*Earthquake resistance
of post-tensioned
soil-cement buildings
with low geometric
complexity*

Resistencia sísmica del suelo-cemento postensado en construcciones de baja complejidad geométrica

Autores

BARROS, L. P.

Arquitecto Universidad de Chile
Director del Departamento de Arquitectura UTFSM

Departamento de Arquitectura UTFSM
e-mail: luis.barros@usm.cl
phone: 56 (0)32 2 65 41 06
fax: 56 (0)32 2654108
address: avda. España 1680
p.o. box: casilla 110-v
postcode: 2390123 Valparaíso - Chile

IMHOFF, F. A.

Arquitecto UTFSM, Investigación y desarrollo

Departamento de Arquitectura UTFSM
e-mail: felipe.imhoff@usm.cl
phone: 56 (0)32 2 65 41 06
fax: 56 (0)32 2654108
address: avda. España 1680
p.o. box: casilla 110-v
postcode: 2390123 Valparaíso - Chile

Fecha de recepción 27/08/2010

Fecha de aceptación 01/12/2010

Resumen

Este artículo presenta el desarrollo y evaluación de un sistema constructivo-estructural a base de tierra cruda, que ofrece mejorar la sismorresistencia dentro de un rango aceptable (0.8g).

La investigación consistió en analizar y elaborar en laboratorio un material llamado suelo-cemento. Luego se procedió al desarrollo de un sistema constructivo estructural a base de tapial en suelo-cemento postensado. A continuación se fabricaron dos prototipos físicos escala 1:6 que fueron sometidos a ensayos de resistencia en el Laboratorio

de Construcción Sismorresistente del Departamento de Obras Civiles UTFSM, para evaluar su comportamiento frente a solicitaciones sísmicas.

Los resultados muestran que los ensayos fueron satisfactorios, por cuanto ambos modelos resistieron las simulaciones del terremoto de Kobe (0.8g) a un 100% sin indicios de colapso. Se piensa que este modelo podría ser aplicado en la construcción de obra nueva de baja complejidad geométrica a la luz del terremoto de febrero de 2010 en Chile.

Palabras claves: Construcción con tierra apisonada, suelo-cemento postensado, tierra apisonada estabilizada.

Abstract

This article shows the research and development of a structural-building technique based on soil, which offers the improvement of earthquake resistance within an acceptable range (0.8g). The so-called soil-cement material was investigated and developed in laboratory. Then, a building technique based on rammed soil on post-tensioned soil-cement was developed. Two physical prototypes at a 1:6 scale were built,

that were subject to strength tests in the Laboratory of the Civil Works Department of the UTFSM to assess their performance under seismic stress. Test results were satisfactory, since both models resisted Kobe earthquake (0.8g) simulations with no signs of collapse. It is thought that this model could be applied in the construction of new buildings with low geometric complexity after the earthquake of February 2010 in Chile.

Key words: *Rammed soil construction, post tensioned soil-cement, stabilized rammed soil.*

Introducción

El uso del suelo natural como material de construcción ha sido usado desde tiempos inmemoriales. Las técnicas de construcción con tierra datan de hace más de 9.000 años. En Turquestán fueron descubiertas viviendas en tierra del período 8000-6000 a. C. (Pumpelly, 1908). En Asiria fueron encontrados cimientos de tierra apisonada que datan del 5000 a. C. Todas las culturas antiguas utilizaron la tierra no solo en la construcción de viviendas, sino también en fortalezas y obras religiosas (Minke, 2008).

La tierra es el material de construcción con menor huella ecológica y puede manipularse sin una capacitación sofisticada de mano de obra, lo que implica que puede ser aplicada básicamente para la solución de demandas habitacionales.

Sin embargo, a pesar de sus características aislantes, inerciales y resistentes, la tierra presenta limitaciones en su aplicación. Su resistencia mecánica es reducida, vulnerable a la humedad y se erosiona por acción de agentes externos. Con el paso del tiempo ha perdido credibilidad y se ha puesto en tela de juicio sus propiedades mecánicas ante un sismo de gran envergadura. Las construcciones de adobe, a nivel de componentes, presentan problemas estructurales y de estabilidad a consecuencia de la fragilidad en la unión de los bloques y la poca resistencia a los esfuerzos de flexión en el plano del muro. Un claro ejemplo de esto se pudo ver el pasado 27 de febrero de 2010 con las innumerables construcciones de adobe de la VI y VII Región dañados por el terremoto 8,8 Richter.

En Chile, la consecuencia más importante es la exclusión del adobe como sistema constructivo por la Ordenanza. Lo anterior ha llevado a que el adobe tenga un uso limitado en construcciones. Tal como lo menciona Gaete (2010), "la ausencia de criterios o normativas nacionales que regulen las construcciones que consideren la tierra como material predominante y/o estructural limita su uso" (p.1).

En la actualidad se observan cambios constructivos importantes en la arquitectura en tierra. En cuanto al material original, la tierra cruda, ha tenido cambios que alteraron sus propiedades y sus posibilidades tanto materiales como tecnológicas. Mediante la estabilización con productos naturales o industriales, y la compactación, se alteraron aspectos tales como la durabilidad, las resistencias, las terminaciones y los modos constructivos.

Los avances se originaron a partir del conocimiento en profundidad del material y sus propiedades, con

importantes aportes desde la química, como también a partir del estudio del comportamiento físico-mecánico, estructural y de durabilidad de las construcciones en tierra. Un ejemplo de innovación tecnológica es la el bloque de tierra comprimida (BTC), con variedad de diseños que son empleados principalmente en las propuestas para el hábitat social en los países "en vías de desarrollo". La tierra apisonada también ha tenido interesantes avances en sus diseños y aplicaciones. Principalmente, en la sistematización del proceso constructivo y en el diseño de equipamiento. En el caso de los sistemas mixtos, aparecen prefabricaciones de entramados, como la quinchá peruana del Instituto ININVI, con paneles livianos de madera y caña entrelazada. En Chile, Cortés construye con un sistema de quinchá empleando estructuras metálicas, tierras y cal (Rotandaro, 2007, p.350-351).

En este caso, la pertinencia del estudio bajo las condiciones actuales de reconstrucción del valle central chileno, sitúa el campo operacional en la brecha existente entre material y sistema constructivo, adoptando una metodología de desarrollo de prototipos para la formulación de un sistema que mejora la sismorresistencia basado en suelo-cemento postensado.

En la primera parte de este artículo se expone una revisión de literatura del suelo-cemento, posibles aplicaciones y el estado del arte tanto en el desarrollo de investigaciones pertinentes, así como también ejemplos de proyectos de arquitectura y estudios de casos de las condiciones locales para probar la hipótesis de trabajo. Se realizó un reconocimiento y obtención de muestras de distintos suelos de la V Región, los cuales fueron analizados en Laboratorio de Mecánica de Suelos de la UTFSM. Se eligió un tipo de suelo para elaborar suelo-cemento y así determinar su dosificación óptima. Se fabricaron probetas de suelo-cemento, las cuales fueron ensayadas a compresión. En la segunda parte del artículo se presenta el desarrollo y diseño del sistema constructivo: tapial o tierra apisonada en suelo-cemento postensado y la evaluación sísmica de prototipos de viviendas de una planta, construidas bajo este sistema.

Sistemas constructivos: tapial y suelo-cemento

Este sistema normalmente llamado tapia o tapial en Latinoamérica, fue utilizado antes de la llegada de los conquistadores. Se tienen evidencias de construcciones de tapias hace milenios en regiones tan distantes como China, India, Egipto, Siria, Líbano, Bolivia y Perú. La manifestación más potente se materializó en diversos tramos de la Gran Muralla China que se edificaron

entre el quinto y tercer siglo antes de nuestra era (Houben, 2001).

La técnica de la tapia o tierra apisonada consiste en rellenar un molde con capas de tierra húmeda de 10 a 15 cm compactando cada una de ellas con un pisón, e ir, de este modo, formando las paredes de la construcción.

La tierra apisonada se utiliza hoy en muchos países. Sistemas de moldajes más sofisticados y una compactación de pisones neumáticos reducen los costos de mano de obra significativamente y hacen de esta técnica una opción relevante en países industrializados.

Esta tecnología mecanizada para ejecutar muros de tierra apisonada, en relación a la construcción convencional con ladrillos, no es solo una alternativa viable desde el punto de vista ecológico, sino también económico, especialmente en aquellos países donde por razones climáticas no hay grandes requerimientos de aislamiento térmico. En el sudoeste de los Estados Unidos y en Australia existen empresas que ejecutan hace varios años esta técnica de construcción (figs. 1-2).

De los sistemas constructivos en tierra (adobe, quincha, tapial y ballon frame) se considera el adobe y el tapial como estructurales. Hay diversas opiniones respecto de cuál técnica constructiva tiene mejor comportamiento estructural. Sin embargo, el ingeniero peruano Julio Vargas (1993), especialista en construcción con tierra, opina que: "vale la pena mencionar estudios de resistencia de materiales realizados en años recientes, que han demostrado que los muros de tapia soportan en promedio un 40% más esfuerzos de compresión, tensión y corte que aquellos edificados con base en mampostería de adobe, los cuales, a pesar de su frecuente uso y difusión en todo el mundo, llegan a desarrollar fallas estructurales debido a la falta de homogeneidad entre las piezas y el mortero que las une" (p. 507).

El suelo-cemento como alternativa constructiva-estructural

En la actualidad, impulsadas por constantes investigaciones en el ámbito mundial, se registran interesantes innovaciones tecnológicas respecto de las técnicas constructivas en tierra, caracterizadas por simplicidad, eficiencia, economía y bajo impacto ambiental. Entre ellas, el suelo-cemento como insumo básico, destaca una de las posibilidades del uso de la tierra para la construcción de viviendas. El suelo-cemento es el conjunto de suelo o tierra, cemento y agua, debidamente dosificados y compactados. Su aplicación según diferentes técnicas constructivas permiten la resolución de la envolvente (muros y pisos) conformando elementos monolíticos, mampostería de bloques o de ladrillos prensados y entramados.

El suelo natural, siempre que reúna ciertas características granulométricas, puede ser sometido al tratamiento denominado "estabilización". La adición de un agente estabilizante, como el cemento, permite aprovechar mejor sus cualidades y añadir otras que por sí solo no posee. Este procedimiento de estabilización consiste en extraer el suelo natural del terreno, pulverizarlo, agregarle una cantidad determinada y reducida de cemento, adicionarle agua hasta el humedecimiento óptimo de la mezcla y compactarlo razonablemente, con lo que se obtiene una masa de gran resistencia al terminar el endurecimiento. De esta manera se consigue que el material soporte cargas de trabajo muy superiores a las que podría resistir el suelo sin cemento, obteniéndose, además, una buena durabilidad ante la acción de agentes atmosféricos.

En los laboratorios de materiales del Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (ICCET), en Madrid, y del Centro Navapalos se realizaron una serie de análisis

Figuras 1-2 Casa e iglesia de suelo-cemento compactado construidas por Ramtec, Margaret River, Australia.

de la tierra con el objetivo de comprobar sus posibilidades y limitaciones como material constructivo.

Los científicos españoles Olarte y Guzmán (1993) explican que el objetivo de estos ensayos estuvo orientado a conocer las respuestas de algunas probetas fabricadas con tierra y otras con estabilizantes. Las variables de análisis estuvieron orientadas a conocer el efecto del agua en los bloques de tierra así como determinar su resistencia a esfuerzos mecánicos (compresión).

El ensayo se realizó al séptimo día de fabricadas las probetas. Las dimensiones de las probetas fueron de 10x14x30cm para los ensayos de compresión directa y cilindros de 15cm de diámetro para ensayos de Proctor (compactación de tierra sin aditivos, con distintos porcentajes de agua). Los valores alcanzados que se muestran en la tabla 1 corresponden a la resistencia a compresión de cada una de las probetas.

Con los datos de este ensayo se obtuvieron antecedentes importantes para saber el efecto de algunos estabilizantes. Las probetas con menor resistencia a la compresión fueron las probetas de Suelo-paja (adobe: 7.25 kg/cm²) y Suelo-cal (4% expuesto al sol). Por el contrario, las probetas que resistieron un mayor esfuerzo a la compresión fueron las de tierra compactada (Proctor con 8% agua: 39.6 kgF/cm²) y las

de suelo-cemento (10% cemento: 74 kgF/cm²). Estos ensayos permitieron concluir que el cemento como estabilizante aumenta sobre un 50% la resistencia a la compresión, en comparación a la tierra compactada sin aditivos. Como comentan Olarte y Guzmán (1993): “La mayor resistencia a la compresión de un bloque de suelo-cemento correctamente curado alcanzó 85 kg/cm². En cambio un bloque sin un buen curado tan solo alcanzó los 35 kg/cm². Los bloques de suelo-cemento poseen una gran resistencia a esfuerzos de compresión y la degradación por efecto del agua es reducida. La estabilización con cemento en construcciones de tapial, puede ser factible siempre y cuando se asegure un correcto curado del muro” (p. 23).

Al mismo tiempo se pudo concluir que tanto la poca cantidad como el exceso de agua inciden en la variación de la resistencia de las probetas de tierra compactada. Una tierra demasiado húmeda no puede ser compactada adecuadamente; se adhiere al pisón impidiendo el trabajo y genera alteraciones o deformaciones en los muros durante la etapa del secado. Sin embargo, un material demasiado seco tampoco va a funcionar aunque se compacte de modo correcto. Se necesita una proporción de agua suficiente para activar las arcillas y propiciar su acción aglutinante.

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 los muros de tapial son monolíticos y por ello tienen una mayor durabilidad.

Tabla 1 Resistencia a la compresión al séptimo día de curado	
Materiales	Resistencia a la compresión (kg/cm²)
Suelo-paja (adobe-tradic.)	7.25
Suelo-cal (4% cámara húmeda)	9.85
Suelo-cal (4% expuesto al sol)	2.9
Suelo-asfalto	14.92
Suelo-cemento	74.0
Suelo-yeso	16.9
Proctor (4% de agua)	13.5
Proctor (8% de agua)	39.6
Proctor (12% de agua)	31.9

Testeo de resistencias del suelo-cemento en laboratorio chileno

La elaboración del suelo-cemento se realizó en el Laboratorio de Mecánica de Suelos de la Universidad Técnica Federico Santa María, y constó de las siguientes etapas: selección del suelo, extracción de muestras e individualización, análisis de suelos en laboratorio para determinar su humedad óptima y dosificación, y, finalmente, la confección de probetas para comprobar la resistencia requerida.

Con el objetivo de elaborar suelo-cemento, y considerando que no todos los suelos son apropiados para ello, se procedió a recorrer distintas zonas de la región observando suelos disponibles. Se realizó una previa selección visual y se extrajeron distintas muestras, descartando aquellas con exceso de material orgánico, consideradas como inadecuadas. Se extrajeron 6 distintos tipos de suelos, los cuales se analizaron en laboratorio.

El suelo adecuado para ser estabilizado con cemento es el que da una resistencia elevada y se contrae poco al secarse. Un suelo ideal debe estar compuesto por arena, limo y arcilla; estos dos últimos en proporción tal, que den suficiente cohesión a la mezcla sin que se produzcan contracciones perjudiciales. Existen diversas opiniones y distintas recomendaciones respecto de la granulometría óptima; sin embargo, todas estas coinciden en que los suelos ideales son los arenosos, por ser los que producen mejores resultados al ser estabilizados (tabla 2).

La tabla 2 muestra una recopilación de datos de distintos autores que recomiendan granulometrías óptimas de suelos para ser estabilizados. La mayoría recomienda un mayor porcentaje en arenas (45-80%), luego limo (15-30%) y por último arcilla (10-20%). Aunque cada componente juega un rol importante dentro del conjunto del suelo, la arcilla es clave por tratarse de un material aglomerante, mientras que la arena y el limo dan estructura y estabilidad al sistema.

La singularidad de la arcilla, explica Warren (1999, pp. 40-41), radica en el hecho de estar formada por silicoaluminatos hidratados que provienen de la milenaria desintegración geológica de rocas. Está constituida por cristales (micelas) que, debido a su forma plana y lisa, presentan la cualidad de desplazarse fácilmente entre el resto de las partículas y establecer relaciones electrostáticas que las ligan en conjunto. Este desplazamiento depende de su contacto con el agua y, a nivel macroscópico, se evidencia en la transformación del suelo en un

material plástico, coloidal o hasta líquido, que recupera su estado original al secar.

El resultado de los análisis de granulometría permitió elegir el suelo más adecuado a emplear, siguiendo las recomendaciones expuesta en el cuadro comparativo (tabla 2). El análisis granulométrico consistió básicamente en la determinación cuantitativa de la distribución del tamaño de las partículas del suelo. Se eligió la muestra de suelo correspondiente al sector Las Palmas, cuya distribución granulométrica fue de 70% arena, 12% limo y 18% arcilla. El resto de los suelos analizados contenían un menor porcentaje de arena y un escaso porcentaje de arcilla, por lo cual, fueron descartados.

Una vez seleccionada la muestra de suelo, se procedió a realizar un ensayo de compactación. El objetivo de este ensayo fue el de aislar y estudiar en laboratorio la influencia de dos factores: la humedad del suelo y la energía de compactación. Se debió determinar la correcta cantidad de agua de amasado a usar en terreno y el gasto de compactación que puede esperarse al compactar el suelo a esa humedad óptima. Se realizaron 5 muestras con distintos porcentajes de agua. Estas humedades debieron diferir en aproximadamente 2% una de otra, es decir, 8%, 10%, 12%, 14% y 16% de agua para encontrar el porcentaje de humedad óptimo.

Luego, se calcularon las respectivas densidades secas para cada una de las muestras compactadas. El gráfico (fig. 3) muestra las distintas densidades obtenidas en relación al porcentaje de humedad empleado.

Tabla 2 Cuadro recopilatorio de granulometrías recomendadas para suelo-cemento

Autores	Recomendación	Arena [%]	Limo [%]	Arcilla [%]
Enteiche	óptimo	75	10	15
	rango	45 a 80	20 a 55	
De la Fuente	rango	55 a 80	20 a 45	
De Olarte	óptimo	70	15	15
U. de Valparaíso	rango	70 a 80	20 a 30	5 a 10
Minke	óptimo	70	30	
Walker, Keable	óptimo	45-80	15 a 30	5 a 20
Krüger	óptimo	60	40	

Figura 3 Gráfico relación humedad-densidad (Proctor) Nch 1534-1y 2

Este ensayo permitió encontrar el porcentaje de humedad óptimo de la muestra de tierra utilizada. Las probetas con un 8% de agua alcanzaron una densidad compactada seca de 1.867 (kg/m³), luego las probetas con un 10% de agua alcanzaron un valor de 1.957 (kg/m³). La máxima densidad compactada seca (1.979 kg/m³) se logró con un 12% de agua. Este valor es fundamental, puesto que el grado de humedad de un suelo es una variable crítica en el proceso de compactación en un muro de tapial. Por último las probetas con un 14% y 16% de agua, alcanzaron densidades de 1.924 (kg/m³) y 1.820 (kg/m³).

Se puede concluir que el agua constituye otro elemento fundamental dentro del proceso constructivo, puesto que cumple dos funciones sustantivas. En primer lugar, permite el movimiento de las partículas sólidas de la mezcla al transportar a las más pequeñas entre las de mayor tamaño. En segundo lugar, activa las propiedades adhesivas de la arcilla.

Una vez determinada la humedad óptima del suelo, se prosiguió a elaborar suelo-cemento. Para su elaboración se confeccionaron probetas variando el porcentaje de cemento y manteniendo la humedad óptima de la tierra siempre constante. En total se fabricaron 9 muestras con 3 diferentes porcentajes: 6%, 8% y 10% en peso.

Cada muestra se mezcló en seco con los distintos porcentajes de cemento hasta obtener un material de color homogéneo y sin grumos de cemento. Luego, cada una de las muestras se mezcló con la cantidad de agua considerada suficiente para alcanzar el porcentaje de humedad óptimo, en este caso 360cc, que correspondió a un 12%. Una vez terminado el proceso de mezclado, el material fue compactado en moldes de 4" de diámetro.

Los moldes permanecieron siete días en la cámara húmeda. Posteriormente fueron ensayados a compresión simple hasta la rotura, para determinar la resistencia máxima con respecto al porcentaje de cemento empleado (tabla 3).

Con los valores obtenidos de este ensayo se concluye que la resistencia a la compresión de las probetas aumentó proporcionalmente en relación al porcentaje de cemento empleado. La tabla 3 muestra la resistencia promedio de las probetas ensayadas a compresión. Las probetas con un 6% de cemento resistieron en promedio 40.94 kgF/cm². Las probetas con un 8% de cemento resistieron en promedio 48.11 kgF/cm². Por último las probetas con un 10% de cemento resistieron en promedio 56.33 kgF/cm². Se recomienda no utilizar sobre un 12% de cemento en la dosificación por efectos económicos.

Tabla 3 Gráfico resistencia a la compresión - porcentaje de cemento

Determinación n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9
N° Cápsula	47	46	45	44	43	42	41	40	39
% agua [%]	12	12	12	12	12	12	12	12	12
% cemento [%]	6%			8%			10%		
Peso suelo h. + cápsula [gr]	6005	5956	5934	5578	5621	5580	6014	5981	5963
Peso cápsula [gr]	4028	3968	3949	3612	3641	3616	4051	4017	4019
Suelo compactado [gr]	1963	1976	1970	1956	1971	1953	1953	1955	1937
Carga máxima [kgF]	3200	3200	3100	3700	3900	3550	4400	4200	4450
Resistencia [kgF/cm²]	41,32	41,40	40,10	48,06	50,15	46,12	57,28	54,24	57,46
Resistencia promedio [kgF/cm²]	40,94			48,11			56,33		

Desarrollo y diseño del sistema constructivo

La idea de diseñar un sistema constructivo postensado nace a partir del estudio de viviendas antisísmicas de tierra propuestas por Minke (2008), que explica “una solución para estabilizar los muros de tierra contra los impactos horizontales del sismo es utilizar elementos verticales de fierro, madera o bambú dentro del muro, anclados al 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; como el elemento de refuerzo no tiene un anclaje con la tierra, se debilita la sección de estos puntos y pueden aparecer quiebres horizontales durante el sismo” (p. 132).

En 1998 el Instituto de Investigación de Construcciones Experimentales (FEB) de la Universidad de Kassel, Alemania, y científicos de la Universidad de Chile, elaboraron en un proyecto de investigación un diseño para una vivienda antisísmica de tapial reforzado. La vivienda de 55m² se construyó el año 2001 en Alhué, Chile.

La figura 4 muestra la planta de la vivienda, en color negro se identifican los muros (40 cm de espesor) de

tapial reforzado en forma de L y U. El ángulo recto que se forma en estos elementos se sustituye por un ángulo de 45 grados para rigidizar las esquinas. Así aumenta el espesor del muro debido a que las fuerzas mayores actúan en las esquinas durante el sismo. La figura 5 muestra un escantillón del sistema constructivo. Los refuerzos verticales de tapial los constituyen cañas de coligüe de 2.5 a 5 cm de espesor, fijados al encadenado superior y anclados en el cimiento.

Lo interesante de esta vivienda es que no solo incorpora un refuerzo interior en los muros, sino también propone una solución simple de estabilización mediante la forma angular; es decir, elementos de muros en forma de L y U (autosoportantes), que solo por su forma proveen resistencia al volcamiento y al colapso.

Una vez analizado el caso de estudio, se propuso el diseño de un sistema constructivo a base de suelo-cemento postensado. La hipótesis de trabajo consistió en insertar en el alma del muro unos tubos de plástico común y corriente, por los cuales corren hilos de acero. Luego, se coronó con un tablón que cumple la función de una cadena perimetral, el hilo pasa a través del tablón con una golilla y una vez que el muro está terminado se le da tensión a través de esta varilla de acero.

Figuras 4-5 Planta y escantillón de vivienda antisísmica de tapial reforzado

La figura 6 muestra la secuencia constructiva del sistema postensado.

De esta manera, la barra o tensor vertical trabaja a tracción y el muro de tierra se comprime, aumentando así su resistencia y rigidez. El propósito del tensor es también el de anclar la cadena o vigueta a la parte superior del muro, con el fin de tener una estructura unitaria.

Distintos autores recomiendan la presencia de una cadena superior. El principal propósito de estas vigas es conformar un collar de amarre en la parte superior del muro, que no solo limite el movimiento de los muros hacia el exterior, sino también hacia el interior. Esto provoca que las construcciones se comporten unitariamente aun cuando los muros sean monolíticos y discontinuos los unos de los otros. Además, la viga cumple la función de soportar el peso de la techumbre y distribuirlo uniformemente a lo largo del muro.

Para comprobar la efectividad del sistema constructivo ante un sismo, se fabricaron dos prototipos a escala reducida (1:6) de suelo-cemento postensado. Ambos prototipos se construyeron idénticos en relación a su configuración geométrica y dimensiones. Sin embargo, cada uno proponía detalles constructivos distintos para mejorar la sismorresistencia.

En el prototipo A se propuso un aumento del espesor de las esquinas para mejorar su estabilidad y rigidez (fig. 7). Esta solución nace a partir del estudio de la vivienda experimental construida por Minke (2005), quien postula que "durante un sismo, las fuerzas perpendiculares al muro se transfieren a la sección del muro paralela 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" (p.17).

En el prototipo B se propuso un diafragma rígido en el plano superior, sujeto fuertemente a los muros en las dos direcciones. La idea fue que las cargas laterales se trasmitan a los elementos arriostrantes y el modelo completo funcione como una sola unidad al momento de recibir movimientos telúricos (fig. 8).

Es necesario hacer mención al estado del arte respecto a patentes relacionadas con sistemas constructivos estructurales en base a tierra. El Departamento de Obras Civiles de la Universidad de Wyoming, Estados Unidos,

Figura 7 Prototipo A (esquinas 45°)

Figura 6 Secuencia constructiva del sistema postensado

Figura 8 Prototipo B (diafragma rígido)

patentó el año 2006 un sistema constructivo de tapial postensado. Cabe destacar que el sistema patentado propone tierra cruda como material de construcción en vez de suelo-cemento. Por otra parte, la innovación de la cadena superior de madera y la esquina reforzada son características propias del sistema constructivo desarrollado en la presente investigación.

Modelos a escala reducida y ensayos sísmicos

Los modelos a escala reducida de suelo-cemento compactado se sometieron a ensayos sísmicos en la mesa de simulación de terremotos perteneciente al Laboratorio de Ingeniería Sismorresistente del Departamento de Obras Civiles de la UTFSM.

Por medio de ensayos de modelos a escala reducida se puede estudiar el comportamiento dinámico de estructuras construidas con distintos materiales. Para lograr reproducir adecuadamente el comportamiento de

la estructura real, se debe tener en cuenta las relaciones de similitud entre el modelo a escala y la estructura real determinadas por análisis dimensional.

La definición de las solicitaciones tomó como parámetro el terremoto de Kobe, Japón, ocurrido en 1995. Este tuvo una magnitud entre 6.9 y 7.3 en la escala de Richter y causó mucho daño, sobre todo a las construcciones de tierra, debido a su rápida y fuerte aceleración (0.8g). Así los modelos fueron ensayados con el registro de este extenso sismo al 100% para poder analizar su real comportamiento frente a un sismo.

Para poder realizar una comparación del comportamiento sísmico de los prototipos de suelo-cemento compactado en relación al adobe, se tomó como referencia una tesis de investigación del Constructor Civil Carlos Berrios, cuyo tema fue "Modelación a escala reducida de viviendas de adobe sometidas a sismo". Por lo tanto, los prototipos de suelo-cemento se ensayaron bajo los mismos parámetros de esta tesis de investigación.

Las secuencias fotográficas (figs. 9-10) muestran el aspecto exterior de los prototipos a medida que fue progresando el terremoto de Kobe a un 100%.

Resultados

Como primera conclusión, se demuestra claramente que los prototipos de suelo-cemento compactado no sufrieron indicios de colapso, en comparación a la maqueta de adobe que sí colapsó con el registro de Kobe a un 100%.

Este tipo de ensayo sirvió para evaluar los sistemas de construcción con tierra y saber cómo y por qué fallan y además de ver cómo empieza la falla. Con respecto a la casa de adobe, comenta Berrios (2007) que en todas las observaciones de grietas sobre la estructura de adobe se constató que estas se produjeron a través del mortero y no por los adobes, excepto un caso particular en que la grieta cortó un adobe cerca del borde. Esto tuvo que ver con la buena calidad de las unidades fabricadas.

Figura 9 Prototipo de adobe durante el ensayo en la mesa de simulación de terremotos

Figura 10 Prototipo A y B durante el ensayo en la mesa de simulación de terremotos

El colapso del prototipo de adobe se inició y progresó por las esquinas de los vanos. El terremoto de Kobe, apenas comenzó, dañó gravemente los muros. Al final del terremoto la casa apenas se mantuvo en pie y se desplomó. Este colapso se produjo principalmente por el volcamiento de alguno de los muros fuera del plano.

Con respecto a los ensayos de los prototipos en suelo-cemento compactado, se concluyó que al aplicar el registro de Kobe al 100% se generaron solo grietas verticales (fig. 11). Es común que aparezcan fisuras verticales en las esquinas durante la interacción de muros perpendiculares, debido a la flexión de los movimientos fuera del plano. Este tipo de daño puede ser particularmente severo cuando se presentan grietas verticales en ambas caras, lo que permite el colapso de toda la esquina. En el caso de los modelos ensayados esta grieta aparece solo en una cara de los muros y con espesor de 1mm. El comportamiento de estos modelos fue distinto al de una casa de adobe. La resistencia de muros fue mucho al alta y no hubo tendencia a vaciarse los muros.

El engrosamiento de las esquinas ayudó a la estabilidad del modelo A de mejor manera que los tensores en el plano superior propuesto en el modelo B. Los tensores trabajaron de manera eficaz solo a tracción, puesto que a compresión se deformaron perdiendo su rigidez. Si bien el prototipo B no colapsó, registró una mayor cantidad de grietas verticales en comparación al modelo A, por lo tanto se concluye que sufrió más daño.

Ambos modelos tuvieron un comportamiento aceptable frente al sismo, producto de la ancha cadena superior. La cadena al estar bien sujeta y comprimida por el

sistema de barras tensadas, se mantuvo indeformable durante el terremoto, evitando cualquier tipo de giro o volcamiento de los muros.

Discusión y conclusiones

El objetivo principal de esta investigación consistió en analizar el material: suelo-cemento y desarrollar un sistema constructivo estructural de bajo costo, que reponga el valor las ventajas ecológico-ambientales de la construcción con tierra y que mejore la resistencia al sismo.

Se apostó por diseñar un sistema constructivo estructural a base de suelo-cemento compactado con un refuerzo postensado. La hipótesis de trabajo planteó dos posibles soluciones para resolver el efecto del sismo. Para esto se construyeron dos prototipos escala 1:6, en los cuales se midió el comportamiento frente al sismo y se realizó una comparación respecto del adobe.

Desde el punto de vista de mejorar la resistencia al mismo, se cumple en gran medida el objetivo principal de la investigación, puesto que ambos modelos ensayados no colapsaron, resistiendo el terremoto de Kobe al 100% (0.8g).

Con respecto al costo del sistema constructivo, se concluye que este no es de tan bajo costo económico como el adobe, debido a los refuerzos interiores (barras de acero) y a los herrajes, pero sí resulta un 20% más económico que un muro de albañilería reforzada de ladrillo. Cabe destacar que un muro de suelo-cemento no requiere de una aislación termoacústica adicional.

Figura 11 Catastro de agrietamientos de muros: prototipo A y B

Es un sistema que queda terminado sin necesidad de estuco, y tiene un menor índice de conductividad térmica ($\lambda = 0.30 \text{ W/ } ^\circ\text{C m}$) si se compara con un muro de albañilería ($\lambda = 0.85 \text{ W/ } ^\circ\text{C m}$). Estas son variables que influyen positivamente en el costo total a favor de un muro de suelo-cemento compactado.

Su campo de aplicación se orienta principalmente a la construcción de viviendas económicas de geometrías simples (formas compactas) de un solo nivel. Se considera un sistema apropiado por su simplicidad, posibilidad de utilización de mano de obra masiva, terminaciones superficiales adecuadas sin necesidad de revoques y por ser una técnica constructiva fácil de transferir a grupos de autoconstrucción, con mano de obra de baja calificación.

Se piensa que este sistema constructivo estructural podría ser aplicado en la construcción de obra nueva en reemplazo de las edificaciones de adobe tradicional destruidas a raíz del sismo de febrero de 2010 en Chile, conservándose en gran parte las características del lenguaje arquitectónico de las mismas sin alterar el sentido original.

En definitiva se puede concluir que el sistema de tapial en suelo-cemento postensado mejora la resistencia al sismo respecto de la técnica de la tradicional albañilería de adobe.

Como posibilidades de continuar el desarrollo de futuras investigaciones, se visualizan nuevos objetivos por cumplir. Por un lado, sería deseable la construcción de un prototipo escala 1:1 o una parcialidad del mismo para ensayarlo en una mesa sísmica. El diseño y desarrollo de un nuevo sistema de moldaje más económico, de máxima reutilización y de fácil instalación. Finalmente explorar la prefabricación del sistema.

Por último, una evaluación de desempeño bajo otros parámetros, como la resistencia a la humedad, la capacidad de soportar un segundo nivel en estructuras livianas y la exploración en capacidades morfológicas del sistema, abriendo un campo de interés que induce al desarrollo de futuras investigaciones tecnológicas respecto de la construcción en tierra.

Referencias

1. Berríos, C. (2007). *Modelación a escala reducida de viviendas de adobe sometidas a sismos*. Memoria para optar al título de Constructor Civil. Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso.
2. De la Fuente, E. (1995). *Suelo-Cemento, Sus usos, propiedades y aplicaciones* (1ª ed.). México: Editorial Florida.
3. De Olarte, J., Guzmán, E. (1993). *Manual de Edificación con Tierra Armada* (1ª ed.). Madrid: Editorial ID Comunidad.
4. Enteiche, A. (1963). *Suelo-Cemento su aplicación en la edificación* (1ª ed.). Bogotá: Editorial Centro Interamericano de Vivienda y Planeamiento.
5. Gaete, M. (2010). *Estrategias morfológicas de diseño sismo resistente para la construcción contemporánea en tierra portante*. Consultado abril 17, 2010, en <http://www.plataformaarquitectura.cl/2010/04/17/estrategias-morfologicas-de-diseno-sismo-resistente-para-la-construccion-contemporanea-en-tierra-portante>
6. Houben, H. Guillaud, H. (2001). *Earth construction. A comprehensive guide*. London: ITDG Publishing.
7. Minke, G. (2008). *Manual de Construcción con Tierra* (3ª ed.). Montevideo: Editorial Fin de Siglo.
8. Minke, G. (2005). *Manual de Construcción para viviendas antisísmicas de tierra* (3ª ed.). Kassel: Editorial Forschungslabor für Experimentelles Bauen.
9. Rotandaro, R. (2007) *Arquitectura de tierra contemporánea: tendencias y desafíos*, *Apuntes*, 20, 350-351.
10. Tolles, L., Kimbro, E. (2005). *Guías de planeamiento e ingeniería para la estabilización sismorresistente de estructuras históricas de adobe*. California: Getty Publications.
11. Vargas, J. (1993). *Earthquake resistant rammed earth buildings. Memorias de la 7ª Conferência Internacional Sobre o Estudo e Conservação da Arquitectura de Terra*. Lisboa: DGEMN.
12. Ward, T., Grill, J. (2006). *Post-tensioned rammed earth construction*. U.S.Patent N°: 7,033,116.