

Reforzamiento estructural de edificaciones patrimoniales en tierra de 1 y 2 pisos: aplicación de la normativa AIS-610-EP-2017

Structural reinforcement of 1 and 2 story heritage earthen buildings: application of the AIS-610-EP-2017 regulation

Daniel Mauricio Ruiz Valencia*, Paula Rossana Galindo Jaramillo**, Anyi Lizeth Hernández Niño**, Juan Carlos Reytez Ortiz***, Manuela Restrepo Palacio**, Natalia Barrera Ospina**, José Gustavo Martínez Murcia**, Cecilia Teresa López Pérez**

RESUMEN

Los españoles que conquistaron la zona andina latinoamericana construyeron edificios en adobe y tapia apisonada. Por esta razón, el 90% de los edificios patrimoniales en Colombia están contruidos en tierra; la mayoría ubicados en zonas de amenaza sísmica intermedia y alta. Considerando que estas edificaciones son sísmicamente vulnerables, en 2019 se incluyó la norma AIS-610-EP-2017 en la reglamentación sismo-resistente del país (norma para reforzamiento sísmico de edificios patrimoniales en tierra). Utilizando esta norma, se analizaron dos edificios contruidos en el siglo XVI. Los muros fueron reforzados con placas de acero (o de madera). Los resultados indican que para cargas sísmicas solo el 24% de los muros sin refuerzo tendrían tensiones menores que la resistencia a la tracción de la tierra, mientras que en los muros reforzados este porcentaje es del 98%. Asimismo, las tensiones en los elementos de refuerzo (acero y madera) se mantienen por debajo de los límites permisibles.

Palabras clave: tapia apisonada; edificaciones patrimoniales; rehabilitación sísmica; vulnerabilidad sísmica; construcciones en tierra.

ABSTRACT

The Spaniards that conquered the Andean Highlands of Latin America constructed buildings with adobe and rammed earth. For this reason, Colombia has 90% of its heritage buildings made of earth; most of them located in high and intermediate seismic hazard zones. Considering that these constructions are vulnerable to earthquakes, in 2019, the standard AIS-610-EP-2017 was included in the national earthquake-resistant regulation (standard for seismic reinforcement of heritage earthen buildings). Using this standard, two buildings built in the 16th century were analyzed. The walls were reinforced with steel plates (or wooden elements). For seismic loads, the results suggest that only 24% of the unreinforced walls would have stresses lower than the tensile strength of the rammed earth. In contrast, in the reinforced walls this percentage is 98%. Likewise, the stresses in the reinforcing elements (steel and wood) are kept below the allowable limits.

Keywords: rammed earth; heritage buildings; seismic rehabilitation; seismic vulnerability; earthen constructions.

(*) Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá (Colombia), Universidad de los Andes, Bogotá (Colombia).

(**) Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá (Colombia).

(***) Universidad de los Andes, Bogotá (Colombia).

Persona de contacto/Corresponding author: daniel.ruiz@javeriana.edu.co, daniel.ruiz@uniandes.edu.co (D. Ruiz)

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4164-0357> (D. Ruiz); <https://orcid.org/0000-0001-7018-1810> (P. Galindo); <https://orcid.org/0000-0002-9179-2829> (A. Hernández); <https://orcid.org/0000-0003-0690-2956> (J.C. Reyes); <https://orcid.org/0000-0003-1409-1081> (M. Restrepo); <https://orcid.org/0000-0001-7030-7276> (N. Barrera); <https://orcid.org/0000-0003-1135-1060> (J. G. Martínez); <https://orcid.org/0000-0002-3974-4192> (C. López)

Cómo citar este artículo/Citation: Daniel Mauricio Ruiz Valencia, Paula Rossana Galindo Jaramillo, Anyi Lizeth Hernández Niño, Juan Carlos Reytez Ortiz, Manuela Restrepo Palacio, Natalia Barrera Ospina, José Gustavo Martínez Murcia, Cecilia Teresa López Pérez (2023). Reforzamiento estructural de edificaciones patrimoniales en tierra de 1 y 2 pisos: aplicación de la normativa AIS-610-EP-2017. *Informes de la Construcción*, 75(569): e488. <https://doi.org/10.3989/ic.90103>

Copyright: © 2023 CSIC. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento 4.0 Internacional (CC BY 4.0).

Recibido/Received: 23/06/2021

Aceptado/Accepted: 03/10/2022

Publicado on-line/Published on-line: 01/03/2023

1. INTRODUCCIÓN

Las construcciones en tierra hacen parte fundamental de la historia y el patrimonio cultural de Colombia (1, 2). Los españoles trajeron estas técnicas constructivas a la actual América Latina en la época de la colonia y la conquista del nuevo mundo. Es por esto que las construcciones de adobe y la tapia apisonada son la base fundamental de los centros históricos del país, en particular en la zona andina colombiana. Sin embargo, sus características constructivas y las deficientes propiedades mecánicas de los materiales con los que están construidas las edificaciones patrimoniales hacen que tengan una alta vulnerabilidad sísmica. Entre las características deficientes se tienen: altos pesos de entrepisos y de cubierta, irregularidades en planta y altura, falta de conexión adecuada entre los muros, ausencia de diafragmas rígidos, entrepisos muy flexibles, inadecuada estructuración de la cubierta, ausencia de un cementante de buenas prestaciones mecánicas (3-6). La edad de las edificaciones y los diversos factores ambientales (por ejemplo, susceptibilidad a la erosión), también contribuyen a su alta vulnerabilidad, ya que tienden a desintegrarse por la lluvia o por el agua de infiltración. Por todo lo anterior, durante algunos eventos sísmicos las edificaciones patrimoniales construidas en tierra han colapsado, generando pérdida de vidas humanas, económicas, culturales y patrimoniales (7). En el caso colombiano, aproximadamente el 86% de la población vive en zonas de amenaza sísmica intermedia y alta (8) correspondientes a la zona Andina del norte de suramérica. Es precisamente esta zona montañosa en donde se encuentra la mayor concentración de edificaciones construidas en tierra y donde han ocurrido terremotos que han afectado las edificaciones patrimoniales (varias de ellas construidas en adobe y/o tapia apisonada). Ejemplo de estos seísmos son el terremoto de 1999 de la zona cafetera de Colombia (Mw 6.2), el terremoto de Popayan del año 1983 (Mw 5.5) el terremoto de Cúcuta del año 1875 (Mw 7.5) y el seísmo de la mesa de Los Santos en 2015 (Mw 6.4). Durante el terremoto que afectó el sur del país en 1983 (la zona de Popayán), las edificaciones fueron seriamente afectadas (muchas de ellas en tierra); por lo cual, se desarrolló en el país una norma sismo resistente. Sin embargo, durante casi 4 décadas posteriores al sismo de Popayán, no se reglamentó la construcción de edificaciones nuevas en tierra, ni tampoco se emitieron leyes que definieran alternativas de rehabilitación viables compatibles con la tierra y con la arquitectura patrimonial.

Durante estas últimas décadas diversos, investigadores han propuesto alternativas de rehabilitación de edificaciones en tierra, donde se espera preservar al máximo la arquitectura original tratando de conservar el aspecto general de la construcción (6). En países como Perú, México y Colombia se han realizado varias investigaciones basadas en el reforzamiento mediante mallas y mortero de cal (6, 9-11). La rehabilitación con mallas proporciona una mayor ductilidad al sistema estructural, donde se prolonga la vida de la estructura durante un sismo y retarda la ocurrencia del colapso (6). No obstante, los resultados evaluados en la literatura técnica y científica sugieren que existe otra alternativa de rehabilitación que ofrece mejores resultados estructurales. Dicha alternativa se basa en entramados para el confinamiento de los muros en tierra, mediante elementos prismáticos de madera o de acero (entramados).

Algunos estudios de rehabilitación con entramados de madera se pueden encontrar en las referencias (6, 12-15). Está

opción de reforzamiento muestra una mejora significativa del comportamiento global de la estructura en tierra, donde se evidencian menos grietas, menores daños y menores desplazamientos, en comparación con otras alternativas. Adicionalmente, también se ha encontrado en la literatura que el reforzamiento mediante placas de acero (entramados de acero), aumenta la capacidad de ductilidad al desplazamiento de los muros en tierra de edificaciones patrimoniales, asegura la reducción de daños, disminuye posibles desplazamientos permanentes y retrasa el colapso de las edificaciones minimizando así posibles lesiones y pérdida de vidas (16). Es importante considerar que algunos de los autores del presente artículo han realizado en pasadas investigaciones ensayos sobre modelos a escala real en donde se ha verificado el buen desempeño sísmico de los muros de tierra reforzados con ambos sistemas de refuerzo (con placas de acero y con elementos de madera). Para ello se han realizado pruebas con carga paralela al plano del muro y ensayos de simulación sísmica en mesa vibratoria (16). Toda esta experiencia en pruebas experimentales sustenta la normativa presentada en la referencia (7). No obstante hay aspectos aún por evaluar como por ejemplo el análisis de la durabilidad de la madera en el refuerzo estructural de edificaciones en tierra debido a los eventuales problemas de humedad (en el caso del acero se ha propuesto el uso de recubrimientos anticorrosivos).

El reforzamiento mediante placas de acero (de 100 mm de ancho y 6.35 mm de espesor) tipo A36 (tensión de fluencia

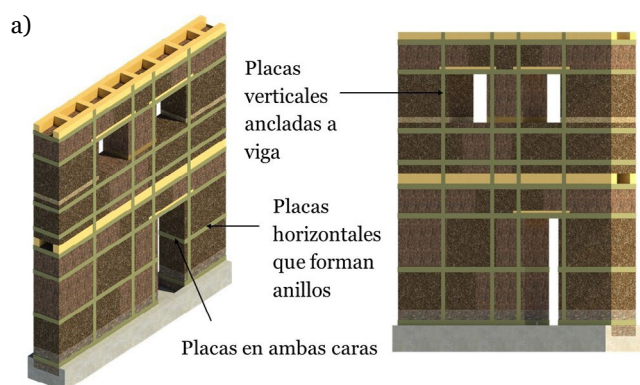


Figura 1. a) Esquema de reforzamiento con placas de acero en un muro de dos niveles de una edificación en tierra, b) fotografía de una edificación patrimonial en tierra en proceso de reforzamiento con placas de acero (fuente: los autores).

de 240 MPa) consiste en instalar estos elementos en ambas caras del muro (Figura 1a). Las placas se configuran en un sistema en donde los elementos horizontales generan anillos alrededor de los muros y los elementos verticales resisten tensiones de flexión y cortante. Se ha encontrado que este sistema es eficiente en el control de daños en los vanos. La máxima distancia horizontal o vertical entre elementos de acero es de 1200 mm (típicamente 1000 mm) y se deben anclar mediante pernos pasantes espaciados máximo cada 600 mm (típicamente 500 mm) (16). En la Figura 1b se presenta una fotografía de una edificación patrimonial en tierra en proceso de reforzamiento con placas de acero.

Por su parte, los elementos de madera (de 180 mm de ancho, 40 mm de espesor) se instalan en los muros por ambas caras y el refuerzo también se conecta mediante pernos pasantes. Las maderas también se instalan en sentido vertical y horizontal máximo cada 1500mm como se observa en la Figura 2a (típicamente 1000 mm), adicionando maderas en las esquinas y en los vanos de las aberturas como puertas y ventanas. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que la distancia entre los dos primeros anillos horizontales en la base de los muros normalmente es inferior a 1000 mm, tanto para maderas como para placas de acero.

El procedimiento de reparación y reforzamiento con ambas técnicas (maderas o placas de acero) es similar y se bosqueja en la Figura 2. Dicho proceso inicia con el retiro de la costra de cal (en caso de haberla) y la posterior reparación de grietas mediante un material de inyección consistente en un mortero de cal y arena en una proporción de mezcla de 1:3. Posteriormente, y para el caso del sistema con elementos de madera se hace un cajeado en el muro para empotrar los elementos de refuerzo (Figura 2a). Después de la reparación de las grietas, se hacen perforaciones pasantes aproximadamente cada 500 mm para instalar las barras de acero de 9,53 mm de diámetro. Dichas barras permiten conectar los elementos de refuerzo de ambas caras del muro, bien sea placas de acero (con soldadura) o elementos de madera (tuercas). No se usa un relleno de contacto entre los elementos de refuerzo y el muro preexistente, sino que la compatibilidad de deformaciones entre el muro y la madera (o las placas de acero) se garantiza mediante estos pernos pasantes. Asimismo, es importante tener en cuenta que los elementos de refuerzo se ubican en zonas de concentración de tensiones, como las aberturas de puertas y ventanas, la cubierta o cerca de la cimentación. De manera complementaria, la conexión de los elementos de refuerzo con las vigas de madera de la cubierta o con los dinteles se realiza con tornillos de 12,7 mm de diámetro. Finalmente, es usual que los arquitectos/ingenieros restauradores cubran el sistema de refuerzo con un pañete con malla metálica el cual le da el acabado final a la superficie del muro reforzado. Es importante anotar que no se considera la costra de cal en el comportamiento de los muros.

Por otro lado, la ausencia de diafragma rígido genera que los muros de edificaciones patrimoniales en tierra sin refuerzo tengan que soportar cargas perpendiculares a su plano lo cual combinado con una baja resistencia a la flexo-tracción induce fallas frágiles. Es por esto que el sistema de diafragma con vigas de madera y/o concreto mejora al desempeño global de la estructura (2, 15, 17). Así mismo este diafragma debe complementarse con una adecuada conexión con el refuerzo de los muros.

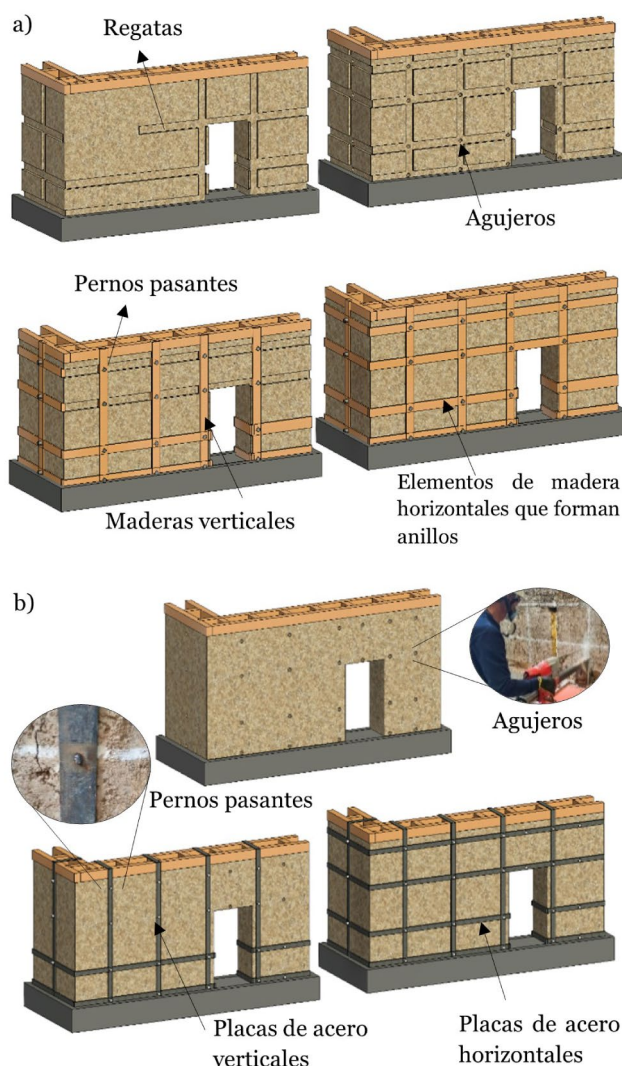


Figura 2. Proceso de reforzamiento con a) con entramados de madera b) placas de acero.

Todas estas alternativas de rehabilitación se incluyeron en la normativa para la rehabilitación sísmica de edificaciones patrimoniales AIS-610-EP-2017 (7). Este documento se vinculó a el reglamento colombiano de construcciones sismo-resistentes NSR-10 (18) por el decreto de los Ministerios de Cultura y Vivienda 2113 de 25 nov del 2019. Dentro de AIS-610-EP-2017 se resaltan los entramados con placas de acero o con maderas como alternativas de rehabilitación que permiten la disipación de la energía sísmica con un factor de reducción de la fuerza sísmica de 2.5.

2. METODOLOGÍA

Con el fin de aportar a la solución del problema sísmico de las edificaciones patrimoniales en tierra (en este caso tapia apisonada), el presente documento busca evaluar estructuralmente el reforzamiento con entramados (placas de acero y elementos en madera), complementado en todos los casos con un diafragma rígido usando las recomendaciones de análisis y modelización de la norma AIS-610-EP-2017. Para ello, se planteó realizar una rehabilitación mediante entramados de placas de acero espaciados a 3 diferentes distancias entre sí (0,50 m, 1 m y 2 m), complementando el reforzamiento con un diafragma rígido. Así mismo, se bus-

có realizar una comparación con la alternativa de entramados de madera con una separación constante de 1.0 metros. Para la metodología se plantearon las siguientes etapas:

- Levantamiento de información planimétrica de edificaciones en tierra de 1 y 2 pisos en la zona andina colombiana.
- Construcción de modelos digitales tridimensionales (Revit ®) de edificaciones patrimoniales en tierra para realizar análisis estadístico de variables geométricas.
- Casos de estudio de dos edificaciones (1 y 2 pisos) representativas de la arquitectura en tierra patrimonial de la zona Andina.
- Análisis y modelización numérica de edificaciones en tierra con y sin reforzamiento (placas de acero y entramados de madera).
- Estimación de costos de construcción de las alternativas de refuerzo implementadas.

3. INFORMACIÓN PLANIMÉTRICA Y MODELOS DIGITALES DE EDIFICACIONES PATRIMONIALES EN TIERRA

La caracterización estructural (geométrica) se llevó a cabo para 33 casas patrimoniales en tierra de 1 y 2 pisos a partir del análisis de la tipología de muros, de vanos y de entrepisos. Con la información planimétrica recopilada se construyeron modelos digitales en Revit (Autodesk ®) y, posteriormente, con estos modelos se obtuvo información estadística de las características geométricas de las edificaciones patrimoniales en tierra de 1 y 2 pisos.

La modelización 3D de las edificaciones a partir de la planimetría, permitió la representación fiel de la edificación original en cuanto a distribución de elementos, dimensiones y geometría. Un modelo BIM de estas edificaciones permite la actualización de los datos del inmueble de diferentes fuentes, reportar las patologías de las edificaciones y gestionar propuestas de mantenimiento y rehabilitación de este tipo de bienes de interés cultural.

A manera de ejemplo, en la Figura 3, se muestran en diferentes colores los espesores de muro encontrados en una edificación de dos niveles en tierra. Complementariamente, a partir del código QR de dicha Figura 3 el lector puede apreciar una vista estéreo panorámica de la edificación de dos pisos. Por su parte, en la Figura 4 se ilustran algunas características de una edificación de un nivel encontrada en la zona Andina colombiana, y con el código QR se puede ver una vista estéreo panorámica de la edificación.

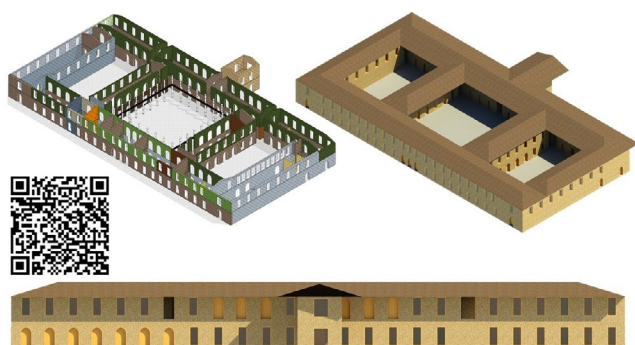


Figura 3. Modelo BIM de edificación de dos niveles patrimonial en tierra – Modelo en Revit a partir de información recopilada.

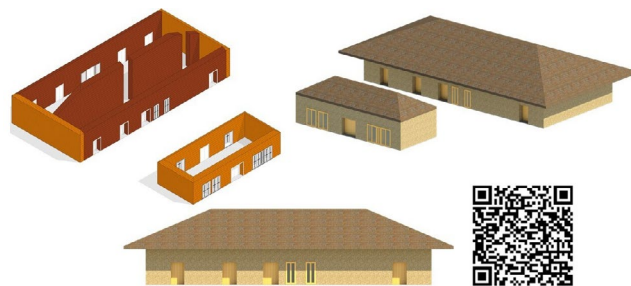


Figura 4. Modelo BIM de edificación de un nivel patrimonial en tierra– Modelo en Revit a partir de información recopilada.

Para el caso de los muros se realizó un análisis de densidad y espesor promedio en cada uno de los niveles de las edificaciones. En total se analizaron 17 edificaciones de un nivel y 16 de dos niveles. Luego, se elaboraron diagramas de cajas (*boxplots*) que muestran las medianas y los percentiles 25 y 75 de las muestras estadísticas de las 33 casas como se muestra en las Figura 5 y Figura 6 para casas de uno y dos pisos, respectivamente. En particular se determinó que el espesor promedio de muros para casas de dos niveles es 0.695 m y para un piso 0.619 m. Por su parte, las casas de dos niveles presentan alturas promedio de 3.518 m en el primer nivel y 3.014 m en el segundo nivel; mientras que, las casas de un piso tienen una altura promedio de 3.105 m.

Del análisis de muros en ambos tipos de edificaciones se puede inferir que las casas de un nivel poseen un espesor menor de muro debido a las menores cargas que asume el sistema, pero, por otro lado, la altura promedio se mantienen bajo el mismo rango para los dos tipos de edificaciones. El análisis de la tipología de vanos permitió eva-

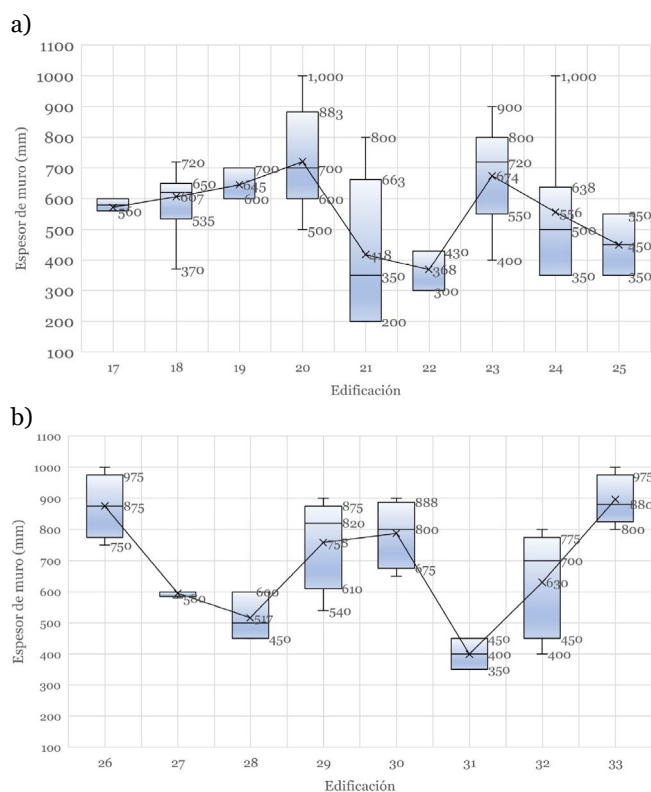


Figura 5. a) y b). Boxplot análisis estadístico: Espesor de muros en casas patrimoniales en tierra de un nivel.

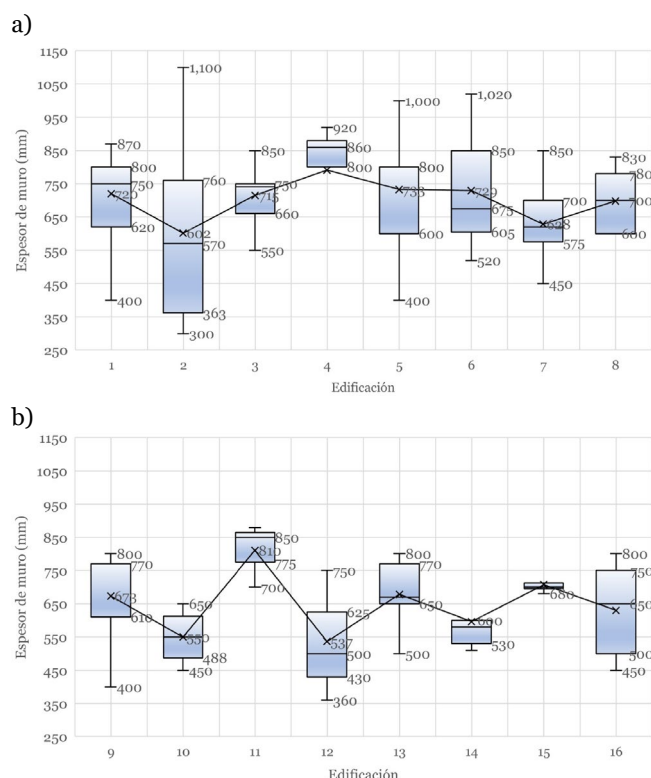


Figura 6. a) y b) Boxplot análisis estadístico: Espesor de muros en casas patrimoniales en tierra de dos niveles.

luar el porcentaje de área que el vano (puertas y ventanas) representa en el área del muro en tierra, siendo este un indicador determinante en el comportamiento sísmico. De las viviendas analizadas se concluye que en promedio el 10.90% del área de los muros estructurales son vanos. Por su parte, del análisis del entrepiso, se estableció que típicamente está compuesto por vigas de coronación y vigas cargueras de sección rectangular entre los 15 cm y 20 cm, las cuales se encuentran espaciadas entre 0.6 m y 1 m.

4. CASOS DE ESTUDIO DE DOS EDIFICACIONES (1 Y 2 PISOS) REPRESENTATIVAS DE LA ARQUITECTURA EN TIERRA PATRIMONIAL DE LA ZONA ANDINA

De las 33 edificaciones patrimoniales en tierra analizadas, se escogieron dos, una de un piso y otra de 2 niveles cuyas características geométricas se encuentran en la zona central de la estadística recopilada. Estas edificaciones, están localizadas en una hacienda del siglo XVI de la zona andina colombiana. Según la información histórica recolectada, estas edificaciones se construyeron durante el proceso de colonización, en el cual se transformó el modelo indígena por un modelo de ordenamiento territorial hispano (19). Cuenta la historia que la Compañía de Jesús a comienzos del siglo XVII fue la encargada de adoctrinar los pueblos de indios de la zona andina bajo la estructura de las misiones en América. En este contexto, se recibieron las tierras en las que se funda la hacienda estudiada (20).

La hacienda está compuesta por dos casas de estructura colonial, un amplio empedrado y jardines. La construcción principal es un volumen de dos pisos de altura, de planta rectangular con cubierta a cuatro aguas. Adosada a éste, so-



Figura 7. Hacienda (edificación patrimonial en tierra) en la zona Andina Colombiana de 1 piso. Tomado de referencia (22).



Figura 8. Hacienda (edificación patrimonial en tierra) en la zona Andina Colombiana de 2 pisos. Tomado de referencia (22).

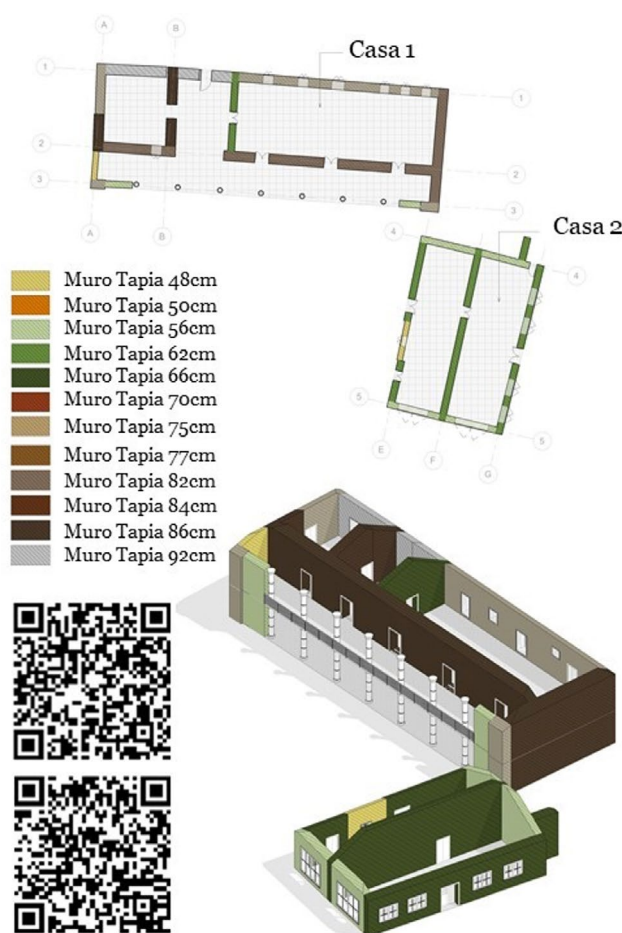


Figura 9. Vista en planta Hacienda (edificación patrimonial en tierra) de la zona Andina Colombiana– Modelo en Revit ® a partir de información recopilada.

bre el costado norte, se encuentra otra construcción o volumen secundario, de un piso de altura también con cubierta a cuatro aguas (Ver Figura 7 y Figura 8). Las dos construcciones conforman el patio rectangular en piedra a través del cual se accede a la casa desde su extremo sur (21).

A partir de la información recopilada fue posible recrear la planta y la volumetría de la hacienda junto con su caracterización estructural, lo cual se muestra en la Figura 9. Con el código QR se puede acceder a una vista 360° de las dos edificaciones de la hacienda.

5. ANÁLISIS DE EDIFICACIONES EN TIERRA SIN REFORZAMIENTO

Para analizar cómo se comporta la estructura sin reforzamiento, se determinaron índices de sobre-tensión individual de los elementos de la edificación, comparando la demanda con la capacidad. Para esto se hacen verificaciones de tensiones/fuerzas dentro y fuera del plano de muros y machones. En la Figura 10 se muestra la convención de las fuerzas internas de los muros a ser analizados. Así mismo, se obtienen índices que permitan establecer si hay una tendencia al volcamiento de los muros y finalmente obtener un índice de flexibilidad general de la edificación. Para llevar a cabo lo anterior, se usa el procedimiento descrito en el documento AIS 610-EP-2017 (7). Para la resistencia a la compresión de muros sometidos a carga axial, se usan las ecuaciones [1] y [2]:

$$[1] \quad P_{nz} = 0,80 f'_m A_m R_e$$

$$[2] \quad R_e = 1,18 - 0,03 \frac{h}{t} \leq 1,0$$

donde: f'_m es la resistencia de muros de tierra sin reforzamiento, A_m el área nominal del sentido a evaluar, R_e el coeficiente de reducción por excentricidad (obtenido con la ecuación [2] (tomada del documento AIS-610-EP-2017 (7))). h es la altura y t el espesor del muro. La resistencia a la tensión de muros sometidos a carga axial se calcula con la ecuación [3].

$$[3] \quad P_n = f_r A_m$$

En esta última expresión, f_r es el módulo de rotura de la tapia apisonada.

Para determinar la resistencia cortante de muros y machones, se utilizó la expresión [4].

$$[4] \quad V_{nx} = f_v A_{mx} + 0,30 P_{uz}$$

En esta ecuación P_{uz} es la fuerza axial sobre el muro y f_v es la resistencia al cortante de la tapia apisonada. Finalmente, para conocer la resistencia a flexión de la sección alrededor de los ejes x , y & z , se utilizaron, respectivamente, las ecuaciones [5, 6 y 7].

$$[5] \quad M_{ny} = \frac{P_{uz} b_x}{3\phi}$$

$$[6] \quad M_{nx} = \frac{P_{uz} t}{3\phi}$$

$$[7] \quad M_{nz} = \frac{b_z t^2}{6} \left[f_r + \frac{P_{ux}}{A_{mx}} \right]$$

En estas últimas expresiones, b_x es el ancho de la sección del muro en dirección x , ϕ es el coeficiente de reducción de resistencia y t es el espesor de la sección del muro. b_z se puede tomar igual a 1000 mm.

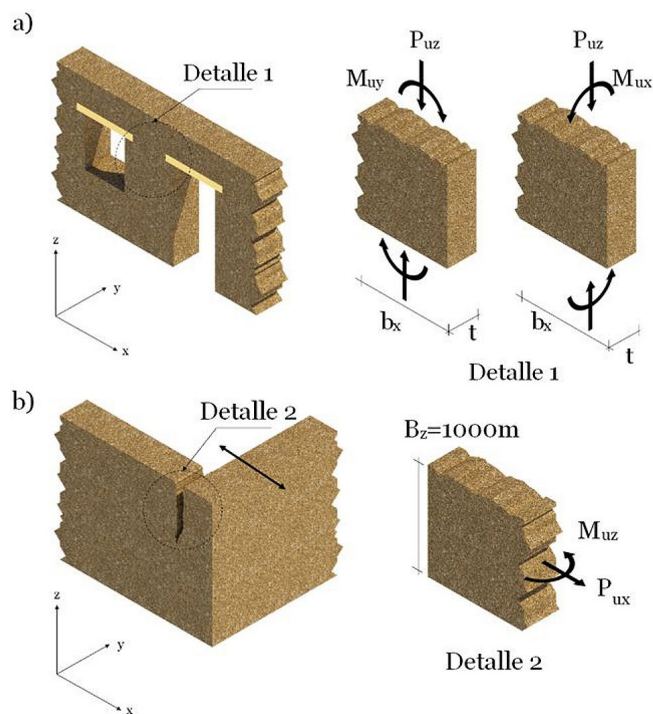


Figura 10. Convención y direcciones de las acciones externas sobre los muros en tierra. a) Muro en tierra y detalle 1 con fuerzas internas b) Esquina del muro en tierra y detalle 2 con fuerzas internas.

Para realizar el análisis se tomaron tramos de muros entre vanos, tanto para la vivienda de un piso como para la vivienda de 2 pisos. Las viviendas de uno y dos niveles (con y sin refuerzo) se modelizaron también con los elementos finitos y las propiedades definidas en la Tabla 1. Se definió un análisis de cargas, teniendo en cuenta las recomendaciones del título B del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 (18). De la misma manera se incluyeron las recomendaciones dadas en el manual para la rehabilitación de viviendas construidas en adobe y tapia apisonada (7). Para el entrepiso (edificación de dos pisos) se usaron viguetas de madera con una carga muerta impuesta de 9.3 kN/m². Así mismo se usó una carga viva correspondiente a la de una edificación que se utiliza para reuniones (5 kN/m²). La carga de la cubierta fue del orden de 8.9 kN/m², la cual incluye tejas de barro, mortero de tierra de pega y demás componentes de una cubierta tradicional de una edificación histórica en tierra de la zona andina. Adicionalmente, se utilizaron las combinaciones de carga de la NSR-10 (18) y se sometieron al efecto de un sismo de acuerdo con el espectro de diseño de la Figura 11.

El análisis de la edificación sin refuerzo se llevó a cabo mediante dos métodos distintos:

- Análisis individual de cada uno de los muros/machones identificados como un segmento vertical limitado

por sus costados por aberturas o por una abertura o un borde (7).

- Modelación por el método de los elementos finitos.

Tabla 1. Definición de elementos en programa de elementos finitos para la vivienda de 1 piso y 2 pisos.

Elemento	Elemento para modelación en SAP 2000	Material	Resistencia a Tracción (T) y/o Compresión (C) (MPa)	Módulo Elasticidad (MPa)	Peso Unitario (kN/m ³)
Viga de coronación	Frame	Concreto	21 (C)	21500	24
Muros de Tierra	Solid	Tierra	0.025 (T) 0.6 (C)	70	19.5
Columnas	Frame	Piedra	NA	20000	26
Vigas de entrepiso	Shell	Madera	16 (C) 15 (T)	9000	7
Placas	Frame	Acero	250	200000	78
Pernos	Frame	Acero	420	200000	78

El primero de los métodos es el establecido por la norma AIS-610-EP-2017, donde cada muro se analiza en su plano y perpendicular a este. Para este primer método, en la Figura 12 mediante distintos colores, se muestra un ejemplo de la división de una de las fachadas de los muros de la edificación de un piso.

Para cada muro/machón, se especificaron sus longitudes y espesores con el fin de comparar la capacidad y la demanda de cada machón. Para evaluar la capacidad y la demanda, se

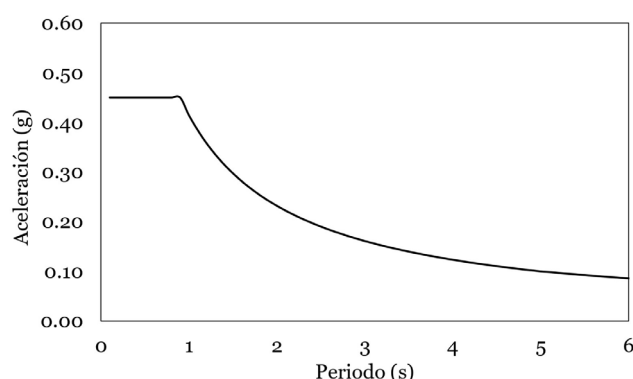


Figura 11. Espectro de diseño.

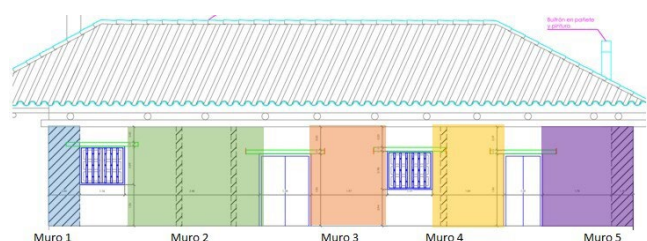


Figura 12. Fachada de edificación en tierra para evaluar los índices de sobre-tensión de muros existente – Edificación de 1 piso.

usaron las combinaciones de carga y las expresiones mencionadas en el numeral 5. Con la demanda y la capacidad, se determinaron los índices de sobre-tensión individual de cada uno de los elementos de la edificación. En la Tabla 2 se presentan como ejemplo los resultados de índices de sobre-tensión de una de las fachadas de la casa de un piso.

Tabla 2. Índices de sobre-tensión en muro casa de un piso eje y.

Índices de sobre-tensión Muro en y									
Muro	Axial *1			Cortante *1			Momento *1		
	P_u (kN)	P_n (kN)	I_p^{*2}	V_u (kN)	V_n (kN)	I_v^{*2}	M_u (kN-m)	M_{ny} (kN-m)	I_m^{*2}
1	Falla por volcamiento			Falla por volcamiento			Falla por volcamiento		
2	128,8	437,2	0,3	46,4	15,6	2,9	59,2	58,6	1,1
3	76,1	171,3	0,43	26,7	9,7	2,8	34,0	19,3	1,8
4	71,6	149,7	0,47	24,9	9,2	2,7	31,8	16,9	1,9
5	89,0	235,9	0,37	31,5	11,	2,8	40,2	26,96	1,5

*1 El subíndice u representa la demanda y el subíndice n representa la capacidad

*2 I corresponde a la relación de demanda con capacidad (índice de sobre-tensión)

Como resultado del análisis, para la vivienda de 1 piso se estableció que los índices de sobre-tensión (demanda dividida la capacidad) en el eje y (dirección de muros cortos) son mayores a 1, tanto para cortante como para momento. De la misma manera, cuando se repitió el análisis en el eje x se obtuvo que todos los muros fallarían por volcamiento, debido a que al calcular el coeficiente R_e esté es mayor a 0.33. Estos índices superiores a 1.0 son un indicativo de la vulnerabilidad de la edificación. Es importante tener en cuenta el coeficiente R_e en el cálculo de la resistencia axial, debido a que este factor es el coeficiente de reducción por excentricidad. El coeficiente depende de la relación entre (h/t) es decir la altura y el espesor del muro con respecto al momento flector alrededor del eje de estudio y la fuerza axial sobre el muro. Cuando este coeficiente es mayor a 0.33 quiere decir que el muro es inestable y falla por volcamiento. Se realizó el mismo análisis en la vivienda de 2 pisos (Figura 13), donde se obtuvo que prácticamente todos los muros tendrían índices de sobre-tensión superiores a 1.0 (flexión y cortante) con una alta probabilidad de inestabilidad y falla por volcamiento.

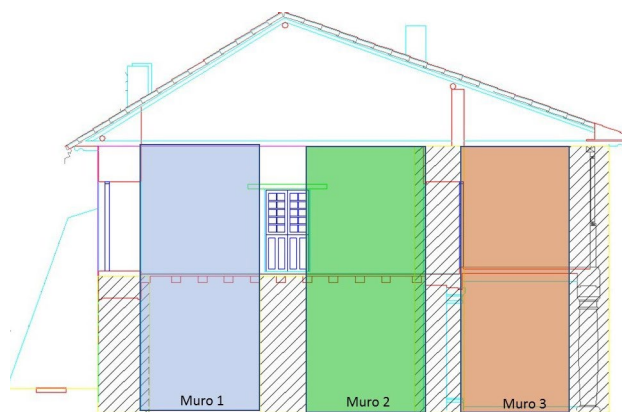


Figura 13. Fachada de edificación en tierra para evaluar los índices de sobre-tensión de muros existente – Edificación de 2 pisos.

De manera complementaria, y con las mismas características de los materiales y geometría establecidos anteriormente se construyeron modelos por el método de los elementos finitos de ambas edificaciones. Es importante considerar que este procedimiento es avalado por la norma presentada en la referencia (7), la cual está sustentada en pruebas experimentales sobre modelos a escala real. Especial atención se dio a la revisión de las tensiones en los muros sin reforzamiento. Por ejemplo, en la Figura 14 se muestran las tensiones S22 obtenidas en los muros

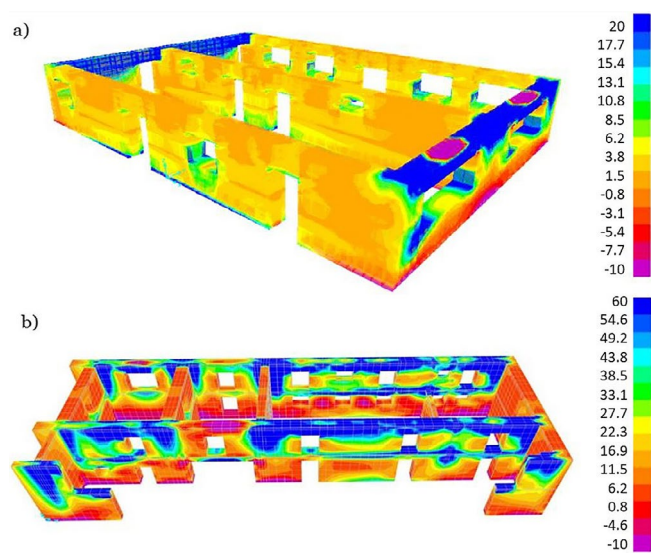


Figura 14. Tensión S22 en muros en tierra a) Casa de 1 piso b) Casa de 2 pisos.

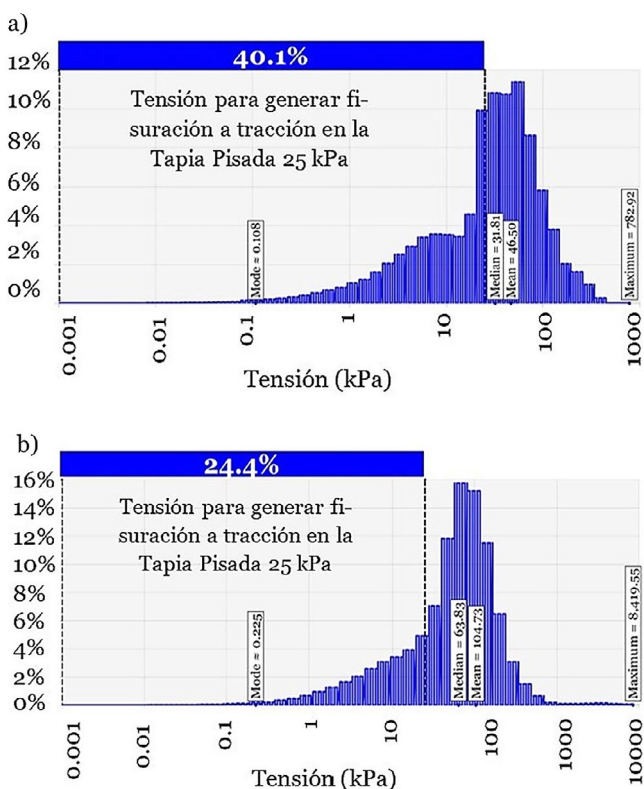


Figura 15. Histograma de frecuencias de la tensión principal mayor a) Edificación de 1 Piso sin reforzamiento, b) Edificación de 2 pisos sin reforzamiento.

de tierra apisonada de las casas de uno y dos pisos sin reforzamiento.

Para establecer cómo es la distribución de las tensiones en los muros, se llevó a cabo el análisis estadístico que se muestra en la Figura 15. Para ello se determinaron las tensiones principales de cada punto material mediante el análisis en Matlab® con base en los resultados de tensiones axiales y a cortante de la envolvente de combinaciones de carga estudiadas. En la Figura 15, se presenta el histograma de frecuencias de la tensión principal mayor de cada punto material del modelo de elementos finitos. Debido al amplio rango de valores que toman las tensiones, el histograma tiene una escala logarítmica en el eje x. Considerando que la resistencia a la flexo-tracción de la Tapia apisonada sin reforzamiento está entre 20 y 25 kPa (1, 23), se observa que el 59.9 % de los elementos finitos de la edificación de 1 piso superan este valor y que el 75.6% de los elementos finitos de la edificación de 2 pisos presentan tensiones máximas superiores a dicho valor.

6. ANÁLISIS Y MODELIZACIÓN NUMÉRICA DE EDIFICACIONES EN TIERRA CON REFORZAMIENTO

Con base en lo obtenido se evidencia la necesidad de un reforzamiento de los muros de las edificaciones de 1 y 2 pisos con placas de acero en sentido vertical y horizontal. Para realizar un análisis de sensibilidad se evalúan espaciamientos del refuerzo cada 0.5, 1.0 y 2.0 m. En todos los casos, el refuerzo se complementó con un diafragma rígido, mejorando la rigidez del entrepiso e instalando una viga corona de concreto reforzado en la cubierta. Para efectos comparativos se implementa también el refuerzo con elementos de madera espaciados cada 1.0 metros.

Al igual que otros materiales usados en la construcción de edificaciones, es claro que el comportamiento de la tapia apisonada no es lineal elástico. Así mismo, la tapia apisonada con refuerzo en acero o en madera tampoco presenta un comportamiento elástico lineal en todo su rango de deformaciones. Por lo tanto, para determinar la respuesta de los muros en tierra reforzados ante carga sísmica habría que acudir a modelos no lineales por elementos finitos como los expuestos en referencias (9, 24, 25). Sin embargo, el proceso de diseño de reforzamiento estructural del patrimonio histórico en tierra que realizan las oficinas de cálculo y diseño se basa normalmente en modelos elásticos lineales. Por ello, haciendo un símil con materiales con capacidad de disipación de energía como el concreto reforzado o el acero estructural, la norma AIS-610-EP-2017 definió un procedimiento de cálculo y diseño del reforzamiento de edificaciones patrimoniales de 1 y 2 pisos en tierra basado en elementos elásticos. Esta opción es válida considerando que las pruebas experimentales reportadas en la literatura científica permiten asignarle una capacidad de disipación de energía al sistema de tapia apisonada con refuerzo. El documento AIS-610-EP-2017 asigna a la tapia apisonada reforzada con placas de acero o con entramados de madera, un coeficiente de disipación de energía R de 2.5 (similar al que tendrían muchos sistemas tradicionales con baja capacidad de disipar energía sísmica). Por su parte, el valor de R para las edificaciones de tapia apisonada sin refuerzo es igual a 1.0 (no hay disipación de energía y la falla es frágil).

Con el anterior marco de referencia, se construyeron 8 modelos numéricos de viviendas de uno y dos pisos refor-

zados según la descripción de la Tabla 3. En dicha Tabla 3 se indica el espaciamiento horizontal y vertical del refuerzo además de las dimensiones de los elementos usados (madera o acero).

Tabla 3. Descripción de modelos de edificaciones en tierra patrimoniales reforzadas de 1 piso y 2 pisos.

Pisos	Placas de acero (100 mm x 6.35 mm)			Maderas (180 mm x 40 mm)
	Espaciamiento del refuerzo (m)			
	0.5	1.0	2.0	1.0
1	X	X	X	X
2	X	X	X	X

Para la construcción de los modelos numéricos y distribución del reforzamiento de cada modelo se siguieron las siguientes recomendaciones (26):

- Los refuerzos horizontales deben formar anillos alrededor de toda la estructura.
- Es necesario poner un anillo de refuerzo a la altura de la cimentación para evitar problemas de estabilidad.
- Se debe poner un anillo de refuerzo al nivel de la viga corona.
- Un refuerzo vertical se debe ubicar muy cerca de los bordes de puertas y ventanas.
- Se deben poner pernos pasantes sobre el refuerzo horizontal, además de los ubicados en las intersecciones de los elementos, cada 500 mm.

Para realizar un análisis de sensibilidad, el reforzamiento con placas de acero se planteó para tres cuantías diferentes: una cuantía de acero igual a la estipulada por la norma AIS 610, una cuantía del doble de AIS 610 y una cuantía de la mitad de AIS 610. En la norma AIS 610, se establece que la cuantía normal corresponde a placas de acero de 100 mm de ancho y 6.35 mm de espesor cada metro, de tal manera que una cuantía del doble de la especificación corresponde a instalar las placas cada 500 mm y una cuantía de la mitad de la especificación implica instalar placas del mismo tamaño, pero cada 2000 mm. En todos los casos, se mantiene el espesor original de la placa (6.35mm o 1/4 de pulgada). En la Figura 16 se muestra el esquema de refuerzo de un muro de la fachada con placas cada 500mm tanto para la edificación de un piso como de la edificación de dos pisos.

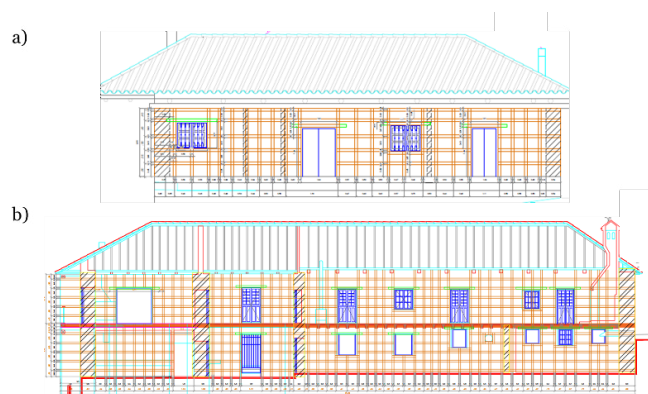


Figura 16. Esquema de reforzamiento cada 500 mm a) Edificación de un piso, b) Edificación de dos pisos (escalas diferentes en los esquemas mostrados para ambas edificaciones).

Es importante anotar que la alternativa propuesta de reforzamiento con espaciamiento a 2 metros se realizó con el fin de tener un límite superior con respecto al espaciamiento propuesto por la AIS-610-EP-2017, ya que esta alternativa no es viable constructivamente debido a que no genera el confinamiento que se busca con la rehabilitación. El espaciamiento mínimo recomendado en la norma AIS-610 es del orden de 1.0 metro.

Se realizó una comparación de los periodos de vibración de cada una de las estructuras obteniendo los resultados de la Figura 17 y Figura 18, donde en el eje *x* se ubican los 4 modos iniciales, y en el eje *y* los periodos de vibración de la estructura.

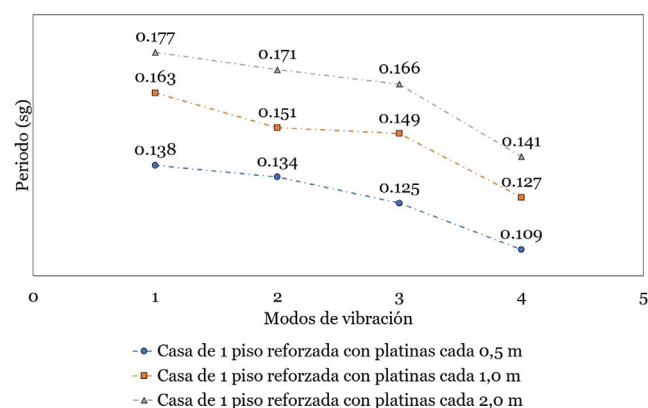


Figura 17. Periodos de vibración edificación de 1 piso.

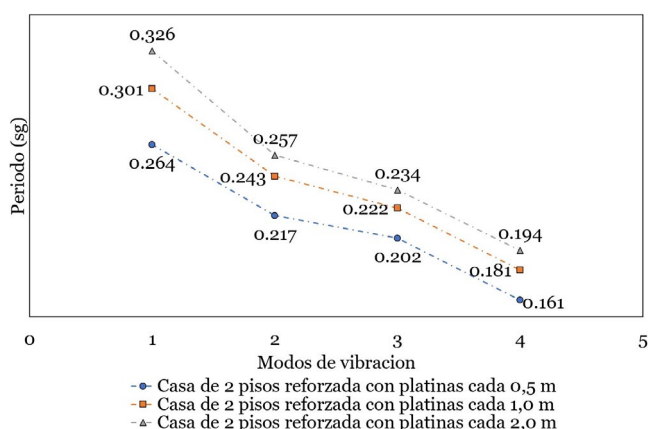


Figura 18. Periodos de vibración de edificación de 2 pisos.

Así mismo, se revisaron las derivas de las edificaciones de 1 y 2 pisos que no deben ser superiores al 1% de la altura de entrepiso de acuerdo con AIS-610-EP-2017. En la Tabla 4 y en la Tabla 5 se presentan los índices de flexibilidad de las estructuras modeladas. I_f es el índice de flexibilidad calculado como el cociente entre la deriva (*interstory drift*) de análisis Δ_a y la deriva permitida Δ_p (correspondiente al 1% de la altura de cada edificación).

Tabla 4. Índices de flexibilidad casa de un piso.

Modelo	Sismo X $I_f = \Delta_a / \Delta_p$	Sismo Y $I_f = \Delta_a / \Delta_p$
Sin reforzamiento	0,20	0,20
Reforzado con placas de acero a 0,5m	0,04	0,04
Reforzado con placas de acero a 1,0m	0,05	0,05
Reforzado con placas de acero a 2,0m	0,06	0,06

Tabla 5. Índices de flexibilidad casa de dos pisos.

Modelo	Sismo X $I_f = \Delta_a/\Delta_p$	Sismo Y $I_f = \Delta_a/\Delta_p$
Sin reforzamiento	0,49	0,65
Reforzado con placas de acero a 0,5m	0,20	0,20
Reforzado con placas de acero a 1,0m	0,26	0,28
Reforzado con placas de acero a 2,0m	0,48	0,29

En la Figura 19 y Figura 20 se muestran las tensiones obtenidas en los muros de tierra apisonada de las casas de 1 y 2 niveles, bajo las combinaciones de sismo.

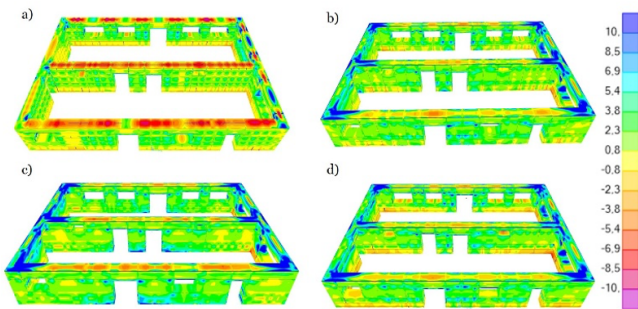


Figura 19. Tensiones S22 (kPa) en muros modelo de 1 piso reforzado a) Espaciamiento de placas a 0,5m, b) Espaciamiento de placas a 1,0m, c) Espaciamiento de placas a 2,0m, d) Espaciamiento a 1,0m con entramados de madera.

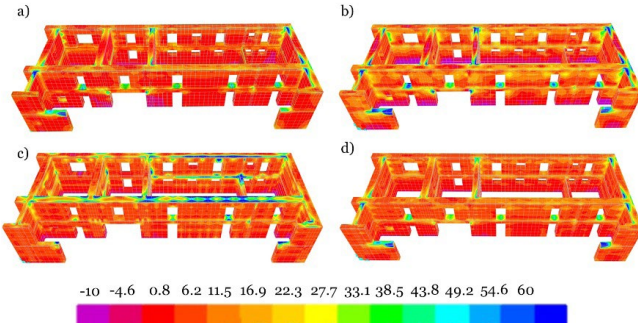


Figura 20. Tensiones S22 (kPa) en muros modelo de 2 pisos reforzados a) Espaciamiento a 0,5m, b) Espaciamiento a 1,0m, c) Espaciamiento a 2,0m, d) Espaciamiento a 1,0m con entramados de madera.

Al igual que se hizo para el caso del modelo sin refuerzo, se estableció la distribución estadística de la tensión principal mayor en los muros de tapia apisonada para la edificación de 1 y 2 pisos con los diferentes refuerzos implementados. Ejemplos de esta distribución estadística se muestran en la Figura 21 y Figura 22, donde se evidencia el histograma de frecuencias de la tensión principal mayor (σ_1) de cada punto material del modelo de elementos finitos para las casas de 1 y 2 pisos para un espaciado de placas de 500 mm. Dichas tensiones principales se calcularon mediante Matlab® a partir del estado generalizado de tensiones del modelo por elementos finitos para cada punto material.

Considerando que la resistencia a la flexo tracción de la tapia apisonada está entre 20 y 25 kPa (1, 23), se observa

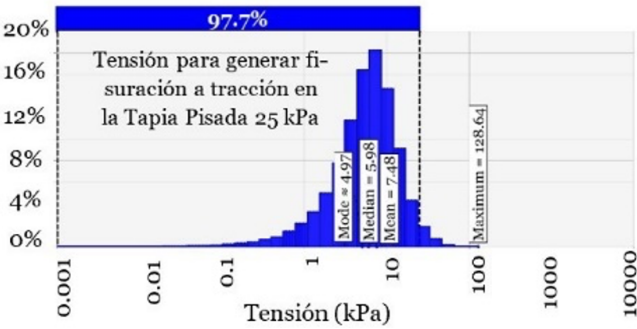


Figura 21. Histograma de frecuencias de la tensión principal mayor en muros de tierra de edificación de 1 piso con placas de refuerzo espaciadas cada 0.5m.

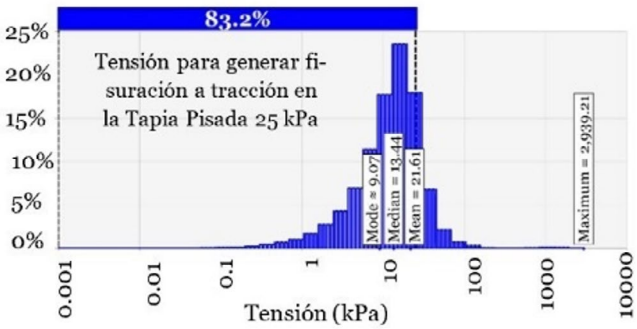


Figura 22. Histograma de frecuencias de la tensión principal mayor en muros de tierra de edificación de 2 pisos con placas de refuerzo espaciadas cada 0.5m.

una mejora notoria de la cantidad de puntos materiales que disminuyen su tensión para la condición de carga sísmica al compararlos con el modelo sin refuerzo. Mientras que en la Figura 15b se reportaba que sólo un 24.4 % de las tensiones en los elementos finitos con los que se modeló la tapia apisonada de la edificación de dos pisos sin refuerzo eran inferiores a 25 kPa, cuando se implementa el refuerzo con placas de acero cada 500 mm se obtiene que el 83.2 % de los elementos finitos tienen una tensión menor a 25 kPa. A manera de resumen, en la Tabla 6. se muestra el porcentaje de puntos materiales que en cada modelo numérico tienen una tensión principal σ_1 menor a 25 kPa. De la misma forma, en la Tabla 6 también se muestra el valor promedio de σ_1 para los modelos analizados.

Tabla 6. Porcentaje de puntos materiales con tensión menor a 25kPa.

Edificación	Espaciamiento del refuerzo con placas (m)	σ_1 promedio (kPa)	% de puntos materiales con $\sigma_1 < 25$ kPa
1 piso	0.5	7.48	97.7
	1.0	11.81	90.7
	2.0	12.85	88.0
2 pisos	0.5	21.61	83.2
	1.0	27.58	69.6
	2.0	31.87	61.8

Es evidente que las tensiones promedio disminuyen en la medida que el espaciado del refuerzo en acero es menor. También es claro que cuanto mayor densidad de refuerzo se

tenga la tensión en los muros de tapia apisonada tienden a ser inferior al límite de resistencia a la tracción de 25 kPa. Esta mejora es notoria y habla muy bien de la alternativa de refuerzo implementada, corroborando además las pruebas experimentales reportadas en las referencias (16, 27).

Posteriormente, el proceso de revisión requiere determinar las tensiones de las placas de acero de cada uno de los modelos numéricos. De acuerdo con resultados experimentales y numéricos obtenidos por (23), en una sección transversal de tierra reforzada, el acero desarrolla una tensión entre el 20%

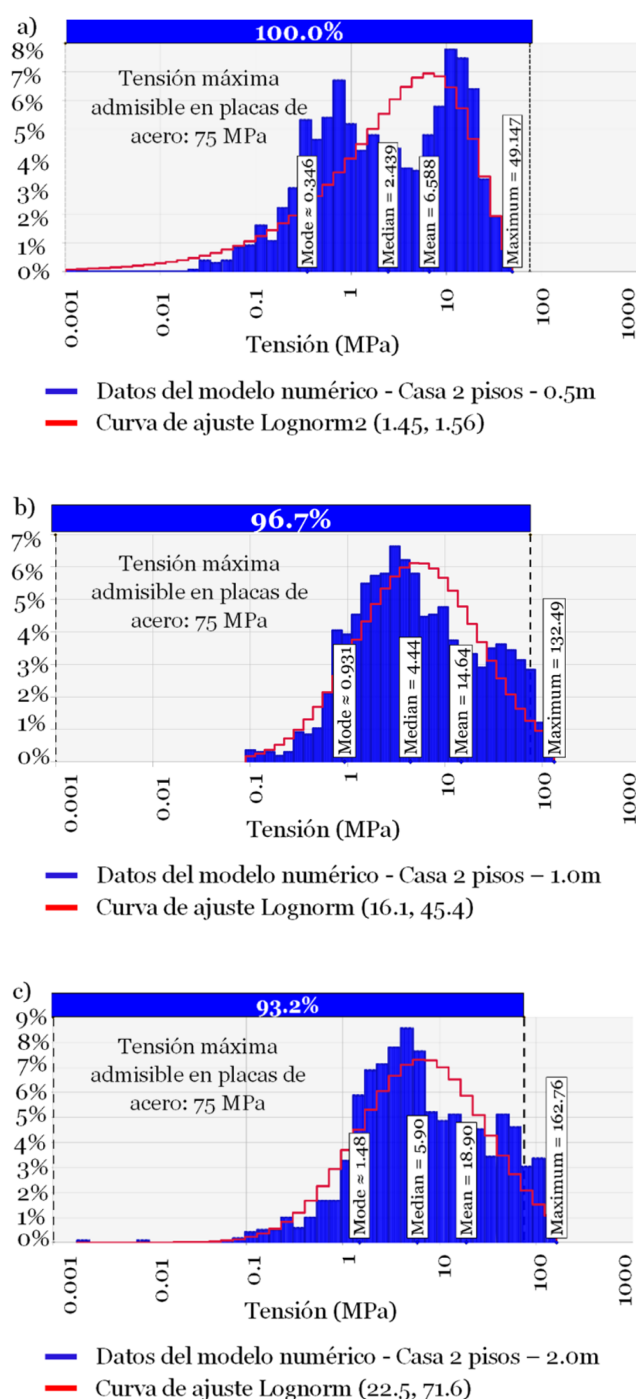


Figura 23. Histogramas de frecuencias de la tensión en las placas de acero a) Edificación de 2 pisos con espaciamiento de refuerzo cada 0.5m, b) Edificación de 2 pisos con espaciamiento de refuerzo cada 1.0 m, c) Edificación de 2 pisos con espaciamiento de refuerzo cada 2.0m.

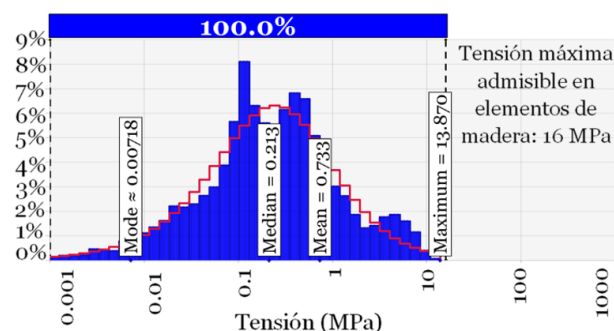


Figura 24. Histogramas de frecuencias de tensiones en la madera en Edificación de 2 pisos reforzada con listones de madera cada 1.0m.

y el 30% de su fluencia. Es importante anotar que esta limitación en la tensión máxima del acero se incluyó en la norma AIS 610-EP-2017.

En el caso particular del presente estudio, las placas están elaboradas con acero A36, con tensión de fluencias de 250 MPa. Siendo así, el máximo valor de la tensión demandada a las placas de los muros en tierra reforzada no debe superar los 75 MPa.

Para visualizar las tensiones demandadas en las placas para cada espaciamiento analizado, en la Figura 23, se muestran los histogramas de frecuencia de las tensiones máximas en las placas de acero para la edificación de dos niveles. En la Figura 23 se incluye también la función de distribución de probabilidad que mejor ajuste estadístico tiene (curva de ajuste, en este caso Log normal).

Los resultados sugieren que hay placas que superan los 75 MPa de tensión demandada y que requerirían una sección transversal superior a 100 mm x 6.35 mm (especificación mínima de AIS 610). No obstante, en el peor de los casos el 93% de las placas tendrían una tensión inferior al límite establecido en de 75 MPa. Al realizare este mismo análisis para el caso de la Edificación de 1 piso se encontró que ninguna de las placas supera la tensión límite.

Para el caso de los modelos de las casas de 1 y 2 pisos reforzadas con listones de madera se tuvo en cuenta el título G de la norma sismo resistente (18). Este análisis se realizó por el método de las tensiones admisibles (con las combinaciones de carga respectiva), en cuyo caso la tensión máxima axial de los elementos de madera no debe superar los 16 MPa, basado en el tipo de madera seleccionada para el reforzamiento (Figura 24). En la Figura 24 se incluye la función de distribución de probabilidad que mejor ajuste estadístico tiene (curva de ajuste). Al analizar los resultados, es claro que ninguno de los entramados de madera que sirven de refuerzo a la edificación de 2 pisos supera este valor límite. Lo mismo sucede en la edificación de un piso reforzada con listones de madera.

Finalmente, para cada una de las estructuras analizadas se determinaron las cantidades de obra y se realizó un análisis de precios unitarios, con lo cual se pudo determinar el costo por metro cuadrado de construcción. Se estableció que los

costos por metro cuadrado (área de muro) de refuerzo para espaciamientos de 0.5m, 1.0m y 2.0 m son respectivamente 116€, 81 € y 48 €.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A partir del análisis estadístico de los muros de 31 edificaciones patrimoniales en tierra (16 de un nivel y 15 de dos niveles), se establece que el espesor promedio de los muros es de 0.62 m y 0.70 m, respectivamente. Así mismo, en las casas de dos niveles se presentan alturas promedio de 3.52 m en primer piso y 3.01 m en segundo nivel, mientras que las casas de un nivel tienen una altura promedio de 3.11 m.

La evaluación de las edificaciones de 1 piso y 2 pisos patrimoniales de tapia apisonada con base en AIS 610 arroja para todos los muros índices de sobre-tensión mayores a 1 tanto para cortante como para momento (con problemas de volcamiento). Este pobre desempeño sísmico es consistente con los resultados de pruebas de laboratorio y con la evidencia del efecto de los terremotos sobre estas construcciones. Así mismo los resultados de la modelación numérica indican que en el mejor de los casos sólo el 40.1% de los puntos materiales de los muros tendrían una tensión inferior a la resistencia a la tracción de la tapia apisonada.

Los periodos de vibración de las edificaciones en tierra bajo estudio disminuyen hasta en un 20% al implementar el refuerzo con placas de acero. Este refuerzo es efectivo en el control de derivas, disminuyendo hasta en un 66% los desplazamientos relativos de entrepiso. Así mismo, el índice de

flexibilidad aumenta a medida que se aumenta separación de las placas.

La instalación de las placas de acero es una estrategia adecuada para disminuir los niveles de daño por flexo-tracción de los muros de las edificaciones patrimoniales en tierra, ya que cuando se instalan las placas con un espaciamiento de 500 mm en la edificación de 1 piso hasta el 97.7% de los puntos materiales del modelo de elementos finitos tienen tensiones inferiores a 25 kPa. Este porcentaje es del 83% para el caso de la edificación de dos pisos.

Los resultados de la modelación numérica indican que el 100 % de las placas no superan la tensión máxima establecida en la norma y en las referencias consultadas (30% del esfuerzo de fluencia) para la edificación de 1 nivel reforzada con placas cada 500 mm, 1000 mm y 2000 mm. Por su parte, en el peor de los casos el 93% de las placas cumplirían esta restricción de 75 MPa para el caso de la edificación patrimonial en tapia apisonada de 2 niveles.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue posible gracias a la financiación proveniente del *Patrimonio Autónomo Fondo Nacional de Financiamiento para la Ciencia, la Tecnología y la Innovación Francisco José De Caldas* de MinCiencias, República de Colombia. En particular por la financiación del proyecto código 120385269649– MGI, propuesta con Id: 6988, Contrato 510-2020 (Rehabilitación sísmica de edificaciones en tierra –patrimoniales- de dos niveles), de acuerdo con los resultados de la Convocatoria No 852-2019.

REFERENCIAS

- (1) Ruiz D., López C., Rivera, J.C. (2012). Propuesta de normativa para la rehabilitación sísmica de edificaciones patrimoniales. *Apuntes: Revista de Estudios Sobre Patrimonio Cultural - Journal of Cultural Heritage Studies*, 25(2 SE), 226-239. Recuperado de <https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/23115>.
- (2) Sánchez Gama, C.E. (2007). La arquitectura de tierra en Colombia, procesos y culturas constructivas. *Apuntes: Revista de Estudios Sobre Patrimonio Cultural - Journal of Cultural Heritage Studies*, 20(2), 242–255. Recuperado de <https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/23047>.
- (3) AIS - Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (2004). *Manual para la rehabilitación de viviendas construidas en adobe y tapia pisada*.
- (4) Bui, Q.B., Morel, J.C., Venkatarama B.V., Ghayad, W. (2009). Durability of rammed earth walls exposed for 20 years to natural weathering. *Building and Environment*, 44(5), 912–919. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.07.001>.
- (5) Day, R. W. (1993). *Performance of Historic Adobe Structure. Journal of Performance of Constructed Facilities*, 7(3), 164–169. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-3828\(1993\)7:3\(164\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-3828(1993)7:3(164)).
- (6) Yamín L. E., Phillips C., Reyes J. C., Ruiz D. (2007). Estudios de vulnerabilidad sísmica, rehabilitación y refuerzo de casas en adobe y tapia pisada. *Apuntes: Revista de Estudios Sobre Patrimonio Cultural - Journal of Cultural Heritage Studies*, 20(2), 286–303. Recuperado de <https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/23002>.
- (7) AIS - Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. (2017). Norma AIS-610-EP-2017: Evaluación e intervención de edificaciones patrimoniales de uno y dos pisos de Adobe y Tapia Pisada.
- (8) Garzón, P. (2011). Evaluación de la Amenaza Sísmica de Colombia mediante análisis de valores extremos históricos [Universidad Nacional de Colombia]. Recuperado de https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/8466/299996.2011_pte._1.pdf?sequence=5&isAllowed=y.
- (9) Reyes, J.C., Smith, J.P., Yamin, L.E., Galvis, F.A., Angel, C. C., Sandoval, J.D., Gonzalez, C.D. (2019). Seismic experimental assessment of steel and synthetic meshes for retrofitting heritage earthen structures. *Engineering Structures*, 198, 109477. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109477>.
- (10) Zegarra L., San-Bartolome A., Quiñ D. y Giesecke, A. (1997). Manual Técnico para el reforzamiento de las viviendas de adobe existentes en la costa y la sierra, Lima-Peru. Recuperado de https://www.preventionweb.net/files/7630_manualtecnico.pdf.
- (11) Blondet, M., Vargas, J., Tarque, N., 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. <https://doi.org/10.3989/ic.10.017>.

- (12) Uribe, C., López C., & Ruiz D. (2014). Casas consistoriales en Cundinamarca. Estudio de caso de la casa del municipio de Cogua. *Apuntes: Revista de Estudios Sobre Patrimonio Cultural - Journal of Cultural Heritage Studies*, 27(1), 124-141. Recuperado de <https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/23227>.
- (13) Ruiz D., López C., Unigarro S., 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. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0000605](http://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000605).
- (14) Gómez, V., López, C., Ruiz, D. (2016). Seismic rehabilitation of rammed-earth heritage buildings: study case of doctrinal church. *Informes de La Construcción*, 68(541), e140. <https://doi.org/10.3989/ic.15.017>.
- (15) López, C., Ruiz, D., Jerez, S., Aguilar, S., Torres, J., Alvarado, Y. (2020). Seismic behaviour of rammed earth buildings reinforced with wood elements and an upper concrete beam. *Informes de la Construcción*, 72(559), e347. <https://doi.org/10.3989/ic.70914>.
- (16) Reyes, J.C., Rincon, R., Yamin, L.E., Correal, J.F., Martinez, J.G., Sandoval, J.D., Gonzalez, C.D., Angel, C.C. (2020). Seismic retrofitting of existing earthen structures using steel plates. *Construction and Building Materials*, 230, 117039. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117039>.
- (17) Shrestha, K.C., Aoki, T., Konishi, T., Miyamoto, M., Zhang, J., Takahashi, N., Wangmo, P., Aramaki, T., Yuasa, N. (2019). Full-scale pull-down tests on a two-storied rammed earth building with possible strengthening interventions. structural analysis of historical constructions. vol 18. Springer, Cham. (pp. 1557–1565). https://doi.org/10.1007/978-3-319-99441-3_167.
- (18) AIS - Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. (2010). Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10.
- (19) Melo E., & Olivos A. (2006). Historia de Cota: Quota en la historia (E. B. Semilla (ed.)). Alcaldía Municipal de Cota.
- (20) Gonzales F. (2004). Reducciones y Haciendas Jesuiticas en Casanare, Meta Y Orinoco. ISBN: 9586836746.
- (21) Lopez C. (2021). Las Haciendas como modelo de producción económica en la Nueva Granada- Bogotá y Cali.
- (22) Servicios Uniandes: Hacienda el Noviciado. (2021). Recuperado de <https://servicios.uniandes.edu.co/hacienda-el-noviciado/>.
- (23) Bran, C., Ruiz D. & Suesca, D. (2021). Análisis experimental de elementos de confinamiento para la rehabilitación de edificaciones patrimoniales en tapia pisada. Trabajo de Grado de Maestría en Ingeniería Civil. Pontificia Universidad Javeriana.
- (24) Bui, T.L., Bui, T.T., Bui, Q.B., Nguyen, X.H., Limam, A. (2020). Out-of-plane behavior of rammed earth walls under seismic loading: Finite element simulation. *Structures*, 24, 191–208. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.01.009>.
- (25) Loccarini, F., Ranocchiai, G., Rotunno, T., Fagone, M. (2020). Experimental and numerical analyses of strengthened rammed earth masonry arches. *Computers & Structures*, 239, 106329. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2020.106329>.
- (26) CIMOC. (2016). Consultoría para el diseño, ejecución e interpretación de ensayos experimentales para caracterizar el comportamiento sísmico de elementos estructurales en Adobe y Tapia Pisada con reforzamiento sísmico. Informe técnico.
- (27) Reyes, J.C., Smith-Pardo, J.P., Yamin, L.E., Galvis, F.A., Sandoval, J.D., Gonzalez, C.D., Correal, J.F. (2019). In-plane seismic behavior of full-scale earthen walls with openings retrofitted with timber elements and vertical tensors. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 17(7), 4193–4215. <https://doi.org/10.1007/s10518-019-00601-8>.