 9 | Maderas | Adobe | 50 | 90 | 45 | Agrietamiento sin colapso |
| 10 | Malla | Adobe | 50 | 90 | 43 | Agrietamiento sin colapso |
| 11 | Malla | Adobe | 20 | 90 | 28 | Agrietamiento sin colapso |
| 12 | Madera | Tapia | 50 | 90 | 53 | Agrietamiento sin colapso |
| 13 | Madera | Tapia | 20 | 90 | 30 | Agrietamiento sin colapso |
| 14 | Malla | Tapia | 50 | 90 | 23 | Agrietamiento sin colapso |

Figura 39:
Fotografía ensayo a escala reducida. Casa de adobe sin refuerzo.



Figura 40:
Fotografía ensayo a escala reducida. Casa de adobe reforzada con maderas.



Figura 41:
Fotografía ensayo a escala reducida. Casa de adobe reforzada con malla.



Figura 42:
Fotografía ensayo a escala reducida. Casa de tapia sin refuerzo.



Figura 43:
Fotografía ensayo a escala reducida. Casa de tapia reforzada con malla.



Figura 44:
Fotografía ensayo a escala reducida. Casa de tapia reforzada con maderas.

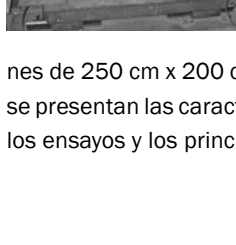


Figura 45:
Fotografía ensayo a escala reducida. Casa de tapia de dos pisos reforzada con maderas.

ocho muros ensayados, todos los que no incluían algún tipo de refuerzo presentaron una falla. Es así como ninguno de los muros reforzados presentó colapso aun después de colocarlos en posición horizontal –sin la aplicación de carga vertical– y bajo la aplicación de una sobrecarga adicional aplicada en dirección perpendicular al plano.

ENSAYO DE VIVIENDAS A ESCALA SOMETIDAS A CARGAS DINÁMICAS EN LA BASE

Se diseñaron y construyeron siete viviendas a escala (escala 1:5) para ser sometidas a ensayos de excitación en la base mediante mesa vibratoria. El ensayo de estos modelos a escala representa en este caso únicamente un análisis cualitativo y que se usó de manera comparativa entre diferentes especímenes con diferentes configuraciones. Los ensayos fueron utilizados principalmente para identificar formas de falla características y para analizar el posible efecto de medidas de rehabilitación. Todo lo anterior se llevó a cabo siguiendo las leyes de la similitud presentadas por Harris y Sabnis (1999). En las figuras 39 a 45 se presentan fotografías de las viviendas ensayadas.

Con el fin de tener en cuenta los efectos ortogonales del sismo en una edificación real, se colocaron los modelos sobre la mesa vibratoria en un ángulo de 45° con respecto a la dirección de aplicación de la señal sísmica. Todos los modelos fueron sometidos a la señal que se presenta en las figuras 46 y 47 que corresponde a una señal

nes de 250 cm x 200 cm x 40 cm. En la tabla 8 se presentan las características de cada uno de los ensayos y los principales resultados. De los

sintética generada a partir de un registro del sismo de Tauramena –estación El Rosal–. La señal se especifica en términos de historia de desplazamientos y se determinó mediante integración directa de la señal indicada. A cada uno de los modelos se le aplicó la señal establecida incrementando la aceleración máxima del registro desde un valor de 0.05 g hasta un valor máximo de 2.0 g

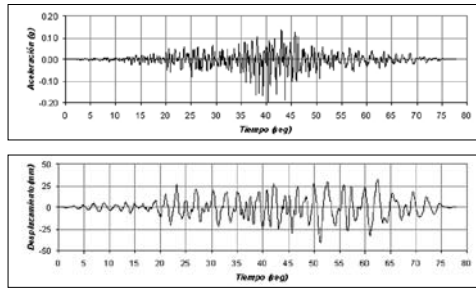


Figura 46:
Registro Sismo Frontal. Registro de aceleración en función del tiempo.

Figura 47:
Registro Sismo Frontal. Registro de desplazamiento en función del tiempo.



Figuras 48 a 51:
Mecanismo de colapso de vivienda de adobe sin ningún refuerzo.

Figuras 52 a 55:
Mecanismo de colapso de vivienda con refuerzo en maderas confinantes.

Figuras 56 a 59:
Mecanismo de colapso de vivienda reforzada con malla.

o hasta que se presentara la falla del espécimen. La instrumentación consistió en la colocación de acelerómetros a nivel de la mesa vibratoria y a nivel de la cubierta, y deformímetros en las dos direcciones principales de la cubierta.

Se ensayaron viviendas que incluían casas a escala de adobe y de tapia pisada con y sin refuerzo. En las figuras 48 a 59 se presentan imágenes del colapso de una casa a escala sin ningún tipo de refuerzo, de una casa a escala reforzada con maderas de confinamiento y de una casa a escala reforzada con malla, respectivamente. De acuerdo con los resultados experimentales, la presencia del refuerzo modifica el comportamiento global y local de los muros de tierra. La vivienda a escala sin ningún tipo de refuerzo presenta grietas originadas en esfuerzos cortantes así como en esfuerzos de tensión originados en la flexión de los muros. Así mismo, es claro que aunque la alternativa de refuerzo con malla retarda el colapso de la edificación finalmente esta colapsa por completo. A diferencia de lo anterior, la alternativa de refuerzo con maderas de confinamiento no solo retarda el colapso de la edificación sino que permite que los muros queden en pie, aunque con serios daños.

De la misma manera, Rodríguez *et al.* (2003) presentan más detalles del comportamiento sísmico de algunas edificaciones de modelos mostrados en las figuras 56 a 61.

Conclusiones

El sistema estructural en adobe y tapia pisada presenta una alta vulnerabilidad sísmica debido principalmente a la poca resistencia a la tensión del material –que origina prácticamente nula resistencia a la flexión y esfuerzos resistentes de tensión diagonal en el orden de los 0.03 MPa– y a la ausencia de ciertas características y componentes estructurales tales como el confinamiento de elementos estructurales, la continuidad de los elementos principales, la ausencia de diafragmas rígidos y otros.

Las rehabilitaciones propuestas e implementadas disminuyen la vulnerabilidad sísmica de este tipo de edificaciones y retardan de manera significativa el colapso de los sistemas estructurales. A la luz de los resultados experimentales, la resistencia se incrementó hasta en un 270% y la capacidad de deformación en el rango elástico se multiplica por 4.4. Las alternativas de rehabi-

litación estudiadas proveen en alguna medida continuidad estructural y generan cierto nivel de confinamiento con lo que se reduce la posibilidad de una falla anticipada –asociada con incrementos de desplazamiento en el rango inelástico–. Aunque estas alternativas generan un impacto en la apariencia arquitectónica, su bajo costo y la facilidad en la consecución de los materiales la hacen ideal para ser aplicada en zonas remotas y en las ciudades del país.

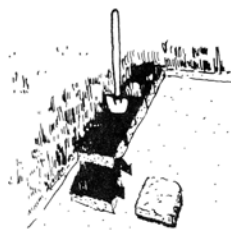
El reforzamiento basado en elementos confinantes de madera tuvo mejor desempeño sísmico que el reforzamiento con malla de vena, ya que incrementó la capacidad de deformación en el rango no lineal así como la resistencia máxima del sistema estructural. No obstante, se recomienda corroborar los resultados finales mediante ensayos a escala real en mesa vibratoria de módulos de adobe y tapia pisada.

Adicionalmente las estructuras de cubierta deben estudiarse con más detalle con el fin de prevenir el colapso de la cubierta sobre los muros de tierra, ya que el estudio específico de la cubierta estuvo por fuera del alcance de la investigación.

Referencias

- American Society for Testing and Materials, ASTM. ASTM C642-97 (1997). *Standard Test Method for Density, Absorption and Voids in Hardened Concrete*.
- GINELL, W. y TOLLES, L. (2000). “Seismic Stabilization of Historic Adobe Structures”. *Journal of the American Institute for Conservation*, 39 (1), artículo 12.
- HARRIS, H. y SABNIS, G. (1999). *Structural modeling and experimental techniques*. 2ª ed. Florida, USA: CRC Press.
- MINKE, G. (2001). *Manual de construcción para viviendas antisísmicas*. 2ª ed. Alemania: Universidad de Kassel.
- Norma Técnica Colombiana (NTC 220) (2004). *Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico usando cubos de 50 mm o 50.08 mm de lado*.
- Norma Técnica Colombiana (NTC 3495) (2003). *Método de ensayo para determinar la resistencia a la compresión de muretes de mampostería*.
- Norma Técnica Colombiana (NTC 4017) (2005). *Métodos para el muestreo y ensayos de unidades de mampostería y otros productos de arcilla*.

- Norma Técnica Colombiana (NTC 4109) (1997). *Ingeniería Civil y Arquitectura. Bordillos y cunetas*.
- Norma Técnica de Edificación (NTE E. 080 ADOBE) (1999).
- Rodríguez, A., Fonseca, L., Yamín, L., Phillips, C. y Reyes, J. (2003). "Comportamiento sísmico y alternativas de rehabilitación de edificaciones en adobe y tapia pisada con base en modelos a escala reducida ensayados en mesa vibratoria". *Revista de Ingeniería (Universidad de los Andes, Facultad de Ingeniería)*: 18, pp. 175-90.
- Universidad de los Andes, Centro de Estudios de Desastres y Riesgos, CEDERI (2002). *Estudio de vulnerabilidad sísmica, rehabilitación y refuerzo de casas de adobe y tapia pisada a nivel nacional*. Informe preparado para Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, AIS.
- Universidad de los Andes, Centro de Investigación en Materiales y Obras Civiles, CIMOC (2002). *Estudio de vulnerabilidad sísmica de las edificaciones construidas en técnicas tradicionales de adobe y tapia pisada*. Informe preparado para la Corporación Barrio La Candelaria.
- Vargas, J. y Blondet, M. (2005). "35 años de investigación en la Pontificia Universidad Católica del Perú". *Memorias digitales del evento SismoAdobe (mayo de 2005)*. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.



Estudios de vulnerabilidad sísmica, rehabilitación y refuerzo de casas en adobe y tapia pisada

(págs. 286-303)



Luis Eduardo Yamín Lacouture

Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia
lyamin@uniandes.edu.co

Ingeniero Civil de la Universidad de los Andes y M.Sc. de la Universidad de los Andes y de la Universidad de Stanford. Profesor Asociado del Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.

Camilo Phillips Bernal

Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia
c-philli@uniandes.edu.co

Ingeniero Civil y M.Sc. de la Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. Ingeniero investigador de proyectos especiales del Centro de Investigación en Materiales y Obras Civiles de la Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. Candidato al título de doctor de la Universidad de Illinois, Estados Unidos.

Juan Carlos Reyes Ortiz

Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia
jureyes@uniandes.edu.co

Ingeniero Civil de la Universidad Industrial de Santander, Colombia, y M.Sc. de la Universidad de los Andes, Colombia. Profesor Instructor del Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. Candidato al título de doctor de la Universidad de California, Berkeley, Estados Unidos.

Daniel Ruiz Valencia

Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia
daniel.ruiz@javeriana.edu.co

Ingeniero Civil y M.Sc. de la Universidad de los Andes, Colombia. Jefe del Laboratorio de Pruebas y Ensayos, Profesor Asistente e Investigador del grupo Estructuras del Departamento de Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.

Recepción

29 de enero de 2007

Evaluación

24 de octubre de 2007

Aceptación

7 de noviembre de 2007

Resumen

Aproximadamente un quinto de la población mundial y alrededor de 35 millones de personas en Suramérica habitan en edificaciones de adobe y tapia pisada. Este tipo de edificaciones han demostrado un pobre comportamiento sísmico en los terremotos ocurridos en los últimos cincuenta años alrededor del mundo generando miles de muertes. Adicionalmente, en Colombia, una gran cantidad de construcciones históricas y culturales en tierra están localizadas en zonas de alta sismicidad. Con estos antecedentes, se desarrolló una investigación orientada a conocer el comportamiento de esta tipología constructiva en su estado actual y proponer alternativas de rehabilitación sísmica viables desde el punto de vista técnico. Las dos alternativas propuestas, refuerzo con malla y pañete y refuerzo con maderas de confinamiento, prueban ser factibles, presentando la segunda un mejor comportamiento sísmico relativo.

Palabras clave del autor

Edificaciones de adobe y tapia pisada, rehabilitación sísmica, investigación experimental.

Descriptorios*

Construcciones de adobe – Investigaciones
Construcciones antisísmicas – Investigaciones
Materiales de construcción – Pruebas

Seismic vulnerability studies, renovation and reinforcement of houses built with adobe brick and rammed earth

Abstract

Approximately one fifth of the world's population and some 35 million people in South America inhabit adobe and rammed earth constructions. These buildings have demonstrated poor seismic behavior in earthquakes occurred over the last 50 years all around the world generating thousands of casualties. In addition, in Colombia a large number of historic and cultural earth built constructions are located on high seismicity zones. With these precedents, an investigation orientated to establish the seismic behavior of these constructive types, and propose seismic rehabilitation alternatives, viable from the technical point of view. The two proposed alternatives, the one with wire mesh and mortar and the other with wood confining elements, prove their feasibility, showing the second one, better relative seismic behavior.

Author Key Words

Adobe and rammed earth buildings, seismic rehabilitation, experimental research.

Key Words Plus*

Building, adobe – Research
Earthquakes and building – Research
Building materials – Testing

* Los descriptorios y key words plus están normalizados por la Biblioteca General de la Pontificia Universidad Javeriana.