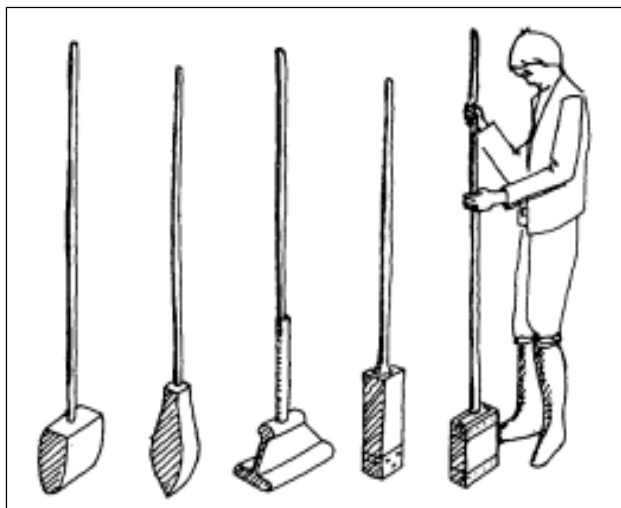


6. Muros antisismicos de tapial (tierra apisonada)

6.1 Generalidades



6-1 Pisones utilizados para compactación manual (Minke 2001)



6-2 Pisón de dos cabezas empleado en Ecuador (Minke 2001)

La técnica del tapial consiste en rellenar un encofrado con capas de tierra de 10 a 15 cm compactando cada una de ellas con un pisón.

El encofrado está compuesto por dos tabloncillos paralelos separados, unidos por un travesaño, ver fig. 6-3. En francés esta técnica se denomina *pisé de terre* o *terre pisée*, en inglés *rammed earth*.

En comparación con técnicas en las que el barro se utiliza en un estado más húmedo, la técnica del tapial brinda una retracción mucho más baja y una mayor resistencia. La ventaja en relación a las técnicas de construcción con adobe, es que las construcciones de tapial son monolíticas y por lo tanto poseen una mayor estabilidad.

En los encofrados tradicionales, los tabloncillos paralelos separados se unen por medio de travesaños (de un espesor considerable) que atraviesan el muro, ver fig. 6-3 estos al desmoldar el elemento dejan espacios vacíos que posteriormente deben ser rellenos. Para evitar un encofrado que requiera tener la altura de un piso y para evitar los travesaños se desarrolló en el Instituto de Investigación de Construcciones Experimentales (FEB) de la Universidad de Kassel, un encofrado trepador, utilizando solo un travesaño de espesor mínimo en la base (4 x 6 mm), ver fig. 6-4.

Antiguamente el barro se compactaba con herramientas manuales utilizando pisones de base cónica, en forma de cuña o de base plana, ver fig. 6-1.

Al utilizar pisones de base cónica y aquellos que tienen forma de cuña, las capas del barro se mezclan mejor y se obtiene una mayor cohesión si se provee a la mezcla una humedad suficiente. No obstante el apisonado con este tipo de pisones requiere de un mayor tiempo que aquel ejecutado con pisones de base plana.

Los muros apisonados con pisones de base plana, muestran uniones laterales débiles y por ello deben recibir solamente cargas verticales.

Es preferible utilizar un pisón de dos cabezas con una cabeza redondeada en un lado y en el otro una cuadrada. Esto permite que se pueda utilizar el pisón del lado cuadrado para compactar las esquinas con efectividad y del lado redondeado para el resto. Tales pisones son utilizados aún hoy en día en el Ecuador, ver fig. 6-2.

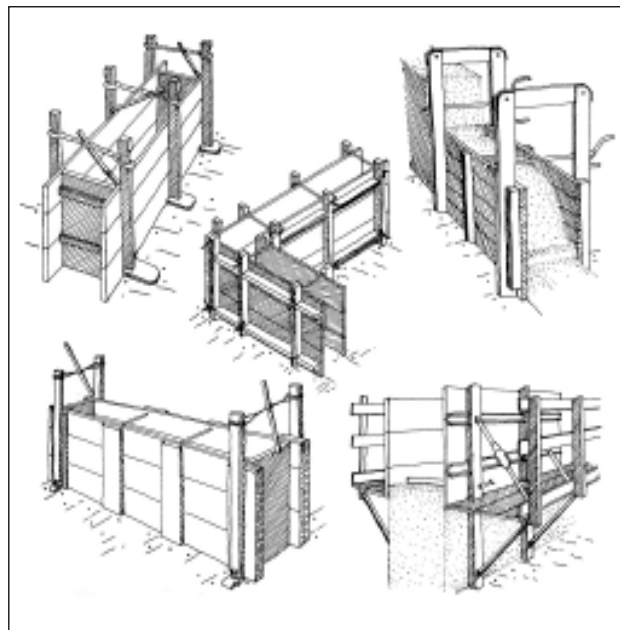
En el segundo cuarto del siglo XX se utilizaron en Alemania, Francia y Australia compactadores

eléctricos y neumáticos.

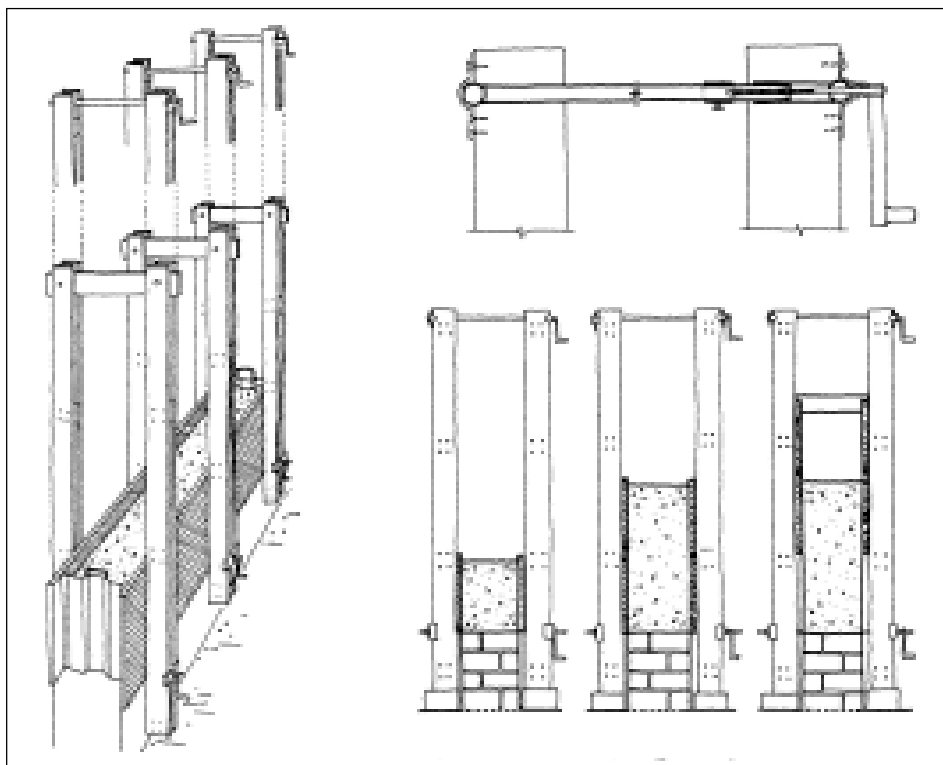
En casi todas las técnicas tradicionales de barro apisonado, el encofrado se desmonta y se vuelve a montar horizontalmente paso a paso.

Esto significa que la tierra es apisonada en capas de 50 a 80 cm de altura, la capa superior de un muro de tapial siempre es más húmeda que la inferior parcialmente ya seca, por ello hay una retracción más alta en la capa superior. Lo que conlleva a la aparición de fisuras en la junta de las mismas.

Esto puede ser peligroso ya que el agua capilar puede filtrarse hacia estas juntas y quedarse allí, provocando humedecimiento y desintegración. Como se puede ver en la misma figura, también pueden aparecer fisuras verticales en estos muros. Para evitar las fisuras horizontales de retracción se deben ejecutar los muros verticalmente y para ello se puede emplear el encofrado trepador.



6-3 Encofrados para tapial (Minke 2001)



6-4 Encofrado trepador para paneles de tapial (Minke 2001)

6.2 Estabilización por la masa

Cuando los impactos horizontales del sismo alcanzan el muro perpendicularmente este tiende a colapsar. Solamente los muros de gran espesor, tienen la capacidad de resistir estas cargas laterales sin requerir elementos de estabilización adicionales.

Se sabe de la existencia de residencias de dos plantas en Mendoza, Argentina, de más de 150 años de antigüedad que resistieron todos los

sismos, mientras que varias construcciones modernas vecinas con muros de menor espesor colapsaron a pesar de que muchas fueron construidas con ladrillos y reforzadas con elementos de hormigón.

Hoy en día viviendas de este tipo ya no se construyen debido al tiempo de ejecución requerido para construir muros de 60 a 100 cm de espesor. Por ello, es necesario buscar nuevas soluciones.

6.3 Estabilización por la forma

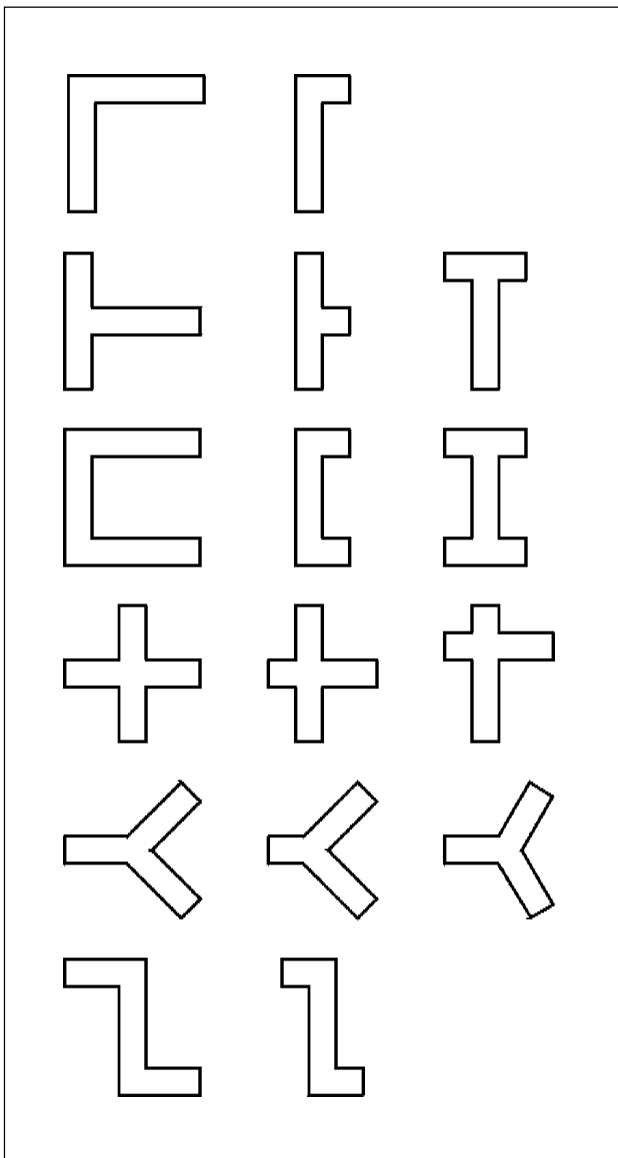
Debido a que los muros delgados son débiles a los impactos horizontales perpendiculares y ya que los refuerzos de hormigón armado son costosos, se propone una solución simple de estabilización mediante la forma angular, es decir elementos de muro en forma de L, T, U, X, Y o Z que solo por su forma proveen resistencia al volcamiento y al colapso, como se puede ver en la fig. 6-5.

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. 6-6.

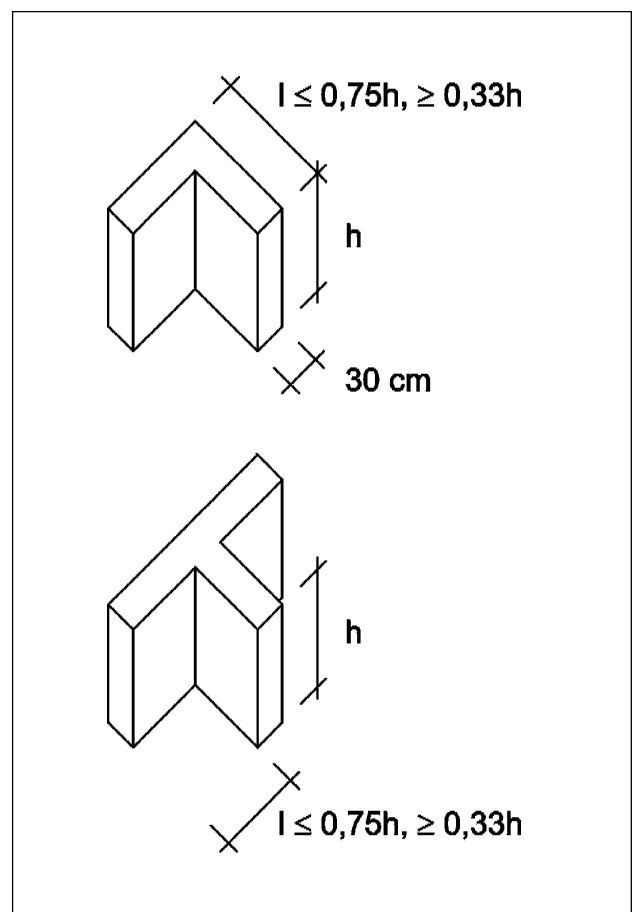
Esta longitud mínima es necesaria para transmitir las fuerzas diagonalmente a los cimientos.

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

Cuando el muro esta anclado abajo con el cemento 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 (fig 6-7).



6-5 Elementos de muro estabilizados por su forma



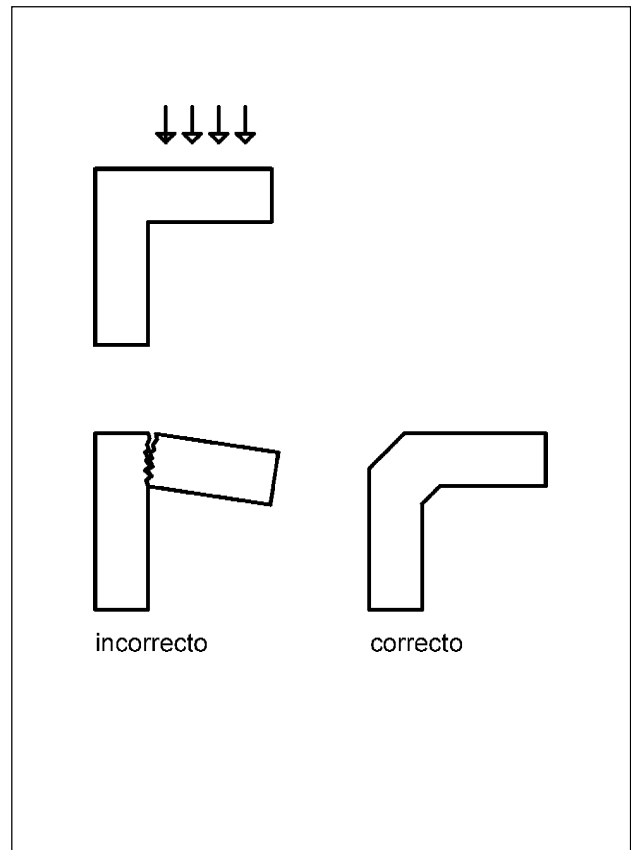
6-6 Proporciones aconsejadas para el diseño de elementos

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. 6-8 y 6-9. Esta es una solución sencilla especialmente para la técnica del tapial.

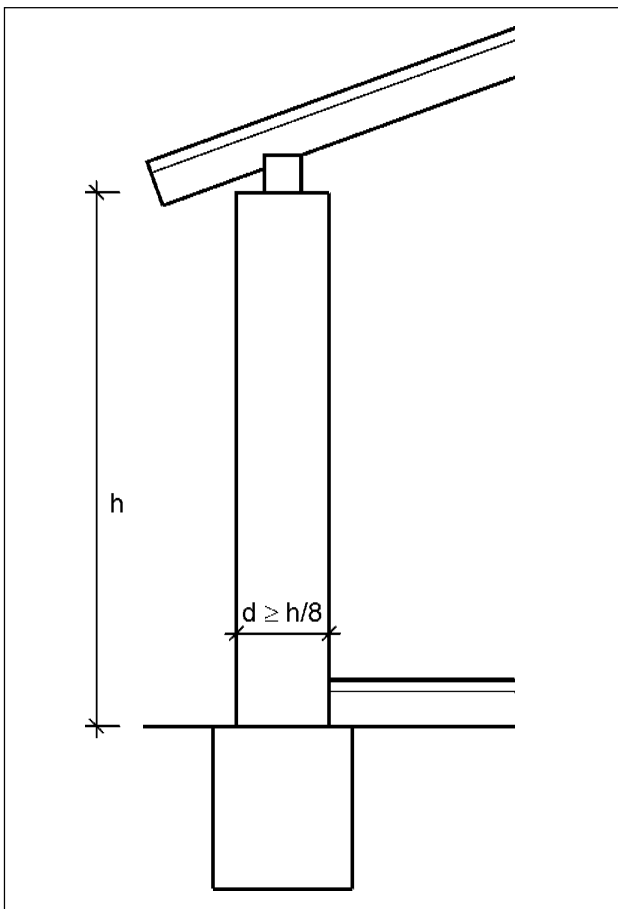
La fig. 6-12 muestra distintas propuestas para plantas utilizando estos elementos angulares.

Para obtener una estabilización lateral, se recomienda que la junta de dos elementos de muro sea machihembrada como se puede ver en la fig. 6-10.

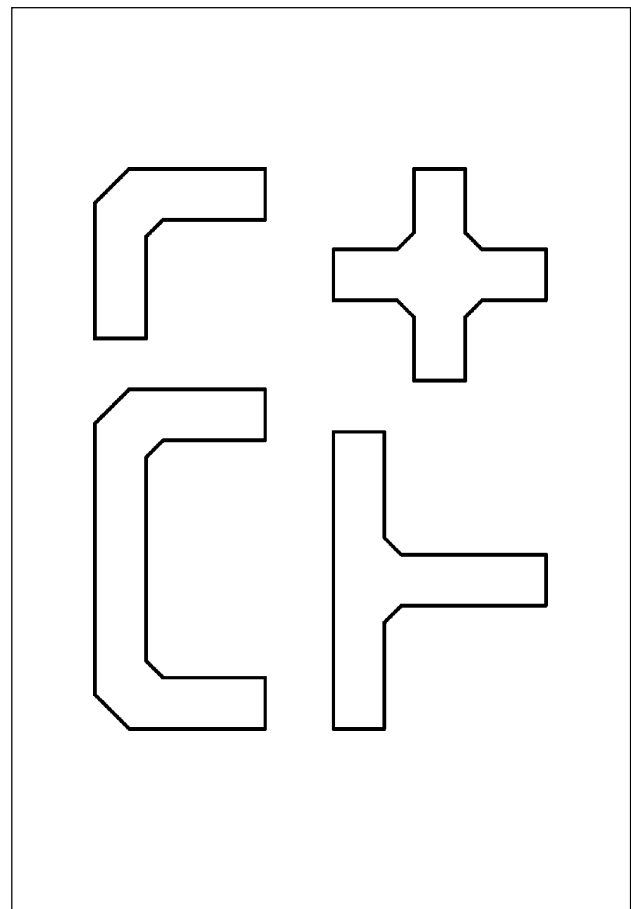
Para obtener una estructura mas flexible se pueden emplear elementos de pequeña longitud y hacer una junta sin machihembrado si los elementos están anclados arriba y abajo, ver fig. 6-11. Durante un movimiento sísmico esta unión puede abrirse sin colapsar debido a que cada elemento tiene un movimiento independiente. Este es un sistema semiflexible que absorbe los choques del sismo. Un proyecto en el que se implementó esta técnica se describe en la sección 6.4.



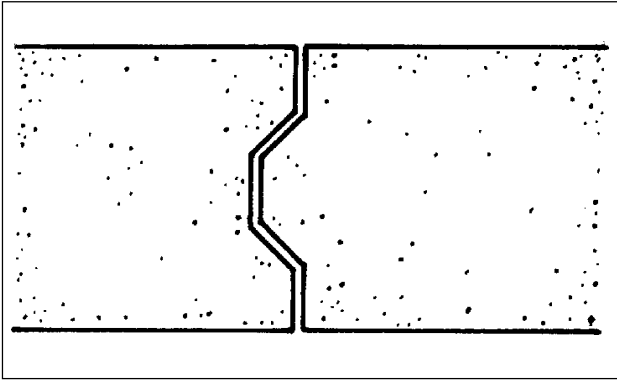
6-8 Forma de un ángulo peligroso y de uno mejorado



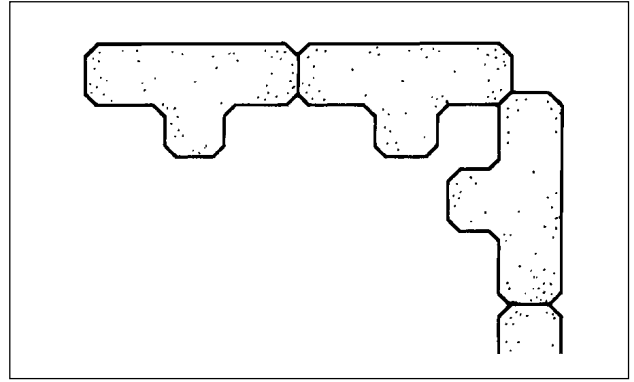
6-7 Relación aconsejable para muros de tapial



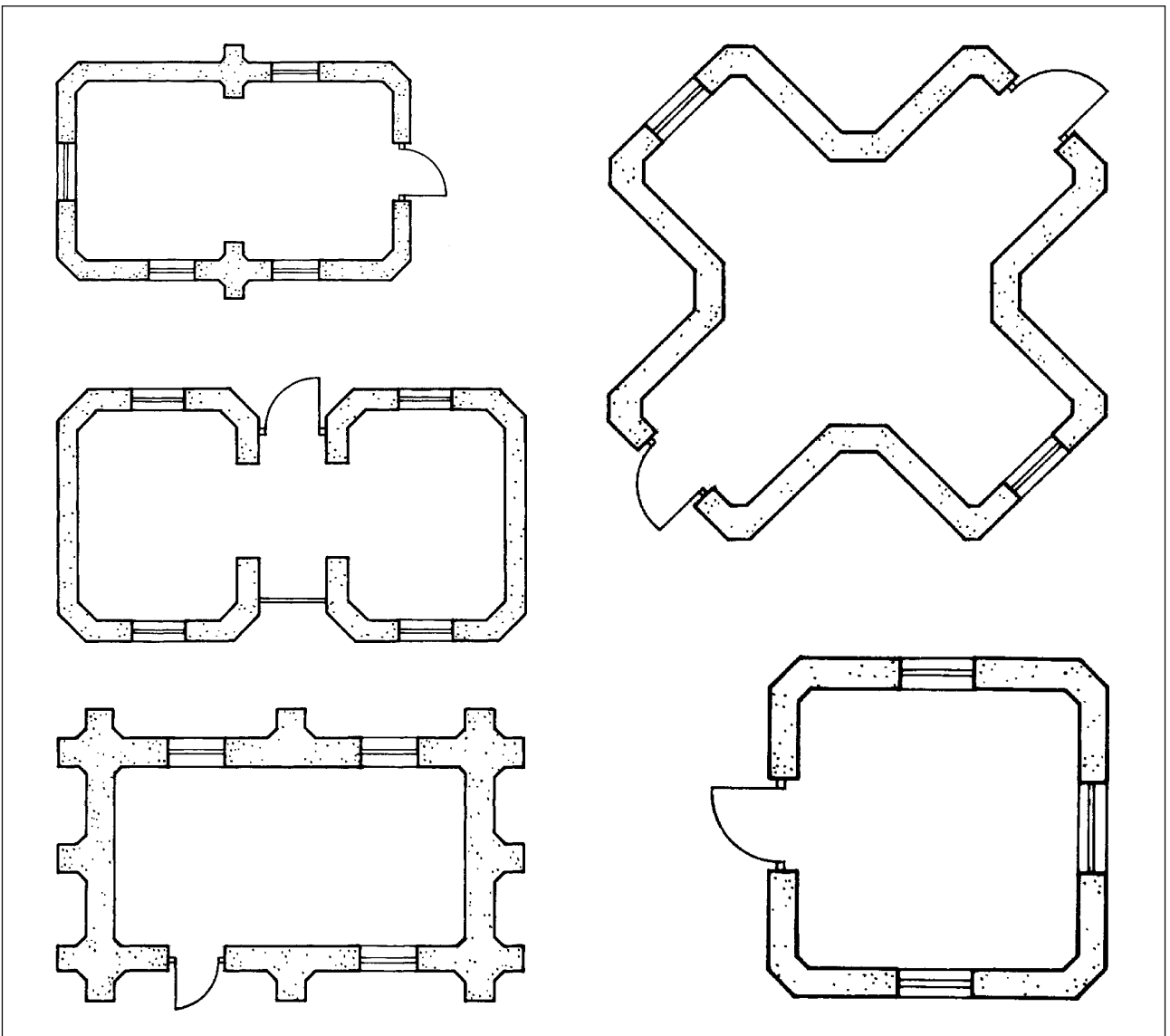
6-9 Diseño de esquinas de elementos de tapial



6-10 Estabilización lateral mediante una unión machihembrada



6-11



6-12 Propuestas de plantas diseñadas con elementos angulares

6.4 Refuerzos internos

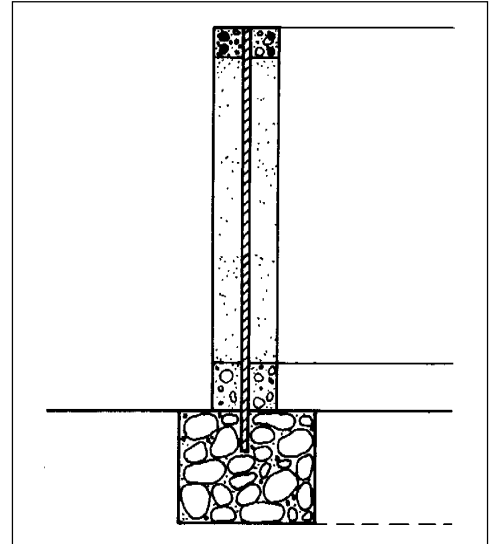
Una solución para estabilizar muros de barro contra los impactos horizontales del sismo es utilizar elementos verticales de madera o bambú dentro del muro, anclados con el sobrecimiento y fijados al encadenado, ver fig. 6-13.

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 una anclaje con la tierra se debilita la sección en estos puntos y pueden aparecer quiebres horizontales durante el sismo.

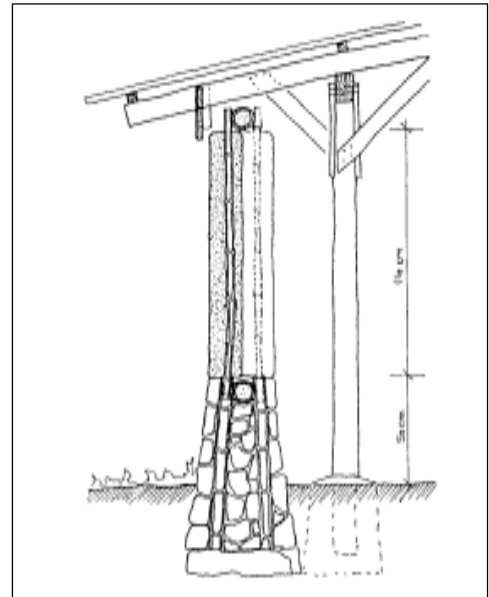
Una sistema de paneles de tapial reforzados con bambú se desarrolló en 1978 como parte de un proyecto de investigación en el FEB, y se implementó exitosamente en Guatemala con la Universidad de Francisco Marroquín (UFM) y el Centro de Tecnología Apropiada (CEMAT), ver figs. 6-14 a 6-19.

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. 6-16 y 6-19. 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 ciclópico) y en la parte superior a un encadenado de bambú rectangular.

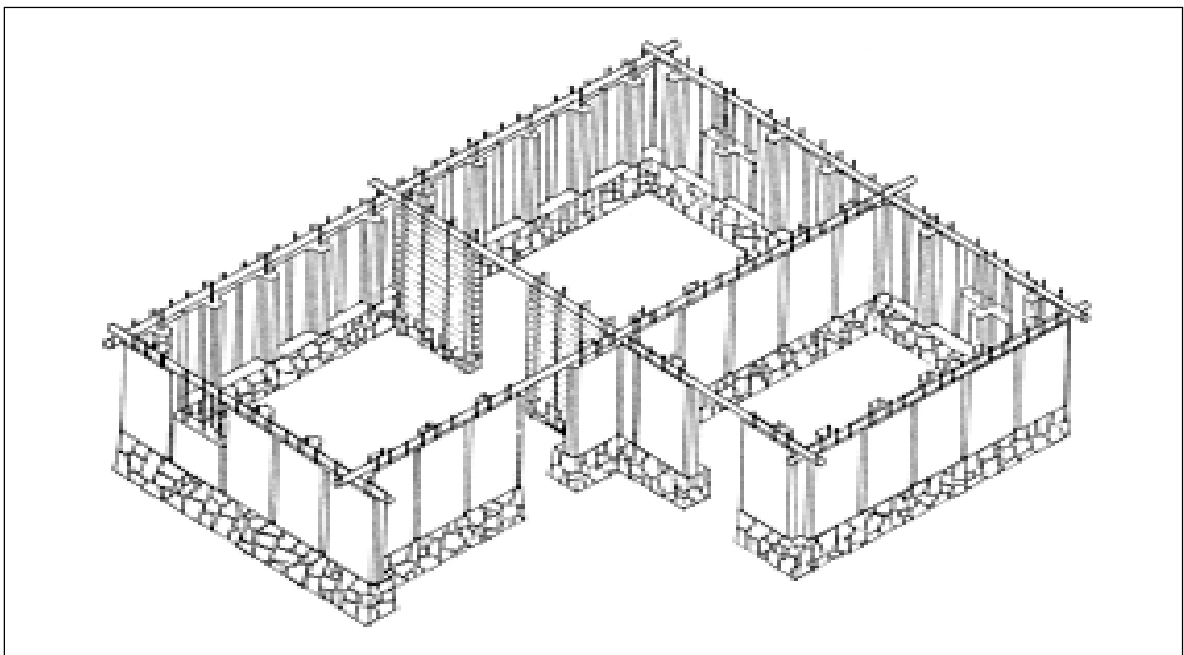
6-13



6-14



6-15

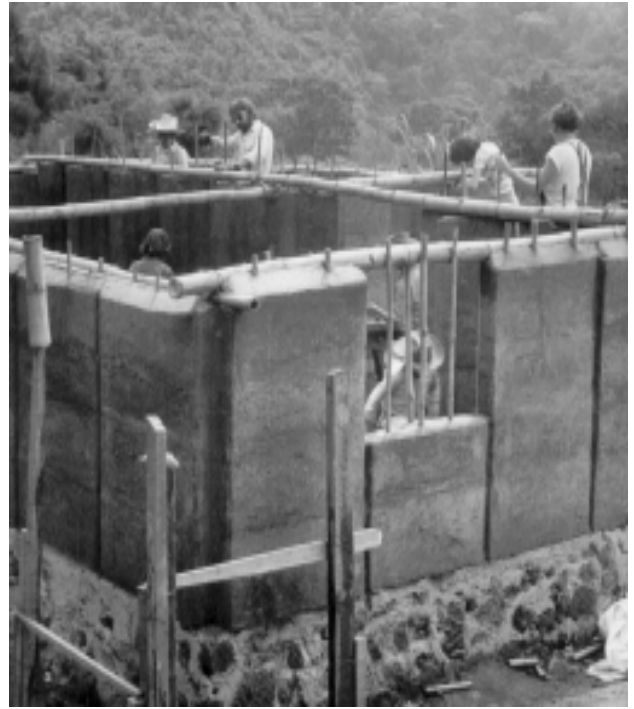




6-16

Debido a la nervadura integrada al elemento, este tiene aproximadamente cuatro veces más resistencia a los impactos horizontales que un muro de 14 cm de espesor.

Luego del secado aparecieron grietas verticales de 2 cm de espesor entre los elementos, estas se rellenaron posteriormente con barro y actúan como juntas de fallo prediseñadas permitiendo un movimiento independiente a cada elemento



6-17

durante el sismo. Esto significa que estas juntas pueden abrirse y que toda la estructura se deforma (disipando la energía cinética sísmica) sin que la unidad del muro se quiebre o colapse. Las columnas sobre las que descansa la cubierta se ubicaron a 50 cm del muro hacia el interior, ver fig. 6-14 de manera tal que la estructura de la cubierta fuera independiente del sistema de muros.



6-18

En 1998 el FEB y científicos de la universidad de Santiago de Chile elaboraron otro proyecto de investigación para una vivienda antisísmica de tapial reforzado. La vivienda se construyó en 2001 y tiene 55 m² de superficie útil, ver figs. 6-20 y 6-21.

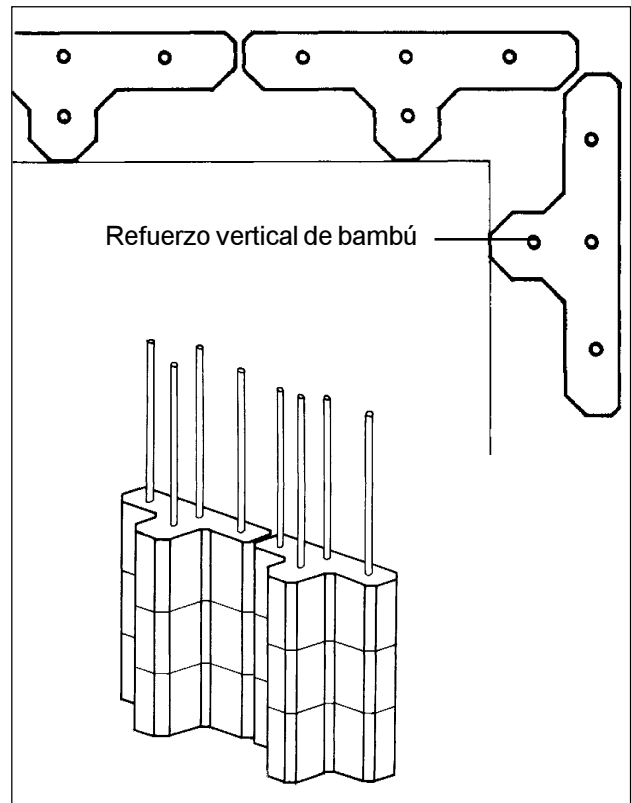
El diseño está regido por la idea de separar la estructura de la cubierta de la de los muros. La cubierta descansa sobre columnas independientes de los muros macizos de tapial, haciendo que ambos elementos se muevan de acuerdo a su propia frecuencia en caso de un sismo.

Los muros de tapial de 40 cm tienen forma de L y U. El ángulo recto que se forma en estos elementos se sustituye por un ángulo de 45 grados para rigidizar la esquina.

El muro de tapial descansa sobre un sobrecimiento de hormigón ciclópeo de 50 cm de espesor. Los refuerzos verticales del tapial los constituyen cañas de coligüe (bambú chileno) de 2.5 a 5 cm de espesor, fijados al encadenado superior y anclados en el cemento, ver fig. 6-21. El encadenado está constituido por dos rollizos de álamo en forma de escalera sobre los muros.

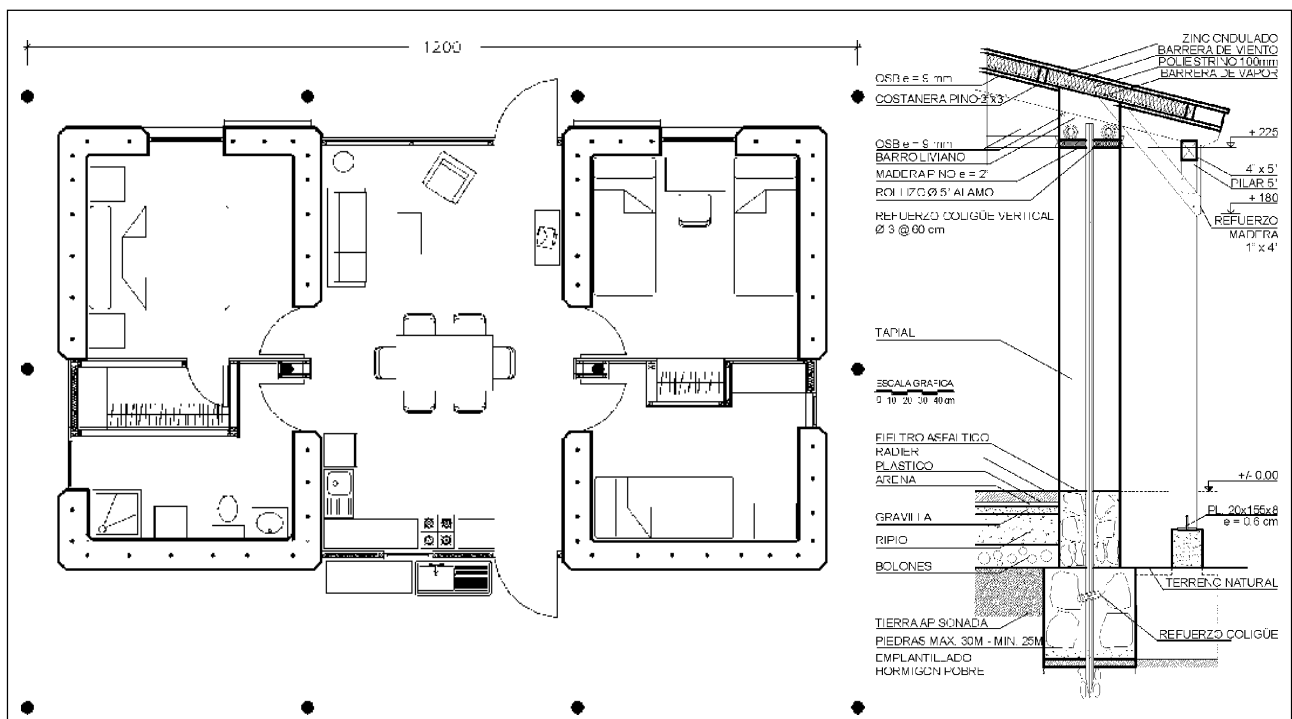
Las ventanas y puertas son de piso a techo y no tienen segmentos de muro macizo sobre los vanos.

Asimismo el tímpano de las fachadas este y oeste se ejecutó con un tabique estructuralmente aislado para evitar el peligro de la caída de materiales macizos durante el sismo.



6-19

6-14 a 6-19 Prototipo de una vivienda antisísmica de bajo costo con tapial reforzado, Guatemala, 1978 (Minke 2001)

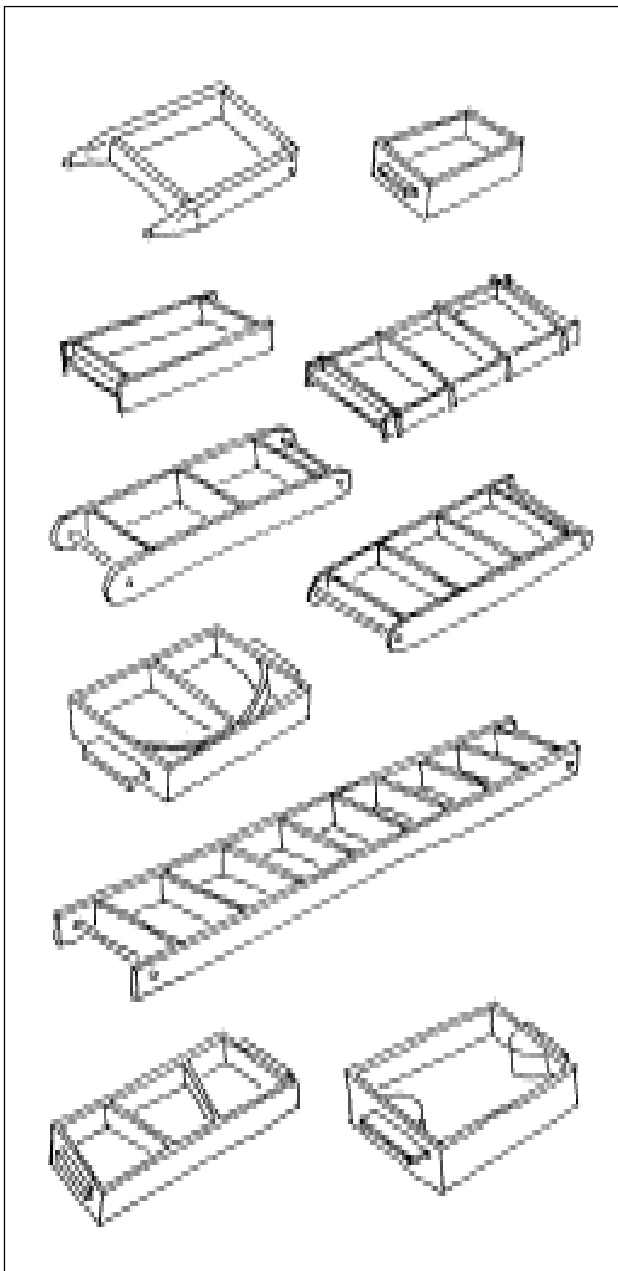


6-20 y 6-21 Vivienda antisísmica de tapial reforzado en Alhué, Chile 2001

7. Muros de adobe

7.1 Generalidades

Los bloques de barro producidos a mano rellenando barro en moldes y secados al aire libre se denominan adobes. Cuando la tierra húmeda se compacta en una prensa manual o mecánica se denominan bloques de suelo. Los ladrillos producidos mediante un extrusor en una ladrillera, sin cocer se denominan ladrillos crudos. Los bloques más grandes compactados en un molde se denominan bloques compactados o adobones.



7-1 Moldes para adobes (Minke 2001)

La elaboración de los adobes se realiza ya sea rellenando los moldes con un barro de consistencia pastosa o lanzando un barro menos pastoso en el molde.

Hay muchos tamaños y formas de adobes en el mundo, la fig. 7-1 muestra diferentes moldes, que usualmente son de madera. En Latinoamérica las medidas más comunes son 38 x 38 x 8 cm o 40 x 20 x 10 cm. La fig. 7-2 muestra un proceso de elaboración de adobes en Ecuador.

Existen también prensas manuales para elaborar bloques de tierra, la más conocida es la CINVA-Ram, ver fig. 7-3. Existen varias variantes de esta prensa por ejemplo la CETA-Ram, ver fig. 7-4,



7-2 Proceso de elaboración de adobes en Ecuador

desarrollada en la Universidad Católica de Asunción del Paraguay y permite elaborar tres unidades a la vez.

Mientras que una persona produce por día 300 adobes a manos, con este tipo de prensa una persona solo llega a producir aproximadamente 150 unidades.

Estos bloques tienen la ventaja de tener medidas constantes y superficies lisas.

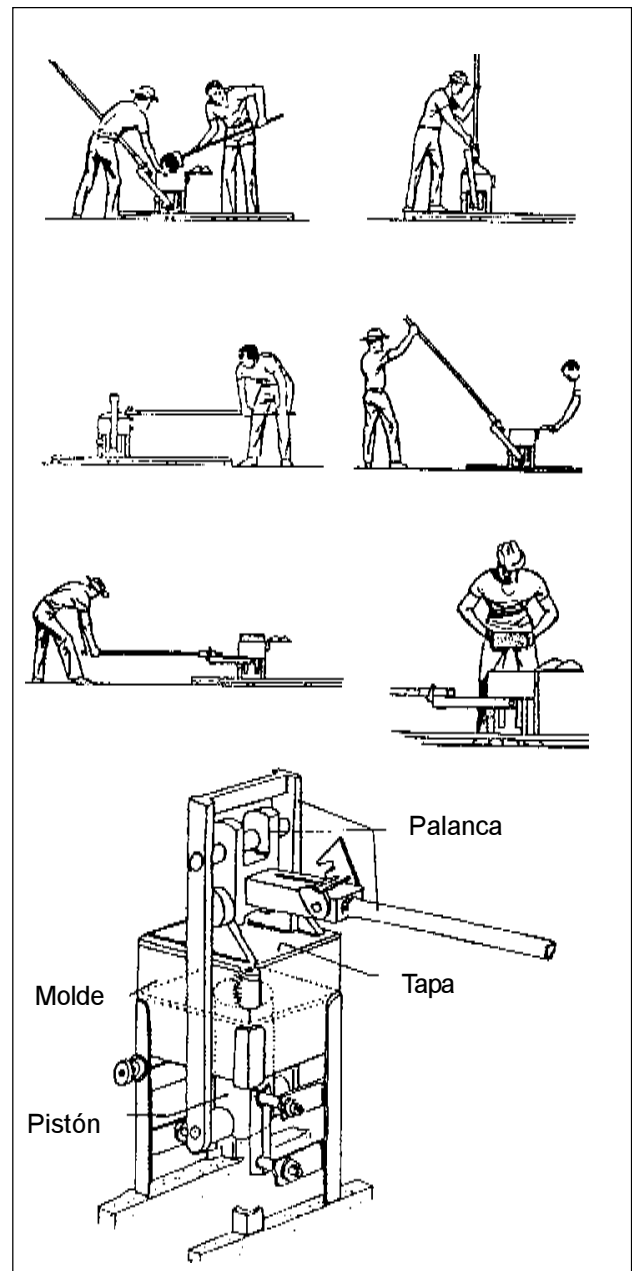
La desventaja es que la resistencia a compresión y flexión es menor y por ello es usualmente necesaria la estabilización con cemento entre 4 a 8%.

Para la ejecución de la mampostería deben tenerse en cuenta las siguientes recomendaciones:

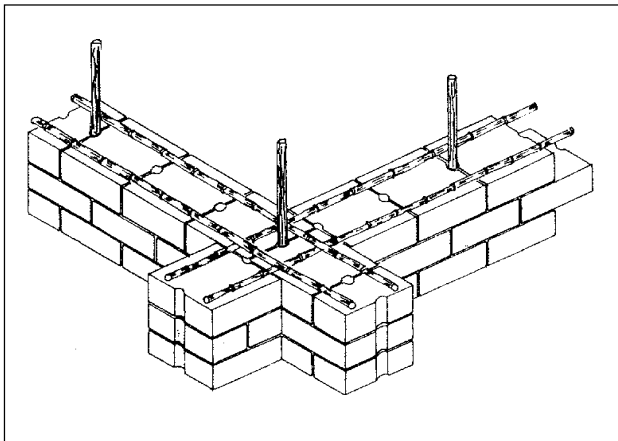
- Las capas horizontales del mortero no deben tener un espesor mayor a 2 cm.
- Las uniones verticales deben rellenarse completamente con mortero.
- La calidad del mortero debe ser alta con un contenido de arcilla alto para obtener una buena adherencia y una alta resistencia a la flexión.
- Los adobes deben mojarse antes de su colocación.



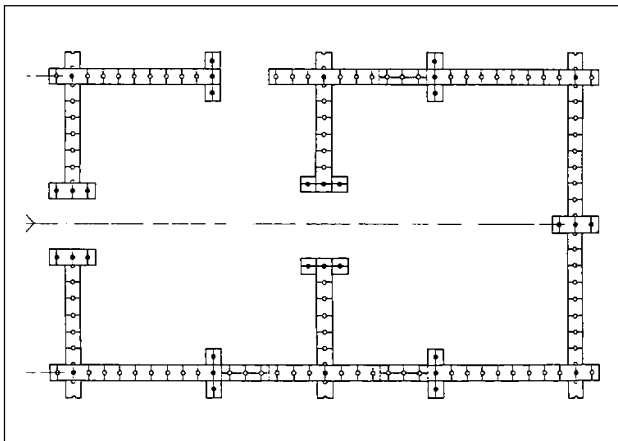
7-4 CETA-Ram, Paraguay



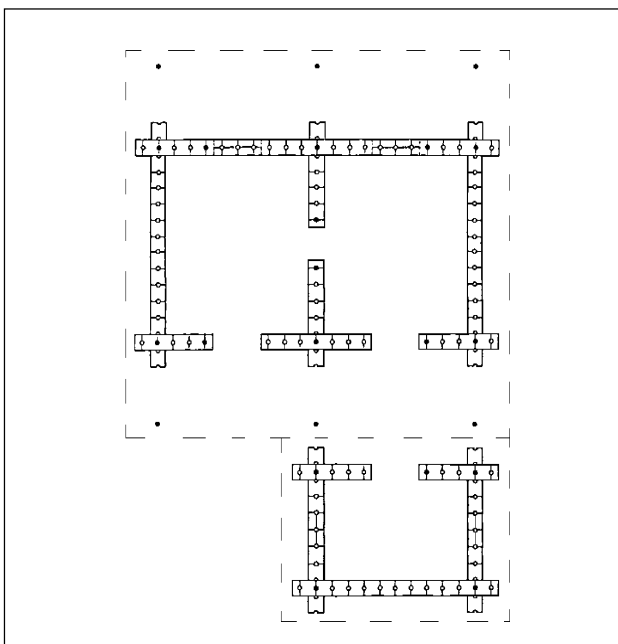
7-3 CINVA-Ram, Colombia



7-5 Sistema ININVI, Perú



7-6 Planta del sistema ININVI, Perú (Pereira 1995)



7-7 Planta del sistema ININVI, Perú (Pereira 1995)

7.2 Refuerzos internos

El Instituto nacional de normalización de la vivienda en Perú (ININVI), desarrolló un sistema de refuerzo interno para muros en el que hay dos tipos de adobes, unos tienen ranuras de 5 cm de diámetro en los extremos y otros son mitades de adobes con una sola ranura para obtener la traba. Por estas ranuras atraviesan varillas de caña, ver fig. 7-5. En este sistema se refuerzan los muros mediante contrafuertes integrados, intermedios y en las esquinas, ver fig. 7-6.

La fig. 7-8 muestra una vivienda revocada, construida con este sistema. En esta figura se pueden ver las vigas horizontales de las cerchas de la cubierta, conectadas con los contrafuertes, logrando así una buena ligazón entre la cubierta y los muros.

La figs. 7-6 y 7-8 muestran los aspectos más importantes para el diseño de una vivienda con este sistema. Si los muros tienen una longitud 12 veces mayor al espesor, se recomienda ejecutar un contrafuerte (machón) intermedio. En la intersección se requiere también un contrafuerte.

Las cañas horizontales que se pueden ver en la fig. 7-5 ubicadas sobre los adobes, usualmente son desventajosas, debido a que debilitan la resistencia del muro a un impacto sísmico en vez de reforzarlo.

La falla surge por la débil ligazón entre las capas de adobe en las que se encuentran las cañas, debido a que la capa de mortero no es suficientemente gruesa para proveer una buena unión. Para obtenerla es necesaria una capa de mortero de 2 cm sobre y debajo de la caña, que da como resultado una junta de 6 a 8 cm.

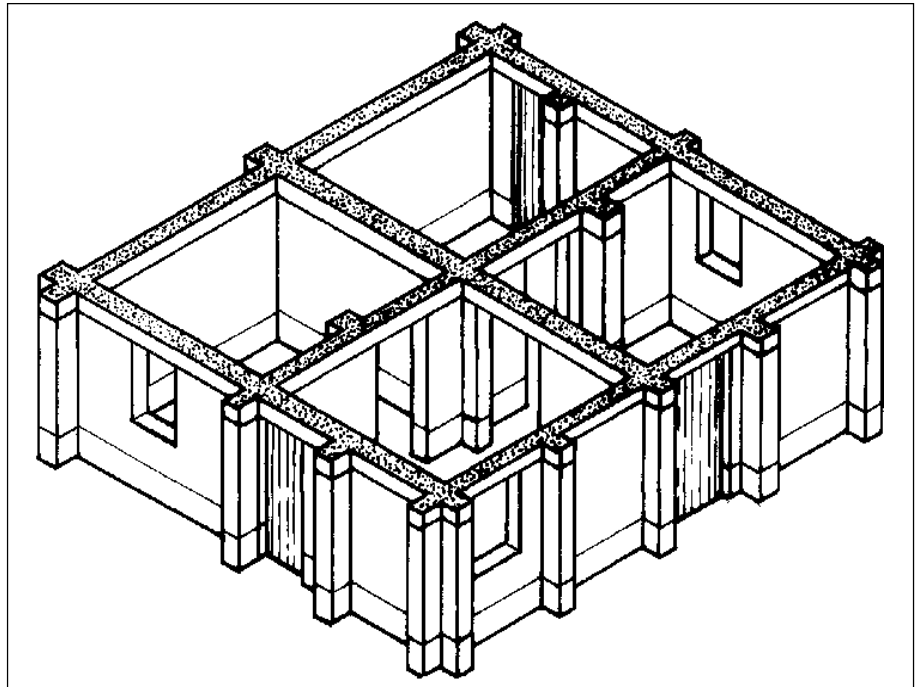
En este sistema los adobes deben ser rugosos, para que la adherencia de estos al mortero sea suficiente. Si no se cumplen estos requerimientos los elementos horizontales debilitan la estructura.

La fig. 7-7 muestra una planta usada en El Salvador (Equipo Maiz 2001).

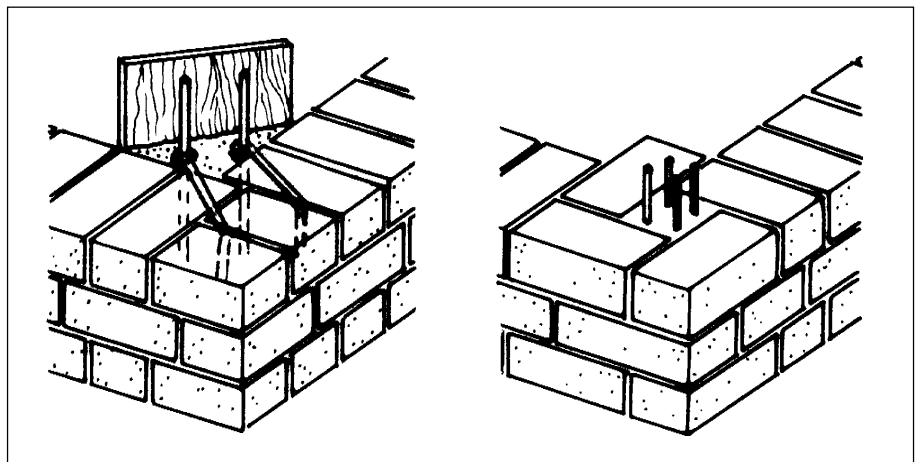
Si el diseño no provee contrafuertes en las esquinas, se requiere reforzar las mismas por ejemplo con hormigón armado, como se puede ver en la fig. 7-10. En la propuesta de arriba se requiere hacer una traba cada 50 cm entre las varillas de acero verticales y la mampostería de adobes, que consiste en varillas de acero horizontales dobladas y enganchadas a la mampostería.



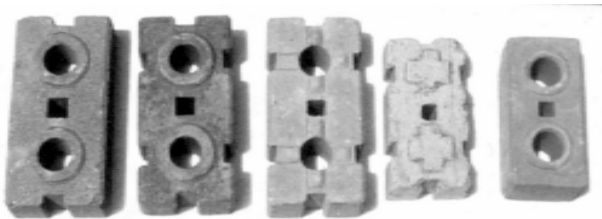
7-8 Centro de educación
Acomayo, Perú
(Pereira 1995)



7-9 Diseño con el sistema
de adobes reforzados
con contrafuertes



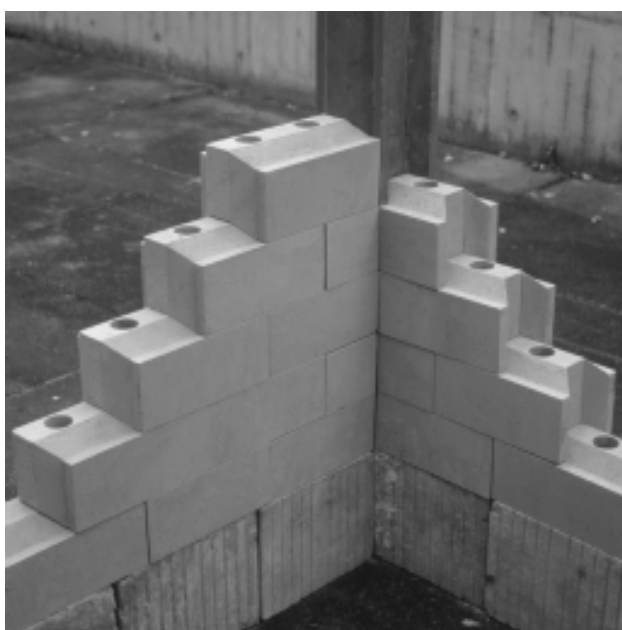
7-10 Esquinas reforzadas
con hormigón
armado



7-11 Bloques machihembrados (Weinhuber 1995)



7-12 y 7-13 Vivienda piloto, Tailandia 1984 (Weinhuber 1995)



7-15 Sistema de bloques machihembrados FEB, 2001

7.3 Muros de bloques machihembrados

Esta es una solución interesante para construir muros sin mortero con bloques de suelo cemento que encajan entre si por medio de un sistema de machihembrado.

En la fig. 7-11 se pueden ver diferentes diseños de bloques. Estos son producidos con un prensa manual y la tierra debe ser estabilizada con cemento.

Estos muros pueden resistir los impactos sísmicos, si reciben suficiente carga de la cubierta, si están reforzados por elementos verticales (caña o hierro) en cada intersección y en los espacios intermedios y si estos elementos están arriostrados con el encadenado.

Asimismo, la estructura es flexible y puede absorber la energía cinética del sismo debido a que los perfiles machihembrados tienen una tolerancia mínima que permite a los bloques moverse levemente en la dirección horizontal.

El sistema fue desarrollado en el Asian Institute of Technology, Bangkok, las figs. 7-12 y 7-13 muestran la aplicación del mismo en la primera vivienda piloto construida en 1984 en Tailandia. En este caso los orificios fueron rellenos con una lechada de cemento y arena en relación 1:3. La fig. 7-14 ilustra un sistema similar desarrollado en la Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela. El sistema consiste en mampostería de bloques de suelo cemento machihembrados con ranuras y contiene refuerzos horizontales «rafas» a una altura de 1.20 m de hormigón armado, de 6 cm de espesor anclados con cañas a los machones verticales.

El anclaje entre los bloques machihembrados tiene un espesor de solo unos milímetros y por ello la resistencia a los impactos laterales es baja.

Las figura 7-15 muestra una propuesta del autor para incrementar esta resistencia mediante una union de 40 mm de espesor con la que se obtiene no solo una union vertical como en los otros sistemas sino tambien una horizontal entre los bloques.

En los orificios de los bloques se pueden colocar refuerzos verticales, por ejemplo bambu fijado con cemento. Si en los extremos de los muros hay columnas de hormigon y sobre los muros un encadenqdo de hormigon no son necesarios los refuerzos verticales.

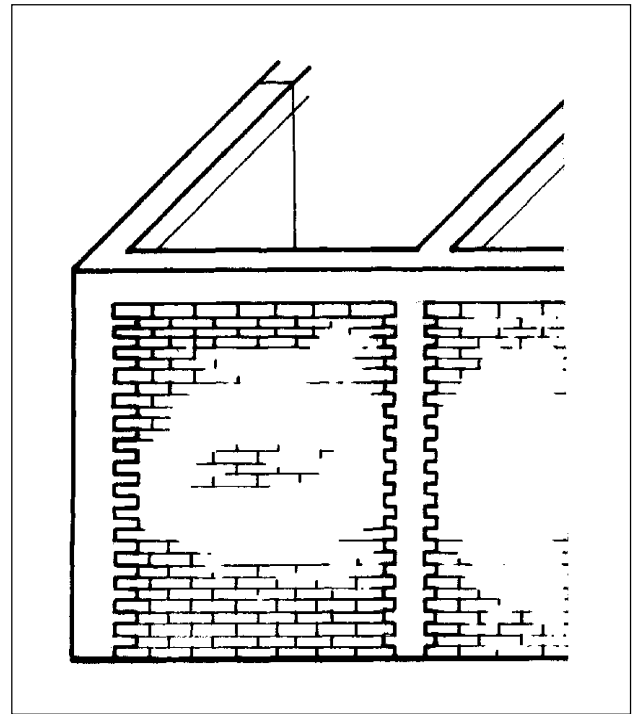
7.4 Muros con sistemas de refuerzo horizontales y verticales de hormigón armado

Las desventajas de los muros de mampostería común, es su tendencia a colapsar por efecto del sismo y la dificultad de controlar la calidad de ejecución de la obra.

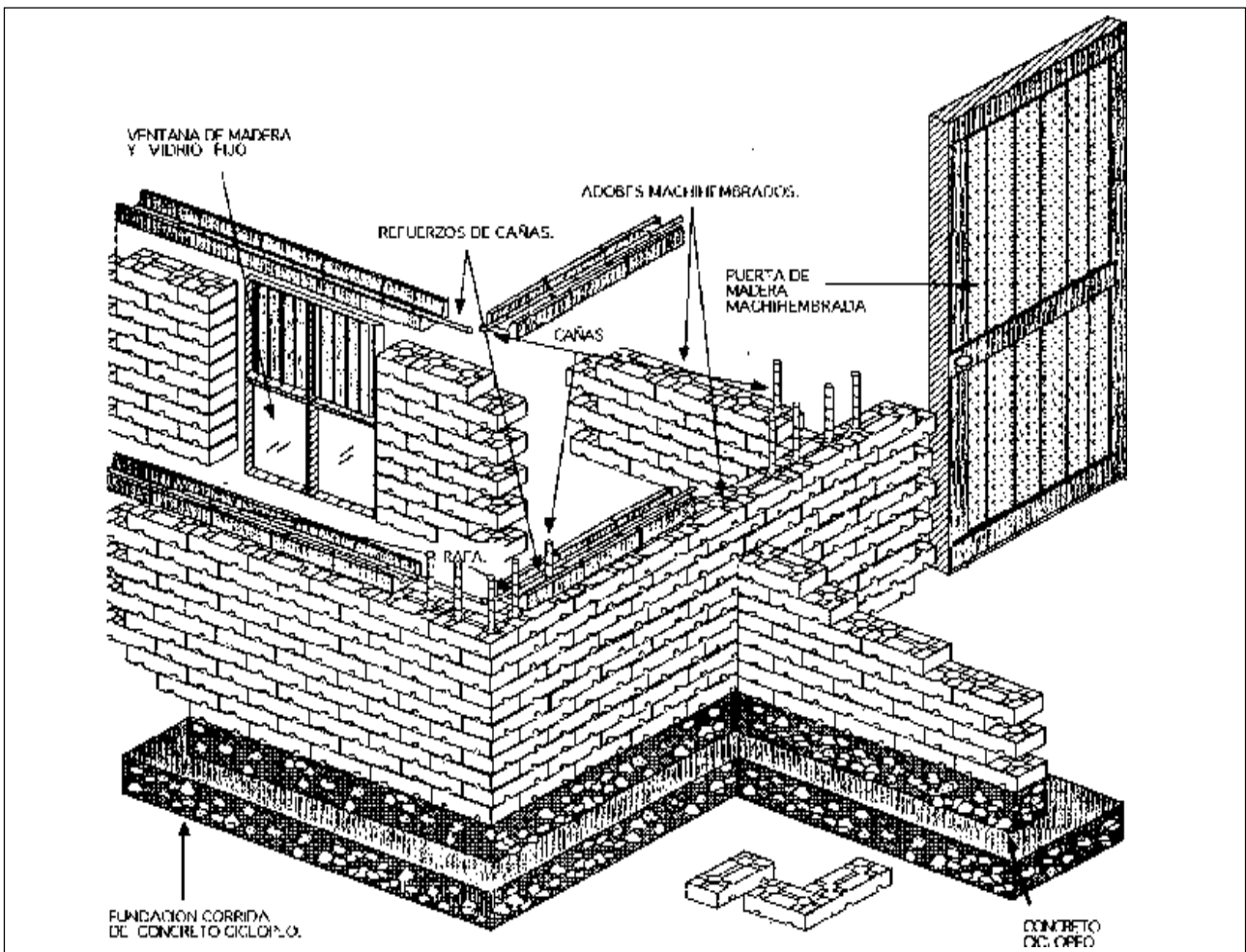
Un método común para el mejoramiento del comportamiento sísmico de construcciones de mampostería, es la utilización de columnas verticales y encadenados horizontales de hormigón armado alrededor de la mampostería. Primero se realiza la mampostería y posteriormente se ejecutan los refuerzos verticales y horizontales (refuerzo vertical mínimo 4 varillas de 14 mm y estribos con diametro de 6 mm a una distancia de 10 cm en la parte final)

En la fig. 7-16 se puede ver que es importante la traba entre las columnas de hormigón y la mampostería.

Esta solución es costosa, muy rígida y no tiene la ventaja de la ductilidad (flexibilidad).



7-16 Estructura de hormigón armado con relleno de mampostería



7-14 Sistema de la Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela (Pereira 1995)