

Seismic performance of rammed earth town halls reinforced with confinement wooden elements

Evaluación del comportamiento sísmico de casas consistoriales de tapia pisada reforzadas con maderas de confinamiento

D. Ruiz ^{1*}, M. Silva *, L. Cerón *, C. López *

* Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá. COLOMBIA

Fecha de Recepción: 03/08/2016
Fecha de Aceptación: 01/01/2017
PAG 25-44

Abstract

There are few studies on the behavior of historic structures of adobe and rammed earth in Latin America, which has contributed to the deterioration of these buildings, which are part of our architectural and cultural heritage. Colombia has 90% of its heritage buildings made of earth and most of them are located in high and intermediate seismic risk zones. The town halls of the colonial era (made of adobe or rammed earth) are part of this Colombian architectural heritage and still kept 11 of these houses in the Department of Cundinamarca. This article presents the results of a study conducted by research groups GRIME and Estructuras & Construcción, where the objective was to study a method of rehabilitation of town halls of rammed earth through confinement wooden elements. The research is based on shake table tests on scale models (1:20), with and without reinforcement with confinement wooden elements. The results suggest that the reinforced model had less seismic displacements (69% less than the model without reinforcement) and that the wooden confinement elements diminishes the cracking of the rammed earth walls.

Keywords: Structural reinforcement, wooden elements, rammed earth, adobe, laboratory tests, town halls, shake table tests

Resumen

Existen pocos estudios del comportamiento de estructuras históricas en adobe y tapia pisada en Latinoamérica, lo que ha contribuido al deterioro de estas construcciones, que son patrimonio arquitectónico y cultural. Colombia tiene el 90% de sus edificios patrimoniales en tierra y la mayoría de ellos están ubicadas en zonas riesgo sísmico alto e intermedio. Las casas consistoriales de la época colonial (casas de ayuntamiento hechas en adobe o tapia pisada) son parte de este patrimonio arquitectónico Colombiano y aún se conservan 11 de estas casas en el Departamento de Cundinamarca. Este artículo, presenta los resultados de un estudio desarrollado por los grupos de investigación GRIME y Estructuras & Construcción, donde el objetivo fue estudiar un método de rehabilitación de casas consistoriales de tapia pisada mediante maderas de confinamiento. La investigación se basó en pruebas en mesa vibratoria sobre modelos a escala 1:20, con y sin refuerzo en maderas de confinamiento. Los resultados sugieren que el modelo reforzado tuvo menores desplazamientos sísmicos (69% menos que el modelo sin refuerzo) y que las maderas de confinamiento disminuyeron la fisuración y el agrietamiento de los muros de tapia pisada.

Palabras clave: Reforzamiento estructural, maderas de confinamiento, tapia pisada, adobe, ensayos de laboratorio, casas consistoriales, ensayos de mesa vibratoria

1. Introducción y antecedentes

1.1 Construcción en tierra

La tierra es uno de los materiales más antiguos utilizados para la construcción de edificaciones (Yamín et al., 2007); su uso data de aproximadamente 8000 A.C. En la época de la conquista los españoles introdujeron la construcción con adobe y tapia pisada en las principales ciudades del reino de la Nueva Granada, se construyeron casas de uno y dos pisos destinadas al gobierno y a templos religiosos (Yamín et al., 2007). Alrededor del 30% al 50% de la población mundial actualmente vive o trabaja en edificaciones en tierra, principalmente en el área rural (Blondet et al., 2011).

En Colombia las construcciones en tierra son una parte fundamental del patrimonio cultural; se encuentran 1118 monumentos declarados de los cuales el 90% de éstos están hechos en tierra (López et al., 2007). Por esta razón es

importante rehabilitar estas edificaciones para conservar el patrimonio cultural y por ello durante la última década se han realizado rehabilitaciones e intervenciones sísmicas en edificaciones de carácter patrimonial en tierra (López et al., 2007).

Una de las técnicas usadas para la construcción con tierra es la tapia pisada, la cual se hace mediante la compactación de capas de aproximadamente 100 mm de espesor con una herramienta denominada pisón. La compactación se hace dentro de una formaleta denominada tapial que consta de 2 tableros de madera de 2 m de largo por 1 m de alto llamados hojas de tapia y 2 compuertas que dan el ancho del muro (Ver Figura 1).

¹ Autor de correspondencia:

Director Departamento de Ingeniería Civil de la Pontificia Universidad de Javeriana, Bogotá. Colombia
E-mail: daniel.ruiz@javeriana.edu.co





Figura 1. Proceso constructivo de la tapia pisada (Chang et al., 2013)

El sistema de entrepiso de las edificaciones en tapia pisada consiste en vigas cargueras de madera que se extienden entre los muros cargueros. Para estas vigas se utiliza madera rolliza de 0.15 – 0.20 m de diámetro o de sección rectangular o cuadrada de 0.20x0.20 m. Las vigas corona de entrepiso se instalan sobre los muros cargueros y sirven de apoyo directo a las vigas cargueras de entrepiso, transmitiendo las cargas horizontales y verticales a los muros cargueros (AIS, 2004). La cubierta generalmente se construye en madera rolliza o elementos aserrados formando una cubierta tipo cercha (AIS, 2004).

1.2 Vulnerabilidad sísmica de edificaciones construidas en tierra

Las construcciones en tierra (adobe y tapia pisada) poseen características constructivas que aumentan su

vulnerabilidad sísmica. Además, la edad de estas edificaciones y el deterioro de las propiedades mecánicas de sus materiales son determinantes en el comportamiento de la tapia pisada como estructura. La poca resistencia a tensión del material que origina una nula resistencia a la flexión y los esfuerzos resistentes de tensión diagonal en el orden de 0.03 MPa, llevan a una disminución de la capacidad del material para soportar fuerzas externas (Yamín et al., 2007). Esto debido a que la tierra es un material poco cementado, lo cual lo hace susceptible a la erosión o a la desintegración al estar en constante contacto con el agua (Day, 1993). Lo anterior trae como consecuencia una tendencia de las edificaciones en tierra a colapsar durante terremotos, como el sismo de Cúcuta (Colombia) en 1875 que causó el colapso de la iglesia (Figura 2).



Figura 2. Colapso de la Iglesia de Cúcuta (en tierra) durante el terremoto de 1875 Tomado de (Ruiz et. al., 2012)

1.3 Alternativas de rehabilitación sísmica de edificaciones en tierra (Adobe y Tapia Pisada)

Se han evaluado diferentes alternativas de rehabilitación para disminuir la probabilidad de colapso de edificaciones en tierra (tapia pisada y/o adobe) o permitir la salida de los ocupantes (Yamín et al., 2007), (Ruiz et al., 2012). De esta manera, se proponen diferentes tipos de rehabilitación como lo son la madera confinada, los tensores de acero, los refuerzos con mallas, bandas de polipropileno, instalación de vigas de coronación, refuerzos internos con caña, entre otros (Blondet et al., 2011).

De acuerdo con ensayos e investigaciones realizados de los refuerzos anteriormente mencionados en Colombia, se llegó a la conclusión que las maderas de confinamiento mejoran notablemente el desplazamiento último y el esfuerzo cortante promedio resistente en las edificaciones en tierra. Esto se debe a que los elementos generan continuidad estructural y confinamiento; reduciendo la posibilidad de una falla anticipada, incrementando la capacidad de deformación en el rango no lineal, así como la resistencia máxima del sistema estructural (Yamín et al., 2007).

El refuerzo con maderas de confinamiento consiste en la instalación de refuerzos horizontales y verticales, como se indica en la Figura 3, teniendo en cuenta la separación entre maderas y entre bordes; para aumentar la resistencia a la flexión de los muros y mantener la unidad de la estructura. Los elementos deben colocarse en la cara interna y en la cara externa del muro, los elementos horizontales de los muros se

unen mediante pernos y platinas de acero de manera que se evite la desarticulación de los muros y se mantenga siempre unida la edificación (Yamín et al., 2007).

1.4 Casas Consistoriales

Las casas consistoriales aparecieron en la época de la colonia con el fin de administrar las ciudades, solucionar los problemas judiciales, administrativos y económicos de los pobladores (Uribe et al., 2014). Al iniciar la construcción de una ciudad se debía iniciar con las casas de habitación, luego la iglesia y para finalizar seguían los edificios comunales como lo eran las casas consistoriales (Wyrobisz, 1980).

Estas casas se debían ubicar en la plaza principal en donde se reunían los capitulares de un ayuntamiento para celebrar sus juntas; éstas eran escenarios de los sucesos y decisiones políticas más importantes de lugar. Allí funcionaban diferentes actividades del gobierno tales como despachos, salones del cabildo y la audiencia, escribanías, archivos, cárceles y hospedaje de la guardia.

Estas edificaciones se construyeron con forma de paralelogramo rectangular, cuya mayor longitud correspondía a la fachada principal, con dos pisos, pilares de madera y corredores; se caracterizan por tener simetría tanto en planta como en fachada.

Las casas consistoriales hacen parte del patrimonio colombiano construido en tierra, actualmente se conservan 11 de estas casas en Cundinamarca (Ver Figura 4), que corresponde al 39% del total inicial (Uribe et al., 2014).

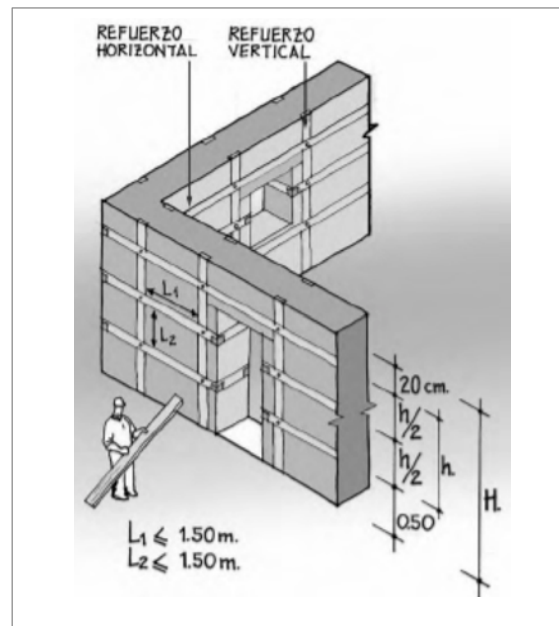


Figura 3. Colocación del refuerzo de maderas de confinamiento (AIS, 2004)



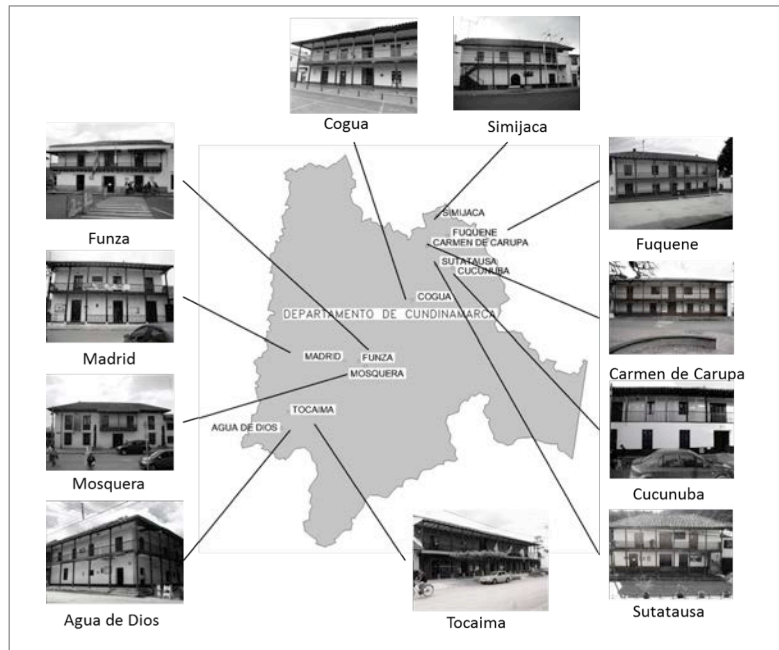


Figura 4. Localización de las casas consistoriales actuales en Cundinamarca (Uribe et al., 2014)

Las casas han sido modificadas sin tener en cuenta la tipología existente, además de no tener un mantenimiento periódico adecuado, requerido para su conservación. Estas casas son utilizadas como instalaciones de la alcaldía y algunas han sufrido modificaciones, sin embargo, conservan sus características principales (Uribe et al., 2014).

1.5 Estudio de caso: Casa consistorial de Cogua

Para este caso, la casa consistorial a trabajar se ubica en Cogua, Cundinamarca, la cual fue construida entre 1780 y 1800. Ésta ha sufrido modificaciones, pero aún conserva los pilares en madera sobre el corredor y el balcón, así como su simetría en la fachada (Ver Figura 5). (Uribe et al., 2014).

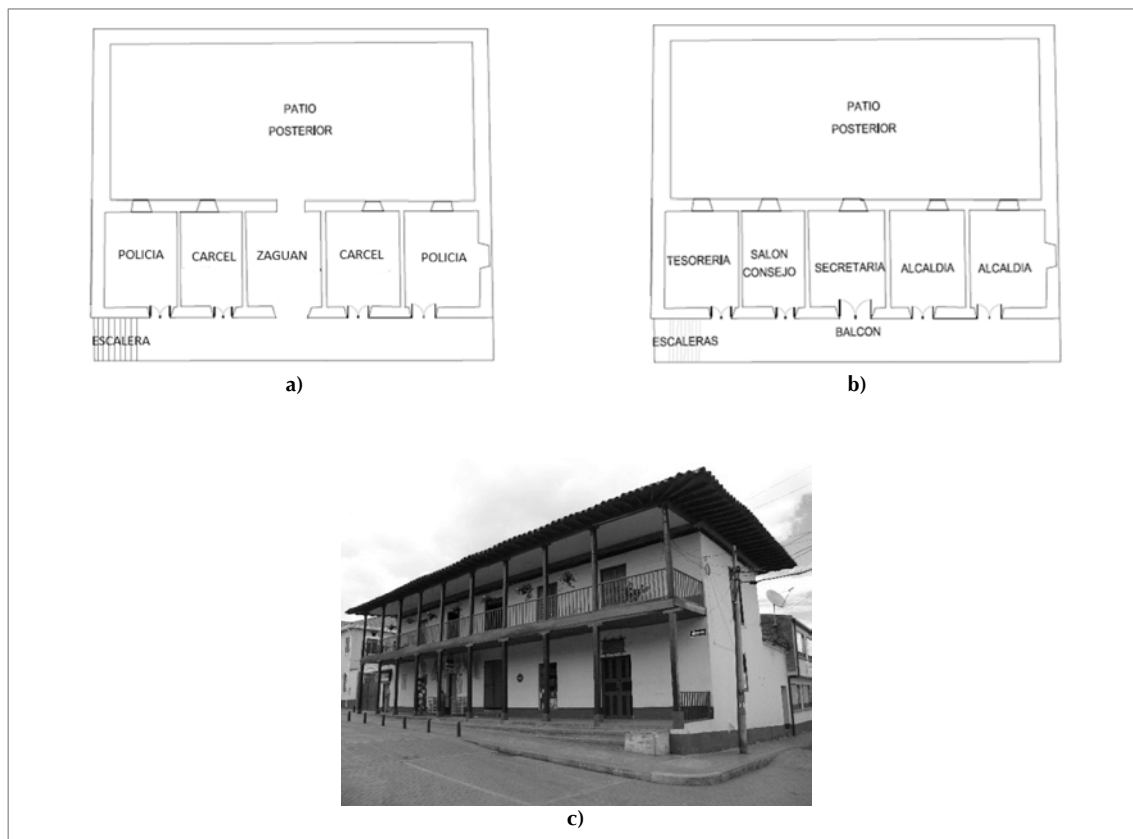


Figura 5. a) Planta primer piso casa Consistorial b) Planta segundo piso casa Consistorial c) Fotografía de la casa consistorial de Cogua Tomado de (Uribe et al., 2014)

Posee muros de 60, 70 y 80 cm de espesor y tiene columnas cuadradas de 15 cm ubicadas en la fachada principal de la casa en el primer y segundo piso sobre pedestales de 30 cm de alto y sección cuadrada de 20 cm. (Uribe et al., 2014)

Los muros cuentan con viga de coronación en madera en el entrepiso y en la cubierta, sin embargo, no existe información en la actualidad acerca de estas vigas (Uribe et al., 2014).

El cielo raso se encuentra suspendido de las vigas de entrepiso y cubierta, está conformado por chusque y tierra, y pañetado en cal, éste presenta múltiples fisuras. La cubierta está conformada por elementos de madera tipo cercha, su acabado es en encañado, tierra y teja de barro; ésta presenta grandes deformaciones y descomposición. (Uribe et al., 2014).

2. Metodología: ensayos de laboratorio

La metodología del estudio consistió en:

- Caracterización físico mecánica de los materiales: suelo y madera

- Caracterización mecánica de los muros reforzados mediante ensayos de tracción diagonal
- Construcción de modelos a escala 1:20 de la casa consistorial de Cogua (con y sin refuerzo) (Ver Figura 6).
- Ensayos en mesa vibratoria de los modelos construidos (con y sin refuerzo con maderas de confinamiento) previa instrumentación de los mismos.
- Interpretación de los resultados: niveles de fisuración y comparación de los desplazamientos de los muros de los modelos con y sin refuerzo con maderas confinamiento

2.1 Caracterización del Suelo

Al suelo usado para la construcción de los modelos se le hicieron ensayos de laboratorio para determinar: granulometría, índice de plasticidad, límite líquido, límite plástico, entre otros que ayudan a la interpretación del comportamiento del material. Los resultados correspondientes a los ensayos anteriormente mencionados se muestran en las Tablas 1 y 2).

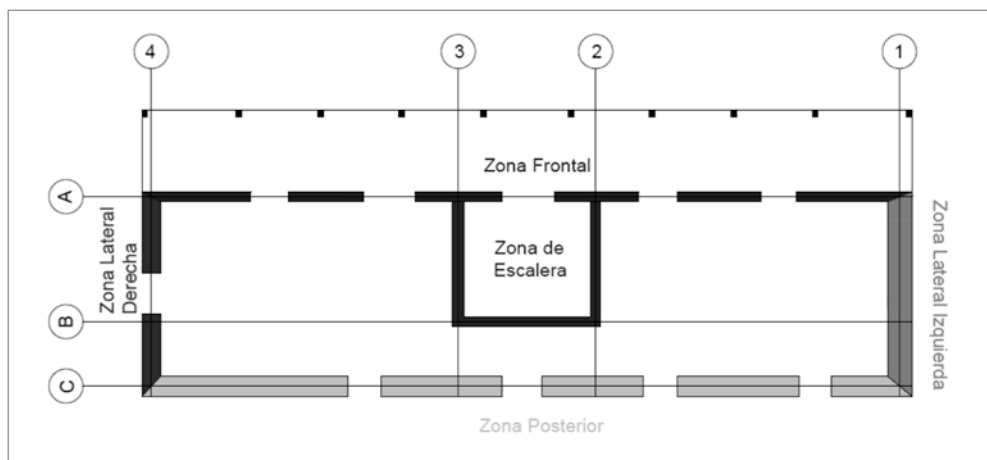


Figura 6. Esquema de muros del modelo a escala

Tabla 1. Características físicas del suelo

Gravedad Específica (g/cm ³)	Límite Líquido	Límite Plástico	Índice de Plasticidad	Clasificación SUCS	Contenido Humedad
1.68	23	13	10	SP	1%

Tabla 2. Granulometría del suelo

Granulometría		
Pasa Tamiz No. 200	Pasa Tamiz No. 40	Pasa Tamiz No. 4
1%	30%	66%



Teniendo en cuenta el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), se determinó el material como Arenoso Pobrementemente gradado (SP). Este tipo de suelo no cumple con los requisitos descritos para la construcción en tierra pues posee pocos finos. Por ello se adicionó arcilla para generar la cohesión necesaria que requiere el material. El material usado se estuvo conformado por: 5 partes de material pasa tamiz No. 10, 1 parte de arcilla, 1 parte de cal, una capa de fibra de fique sobrepuesta en la mezcla y agua hasta obtener la consistencia requerida.

Las rocas que componen el material principal de la cimentación pueden ser de tipo anguloso, redondeado o una mezcla de ambos y material arenoso el cual llena los vacíos, además de usar cal y canto como cementante (AIS, 2004). El material usado para la cimentación de los modelos a escala fue de 2 partes de material granular (pasa tamiz No. 4 y

retiene tamiz No. 10), ½ parte de arena, ½ parte de cal y agua hasta que se obtenga la consistencia adecuada.

2.2 Caracterización de la madera de confinamiento

A la madera que sería usada como elemento de refuerzo de los modelos de las casas en tierra se le realizó los ensayos descritos en la Tabla 3. La madera escogida fue cedro de acuerdo con las recomendaciones de (Ruiz et. al. 2014).

Los ensayos de compresión longitudinal se realizan sobre tres probetas hechas en cedro para determinar la resistencia de la madera. En la Figura 7 se presenta el montaje y en la Figura 8 se muestran los patrones de falla (principalmente por corte).

Los resultados principales de los ensayos de compresión se presentan en la Tabla 4.

Tabla 3. Ensayos de caracterización de madera de refuerzo

Ensayo	Norma
Compresión en fibras longitudinales	ASTM D143-09 (ASTM 2009)
Tensión en fibras longitudinales	ASTM D143-09 (ASTM 2009)



Figura 7. Montaje de probetas a compresión sobre la máquina universal

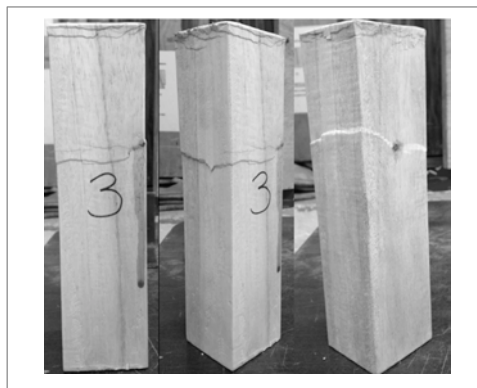


Figura 8. Tipo de falla de la probeta 3

Tabla 4. Resultados del ensayo de compresión longitudinal en maderas

	Resistencia en el límite proporcional (MPa)	Resistencia máxima (MPa)	Módulo de elasticidad (MPa)
Probeta 1	27.3	30	9763
Probeta 2	26.6	33	9823
Probeta 3	30.1	34	9510

Es importante anotar que la madera usada tuvo también una buena capacidad de ductilidad a la deformación unitaria ya que se deformó hasta 4% luego de haber alcanzado su carga máxima.

Se hicieron también tres ensayos de tensión de

acuerdo con las normas técnicas de referencia. En la Figura 9 se muestra el montaje y en la Figura 10 se presentan el tipo de falla.

Los parámetros mecánicos determinados del ensayo a tracción se muestran en la Tabla 5.

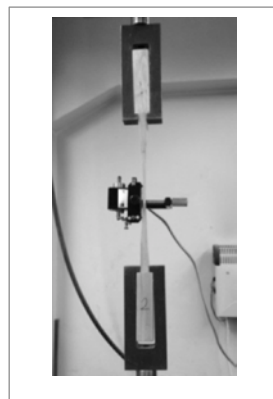


Figura 9. Montaje de probetas a tensión sobre la máquina universal

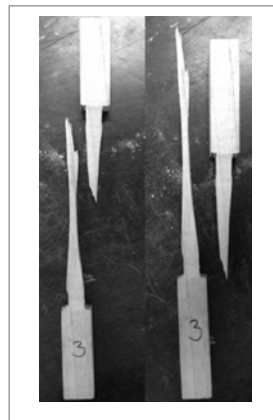


Figura 10. Falla de la probeta 3 a tensión

Tabla 5. Resultados del ensayo de tensión longitudinal en maderas

	Esfuerzo al límite de proporcionalidad (MPa)	Esfuerzo máximo (MPa)	Módulo de elasticidad (MPa)
Probeta 1	96.1	102	9885
Probeta 3	74.9	92	9518

A diferencia del ensayo a compresión, la deformación unitaria en el rango inelástico de la madera sometida a cargas de tensión es limitada y llegó hasta los 0.27%.

2.3 Resistencia de muros a tracción diagonal

Antes de implementar la alternativa de refuerzo con maderas de confinamiento, se hicieron ensayos de tracción diagonal. Este ensayo es típicamente usado para la caracterización de la mampostería ante cargas sísmicas. Para ello se construyeron 4 muros a escala 1:20 con las

dimensiones de un muro perteneciente a la casa consistorial con medidas de 150 mm x 150 mm x 20 mm. Dos de estos muros tenían refuerzo de maderas de confinamiento y dos no tenían refuerzo. Los muros de elaboraron con la tierra descrita anteriormente. Una vez finalizado el secado (1 mes) y con el refuerzo de maderas instalado, se ensayaron mediante la prueba de diagonal de acuerdo con la norma ASTM E519 (ASTM 2010) (ver Figura 11 y 12).

En todos los muretes se produjo una fisura en una de las diagonales (Ver Figura 13).

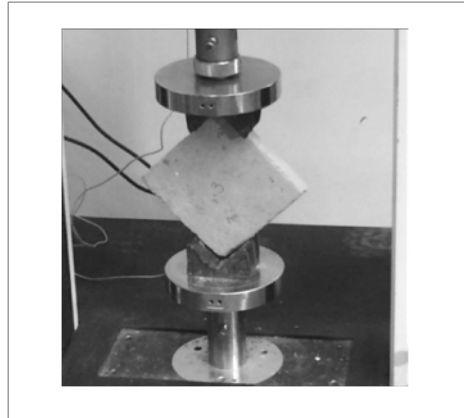


Figura 11. Montaje del murete sin refuerzo

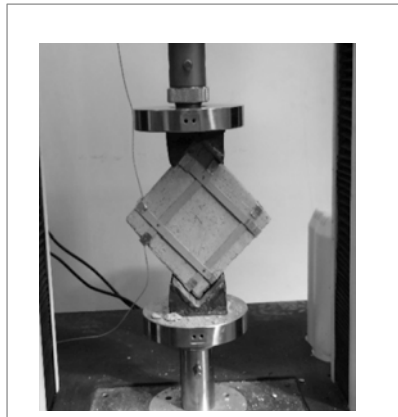


Figura 12. Montaje del murete con refuerzo

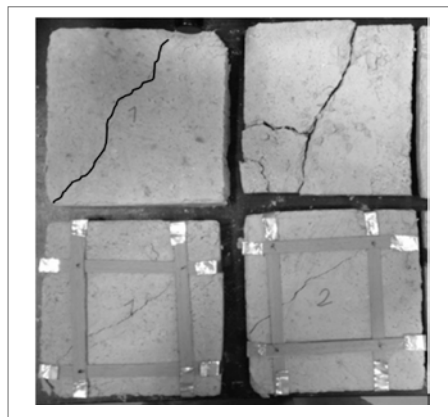


Figura 13. Fisuras presentadas en los muretes por tracción diagonal

SPANISH VERSION.....

Se evidenció en estas pruebas de tracción diagonal la capacidad de ductilidad a la deformación unitaria de los muros reforzados con las maderas de confinamiento. Esto se observa en la Figura 14 en los registros de esfuerzo cortante vs. deformación unitaria. A diferencia de los muros sin refuerzo, los muros reforzados mantuvieron su unidad una vez culminado el ensayo.

2.4 Construcción de los modelos de las casas consistoriales a escala

La cimentación consiste en vigas corridas en material de relleno compactado, conformando un entramado con

espesores variables, bajo los muros principales de la edificación. Es la misma cimentación para el modelo sin reforzar y el modelo reforzado (Ver Figura 15) y se usó el material descrito en el apartado de caracterización del suelo presentado en párrafos anteriores.

Posteriormente se armó la formaleta del primer piso forrada en papel *vinipel* para evitar adherencia al material, y se amarró entre bordes para no tener desajustes en el espesor de los muros. Se compactó el material en capas de aproximadamente 5 cm (Ver Figura 16).

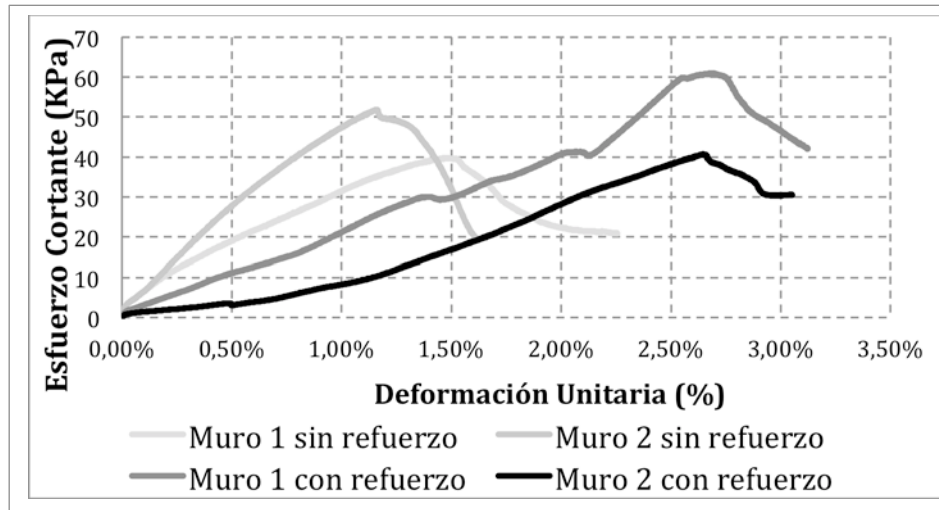


Figura 14. Esfuerzo Cortante vs Deformación Unitaria de muretes a tracción diagonal



Figura 15. Cimentación de la estructura



Figura 16. Proceso de compactación de los muros

Al terminar los muros del primer piso, se colocaron las vigas de madera del sistema de entrepiso para así seguir con el armazón y ajuste de la formaleta del segundo piso y repetir el proceso de compactación de los muros.

Después de 1 semana de haber terminado la compactación, se desencofraron los muros (Ver Figura 17) y posteriormente se pintaron tanto los muros como las viguetas y las columnas. Una vez realizado lo anterior se instaló la cubierta (Ver Figura 18).

Para la construcción de los muros del modelo reforzado con maderas de confinamiento se emplean los mismos pasos del modelo no reforzado.

Para el refuerzo con maderas de confinamiento se usó chapilla de cedro de 1 cm de ancho y 1 mm de espesor (a escala real sería de 20 cm de ancho y 20 mm de espesor).

El refuerzo se coloca de acuerdo con lo esquematizado en la Figura 3. Con base en la escala 1:20, se separan las maderas entre sí a 75 mm (1500 mm a escala real), a 30 mm de las esquinas y a 25 mm desde la cimentación (Ver Figura 19). De la misma manera el refuerzo se ubica a 20 mm del entrepiso y de la cubierta. En las uniones entre refuerzos verticales y horizontales se pasa un alambre de cobre calibre 24, el cual corresponde a pernos de acero en una escala real, al cual se le hace un nudo en ambos lados para asegurar que exista confinamiento de los muros. Igualmente, para asegurar que el refuerzo trabaje en conjunto, se unió en las esquinas tanto internas como externas, así como entre puertas y ventanas con lámina de latón que garantizaran esta unión (a escala real corresponden a platinas de acero) (Ver Figura 20).



Figura 17. Proceso de apertura de puertas y ventanas



Figura 18. Modelo sin refuerzo antes de la falla



Figura 19. Colocación de la madera de refuerzo



Figura 20. Unión entre esquinas, puertas y ventanas

Finalmente, se pintan las maderas para tener una mejor visibilidad de su comportamiento en el momento del ensayo de simulación sísmica (Ver Figura 21). Se instalaron tanto para el modelo con refuerzo como para el modelo sin refuerzo cargas en la cubierta y en el entrepiso para simular la masa sísmica (Ver Figura 22).

2.5 Instrumentación

La instrumentación del modelo durante los ensayos se realizó mediante tres deformímetros tipo LVDT y dos acelerómetros uniaxiales. Los deformímetros se ubicaron en

la zona superior de los muros para registrar los desplazamientos perpendiculares al plano de los mismos. Uno de los acelerómetros registró los movimientos en dirección longitudinal del modelo mientras que el otro registró las aceleraciones en dirección transversal de la casa consistorial. Esto teniendo en cuenta que el modelo se ubicó a 45 grados con respecto a la dirección de movimiento para generar simultáneamente flexión y cortante en los muros. La posición exacta de los LVDT's y los acelerómetros se encuentran en la Figura 23.

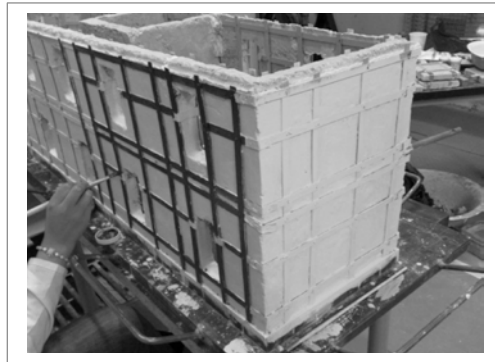


Figura 21. Proceso de pintura de las maderas de confinamiento



Figura 22. Modelo reforzado con cargas antes del sismo

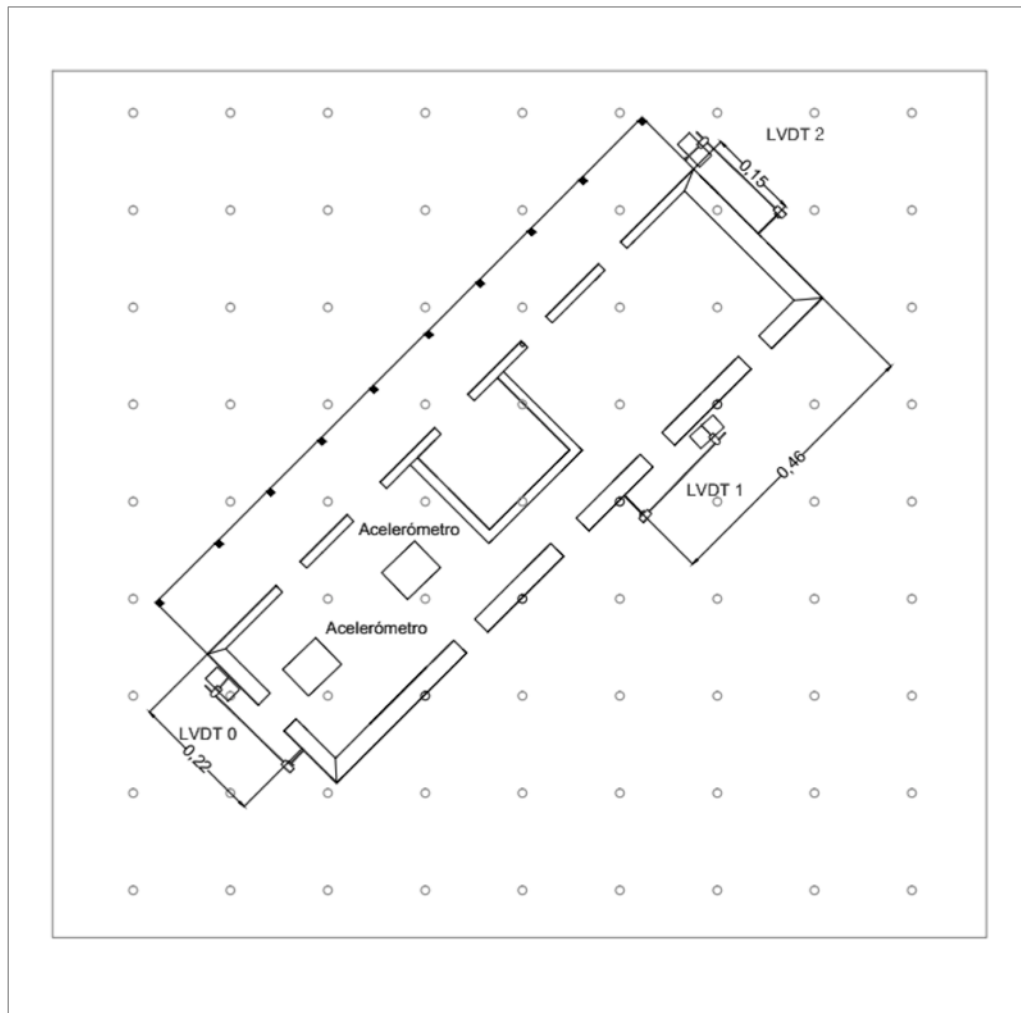


Figura 23. Ubicación exacta de la instrumentación

2.6 Pruebas en mesa vibratoria

Las pruebas dinámicas se realizan en la mesa vibratoria del Laboratorio de Pruebas y Ensayos de la Pontificia Universidad Javeriana, la cual tiene unas dimensiones de 1.5 x 1.5 m, con una capacidad de modelos hasta de 2 ton y una desplazamiento máximo de ± 12.5 cm: El sistema es accionado por un gato hidráulico con una capacidad de carga dinámica de 100 kN.

Para el montaje de ambos modelos, tanto no reforzado como reforzado, se ubicaron a un ángulo de 45° con respecto a la dirección del desplazamiento del terreno con el fin de garantizar que la fuerza inercial originada actuara sobre las direcciones longitudinal y transversal de la estructura y que el efecto ortogonal fuese tenido en cuenta.

Los modelos se someten al sismo de Tauramena

(Ver Figura 24 y 25) registrado en 1995 (Estación Rosal, Colombia) que corresponde a una señal característica que puede presentarse en Bogotá en terreno firme para un sismo que se genere en la falla frontal de la Cordillera Oriental de Colombia (Ruiz et al., 2014; Yamin et al., 2003).

Para tener en cuenta la escala del modelo, fue necesario modificar la escala de tiempo de la señal de entrada, para mantener la similitud en la fuerza dinámica de excitación (Yamin et al., 2003). Por ello en la Figura 25 se muestra el registro de desplazamiento contra el tiempo usado en la mesa vibratoria el cual tiene una duración sustancialmente inferior a la señal real pero generando niveles de aceleración acordes al del modelo a escala siguiendo lo establecido en (Harris y Sabnis, 1999).

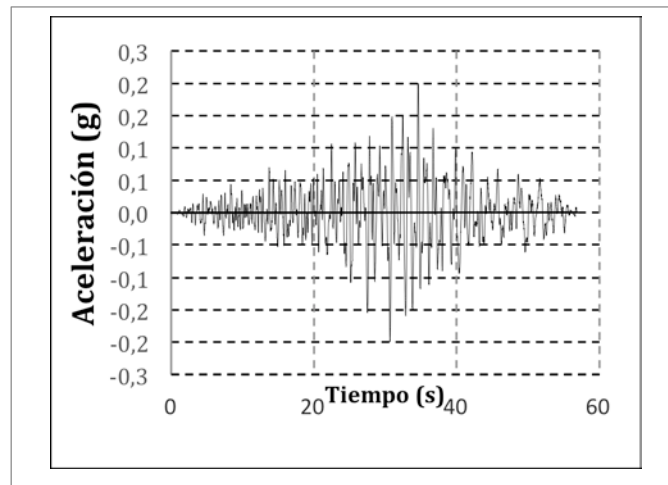


Figura 24. Señal sísmica de Tauramena

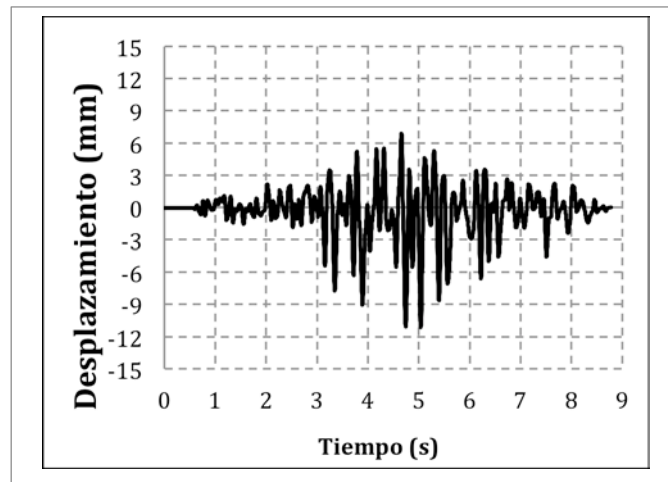


Figura 25. Desplazamiento del terreno para el sismo de Tauramena usado en los ensayos

3. Resultados y discusión

3.1 Modelo a escala sin refuerzo

Después de someter el modelo sin refuerzo a los movimientos de la mesa vibratoria, la casa presentó en la zona lateral izquierda, en la unión de los ejes 1 – C en el segundo piso, agrietamientos desde la cubierta (Ver Figura 26) los cuales alcanzaron el primer piso; adicionalmente se ocasionó una secuencia de grietas en la unión de los ejes A y 1, las cuales generaron vibraciones independientes de un

muro respecto a otro, produciendo el colapso del muro en su mayor parte como se muestra en la Figura 27.

En la zona lateral derecha, se fisuró el borde de los ejes C – 4 en el segundo piso y se registraron agrietamientos en los vanos de la ventana del segundo piso atravesando el muro de manera horizontal hasta el eje A, como se muestra en la Figura 28.



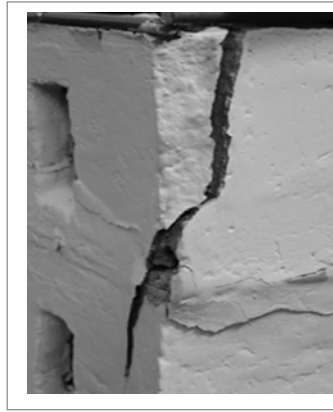


Figura 26. Agrietamiento en la zona lateral izquierda luego del evento sísmico

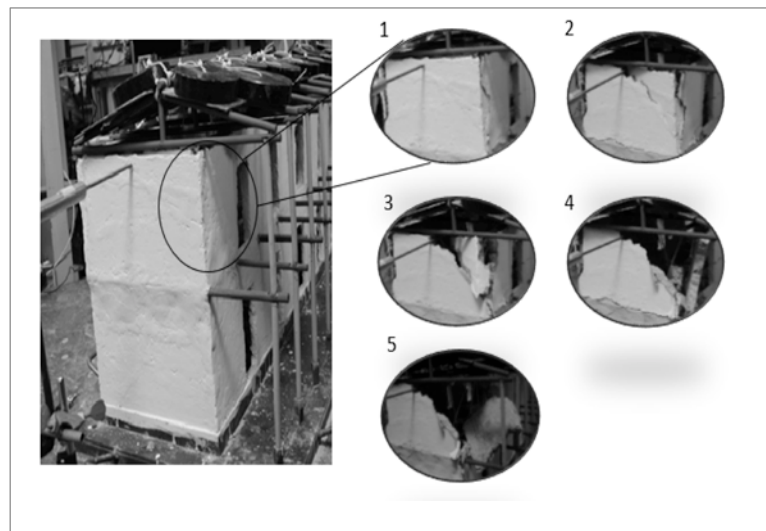


Figura 27. Secuencia de colapso en zona lateral izquierda



Figura 28. Agrietamiento en la zona lateral derecha luego del evento sísmico

SPANISH VERSION.....

En la zona posterior se generaron fisuras de forma vertical entre los ejes 3 y 4 en el eje C en el segundo piso y fisuras horizontales entre los ejes 2 y 3 del eje C, también en el segundo piso. A su vez, se presentaron fisuras en los vanos de las ventanas entre los ejes 1 y 2 del eje C, y se generó una fisura vertical en el primer piso en la unión de los ejes 1 – C desde el entrepiso hasta el inicio de la cimentación (Ver Figura 29).

En la zona frontal, se presentó un agrietamiento del

vano de la puerta del segundo piso entre ejes 1 y 2 del eje A, además, ocurrió el colapso del muro de la parte superior izquierda en la unión de los ejes A – 1 y entre los ejes A – 4, se generó una grieta desde la cubierta hasta el entrepiso (Ver Figura 30).

En la zona de escalera ocurrió el colapso de los muros de los ejes 2 y 3, generando la destrucción del entrepiso (Ver Ver Figura 31).

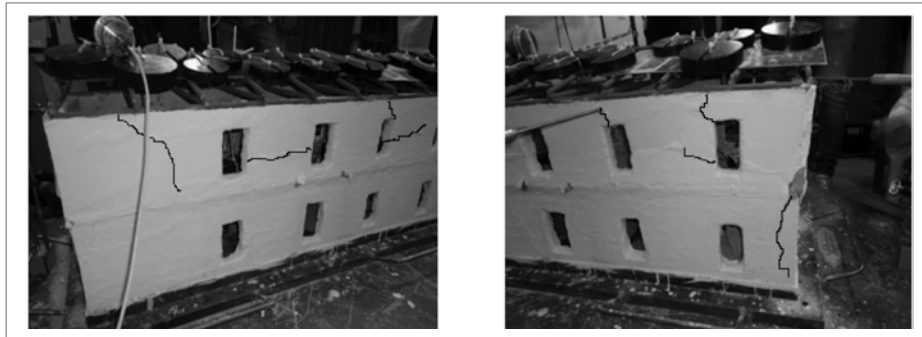


Figura 29. Agrietamientos producidos en zona posterior por el evento sísmico



Figura 30. Agrietamiento producidos en la zona frontal por el evento sísmico



Figura 31. Colapso de la escalera en el segundo piso



Las deficiencias de las estructuras hechas en tapia pisada antes la acción de un sismo hace que éstas sean muy vulnerables, ya que al no comportarse como diafragma rígido, los muros presentan vibraciones independientes uno respecto a otro. Cuando los muros se agrietan en sus extremos laterales, no existe un trabajo en conjunto y cada muro absorbe el sismo de manera independiente (Yamín et al., 2007), generando concentración de esfuerzos en la parte superior de la conexión entre muros ortogonales, haciendo que los muros queden sueltos vibrando libremente en sentido perpendicular a su plano.

Algunas de las fallas se producen por a falta de conexiones entre bloques de la estructura, los cuales tienden a separarse por la generación de grietas que van desde las esquinas o puntos de concentración de esfuerzos hasta las aberturas de puertas o ventanas (Yamin et al., 2003).

3.2 Modelo a escala con refuerzo

En este modelo se presentó menor cantidad de fisuras en todas las caras. Además, no se presentaron colapsos parciales o totales de ningún muro.

En la zona lateral izquierda, se presentó una fisura en el segundo piso del borde de la esquina entre ejes 4 – C (Ver Figura 32).

En la zona lateral derecha, en la parte inferior del muro entre los ejes 1 – C, se presentó una fisura diagonal (Ver Figura 33).

Para zona posterior se generaron tres fisuras, una en la esquina entre los ejes C – 4, otra en la parte superior del vano de la ventana que se encuentra entre los ejes 4 y 3 sobre el eje C, y una fisura entre los bordes de las ventanas ubicadas en los ejes 3 y 4, cruzando el entrepiso (Ver Figura 34).

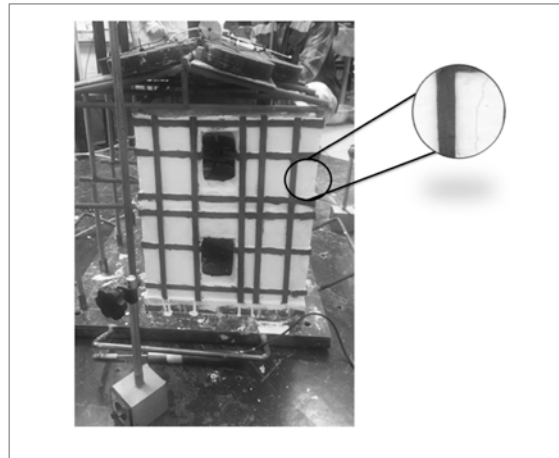


Figura 32. Zona lateral izquierda del modelo reforzado

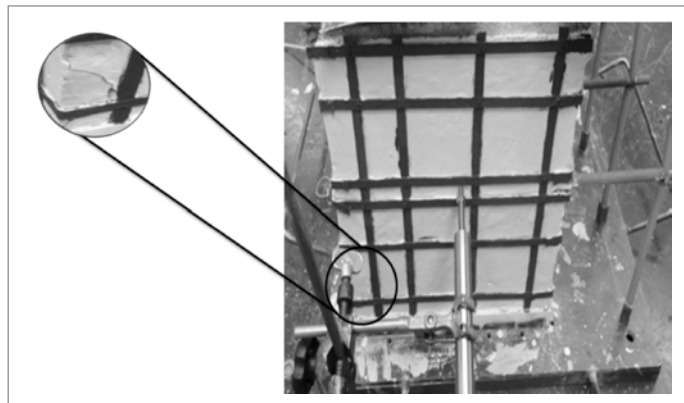


Figura 33. Zona lateral derecha del modelo reforzado

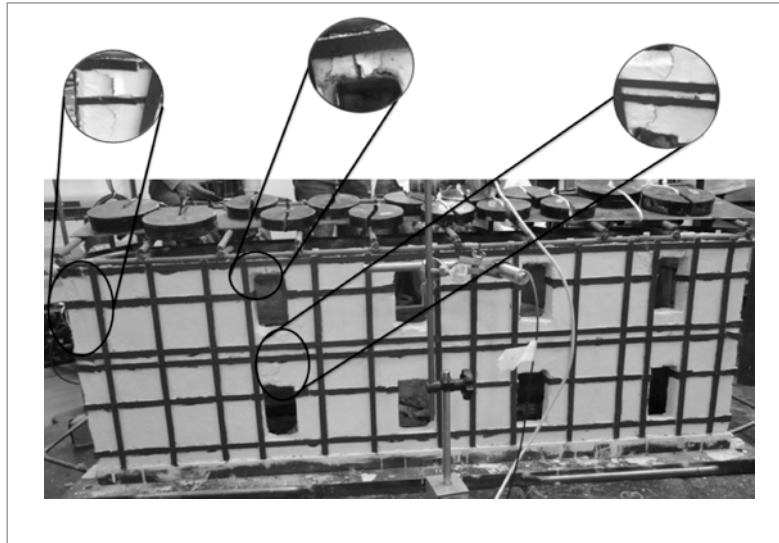


Figura 34. Zona posterior del modelo reforzado

Cabe resaltar que el uso de maderas de confinamiento evito la aparición de grietas en este modelo, teniendo en cuenta que únicamente se presentaron 5 fisuras que no comprometen la estabilidad de los muros.

3.3 Efecto e influencia del refuerzo sísmico en los desplazamientos de los muros

Los desplazamientos (relativos con respecto al movimiento del terreno) se obtuvieron de la medición de los LVDT's durante la aplicación del sismo, tanto para el modelo sin refuerzo como para el modelo con refuerzo. La numeración y ubicación de los LVDT's está dada en la Figura 23.

A nivel de cubierta, el registro del LVDT 0 ubicado en el muro lateral derecho, marcó un desplazamiento máximo de 7.06 mm en el modelo sin refuerzo y de 2.40 mm en el modelo con refuerzo (Ver Figura 35). En el modelo sin refuerzo, se registró un desplazamiento permanente de 1.40 mm al finalizar el evento sísmico, a diferencia del modelo reforzado en donde no se registraron desplazamientos

permanentes. Además, cabe resaltar la disminución del registro de desplazamientos que existe en el modelo con refuerzo, comparado con el modelo sin refuerzo.

El LVDT 1 ubicado en el muro posterior, registró un desplazamiento máximo de 21.15 mm en el modelo sin refuerzo y de 9.47 mm en el modelo con refuerzo (Ver Figura 36). En el modelo sin refuerzo, se registró un desplazamiento permanente de 4.90 mm al finalizar el evento sísmico. También se puede observar una disminución del registro de desplazamientos que existe en el modelo con refuerzo, comparado con el modelo sin refuerzo.

En el muro lateral izquierdo, en donde se ubica el LVDT 2, se registró un desplazamiento máximo de 13.94 mm en el modelo sin refuerzo y de 4.40 mm en el modelo con refuerzo (Ver Figura 37). En el modelo sin refuerzo, se registró un desplazamiento permanente de 4.47 mm al finalizar el evento sísmico. Para este caso, también existe una disminución en el registro de desplazamientos que existe en el modelo con refuerzo, comparado con el modelo sin refuerzo.

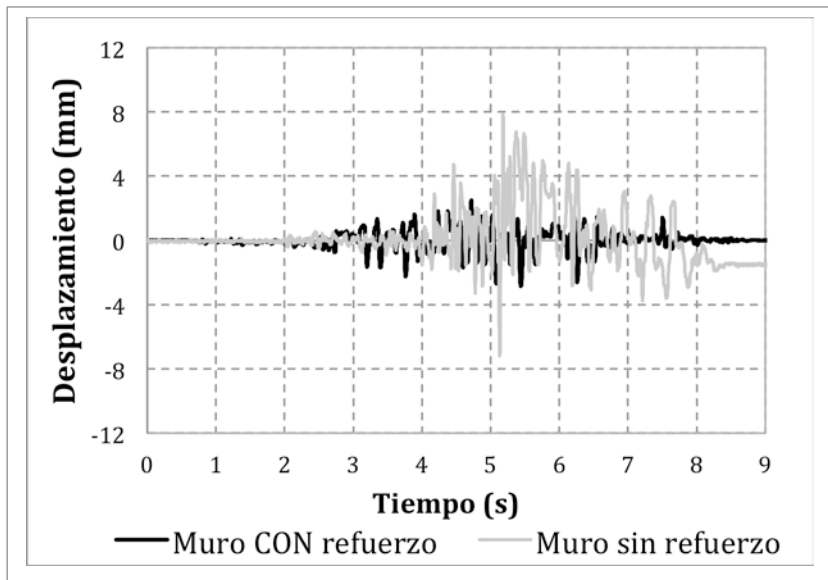


Figura 35. Desplazamientos medidos por el LVDT 0 en los modelos reforzado y no reforzado para la cubierta

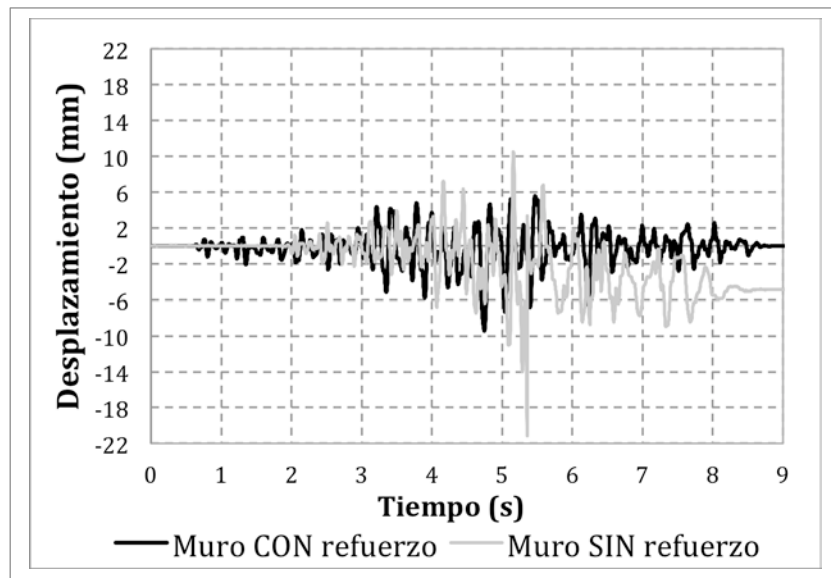


Figura 36. Desplazamientos medidos por el LVDT 1 en los modelos reforzado y no reforzado para la cubierta

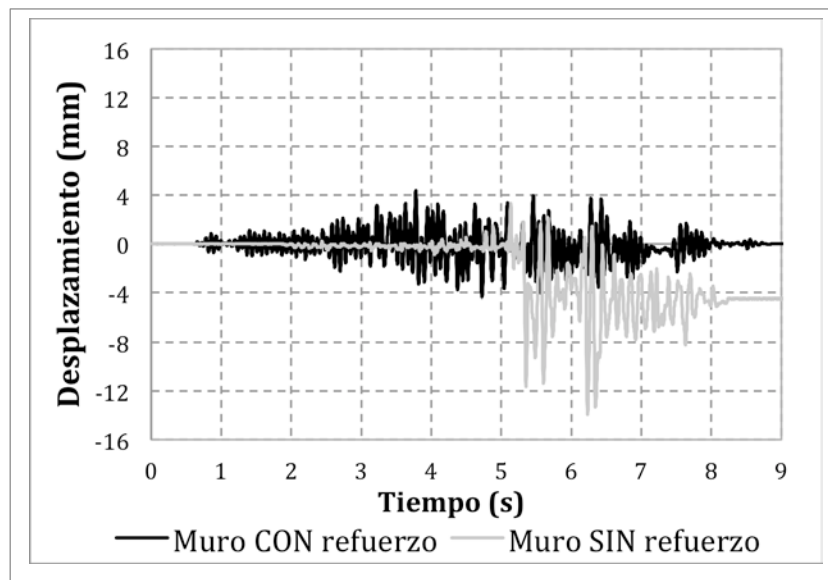


Figura 37. Desplazamientos medidos por el LVDT 2 en los modelos reforzado y no reforzado para la cubierta

4. Conclusiones

- Se evidenció una mejora de la casa consistorial de dos pisos con el uso de maderas de confinamiento como alternativa de refuerzo ya que la madera hace que los muros trabajen en conjunto e incrementa la capacidad de disipación de energía en la estructura.
- Al comparar los modelos con y sin refuerzo (Ver Tabla 6), se pudo observar un mejor desempeño sísmico en el modelo con refuerzo de maderas de confinamiento, mientras que el modelo sin refuerzo presentó varios colapsos, debidos a los esfuerzos de tensión, flexión y cortante a los que está sometida la estructura.

En términos de desplazamientos máximos relativos (Ver Tabla 7), las maderas de confinamiento redujeron hasta en un 69% los desplazamientos de los muros para mismo sismo de análisis.

Al haberse comprobado la eficiencia de las maderas de confinamiento, estas pueden ser usadas como alternativa de rehabilitación en las casas consistoriales construidas en tapia pisada, con el fin de preservar el patrimonio histórico y cultural colombiano.

Tabla 6. Cuadro comparativo de los modelos con y sin refuerzo

	Fisuras	Grietas	Colapsos
Sin refuerzo	8	9	1
Con refuerzo	6	0	0

Tabla 7. Desplazamientos relativos de la cubierta

Muro	Desplazamiento máximo sin refuerzo (mm)	Desplazamiento máximo con refuerzo (mm)	Reducción
Lateral Derecha	7.06	2.40	66%
Posterior	21.15	9.47	55%
Lateral Izquierda	13.94	4.40	68%



5. Agradecimientos

La investigación presentada en este artículo fue financiada por el Departamento de Ingeniería Civil, el Departamento de Arquitectura y la Vicerrectoría de Investigación de la Pontificia Universidad Javeriana. Todos

los ensayos fueron realizados en el Laboratorio de Pruebas y Ensayos del Departamento de Ingeniería Civil de la misma Universidad. El proyecto fue desarrollado por los grupos de investigación: *Estructuras y Construcción* y *GRIME*.

6. Referencias

- AIS (2004)**, Manual para la rehabilitación de viviendas construidas en adobe y tapia pisada. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.
- ASTM (2009)**, "Standard test methods for small clear specimens of timber." D143, West Conshohocken, PA.
- ASTM (2010)**, "Standard test method for diagonal tension (Shear) in masonry assemblages." E519, West Conshohocken, PA.
- Blondet M., Vargas J., Tarque N. y Iwaki C. (2011)**, Construcción sismorresistente en tierra: la gran experiencia contemporánea de la Pontificia Universidad Católica del Perú. *Informes de la Construcción*, 63(523): 41-50, doi: <http://dx.doi.org/10.3989/ic.10.017>.
- Chang G., Fiori C. y Schexnayder C. (2013)**, Rammed Earth: Construction Lessons from Experience. *Pract. Period. Struct. Des. Constr.* 18, 149–154. doi:10.1061/(ASCE)SC.1943-5576.0000152
- Day R. (1993)**, Performance of Historic Adobe Structure. *J. Perform. Constr. Facil.* 7, 164–169. doi:10.1061/(ASCE)0887-3828(1993)7:3(164)
- Harris H., Sabnis G. (1999)**, Structural Modeling and Experimental Techniques, Second Edition. CRC Press.
- López C., Ruiz D., Jerez S., Quiroga P. y Uribe J. (2007)**, Rehabilitación sísmica de muros de adobe de edificaciones monumentales mediante tensores de acero. *Revista Apuntes*, 20(2): 304-317.
- Ruiz D., López C., Unigarro S. y Domínguez M. (2014)**, Seismic Rehabilitation of Sixteenth- and Seventeenth-Century Rammed Earth-Built Churches in the Andean Highlands: Field and Laboratory Study. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 29(6): 04014144-1 - 04014144-17, doi: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0000605](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000605).
- Ruiz D., López Pérez C. y Rivera J.C. (2012)**, Propuesta de normativa para la rehabilitación sísmica de edificaciones patrimoniales. *Apunt. Rev. Estud. Sobre Patrim. Cult. - J. Cult. Herit. Stud.* 25, 226–239.
- Uribe C., Lopez C. y Ruiz D. (2014)**, Casas consistoriales en Cundinamarca. Estudio de caso de la casa del municipio de Cogua. *Revista Apuntes*, 27(1), 124-141. <http://dx.doi.org/10.11144/Javeriana.APC27-1.cccce>
- Wyrobisz A. (1980)**, La ordenanza de Felipe II del año 1573 y la construcción de ciudades coloniales españolas en america. *Estud. Latinoam.* 7, 11–34.
- Yamin L., Rodríguez A., Fonseca 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*, 18, 175–190.
- Yamin L., Phillips C., Reyes J. y Ruiz D. (2007)**, Estudios de vulnerabilidad sísmica, rehabilitación y refuerzo de casas en adobe y tapia pisada. *Revista Apuntes*, 20(2): 286-303.