

Viviendas antisísmicas de tierra, resultados de investigación y ejecución en zonas sísmicas de los Andes

Gernot Minke

Universidad de Kassel, D-34109 Kassel, Alemania
Tel.: ++49-561-804-5312/5315, e-mail: feb@asl.uni-kassel.de

Palabras clave: construcciones antisísmicas-tierra-viviendas

Resumen

En el Forschungslabor für Experimentelles Bauen (Instituto de investigación de construcciones experimentales) de la Universidad de Kassel, Alemania fueron estudiados los efectos de sismos de alta intensidad en viviendas de tierra de un piso en cuatro proyectos de investigación en Latino América.

El análisis de los daños presentados en viviendas de un piso afectadas por sismos de alta intensidad en diferentes zonas rurales de los Andes, permite establecer que son siempre algunos de los mismos típicos errores de diseño estructural o de ejecución de obra que conducen al colapso o a daños considerables.

Mientras estas investigaciones se construyeron seis prototipos de viviendas con diferentes sistemas estructurales en México, Guatemala, Ecuador, Bolivia, Chile y Argentina: con muros de tierra apisonada reforzados con bambú, muros dúctiles de bahareque (Quincha), muros dúctiles de elementos textiles rellenos con tierra, cúpula y bóveda de adobe pretensadas. En algunas viviendas se emplearon elementos angulados para crear un efecto de auto estabilización, en otras se emplearon uniones flexibles que dan la ductilidad necesaria para la sismo resistencia, y en otras se aisló la estructura de la cubierta de los muros.

La ponencia describe aspectos de diseño para optimizar plantas así como vanos para puertas y ventanas, describe uniones críticas y da sugerencias para la construcción de encadenados y dinteles.

Se muestra además el ensayo de una bóveda de adobe pretensada, de 3,25 m de luz sobre una mesa vibratoria en la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP) Lima con una aceleración de hasta 0,8 g, un desplazamiento horizontal de hasta 8,30 cm. y con una duración de 30 segundos en cada fase simulando un sismo de alta intensidad.

El resultado de estos proyectos de investigación es la percepción de que no es la tierra como material de construcción, que conduce a daños durante un sismo sino errores en el diseño estructural y/o una mala ejecución de obra.

Introducción

El barro como material de construcción ha perdido credibilidad debido a que gran parte de las viviendas nuevas construidas en tierra no resistieron terremotos recientes y debido al prejuicio de ser considerado como “material de los pobres”.

En Mendoza, Argentina por ejemplo está prohibido construir viviendas con adobes, a pesar que más del 80 % de la población rural alrededor de la ciudad sigue construyendo sus viviendas con dicho material. Por otra parte en Mendoza muchos casos de viviendas de ladrillos cocidos o bloques de concreto se derrumbaron de igual manera que las viviendas construidas con adobes.

En la ciudad se pueden ver viviendas antiguas construidas con muros de tapial que resistieron todos los sismos de los siglos pasados.

El resumen de las investigaciones llevadas a cabo en diferentes regiones de los Andes demuestra que: No es la tierra como material de construcción la causa de los daños en un sismo, sino un diseño estructural no adaptado al sismo ó una obra mal ejecutada.

Requisitos de diseño, medidas estructurales

En los sismos los daños más grandes ocurren cuando los muros colapsan hacia el exterior dejando caer el techo sobre los habitantes de las viviendas. Por ello la tarea principal del diseño antisísmico es asegurar que los muros no caigan hacia el exterior solución que se logra mediante un encadenado. Para evitar que los muros se pandeen y quiebren se puede utilizar un espesor mayor, muros intermedios, contrafuertes y / o refuerzos internos.

Basados en daños en viviendas rurales de adobe de forma rectangular analizadas después sismos de gran intensidad diez errores principales fueron analizados e ilustrados en la fig. 1.

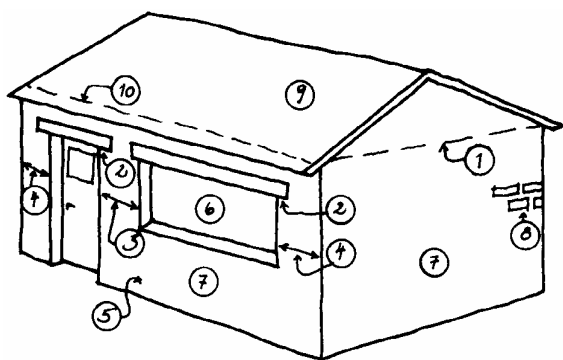


Fig. 1 Errores típicos

1. Ausencia de un refuerzo horizontal (encadenado, collarín o viga cadena)
2. Los dinteles no penetran suficientemente en la mampostería
3. El ancho de muro entre los vanos de la ventana y la puerta es demasiado angosto
4. El ancho entre los vanos de la ventana y la puerta en relación a las esquinas es demasiado angosto
5. Ausencia de un sobrecimiento (zócalo)
6. El vano de la ventana es demasiado ancho
7. El muro es muy largo y delgado sin tener elementos de estabilización
8. La calidad de la mezcla del mortero es pobre (con una baja capacidad aglutinante), las uniones verticales no están completamente rellenas, las uniones horizontales son demasiado gruesas (más de 1,5 cm)
9. La cubierta es demasiado pesada
10. La cubierta tiene un arriostramiento débil con el muro

Tomando como base esta investigación se desarrollaron 17 reglas para un diseño antisísmico.

1. Las viviendas no se deben ubicar en terrenos inclinados.
2. Es ventajoso si la frecuencia de resonancia de la vivienda no es igual a la frecuencia del movimiento telúrico durante el sismo. Esto implica que las viviendas pesadas construidas con técnicas sólidas no deben ser ubicadas sobre una base de roca dura sino sobre suelos arenosos o limosos. Viviendas ligeras sin embargo se comportan mejor sobre un suelo blando.
3. Los diferentes espacios de la vivienda no deben tener diferentes niveles ni tener alturas distintas. Si así fuera, estas partes deben estar estructuralmente separadas. Debido a

que las secciones de diferentes alturas tienen diferentes frecuencias de resonancia, se les debe permitir tener una oscilación independiente.

4. La planta de la vivienda debe ser tan compacta como sea posible. Las plantas circulares dan una mejor rigidez que las cuadradas y éstas mejor rigidez que las rectangulares.
5. Los cimientos deben actuar como una cadena de anclaje rígida (viga perimetral) y por ello, deben estar adecuadamente reforzados.
6. Los cimientos, muros y techos deben estar bien fijados entre sí y las juntas en condiciones de resistir las fuerzas de corte que se producen.
7. Como encuentro superior de los muros debe construirse un encadenado (viga anillo) que enlace toda la estructura.
8. Los muros deben ser estables contra las fuerzas de tracción y corte que se producen. La mampostería debe realizarse con juntas bien rellenas y morteros con buena capacidad aglutinante.
9. Los muros portantes de mampostería deben tener un espesor mínimo de 40 cm y su altura no debe ser mayor a 6 veces su espesor.
10. Los muros de mampostería deben reforzarse cada 3 a 4 m con columnas que estén fijadas estructuralmente a los cimientos (capaces de tomar momentos) ó con refuerzos laterales (fig. 2).
11. Las esquinas de los muros, juntas entre muros y las aberturas de ventanas deben rigidizarse con columnas verticales de madera ó hormigón armado que estén fijados a los cimientos o con contrafuertes de tal manera que las fuerzas horizontales no muevan los elementos.
12. En muros hechos de tapial se recomienda la realización de los mismos en elementos con forma de T, U, Z, L evitando por su forma el peligro que estos colapsen, ver fig. 3.

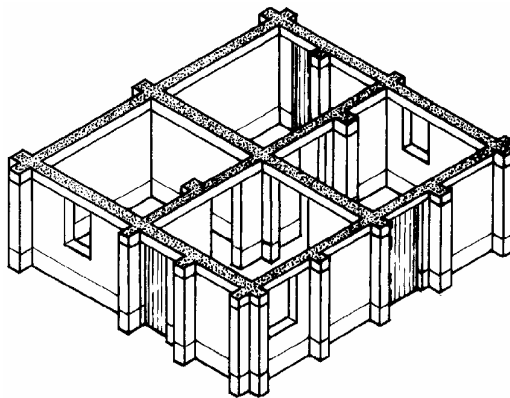


Fig. 2

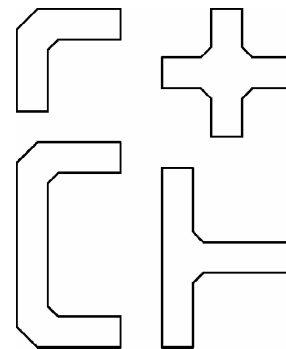


Fig. 3

13. Se recomienda hacer las aberturas sin dintel utilizando para este propósito el encadenado superior, ver fig. 4.
14. Las cubiertas deben ser tan ligeras como sea posible. Debido a su masa y altura tienen una diferente frecuencia de movimiento en relación a los muros durante el sismo. Se recomienda fijar la estructura de la cubierta a columnas dentro o fuera de los muros, de tal manera que ante fuerzas sísmicas su movimiento sea independiente al de los muros.
15. Los empujes horizontales de bóvedas y cúpulas deben estar suficientemente asegurados con encadenados, contrafuertes o tirantes.
16. Vanos para ventanas y puertas desestabilizan los muros y requieren un diseño cuidadoso, ver fig. 5.
17. Las cubiertas deben ser livianas.

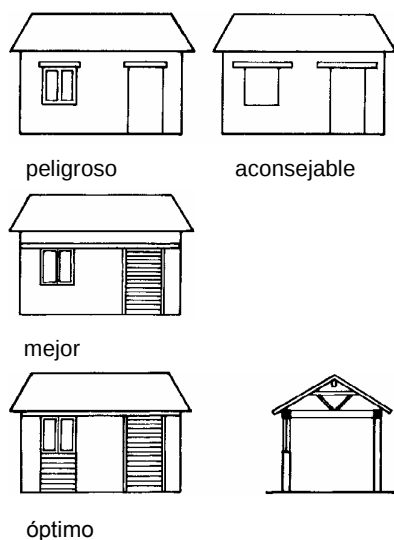


Fig. 4

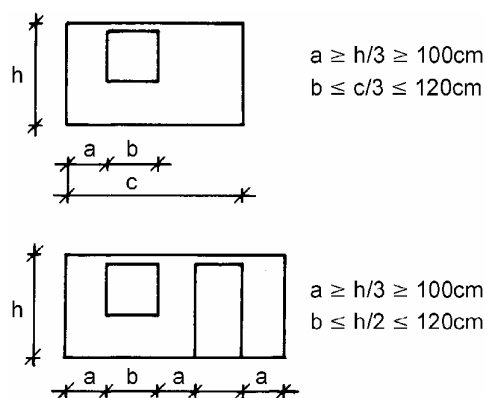


Fig. 5

Muros de tapial estabilizados por la forma

Debido a que los muros delgados son débiles a los impactos horizontales perpendiculares y ya que los refuerzos de hormigón armado son costosos, se propone una solución simple de estabilización mediante la forma angular, es decir elementos de muro en forma de L, T, U, X, Y o Z que solo por su forma proveen resistencia al volcamiento y al colapso, como se puede ver en la fig. 3.

Existe una regla para el diseño de los extremos libres de estos elementos. Si el muro tiene un espesor de 30 cm, el extremo debe ser de no más de 3/4 de la altura y no menos de 1/3 de la altura, ver fig. 6. Esta longitud mínima es necesaria para transmitir las fuerzas diagonalmente a los cimientos.

Con longitudes mayores, los extremos libres deben ser estabilizados, mediante otros angulares o columnas.

Cuando el muro está anclado abajo con el cimiento y fijado arriba con el encadenado, es posible utilizar elementos de mayor altura o menor espesor. Sin embargo, la altura del muro no debe ser mayor a 8 veces el espesor del mismo.

Las fuerzas perpendiculares al muro se transfieren a la sección del muro paralela a las mismas. Debido a que las fuerzas se concentran en la esquina del ángulo, este tiende a abrirse, por ello es recomendable diseñarlas con un espesor mayor a la del resto del elemento evitando el ángulo recto, como se puede ver en la fig. 7. Esta es una solución sencilla especialmente para la técnica del tapial.

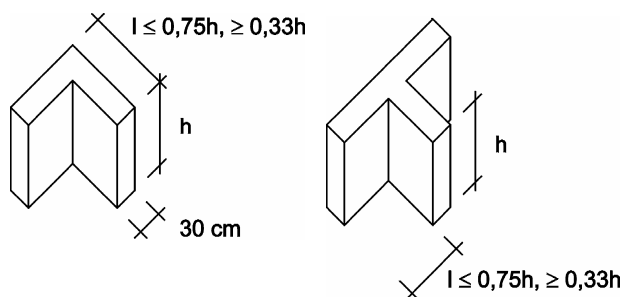


Fig. 6

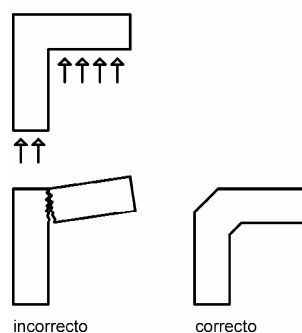


Fig. 7

Muros de tapial con refuerzos internos

Una solución para estabilizar muros de tierra apisonado contra los impactos horizontales del sismo es utilizar elementos verticales de madera o bambú dentro del muro, anclados con el sobrecimiento y fijados al encadenado.

Los elementos de refuerzo horizontal son poco efectivos e incluso pueden ser peligrosos, debido a que no se puede apisonar bien la tierra debajo de los mismos y ya que el elemento de refuerzo no tiene un anclaje con la tierra se debilita la sección en estos puntos y pueden aparecer quiebres horizontales durante el sismo.

Una técnica de paneles de tapial reforzados con bambú se desarrolló en 1978 como parte de un proyecto de investigación en el FEB, y se implementó exitosamente en Guatemala con la Universidad de Francisco Marroquín (UFM) y el Centro de Tecnología Apropiada (CEMAT), ver figs. 8 a 11.

En este proyecto se construyeron elementos de 80 cm de largo y de un piso de altura, de tapial reforzado con bambú utilizando un encofrado de metal en forma de T de 80 cm de largo, 40 cm de altura y 14 a 30 cm de espesor, ver fig. 8. La estabilidad de los elementos se obtuvo con 4 varillas de bambú de 2 a 3 cm de espesor y la sección T. Estos elementos se fijaron en la base a un encadenado de bambú dentro de un zócalo de mampostería de piedra (hormigón ciclópeo) y en la parte superior a un encadenado de bambú.

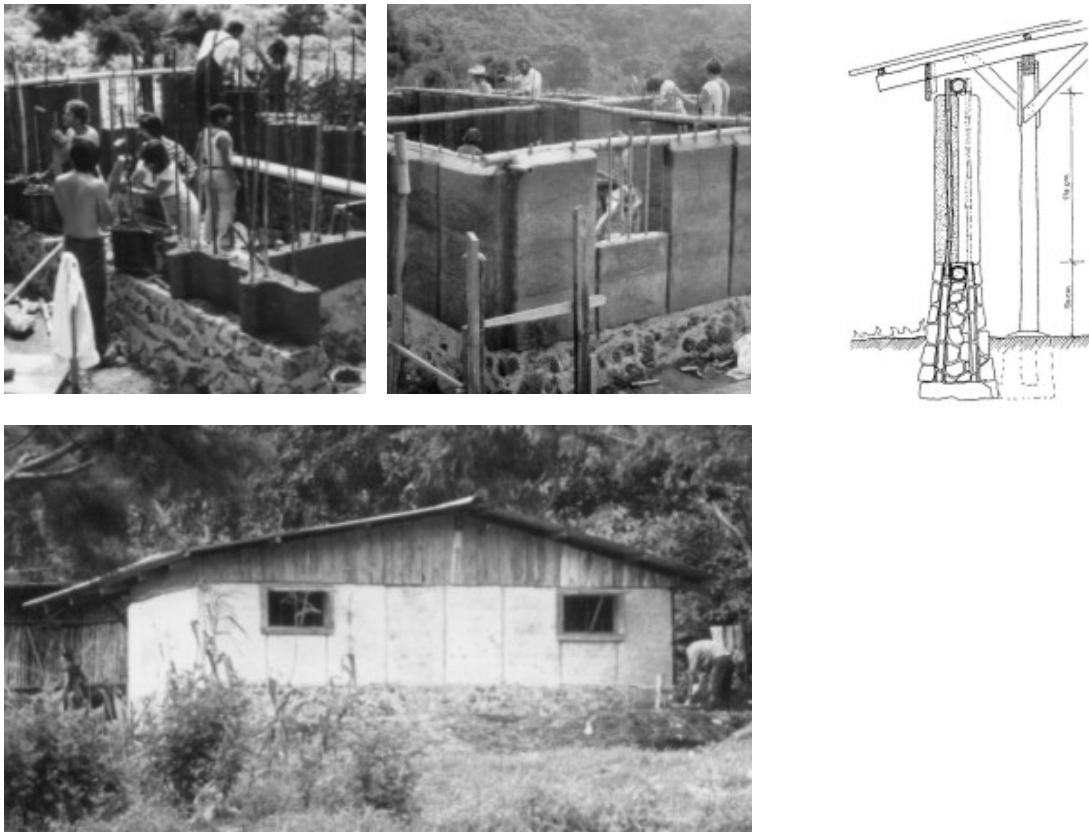


Fig. 8 a 11

Las uniones de los elementos de tapial actúan como juntas de fallo prediseñadas, lo que significa que estas pueden abrirse y toda la estructura se deforma un poco disipando la energía cinética sísmica.

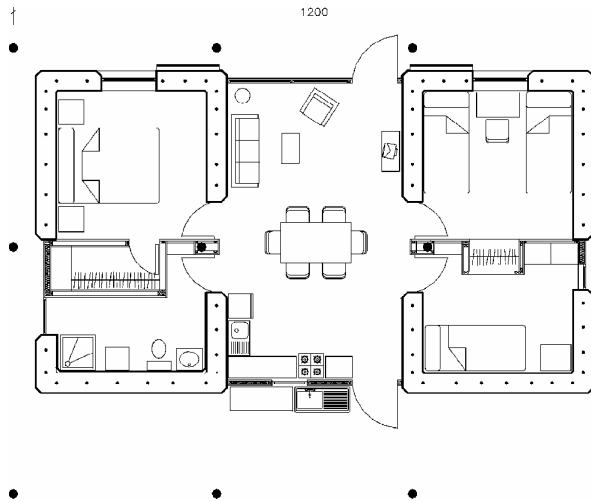


Fig. 12

fueron reforzados con cañas verticales de coligue en el interior. Entre estos elementos se situaron las secciones débiles como puertas y ventanas de piso a techo, que crean uniones que pueden deflectarse en el sismo. Por esto la estructura tiene suficiente ductilidad a pesar de estar construida con elementos rígidos.

Las columnas sobre las que descansa el techo se ubicaron a 50 cm del muro hacia el interior. Entonces ambos sistemas pueden moverse independiente de acuerdo a su propia frecuencia en el sismo. El FEB y científicos de la universidad de Santiago de Chile construyeron en un proyecto de investigación una vivienda antisísmica de tapial reforzado, ver fig. 12.

En este proyecto las columnas del techo también son excéntricas de los muros. Los muros de tapial tienen elementos en forma de L ó U, con 40 cm de espesor. Ellos proveen resistencia contra fuerzas horizontales del sismo por su forma. Y además

Cúpulas

Una cúpula antisísmica debe tener una sección especial que evite todas las fuerzas de anillo de compresión y tensión, asimismo la línea de presiones de la cúpula debe mantenerse en el centro del espesor de la cúpula.

Para construir una cúpula sin encofrado con esta sección estructuralmente optima, se desarrolló en el FEB una guía rotatoria, que tiene un ángulo recto con el que se colocan los bloques. Este ángulo está ajustado a un brazo rotatorio fijado a un poste vertical. Las figs. 13 y 14 muestran la aplicación de esta técnica para una cúpula antisísmica de 8.80 m de luz libre y 5.50 m de altura libre que se construyó en La Paz, Bolivia en 2000. Los adobes de esta cúpula se elaboraron manualmente con un molde especial con esquinas redondeadas para mejorar la acústica. Encima del sobrecimiento (zócalo) y debajo se hizo un encadenado de hormigón armado.

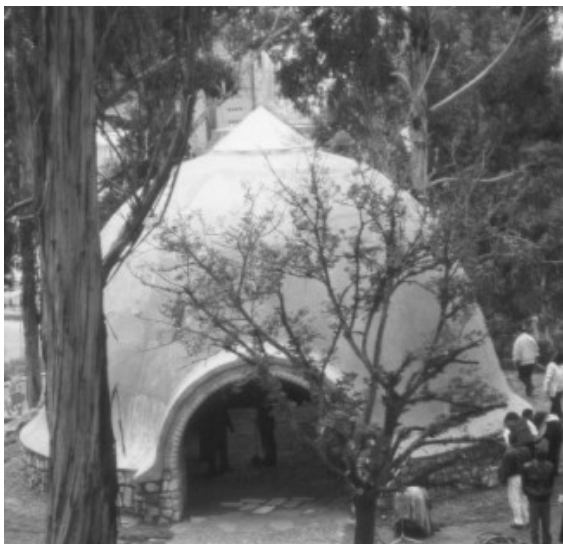


Fig. 13 y 14

Bóvedas

Se recomienda que al igual que las cúpulas, las bóvedas arranquen directamente sobre el sobrecimiento para obtener una mejor estabilidad en caso de sismo.

La sección transversal de una bóveda que por lo general esta cargada solo por su propio peso, debe tener la forma de una catenaria invertida, de tal manera que solo contenga cargas de compresión.

Un sistema de bóvedas pretensadas construidas de adobe con elementos de metal fue desarrollado por el autor en 2004 para proyectos en Irán y Argentina.

Una bóveda de este tipo fue testeada a escala 1:1 sobre la mesa vibratoria de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP) Lima (ver fig. 15). Esta bóveda resistió la simulación de un sismo de alta intensidad con una aceleración de 0,8 g, un desplazamiento horizontal de hasta 8,3 cm y una duración de 30 segundos, sin colapsar.

Este sistema fue aplicado en una vivienda realizada con cuatro bóvedas y una cúpula central en la estancia Guanizuil, San Juan, Argentina, ver fig. 16.

Actualmente se esta diseñando otra aplicación para un restaurante con bóvedas cruzadas en Barreal, Argentina.



Fig. 15



Fig. 16

Muros Dúctiles

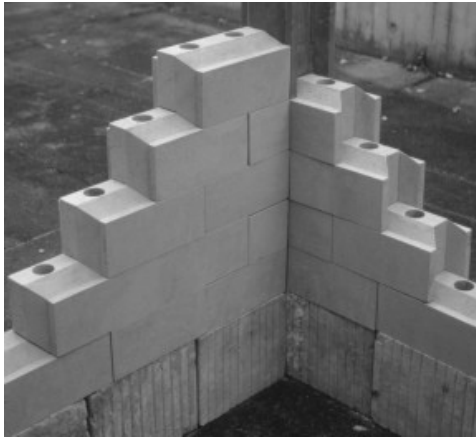
Los Incas utilizaron para muros piedras que encajan unas con otras sin mortero. Estos resistieron sismos de gran intensidad durante siglos, ver fig. 17, debido a su ductilidad.



Los sistemas de bloques machihembrados tienen una ductilidad similar. Pero los bloques machihembrados comunes no tienen suficiente resistencia contra fuerzas horizontales debido a que el efecto del machihembrado solo se logra mediante una altura de algunos milímetros.

Por ello el autor desarrolló un sistema de bloques de barro prensado con uniones machihembradas a los cuatro lados y cada de una altura de 40 mm, ver fig. 18. Estos muros se pueden estabilizar adicionalmente con refuerzos verticales como cañas de bambú ó fierros que atraviesen los hoyos.

Fig. 17



En el Instituto de Investigación de Construcciones Experimentales (FEB) de la Universidad de Kassel, Alemania, se investigaron desde 1977 diferentes posibilidades para utilizar elementos textiles rellenos con tierra arcillosa, pómez o arena en la construcción de muros dúctiles.

Como parte de un proyecto de investigación de cooperación del FEB, la Universidad Francisco Marroquin (UFM) y el Centro De Estudios Mesoamericano sobre Tecnología Apropriada (CEMAT) ambos de Guatemala, en 1978 se construyó una vivienda prototipo de 55 m² en Guatemala utilizando mangueras rellenas de tierra con piedra pómez para los muros,

ver fig. 19.

Las mangueras de 10 cm de diámetro se hicieron de tela de algodón y se embebieron en una lechada de cal (para evitar la putrefacción de la tela) y luego se colocaron entre columnas verticales ubicadas a una distancia de 2.25 m. Una estabilidad adicional se logró con cañas de bambú fijadas verticalmente a una distancia de 45 cm entre cada panel.

La estructura de la cubierta descansa sobre columnas exentas ubicadas a 50 cm de los muros hacia el interior. Los costos materiales de esta estructura resultaron ser la mitad de los costos de una vivienda similar construida con bloques de hormigón.



Fig. 19

Bibliografía

*MINKE, Gernot: *Manual de construcción para viviendas antisísmicas de tierra*, Alemania, 2005

*<http://www.asl.uni-kassel.de/~feb> - Publikationen