

Evaluación estructural, técnica y de económica del reforzamiento estructural de dos Edificaciones Patrimoniales en tierra (1 piso y 2 pisos) usando las recomendaciones del documento AIS- 610-EP-2017 y las prácticas de los arquitectos/ingenieros restauradores.

Ing. Paula Rossana Galindo Jaramillo

Ing. Anyi Lizeth Hernandez Niño

Pontificia Universidad Javeriana

Facultad de Ingeniería

Departamento de ingeniería civil

Bogotá, Colombia

2021



Evaluación estructural, técnica y económica del reforzamiento estructural de dos Edificaciones Patrimoniales en tierra (1 piso y 2 pisos) usando las recomendaciones del documento AIS- 610-EP-2017 y las prácticas de los arquitectos/ingenieros restauradores.

Trabajo de grado para optar al título de:
Magister en Ingeniería Civil

Ing. Paula Rossana Galindo Jaramillo

Ing. Anyi Lizeth Hernández Niño

Director:

MSc. Ing. Daniel Mauricio Ruiz Valencia

Codirector:

MSc Ing. José Gustavo Martínez

Pontificia Universidad Javeriana

Facultad de Ingeniería

Departamento de ingeniería civil

Bogotá, Colombia

2021

Tabla Contenido

1. Introducción.....	4
1.1. Hipótesis	4
1.2. Pregunta de investigación	4
2. Problemática y Justificación	5
3. Objetivos.....	6
3.1. Objetivo General	6
3.2. Objetivos Específicos	6
4. Artículo	7

1. Introducción

En el presente documento se presentará el desarrollo del trabajo de investigación el cual busca analizar, estructuralmente, constructivamente y económicamente el reforzamiento estructural de dos Edificaciones Patrimoniales en tierra (1 piso y 2 pisos) usando las recomendaciones del documento AIS- 610-EP-2017 y las prácticas de los arquitectos/ingenieros restauradores.

Como investigadoras decidimos realizar un artículo el cual expone todo lo desarrollado durante el trabajo de grado, sin embargo, a continuación, se incluyen los objetivos principales del trabajo, la hipótesis y la pregunta de investigación con el fin de darle mayor entendimiento al lector.

El principal documento de referencia fue la AIS – 610-EP-2017, se determinó que todo lo expuesto por la norma se ajusta a los resultados obtenidos en la presente investigación, sin embargo, se realizan algunas recomendaciones con el fin de minimizar costos de construcción para realizar este tipo de rehabilitaciones y adicionalmente se logró comprender de mejor manera el comportamiento de la tierra y las platinas de reforzamiento utilizadas para la rehabilitación.

1.1. Hipótesis

El refuerzo mediante entramado de platinas de acero instaladas en los muros con espaciamientos de 0,50m, 1m, 2m entre sí y un diafragma rígido, mejorarán el comportamiento sísmico de las edificaciones construidas en tapia pisada con respecto a otra alternativa de reforzamiento expuestas en la AIS-610-EP-2017 y serán más eficientes técnicamente, estructural y económicamente.

1.2. Pregunta de investigación

¿El refuerzo mediante entramados de platinas de acero instaladas en muros en tierra en conjunto con un mejoramiento de diafragma, pueden disminuir la vulnerabilidad sísmica de una edificación patrimonial y tener un menor costo que otras alternativas de rehabilitación expuestas en la AIS-610-EP-2017?

2. Problemática y Justificación

La tierra es uno de los materiales más antiguos utilizados para la construcción de edificaciones. Sus fechas de uso datan del 8000 a.C. Durante la conquista española, los conquistadores introdujeron la construcción con adobe y tierra apisonada. En las principales ciudades del Nuevo Reino de Granada, se construyeron edificaciones de uno y dos niveles principalmente para instalaciones gubernamentales y templos religiosos (Yamín Lacouture et al., 2007).

Las construcciones en tierra hacen parte fundamental de la historia y el patrimonio cultural de Colombia. Cerca del 80% de los centros históricos del país se encuentran construidos en tierra según el listado de bienes declarados de interés cultural de la dirección de patrimonio del 21 de febrero de 2017 (De Investigación et al., 2017).

Todos los edificios requieren un mantenimiento periódico y, en los casos de edificios deteriorados, restauración y puesta en valor. Lamentablemente, la pérdida de las formas tradicionales de construir, han motivado una notable interrupción en la transmisión de conocimientos de nuestros antepasados, como consecuencia, el mantenimiento no ha sido el adecuado y la capacitación en técnicas constructivas convencionales de hoy no es siempre apropiada para conservar y restaurar la construcción en tierra (FADU, 2012).

Además de su importancia histórica y cultural, también es importante resaltar estas edificaciones desde una perspectiva sostenible. Las edificaciones construidas en tierra cuentan con varias características favorables (Gomes et al., 2011) en comparación con otros materiales, como el concreto y el acero. La tierra es un material de bajo costo disponible en varias zonas del país, donde aproximadamente un 50% del territorio está construido en sistemas constructivos como Tapia pisada, adobe y bareque. Adicionalmente es incombustible, funciona como buen aislante térmico, es reciclable, reutilizable y no se necesita de mano de obra especializada para desarrollarlo (T.-T. Bui et al., 2014).

Las edificaciones construidas en tierra, con sistemas constructivos como adobe y la tapia pisada presentan un buen comportamiento, siempre y cuando no sean expuestas a la humedad (Q. B. Bui et al., 2009). La construcción en el pasado se limitaba al uso de materiales disponibles de cada región (Yamin et al., 2003). Durante la época de la evangelización en Colombia, se construyeron iglesias bajo ordenanza española promulgada por Felipe II de España. Este tipo de ordenanza se aplicó para la construcción de casas gubernamentales y templos religiosos. (Gómez et al., 2016) Actualmente las viviendas o edificaciones que se han intervenido para hacer restauraciones y/o adecuaciones, tienen como factor común grandes espesores en los muros, entre los 0,5m hasta los 1,26 m de ancho y alturas entre 5,04 y 6,72 m.

En el tiempo la tapia pisada ha sido relegada como sistema estructural. En zonas de importante actividad sísmica, la alta vulnerabilidad de las construcciones y monumentos ha sido expuesta en diferentes escenarios, debido a que ante terremotos moderados ha provocado el colapso y pérdida de vidas humanas. Terremotos como el ocurrido en el Eje Cafetero el 25 de enero de 1999, el sismo de Popayán en 1983, o el sismo de Cúcuta el 25 en 1875, dejaron al descubierto la falencia en el sistema estructural de las viviendas y monumentos afectados.

Con el fin de aportar a la solución del problema sísmico de las edificaciones en tierra, se han realizado investigaciones en algunas de las mejores universidades del país, en torno al conocimiento de las propiedades de los materiales y del comportamiento de los sistemas estructurales en tierra ante fuerzas sísmicas (Ruiz Valencia et al., 2012).

Estas investigaciones se han enfocado en la búsqueda de técnicas y procesos para la rehabilitación sísmica de edificaciones patrimoniales en tierra. Los resultados han sido plasmados en el documento AIS-610-EP-2017 (AIS, 2017), el cual se vinculó a la NSR-10 mediante un decreto de los Ministerios de Cultura y Vivienda, decreto 2113 del 25 nov del 2019 (*Decreto 2113 Del 25 de Noviembre Del 2019*, 2119). Dentro de AIS-610-EP-2017 se resalta el reforzamiento con platinas de acero (con diafragma rígido) como la mejor alternativa de rehabilitación. En el presente proyecto de investigación, se busca evaluar técnica, estructural y económicamente si el reforzamiento con platinas de acero y diafragma rígido usado en casas de uno y dos niveles a espaciamientos entre 0,50 y 2,0 m

mejora el comportamiento sísmico en comparación a otras alternativas de reforzamiento expuestas en la AIS-610-EP-2017.

3. Objetivos

3.1. Objetivo General

Proponer alternativas de reforzamiento sísmico de dos edificaciones patrimoniales en tierra (1 piso y 2 pisos) usando las recomendaciones de reforzamiento del documento AIS - 610- EP-2017 con platinas de acero y diafragma rígido; evaluando simultáneamente los aspectos económicos y técnicos de otro tipo de intervención estructural también expuesto en la AIS-610- EP -2017

3.2. Objetivos Específicos

- Comparar el comportamiento estructural de 2 casos de estudio de edificaciones patrimoniales en tierra (1 y 2 pisos), considerando diversos espaciamientos del refuerzo con platinas de acero y diafragma rígido; e implementado otra alternativa de reforzamiento adicional de la AIS- 610-EP-2017.
- Implementar en los modelos de las edificaciones patrimoniales bajo estudio, las recomendaciones de los arquitectos/ingenieros restauradores de edificaciones patrimoniales en tierra conjuntamente con los lineamientos del documento AIS- 610-EP-2017.
- Realizar comparaciones desde el punto de vista estructural, constructivo y de costos de las alternativas de rehabilitación propuestas; y así establecer recomendaciones, ventajas y desventajas de las técnicas de reforzamiento implementadas.

4. Artículo

Evaluación estructural, técnica y económica del reforzamiento estructural de dos Edificaciones Patrimoniales en tierra de 1 piso y 2 pisos, usando las recomendaciones del documento AIS- 610-EP-2017 y las prácticas de los arquitectos/ingenieros restauradores

Structural, constructive and cost evaluation of the structural reinforcement of two Earthen Heritage Buildings of 1 floor and 2 floors, using recommendations of the document AIS-610-EP-2017 and the practices of the restoration architects/engineers.

D. Ruiz*, P. Galindo**, A. Hernández **, J. C. Reyes***, M. Restrepo****, N. Barrera****, J. Martínez*****

Los españoles que conquistaron la zona andina latinoamericana construyeron edificios en adobe y tapia pisada. 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 Pisada; Construcciones Patrimoniales; Rehabilitación; Vulnerabilidad sísmica; Construcciones en tierra; Conservación; Materiales sostenibles; Edificaciones de dos niveles.

ABSTRACT

The Spaniards that conquered the Andean Highlands of Latin America constructed buildings with adobe and rammed earth. Because of this, 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 local 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 indicate 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 constructions; Rehabilitation; Seismic vulnerability; earthen constructions; conservation; Sustainable materials; two level buildings.

(*) Ingeniero Civil. Profesor Asociado/Estudiante de Doctorado. Pontificia Universidad Javeriana/Universidad de los Andes. Bogotá (Colombia). ORCID:<http://orcid.org/0000-0003-4164-0357> (D. Ruiz) (**) Ingeniera Civil. Magíster en Ingeniería Civil. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá (Colombia) ORCID: <https://or-cid.org/0000-0001-7018-1810> (P. Galindo) (***) Ingeniera Civil. Magíster en Ingeniería Civil. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá (Colombia) ORCID: <https://or-cid.org/0000-0002-9179-2829> (A. Hernández) (****) Ingeniero Civil. Profesor Asociado. Universidad de los Andes. Bogotá (Colombia). <https://orcid.org/0000-0003-0690-2956>

(****) Ingeniera Civil y Arquitecta. Asistente de Investigación. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá (Colombia)

(*****) Ingeniero Civil y Arquitecto. Profesor de cátedra. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá (Colombia)

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

1. INTRODUCCIÓN

Las construcciones en tierra hacen parte fundamental de la historia y el patrimonio cultural de Colombia (Ruiz Valencia et al., 2012), siendo éstas la base fundamental de los centros históricos del país. Además de esto, las edificaciones en tierra cuentan con características favorables al ser construidas con un material de bajo costo (Blondet et al., 2011), de fácil disponibilidad, incombustible, que funciona como buen aislante térmico y acústico. De igual forma, este material es reciclable y reutilizable (Q. B. Bui et al., 2009; T.-T. Bui et al., 2014; Gomes et al., 2011), por esto, países en desarrollo lo están implementando como material de construcción y así contribuir a la sostenibilidad (Hall & Djerbib, 2004), debido a sus bajos niveles de producción de CO₂ durante toda la vida útil de la edificación.

En Colombia las técnicas de construcción en tierra se han establecido y desarrollado de acuerdo con las regiones. En los altiplanos predomina la tecnología del adobe y la tapia pisada y a lo largo de las riberas de los ríos Magdalena y Cauca se desarrolló en mayor medida el bahareque (Sánchez Gama, 2007). Los altiplanos son la principal zona de auge en la evolución de la arquitectura vernácula (construcciones tradicionales) con tierra en Colombia lo que conlleva a una compresión amplia de la mampostería de adobe y muros de tapia pisada como sistemas constructivos en material de tierra, presentan un buen comportamiento, siempre y cuando no sean expuestas a la humedad (Q. B. Bui et al., 2009). Estas edificaciones requieren un mantenimiento periódico (FADU, 2012) debido a sus características constructivas, que contribuyen a una mayor vulnerabilidad sísmica.

En el caso de las edificaciones patrimoniales en tierra, se encuentran características que las hacen vulnerables como por ejemplo cimentaciones superficiales, irregularidades en planta y altura, falta de conexión adecuada entre los muros, ausencia de diafragmas rígidos, entresijos muy flexibles y finalmente la mala estructuración en la cubierta (Yamín Lacouture et al., 2007). La edad de las edificaciones, el deterioro por el uso, la realización de intervenciones inadecuadas, la falta de correcto mantenimiento, contribuye a la alta vulnerabilidad de las mismas como también los diversos factores ambientales (por ejemplo, susceptibilidad a la erosión), ya que tiende a desintegrarse por la lluvia y son propensos a inundarse debido a la presencia de agua superficial y aguas subterráneas. Adicionalmente, se presenta la ausencia de un cementante de buenas prestaciones mecánicas en los muros de mampostería de tierra (AIS, 2004; Q. B. Bui et al., 2009; Day, 1993). Por lo anterior, durante algunos eventos sísmicos las edificaciones patrimoniales construidas en tierra han colapsado, generando pérdida de vidas humanas, económicas, culturales y patrimoniales (AIS, 2017).

Adicionalmente, en el caso colombiano aproximadamente el 80% de la población vive en zonas de amenaza sísmica intermedia y alta (Garzón, 2011) correspondientes a la zona Andina. Es precisamente esta zona montañosa en donde se encuentra la mayor concentración de edificaciones construidas en tierra. Durante el terremoto que afectó el sur del país en 1983 (la zona de Popayán), muchas edificaciones fueron seriamente afectadas (muchas de ellas en tierra); por lo que se desarrolló en el país una norma sísmo resistente. Sin embargo, durante las 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.

No obstante, durante estas décadas diversos investigadores han propuesto varias alternativas de rehabilitación de edificaciones en tierra, donde se pretende preservar al máximo la arquitectura original tratando de conservar los valores patrimoniales del inmueble y su morfología (Yamin et al., 2003). En países como Perú, México y Colombia se han realizado investigaciones basadas en el reforzamiento mediante mallas y mortero de cal (Reyes, Smith-Pardo, Yamin, Galvis, Angel, et al., 2019; Yamín Lacouture et al., 2007; Zegarra, Luis, San Bartolome, Angel, Quiun, Daniel y Giesecke, 1997). Este método de rehabilitación con mallas proporciona una mayor ductilidad al sistema estructural, donde se prolonga la vida de la estructura durante un sismo y retarda el daño no reparable (Yamin et al., 2003). 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. Ejemplos de estudios de rehabilitación con entramados de madera se puede encontrar en (Gómez et al., 2016); (Jerez et al., 2017); (Uribe Kaffure et al., 2014), (Yamín Lacouture et al., 2007). Esta 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 técnica y científica que el refuerzo mediante platinas 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, tal como se presenta en (Reyes et al., 2020).

El reforzamiento mediante platinas de acero (de 100 mm de ancho y 6.35 mm de espesor) consiste en instalar estos elementos en ambas caras del muro como se evidencia en la Figura 1, donde se retira parcialmente el mortero de los muros para colocar las platinas. Estas platinas se configuran en un sistema de retícula en donde los elementos horizontales hacen anillos alrededor de las paredes y los elementos verticales se colocan a lo alto de la edificación, principalmente cerca a los bordes de las aberturas. Estas platinas verticales deben anclarse a la estructura de cubierta. 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) (Reyes et al., 2020).

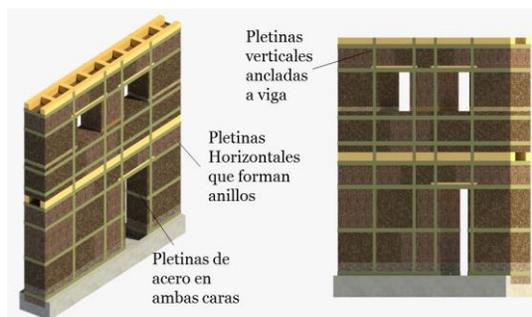


Figura 1. Esquema de reforzamiento con platinas de acero

En el caso de los elementos de madera (de 180 mm de ancho, 40 mm de espesor), para su correcta instalación en los muros, deben interconectarse también mediante pernos pasantes. Las maderas al igual que en el caso del acero, se instalan en sentido vertical y horizontal máximo cada 1500mm como se observa en la Figura 2 (típicamente 1000 mm), adicionando maderas en las esquinas y en los vanos de las aberturas como puertas y ventanas. Este sistema de entramados de madera se complementa con ángulos de acero en las esquinas.

El estudio presentado en este artículo se enfoca a la rehabilitación de muros de edificaciones patrimoniales mediante entramados de acero y de maderas de confinamiento evaluando simultáneamente los aspectos económicos y técnicos de estas dos intervenciones.

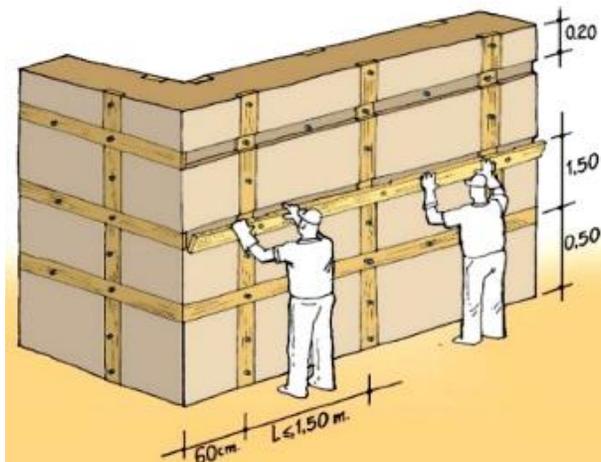


Figura 2. Reforzamiento con entramados de madera (AIS, 2004)

Adicional a lo anteriormente mencionado, se implementa un diafragma rígido, debido a que su ausencia 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 presentan una alternativa de mejora al desempeño global de la estructura (Jerez et al., 2017) (Shrestha et al., 2020). Así mismo este diafragma debe complementarse con una adecuada conexión con el refuerzo de los muros, mejorando de esta manera el comportamiento de la estructura (Shrestha et al., 2019).

Todas estas alternativas de rehabilitación se incluyeron en la normativa para la rehabilitación sísmica de edificaciones patrimoniales AIS-610-EP-2017 (AIS, 2017). Este documento se vinculó a la norma sismo resistente colombiana NSR-10 (AIS, 2010) (ley de obligatorio cumplimiento en el territorio colombiano) por el decreto de los Ministerios de Cultura y Vivienda número 2113 de 25 nov del 2019. Dentro de AIS-610-EP-2017 se resaltan los entramados con platinas de acero y con maderas como una alternativa de rehabilitación sísmica que permite disipar energía adecuadamente con un factor de reducción de la fuerza sísmica de 2.5. Lo anterior se debe complementar con un mejoramiento de los diafragmas de las edificaciones patrimoniales en tierra.

Con el fin de aportar a la solución del problema sísmico de las edificaciones patrimoniales en tierra (en este caso Tapia Pisada), el presente documento busca evaluar estructural y económicamente el reforzamiento con entramados (platinas de acero y elementos en madera), complementado en todos los casos con un diafragma rígido. Lo anterior se hará a la luz de la

normativa AIS-610-EP-2017 en edificaciones patrimoniales en tierra de uno y dos niveles.

2. METODOLOGÍA

Teniendo en cuenta la alta vulnerabilidad sísmica a la que están expuestas las edificaciones construidas en tapia pisada, es indispensable reducir dicha vulnerabilidad implementando procesos de rehabilitación, considerando la importancia de mantener lo más inalterado posible los valores patrimoniales y culturales de las edificaciones y además que dicha implementación sea viable técnica y económicamente.

Por lo tanto, el marco de la investigación se centra en la evaluación estructural y económica del reforzamiento estructural de edificaciones patrimoniales de uno y dos niveles construidas en tapia pisada usando las recomendaciones de análisis y modelización incluidas en la norma AIS 610-17. Para ello se planteó realizar una rehabilitación mediante entramados de platinas 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 buscó una comparación de estas alternativas de refuerzo con platinas con entramados de madera separados entre sí cada metro.

Para la metodología de la investigación, se planteó realizar en una serie de 7 etapas como se indica a continuación.

- Levantamiento de información planimétrica existente y visitas técnicas de inspección: Se realizaron visitas a edificaciones construidas en tierra de 1 y 2 pisos. De esta manera se identificaron las tipologías, dimensiones y materiales de los muros, sistema de entrepiso, sistema de cubierta, cimentación, uso, entre otros. Así mismo se obtuvo amplia información planimétrica de diversas edificaciones construidas en tierra en la zona Andina Colombiana
- Con base en la información recolectada se construyeron modelos en Revit (Autodesk ®) de edificaciones patrimoniales en tierra y de esta manera se realizó un análisis estadístico de variables geométricas como espesores de los muros, altura de las edificaciones (1 y 2 pisos), dimensiones de puertas y ventanas, longitudes y anchos de los muros, etc. Esta información estadística permitió escoger dos edificaciones patrimoniales en tierra que fueran de los espesores más representativos, una de 1 piso y otra de 2 pisos, con el fin de que sirvieran de estudio de caso para la implementación de la norma AIS-610.
- Recopilación de información sobre proyectos de rehabilitación realizados: Se tuvieron en cuenta investigaciones y estudios de casos de reforzamiento de edificaciones históricas por parte de restauradores expertos en el tema. De esta manera se identificaron las mejores prácticas y técnicas constructivas.
- Modelación numérica: Se generaron 10 modelos numéricos en el software SAP 2000 con reforzamiento con platinas de acero y entramados de madera con diferentes espaciamientos del refuerzo. De estos 10 modelos numéricos, 5 correspondían a la edificación de 1 nivel (1 modelo sin reforzamiento, 4 modelos con reforzamiento) y 5 a la edificación de dos pisos (1 modelo sin reforzamiento, 4 modelos con reforzamiento). Estos modelos se construyeron a partir

de la información recopilada en los archivos históricos, complementado con las visitas técnicas hechas a lo largo de los años por los investigadores, además de la información recolectada con maestros (arquitectos e ingenieros) restauradores expertos en el tema.

- Se realizó el cálculo de las cantidades de obra de los 8 modelos de reforzamiento propuestos, donde se consideró no solamente el reforzamiento de muros sino también las intervenciones adicionales como los diafragmas rígidos.
- Se desarrollaron análisis de precios unitarios para determinar los 8 diferentes presupuestos de reforzamiento, partiendo de información primaria de rendimientos de proyectos ya ejecutados.

3. ANÁLISIS EDIFICACIONES EN TIERRA EN LA ZONA ANDINA COLOMBIANA

3.1 Caracterización geométrica edificaciones Zona Andina

La caracterización estructural (geométrica) se llevó a cabo para 31 casas patrimoniales en tierra de 1 y 2 pisos. La caracterización parte del análisis de la tipología de muros, tipología de vanos y entrepisos.

Una vez recopilada la información planimétrica se construyeron modelos en Revit (Autodesk ®). Posteriormente, se obtuvo información estadística de las características geométricas de las edificaciones patrimoniales en tierra de 1 y 2 pisos analizadas. La modelación de las edificaciones 3D a partir de la planimetría, permitió la representación fiel de las 31 casas patrimoniales 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, conocer la patología de las edificaciones y gestionar las diferentes propuestas de mantenimiento y rehabilitaciones de este tipo de bienes de interés cultural. A manera de ejemplo se muestra la

Figura 3, donde se evidencian en diferentes colores los espesores de muro encontrados. Complementariamente con el código QR de dicha Figura el lector puede ver una imagen estéreo panorámica de una edificación de dos pisos.



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

En la Figura 9 se ilustra algunas características de una edificación de un nivel encontrada en la zona Andina colombiana. Al igual que en el caso de la Figura 3 con el código QR de la Figura 4 el lector puede ver una imagen estéreo panorámica de dicha edificación.

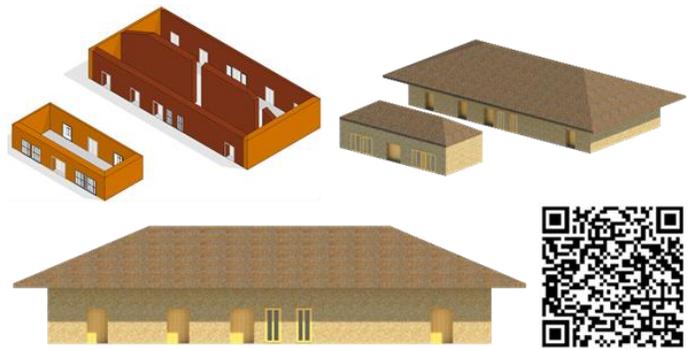


Figura 4. Modelo BIM de edificación de un nivel– Modelo en Revit a partir de información recopilada

En el caso de los muros se realiza un análisis de densidad y espesor promedio en cada uno de los niveles de la vivienda. A partir del análisis de 16 casas de un nivel y 15 de dos niveles se realizan Box Plots que muestran la variabilidad y los promedios de la muestra estadística. En particular se determina que el espesor promedio de muros para casas de dos niveles es 0.695m y para un piso 0.619m. Por su parte las casas de dos niveles presentan alturas promedio de 3.518m en primer piso y 3.014m en segundo nivel, mientras que las casas de un nivel tienen una altura promedio de 3.105m. En la Figura 5 y Figura 6 se evidencian los Box Plots en donde se representa la distribución de los datos obtenidos de las 31 casas clasificadas en dos tipos: casas de un nivel y casas de dos niveles.

Del análisis de muros en ambos tipos de edificaciones de uno y dos niveles se concluye que las casas de un nivel poseen un espesor menor de muro debido a las mismas cargas que estos han de recibir.

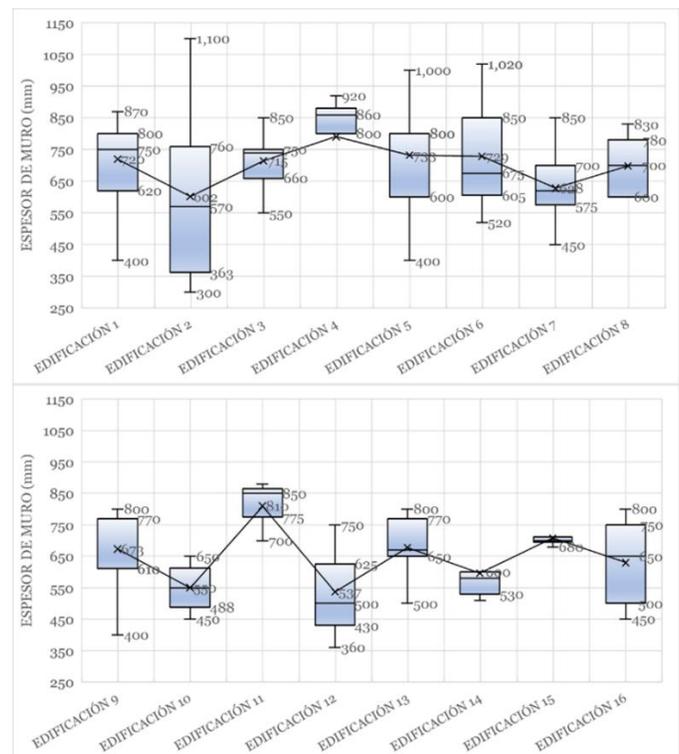


Figura 5. Box Plot Análisis Estadístico Tipología Muros de un nivel.

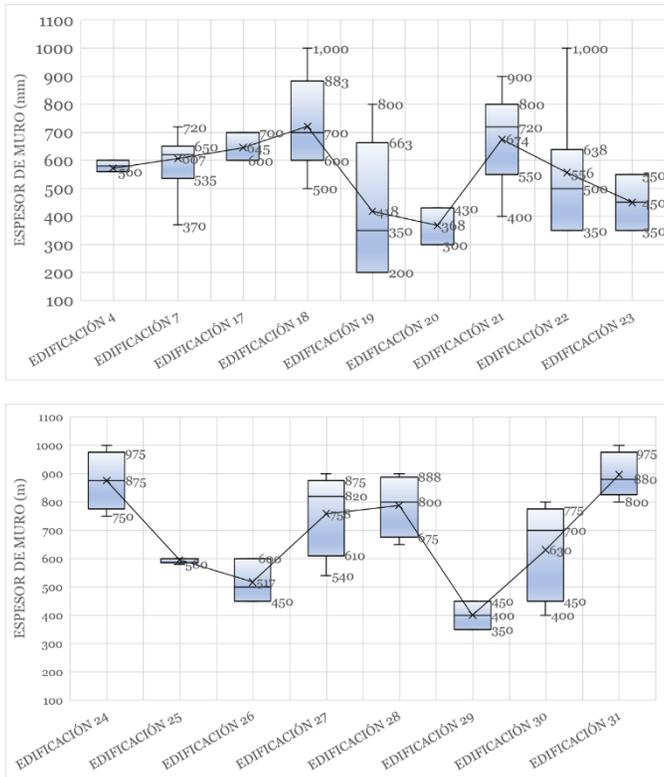


Figura 6. Box Plot Análisis Estadístico Tipología de Muros en casas de dos niveles.

Por otro lado, se realizó un análisis de la tipología de vanos el cual permite evaluar el porcentaje de área que el vano (puertas y ventanas) representa en el área del muro en tierra. Este indicador es determinante en el comportamiento sísmico. De las viviendas analizadas se concluye que el 10.90% del área de los muros estructurales en tapia pisada son vanos.

Por su parte, del análisis de la tipología de entrepiso se estableció que típicamente está compuesto por vigas de coronación y vigas cargueras de sección rectangular entre los 15cm y 20cm, las cuales se encuentran espaciadas entre 0.6m y 1m.

4. CASOS DE ESTUDIO

De las 31 edificaciones patrimoniales en tierra a las que se les recopiló la información, se escogieron dos edificaciones patrimoniales, una de un piso y otra de 2 niveles cuyas características geométricas están en la zona central de la estadística recopilada. Dichas edificaciones están dentro de un mismo predio correspondiente a una hacienda en la zona Andina Colombiana. Estas datan del Siglo XVI, y de acuerdo con la información histórica recolectada estas edificaciones aparecen en el proceso de colonización, durante el cual se implantó el nuevo orden que transformó el ordenamiento del territorio del modelo indígena, al modelo Hispano. La Hacienda bajo estudio (Gonzales Mora, 2012), está ubicada en Cota, Cundinamarca y se dice que la Compañía de Jesús (a comienzos del siglo XVII) (Melo Delgado & Olivios Lombana, 2006), fue la encargada de adoctrinar los pueblos de indios de Cajicá en 1605 y de Fontibón en 1608 bajo la estructura de las Misiones en América. En este contexto se reciben las tierras en las que se funda la Hacienda estudiada.

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, sobre 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 (Lopez Pérez, 2021).



Figura 7. Hacienda en la zona Andina Colombiana de 1 piso. Tomado de (Uniandinos, 2019)



Figura 8. Hacienda en la zona Andina Colombiana de 2 pisos. Tomado de (Uniandinos, 2019)

En la Figura 9 se muestra una vista en planta de la hacienda en estudio y sus características a partir de la información recopilada. Con el código QR se puede hacer una vista 360° de las dos edificaciones de la hacienda

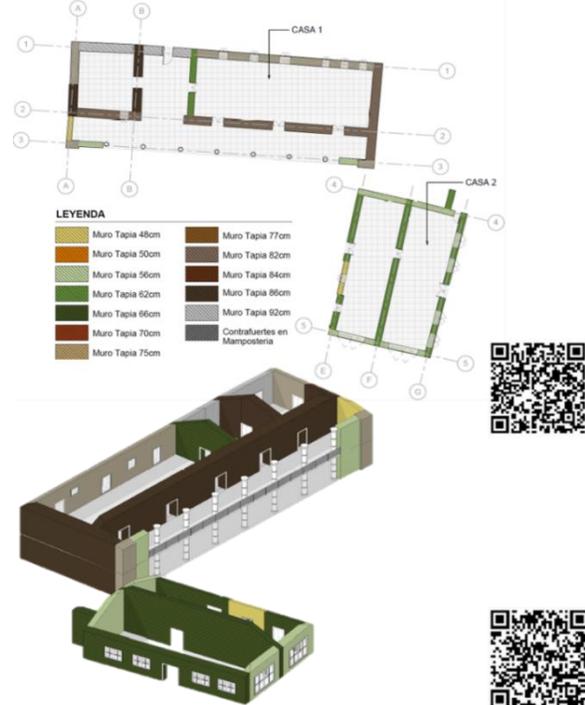


Figura 9. Vista en planta Hacienda en la zona Andina Colombiana—Modelo en Revit ® a partir de información recopilada.

5. EVALUACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS EXISTENTES

Para analizar cómo se comporta la estructura sin reforzamiento, se deben considerar aspectos como la determinación de índices de sobreesfuerzo individual de los elementos de la edificación y comparar la capacidad de cada uno de estos elementos frente a la demanda. Para esto se hacen verificaciones de esfuerzos/fuerzas dentro y fuera del plano de muros y machones. Así mismo se deben obtener 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 601-EP-2017 (Sísmica, 2017). Para la determinación de los índices de sobre-tensión mencionados anteriormente para las edificaciones sin reforzar, se usaron las siguientes expresiones del numeral del documento:

Resistencia a la compresión de muros, sometidos a carga axial mediante la ecuación [1].

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

Coefficiente de reducción por excentricidad, con la siguiente ecuación [2].

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

Resistencia a la tensión de muros, sometidos a carga axial, con la ecuación [3].

$$[3] \quad P_{nx} = f_r \times A_{mx}$$

Entendiendo que: f'_m , es la resistencia de muros de tierra sin reforzamiento, A_m , el área nominal del eje a evaluar, R_e , el coeficiente de reducción por excentricidad, obtenido por la fórmula [2] o por la tabla 6.5.1-1 AIS-610-EP-2017, f_r , el módulo de rotura de la tapia pisada, h , la altura y t , el espesor del muro.

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

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

Donde, P_{uz} , es la fuerza axial sobre el muro y f_v , es la resistencia al cortante de la tapia pisada.

Finalmente, para conocer la resistencia a flexión con respecto al eje horizontal y al eje vertical combinadas con la fuerza axial horizontal y vertical se utilizaron las siguientes expresiones:

Resistencia a la flexión de la sección alrededor del eje "y", dada por la ecuación [5].

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

Resistencia a la flexión de la sección alrededor del eje "x", mediante la ecuación [6].

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

Y resistencia a la flexión de la sección alrededor del eje "z", con la formula [7].

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

Donde, b_z , es el ancho de la sección del muro en dirección del eje a evaluar, ϕ , es el coeficiente de reducción de resistencia y t , es el espesor de la sección del muro.

En la Figura 10, se evidencia la convención y las direcciones de las acciones externas sobre los muros.

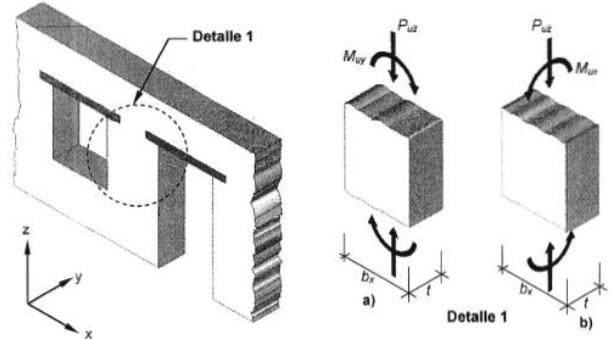


Figura 10. Flexión con respecto al eje horizontal combinada con fuerza axial vertical (AIS, 2017).

Para realizar este análisis se tomaron tramos de muros entre vanos como lo estipula la AIS 601-EP-2017, tanto para la vivienda de un piso como para la vivienda de 2 pisos.

6. MODELACIÓN NUMÉRICA

La curva de comportamiento de la Tapia Pisada no responde a un comportamiento lineal elástico, al igual que otros materiales usados en la construcción de edificaciones. Este material reforzado con acero o madera tampoco tiene un comportamiento elástico lineal en todo su rango de deformaciones.

Por ello 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 (T.-L. Bui et al., 2020; Illampas et al., 2014; Loccarini et al., 2020; Reyes, Smith-Pardo, Yamin, Galvis, Sandoval, et al., 2019)

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 definió un procedimiento de cálculo y diseño del reforzamiento de edificaciones patrimoniales en tierra de 1 y 2 pisos en tierra, cuya aplicación mediante modelos elásticos se resumirá en los siguientes apartados. Lo anterior parte de los fundamentos de la mecánica estructural y considerando que las pruebas experimentales reportadas en la literatura científica permiten asignarle al sistema de Tapia Pisada reforzada una capacidad de disipación de energía. Por ello en la norma AIS 610 se le asigna a la tierra con refuerzo un coeficiente de reducción de la fuerza sísmica (parámetro R en la NSR 10). En el caso de la Tapia Pisada sin refuerzo, el valor de R para las edificaciones es de 1.0 (no hay disipación de energía y la falla es frágil). Por su parte el caso de tapia pisada reforzada con platinas de acero o con entramados de madera el valor de R es 2.5.

Con el anterior marco de referencia, se construyeron 10 modelos numéricos con el software SAP2000 descritos en la Tabla 1 de viviendas de uno y dos pisos. Los modelos analizados consideran refuerzos con platinas de acero y entramados de madera tal como se mostró en capítulos anteriores. Si bien es claro que la Tapia Pisada y su interacción con el refuerzo (acero o madera) no obedece a leyes elásticas lineales, el propósito de este análisis es corroborar el tipo de procesos que se llevaría a cabo en una oficina de cálculo y diseño estructural, quienes son los usuarios finales de la norma AIS-610. Este tipo de análisis elástico es permitido en dicha norma, con los coeficientes de reducción de la fuerza sísmica R tal como se lleva a cabo en edificaciones de acero y de concreto reforzado.

Tabla 1. Descripción de modelos de casas reforzadas de 1 piso y 2 pisos.

Casa	Características del modelo
Casa de 1 Piso	Modelo sin reforzamiento
	Reforzamiento mediante entramados de platinas de acero de 4" x 1/4" a un espaciamiento de 0,50 m entre sí, complementado con un diafragma rígido.
	Reforzamiento mediante entramados de platinas de acero de 4" x 1/4" a un espaciamiento de 1,00 m entre sí, complementado con un diafragma rígido.
	Reforzamiento mediante entramados de platinas de acero de 4" x 1/4" a un espaciamiento de 2,00 m entre sí, complementado con un diafragma rígido.
	Reforzamiento mediante entramados de madera de 40mm x 180mm a un espaciamiento de 1,00 m entre sí, complementado con un diafragma rígido.
	Modelo sin reforzamiento
Casa de 2 Pisos	Reforzamiento mediante entramados de platinas de acero de 4" x 1/4" a un espaciamiento de 0,50m entre sí, complementado con un diafragma rígido.
	Reforzamiento mediante entramados de platinas de acero de 4" x 1/4" a un espaciamiento de 1,00m entre sí, complementado con un diafragma rígido.
	Reforzamiento mediante entramados de platinas de acero de 4" x 1/4" a un espaciamiento de 2,00m entre sí, complementado con un diafragma rígido.
	Reforzamiento mediante entramados de madera de 40mm x180mm a un espaciamiento de 1,00m entre sí, complementado con un diafragma rígido.
	Modelo sin reforzamiento

Para la construcción de los modelos numéricos y distribución del reforzamiento de cada modelo se siguieron las siguientes recomendaciones (CIMOC, 2015):

- 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. En la parte inferior del muro, es recomendable que los tres primeros anillos estén separados máximo 0,50m.
- Se debe poner un anillo de refuerzo al nivel de la viga corona.
- El refuerzo vertical se debe ubicar a 100 mm 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, mínimo cada 600 mm para mejorar la compatibilidad de los materiales.

Las viviendas de uno y dos niveles se modelaron estructuralmente con los elementos definidos en la Tabla 2.

Tabla 2. Definición de elementos en programa SAP 2000 para la vivienda de 1 piso y 2 pisos

Elemento	Elemento para modelización 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 en piedra	Frame	Piedra	NA	20000	26
Contrafuertes	Solid	Piedra	NA	20000	26
Vigas de entrepiso	Shell	Madera	16 (C) 15 (T)	9000	7
Platinas	Frame	Acero	250	200000	78
Pernos	Frame	Acero	420	200000	78

La malla de elementos finitos de los modelos se realizó teniendo en cuenta las recomendaciones dadas por (CIMOC, 2015) y por la experiencia de ingenieros y arquitectos restauradores que asesoraron el presente estudio proporcionando información de proyectos ya realizados y lecciones aprendidas de experiencias pasadas. Para las condiciones de contorno se establecieron apoyos de segundo grado en los sólidos inferiores.

Se definió un análisis de cargas, teniendo en cuenta las recomendaciones del título B de la Norma Sismo Resistente de la República de Colombia NSR-10 y un análisis modal espectral. De la misma manera se incluyeron las recomendaciones dadas en el manual para la rehabilitación de viviendas construidas en adobe y tapia pisada (AIS, 2017).

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 una edificación que se utiliza para reuniones (5 kN/m²). Por su parte la cubierta se cargó con la tipología establecida en este tipo de edificaciones; en donde las tejas de barro, mortero de tierra de pega y demás elementos pesan del orden de 8.9 kN/m².

Adicionalmente, se cargaron los modelos con las combinaciones de carga que se muestran en la Tabla 3 y se sometieron al efecto de un sismo. Por su parte el espectro de diseño (Figura 11) se calculó según la recomendación del capítulo 5.2.1.1 de la AIS-610-EP-2017.

Tabla 3. Combinaciones de carga utilizadas para los modelos

Combinaciones de carga		
Sin Refuerzo	Acero	Madera
1,2D+1,6L+0,5G	1,4D	1,4D
1,4D	1,2D+1,6L+0,5G	1,2D+1,6L
1,2D+1,6L	1,2D+1,6L	1,2D+0,5G
1,2D+1L+0,33SX+1SY	1,2D+1,5L	1,2D+0,75L+0,375G
1,2D+1,5L	1,2D+1L+0,135SX+0,4SY	1,2D
1,2D+1L+0,33SY+1SX	1,2D+1L+0,4SX+0,135SY	1,2D+0,28SX+0,094SY
0,9D+0,33SX+1SY	0,9D	1,2D+0,75L+0,375G
0,9D	0,9D+0,135SX+0,4SY	1,2D+0,21SX+0,0709SY+0,75L+0,5G
0,9D+0,33SY+1SX	0,9D+0,135SY+0,4SX	0,6D
-	-	0,6D+0,28SX+0,0945SY

Donde D se considera como la carga muerta, L la carga viva, G la carga debido al granizo, SX el sismo en sentido x y SY el sismo en sentido y .

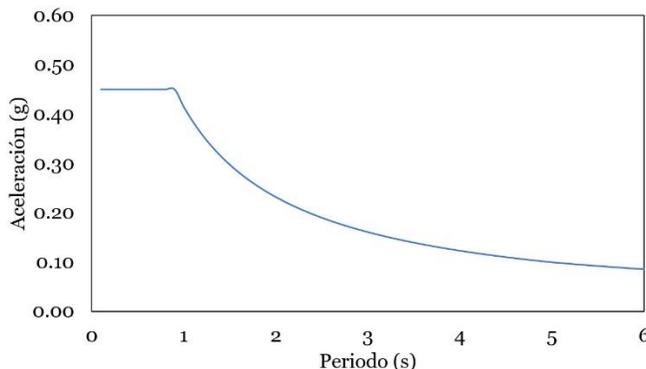


Figura 11. Espectro de diseño para vivienda en Cota- Cundinamarca

Se tuvo en cuenta la recomendación realizada por el documento AIS-610-EP2017, donde la fuerza sísmica se calcula sólo con la meseta del espectro de aceleraciones y con un coeficiente de reducción de la fuerza sísmica R mencionado previamente.

7. ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS Y PRESUPUESTOS

Para lograr obtener los 8 presupuestos propuestos para las condiciones de reforzamiento, calcularon las cantidades de cada uno de los modelos, donde no solo se tuvieron en cuenta actividades con relación a la instalación de las platinas, sino también actividades referentes a cimentación, cubierta y acabado con pañete, con el fin de ajustarse a la realidad y a las actividades que se han desarrollado en proyectos donde ya se ha realizado la rehabilitación mediante platinas de acero y entramados de madera.

Con la información de las cantidades de todos los modelos, se procedió a construir una herramienta de cálculo, donde se establecieron los diferentes análisis de precios unitarios de las diversas actividades necesarias para realizar las intervenciones. Para la realización de estos análisis de precios, se tuvieron en cuenta rendimientos de proyectos ya ejecutados y precios comerciales del año 2021. En esta herramienta se incluyeron listados de materiales, mano de obra y equipos.

Finalmente, se consolidaron los precios unitarios y las cantidades de las actividades, dividiéndolo por capítulos Y se obtuvo un valor de la intervención/reforzamiento estructural por metro cuadrado de cada uno de los casos analizados.

8. ANÁLISIS DE RESULTADOS

8.1. Resultados de la evaluación de la estructura existente

De acuerdo a los lineamientos establecidos por la norma AIS-610-EP-2017, cada muro o machón se identifica como un segmento vertical, limitado por sus costados por aberturas o por una abertura o un borde (AIS, 2017), como por ejemplo tramos de muros entre 2 ventanas o entre una ventana y una puerta. En la Figura 12 mediante distintos colores se muestra la división de una de las fachadas de los muros de la edificación de un piso.

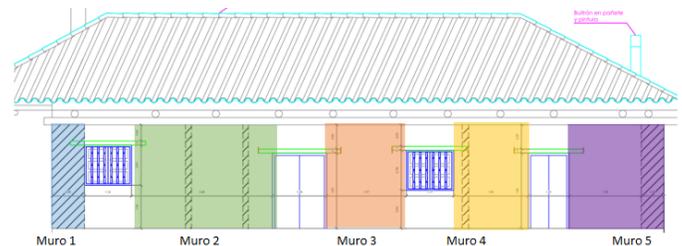


Figura 12. Fachada a evaluar los índices de sobre-tensión de muros existente – Casa de 1 piso.

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

Para determinar la capacidad se realizó mediante las combinaciones de carga descritas en la sección B.2.4.2 del Reglamento NSR-10 y para la demanda, se aplicaron las expresiones mencionadas en el numeral 5, con las cuales se determinaron los índices de sobre-tensión individual de cada uno de los elementos de la edificación.

A continuación, en la Tabla 4 se presentan como ejemplo los resultados de índices de sobre-tensión de una de las fachadas de la casa de un piso.

Tabla 4. Índices de sobre-tensión en muro casa de un piso eje y

Índices de sobre-tensión Muro en y									
Muro	Axial			Cortante			Momento		
	Pu (kN)	Pn (Kn)	Ip	Vu (kN)	Vn (kN)	Iv	Mu (Kn-m)	Mny (kN-m)	Im
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

Como resultado se obtuvo para la vivienda de 1 piso, que los índices de sobre-tensión (demanda dividida la resistencia) en el eje y 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 Re éste es mayor a 0.33. Estos índices superiores a 1.0 son un indicativo de la vulnerabilidad de la edificación y que al momento de un evento sísmico presentan una alta probabilidad de colapso.

Es importante tener en cuenta el coeficiente Re 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 al superar su estabilidad estructural.

Se realizó el mismo análisis en la vivienda de 2 pisos (Figura 13), donde a diferencia de la casa de 1 piso se evidencio que al ser una casa de mayor altura, es más probable que los muros fallen por volcamiento. Se evidenció que, al momento de calcular la resistencia a la compresión de los muros al ser sometidos a carga axial sin excentricidad, el factor Re previamente mencionado en un 99% de los muros presenta valores superiores a 0.33, lo que demuestra la inestabilidad de estos y la alta probabilidad de falla por volcamiento.

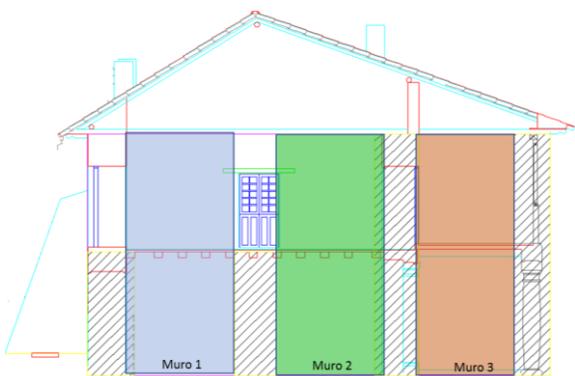


Figura 13. Fachada a evaluar los índices de sobre-tensión de muros existente - Casa de 2 pisos.

Con base en lo obtenido se da cabida al planteamiento de reforzamiento de los muros de cada casa con platinas de acero en sentido vertical y horizontal espaciadas cada 0,50, 1,00 y 2,00m respectivamente, con el uso de pernos. Todos los refuerzos se complementaron con un diafragma rígido como entrepiso de la estructura y una viga corona de concreto reforzado.

8.2. Resultados de la modelación numérica

Se iniciaron los análisis de las edificaciones sin reforzamiento, haciendo una revisión de las tensiones en los muros, en la Figura 14 se muestran las tensiones S_{22} (Esfuerzos de compresión axial-flexo compresión) obtenidos en los muros de tierra apisonada de las casas de uno y dos pisos.

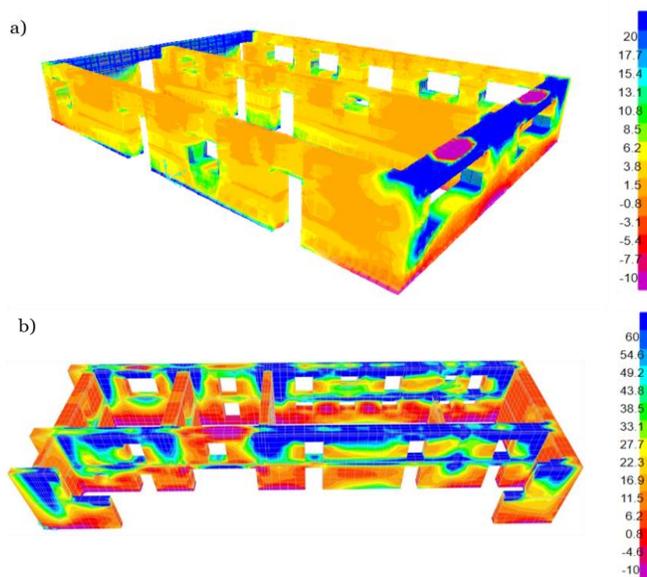


Figura 14. Tensión S_{22} en muros a) Casa de 1 piso b) Casa de 2 pisos

Se evidenciaron tensiones superiores a 60 kPa tanto para la casa de 1 piso como para la casa de dos pisos, estas se muestran en color azul en la Figura 14, los esfuerzos altos se presentan principalmente cerca a vanos de puertas y ventanas, unión entre muros y zonas altas de muros. No obstante, para establecer cómo es la distribución de las tensiones en los muros para la edificación de 1 y dos pisos, se llevó a cabo un 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 de acuerdo con la referencia (Bran & Suesca, 2021) la resistencia a la flexo tracción de la Tapia Pisada sin refuerzo está entre 20 y 25 kPa, se observa en la Figura 15 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.

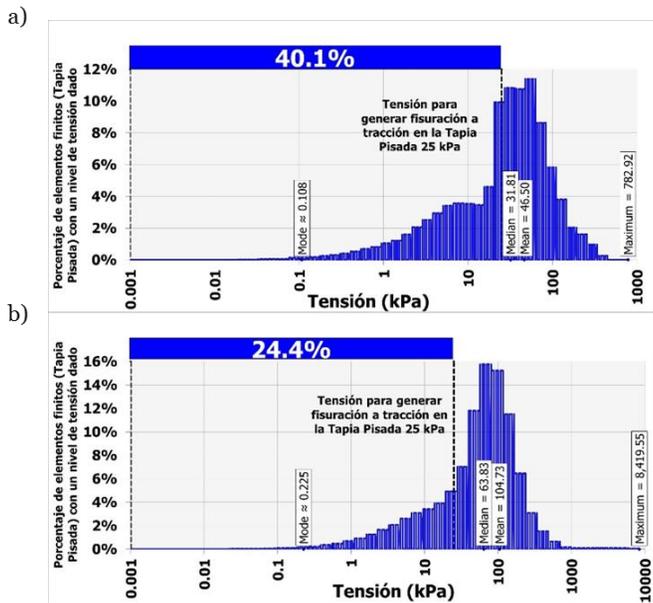


Figura 15. Histograma de frecuencias de la tensión principal mayor a) Casa 1 Piso sin refuerzo, b) Casa 2 pisos sin refuerzo

Dado lo anterior, se evidencia la necesidad de realizar el reforzamiento estructural mediante entramados de platinas de acero (o de madera), pernos metálicos y diafragma rígido en el entrepiso y cubierta para ambas edificaciones.

Para realizar un análisis de sensibilidad, el reforzamiento con platinas de acero se planteó para tres cuantías diferentes: una cuantía de acero igual a la de 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 platinas 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 platinas cada 500 mm y una cuantía de la mitad de la especificación de AIS 610 implica instalar platinas del mismo tamaño, pero cada 2000 mm. En la Figura 16 se muestra el esquema de refuerzo de un muro de la fachada con platinas 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) Casa de un piso, b) Casa de dos pisos

En la Tabla 5 se presentan los modelos analizados incluyendo el peso de las viviendas. Se evidencia la diferencia de los pesos con respecto a los diferentes espaciamientos planteados, entre mayor sea el espaciamiento entre las platinas menor es el peso

de la estructura, esto se realizó con el fin de establecer la diferencia en peso entre las diferentes alternativas de espaciamiento y comprender el porcentaje de la cantidad de acero necesario para cada uno.

Tabla 5. Peso de modelos realizados

	Modelo	Peso (kN)
Casa 1 Piso	Sin reforzamiento	1326,55
	Espaciamiento 0,5m con platinas	1532,58
	Espaciamiento 1,0m con platinas	1516,3
	Espaciamiento 2,0m con platinas	1500,03
Casa 2 Pisos	Sin reforzamiento	6800,52
	Espaciamiento 0,5m con platinas	6972,24
	Espaciamiento 1,0m con platinas	6915,55
	Espaciamiento 2,0m con platinas	6877,9
	Espaciamiento 1,0m con entramados de madera	6822,78

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. Por esta razón, el espaciamiento mínimo recomendado en la norma AIS-610 es de 1.0 metros.

También se realizó una comparación de los periodos de vibración de cada una de las estructuras obteniendo los resultados que se evidencian en 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, donde se evidencia que a medida de que incrementa el espaciamiento de las platinas, aumenta su periodo en segundos, ya que cuentan con mayor posibilidad de desplazamiento.

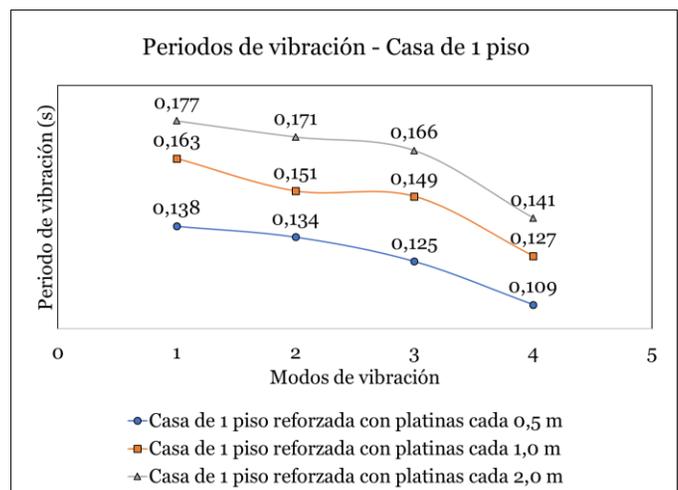


Figura 17. Periodos de vibración casa de 1 piso

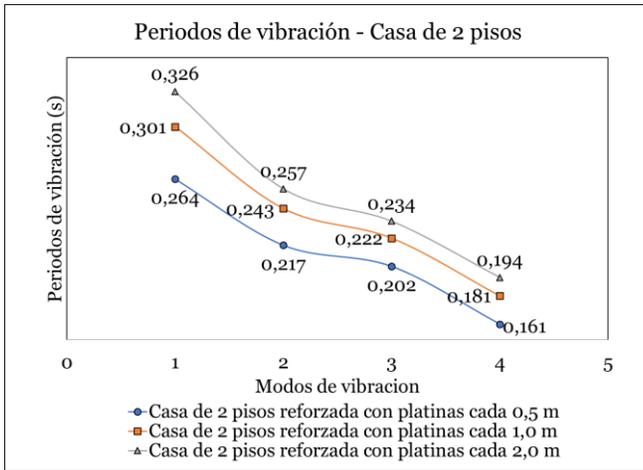


Figura 18. Periodos de vibración casa de 2 pisos.

Así mismo se realizó la revisión de las derivas de las edificaciones de 1 y 2 pisos, según los límites establecidos en la tabla A.6.4-1 de la NSR-10 (AIS, 2010), donde la deriva máxima no debe superar el 1% de la altura de la edificación. En la Tabla 6 y

Tabla 7 se presentan los índices de flexibilidad de las estructuras modeladas. Donde el factor I_f indica el índice de flexibilidad dado por Δ_a que es la deriva de análisis y Δ_p que determina la deriva permitida correspondiente al 1% de la altura de cada edificación, se tiene en el caso de la casa de un piso una altura de 2,55m y se obtienen valores de deriva menores al porcentaje permitido cuando se refuerza la estructura, en el caso de la casa de 2 pisos se tiene una altura de 5,4m donde también se tienen valores dentro del rango permitido.

Tabla 6. 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 platinas de acero a 0,5m	0,04	0,04
Reforzado con platinas de acero a 1,0m	0,05	0,05
Reforzado con platinas de acero a 2,0m	0,06	0,06

Tabla 7. Índices de flexibilidad casa de dos pisos

Cálculo de derivas - Vivienda 2 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 platinas de acero a 0,5m	0,20	0,20
Reforzado con platinas de acero a 1,0m	0,26	0,28
Reforzado con platinas 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.

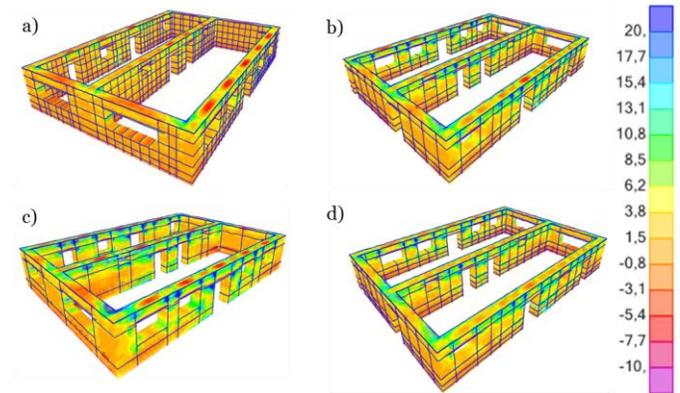


Figura 19. Tensiones S22 en muros modelo de 1 piso reforzado a) Espaciamiento de platinas a 0,5m, b) Espaciamiento de platinas a 1,0m, c) Espaciamiento de platinas a 2,0m, d) Espaciamiento a 1,0m con entramados de madera.

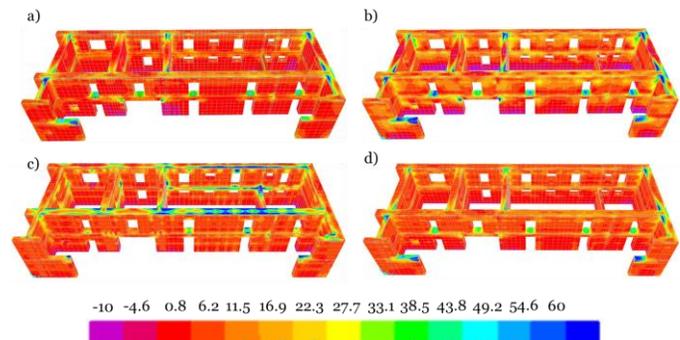


Figura 20. Tensiones S22 en muros modelo de 2 pisos reforzados a) Espaciamiento a 0,5m, b) Espaciamiento a 1,0m, c) Espaciamiento a 2,0m, d) Espaciamiento a 1,0m con entramados de madera

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 pisada para la edificación de 1 y dos pisos con los diferentes refuerzos implementados. Ejemplo de dicha distribución estadística se muestra en la Figura 21 y Figura 22. En dichas figuras se muestra 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 espaciamiento de platinas de 500 mm. Dichas tensiones principales se calcularon mediante Matlab ® a partir del estado generalizado de tensiones de SAP 2000 para cada punto material.

Considerando que de acuerdo con la referencia (Bran & Suesca, 2021) la resistencia a la flexo tracción de la Tapia Pisada está entre 20 y 25 kPa, se observa 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 Pisada de la edificación de dos pisos sin refuerzo eran inferiores a 25 kPa, cuando se implementa el refuerzo con platinas de acero cada 500 mm se obtiene que el 83.2 % de los elementos finitos tienen una tensión principal menor a 25 kPa. A manera de resumen, en la Tabla 8 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 dicha tabla también se muestra el valor promedio de σ_1 para los modelos analizados.

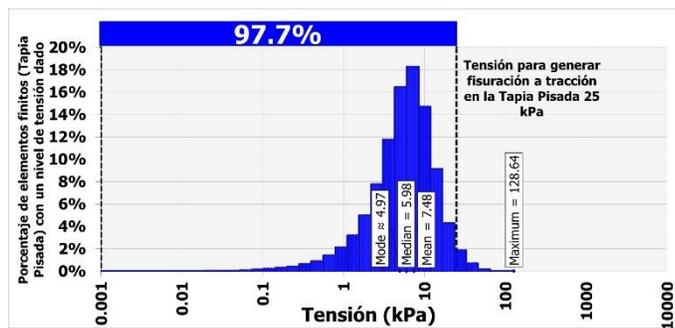


Figura 21. Histograma de frecuencias de la tensión principal mayor casa 1 piso con platinas a espaciamiento cada 0.5m

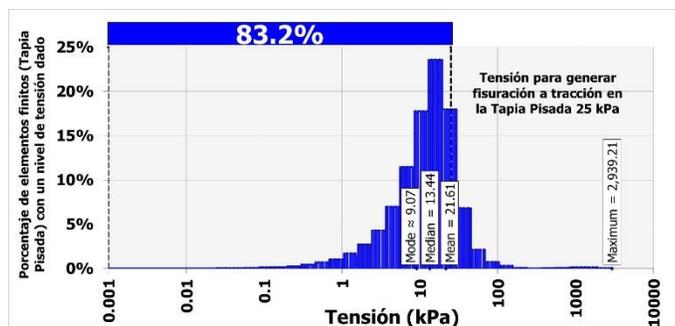


Figura 22. Histograma de frecuencias de la tensión principal mayor casa 2 pisos con platinas a espaciamiento cada 0.5m

Tabla 8. Porcentaje de puntos materiales con tensión menor a 25kPa

Edificación	Espaciamiento del refuerzo con platinas (m)	σ_1 promedio (kPa)	% de puntos materiales con $\sigma_1 < 25$ kPa
1 piso	Sin reforzamiento	46.50	40.1
	0.5	7.48	97.7
	1.0	11.81	90.7
	2.0	12.85	88.0
2 pisos	Sin reforzamiento	104.73	24.4
	0.5	21.61	83.2
	1.0	27.58	69.6
	2.0	31.87	61.8

Es evidente en la tabla anterior que las tensiones promedio disminuyen en la medida que el espaciamiento del refuerzo en acero es menor. También es claro que cuanto mayor densidad de refuerzo se tenga la tensión en los muros de Tapia Pisada tienden a ser inferior al límite de resistencia a la tracción de 25 kPa. Esta mejora es notoria y confirma la importancia de la alternativa de refuerzo implementada y que es corroborada por

las pruebas experimentales reportadas en las referencias (Reyes et al., 2020),(Reyes, Smith-Pardo, Yamin, Galvis, Angel, et al., 2019).

Posteriormente, el proceso de revisión requiere determinar las tensiones de las platinas de cada uno de los modelos numéricos. De acuerdo con resultados experimentales obtenidos por (Bran & Suesca, 2021), la sección transversal de tierra reforzada con acero no trabaja al 100% en sección compuesta. Los resultados experimentales de (Bran & Suesca, 2021) indican que para el máximo momento resistente, la sección de tierra reforzada trabaja en el orden de magnitud del 30% de la sección compuesta. Considerando que las tensiones a tracción resistentes de la Tapia pisada son prácticamente despreciables al compararlos con la tensión de fluencia del acero (25 kPa vs 250 MPa), esta limitación del 30% de sección compuesta implica que el acero como máximo debe trabajar al 30% de su tensión de fluencia. Esta misma limitación se evidencia en el numeral 8.5.2 de la norma AIS 610-EP-2017. En el caso particular del presente estudio, las platinas están elaboradas con acero A36, con tensión de fluencias de 250 MPa. Siendo así, el máximo valor de la tensión demandada a las platinas de los muros en tierra reforzada no debe superar los 75 MPa.

Para visualizar y entender mejor las tensiones demandadas en las platinas para cada espaciamiento analizado, en la Figura 23 se muestran los histogramas de frecuencia de las tensiones máximas en las platinas de acero para cada uno de los espaciamientos analizados. Al comparar los resultados de las Figura 23a, 23c y 23e se evidencia que ninguna de las platinas supera la tensión límite de 75 MPa; lo cual implica que no se superaría los momentos resistentes de la sección establecidos en las referencias consultadas en el caso de la Edificación de 1 piso. Por su parte, al analizar las tensiones en las platinas que sirven de refuerzo a la Edificación patrimonial en Tapia Pisada de dos pisos (Figura 23b, 23d, 23f) es claro que hay platinas 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 platinas tendrían una tensión inferior al límite establecido en de 75 MPa.

Para el caso de los modelos de las casas de 1 y 2 pisos reforzados con listones de madera (Figura 23g y 23h) se tuvo en cuenta el título G de la norma sismo resistente (AIS, 2010). 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 seleccionad para el reforzamiento. Al analizar los resultados, es claro que ninguno de los entramados de madera que sirven de refuerzo a la edificación de 1 y 2 pisos supera este valor límite.

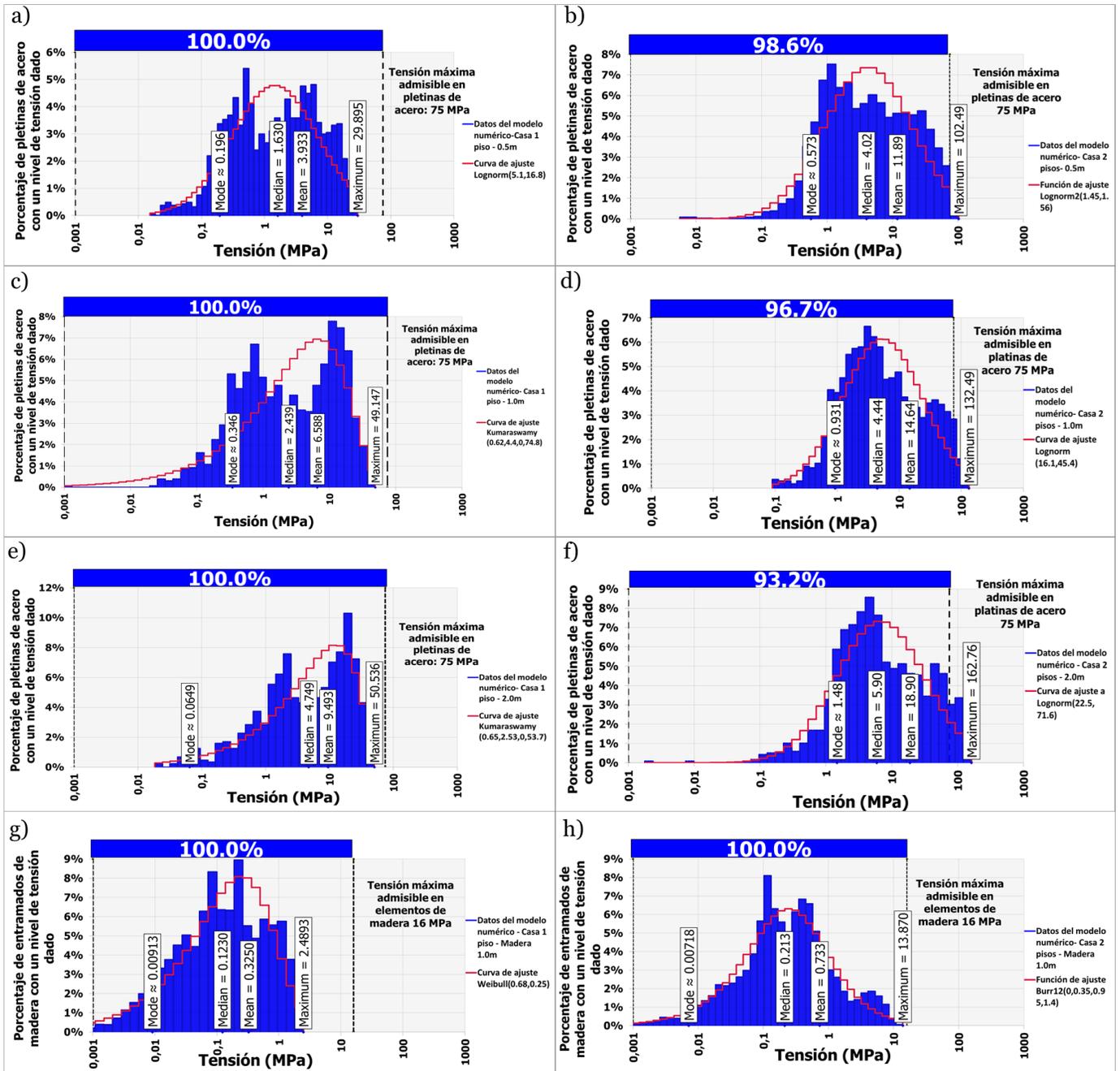


Figura 23. Histogramas de frecuencias dispersión de tensiones de pletinas a) Casa 1 piso espaciamento 0.5m, b) Casa 2 piso espaciamento 1.0m, c) Casa 1 piso espaciamento 2.0m, d) Casa 2 pisos espaciamento 0.5m, e) Casa 2 pisos espaciamento 1.0m, f) Casa 2 pisos espaciamento 2.0m, g) Casa 1 piso reforzada con listones de madera espaciamento 1.0m, h) Casa 2 pisos reforzada con listones de madera espaciamento 1.0m.

De manera complementaria, y para revisar el comportamiento del modelo numérico chequeando las pletinas con la norma (AISC, 2005) mediante el método LRFD, en la Figura 24 y Figura 25 se muestran los índices de sobre-tensión de las pletinas para cada uno de los espaciamentos analizados.

En color rojo se evidencian las pletinas que tienen índices superiores a 1.0 lo que indica que estas pletinas fallan a compresión y estarían presentando pandeo en el momento del evento sísmico.

Las pletinas que se muestran en color azul tienen índices entre 0 y 0,5 lo que indica que éstas no presentarían el fenómeno de pandeo. Es evidente que a medida que el espaciamento aumenta, la cantidad de pletinas con índices superiores a 1 aumenta.

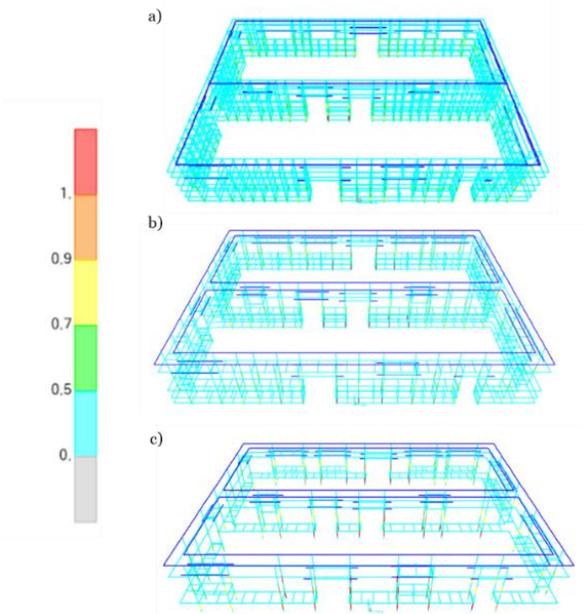


Figura 24. Índices de sobre-tensión en platinas de acero del modelo de 1 piso a) Espaciamento a 0,5m, b) Espaciamento a 1,0m, c) Espaciamento a 2,0m

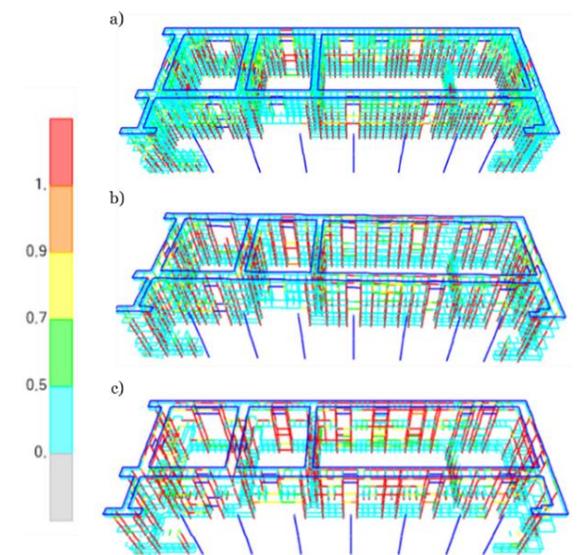


Figura 25. Análisis de índices de sobre-tensión en platinas de acero del modelo de 2 pisos a) Espaciamento a 0,5m, b) Espaciamento a 1,0m, c) Espaciamento a 2,0m

Debido a los resultados obtenidos en el modelo de la casa de 1 piso, se mejoró el modelo con espaciamento a cada metro (Figura 26). El proceso consistió en implementar 3 espesores diferentes de platinas (Tabla 9) con el fin de buscar minimizar costos de construcción y contar con un menor número de platinas con índices pequeños. Esto también permitió no tener platinas con índices superiores a 1 como se evidencia en el histograma de frecuencias de la Figura 28.

Adicionalmente se realizó, un histograma de frecuencia de las tensiones máximas en las platinas de acero para este modelo, donde se evidencia, la distribución de tensiones demandadas en las platinas y al realizar la comparación entre lo obtenido en la Figura 27 con la Figura 23c, se evidencia que, las tensiones son

mayores pero conservando los límites superiores. Esta mejor distribución del esfuerzo se logró disminuyendo el espesor de las platinas instaladas en sentido horizontal y aumentando el espesor de las platinas que están cerca de ventanas y puertas.

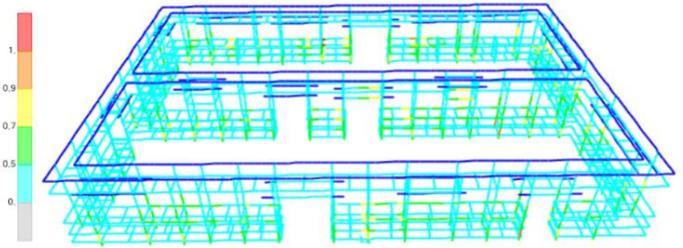


Figura 26. Análisis de índices de sobre-tensión en platinas de acero del modelo de 1 piso a espaciamento de 1,0m optimizado.

Tabla 9. Número y calibre de platinas de modelo con mejor distribución del refuerzo

# Platinas	Calibre y Ubicación de Platinas
1702	Platinas Horizontales de 1/8"
551	Platinas Horizontales de 1/4"
676	Platinas verticales muros cortos 1/4"
760	Platinas verticales muros largos 1/4"
998	Platinas verticales muros largos 3/8"

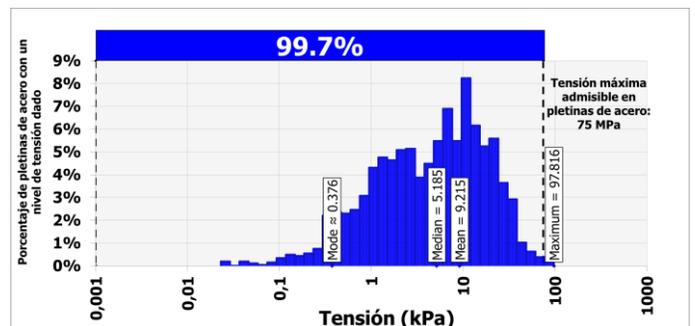


Figura 27. Histogramas de frecuencias dispersión de tensiones de platinas.

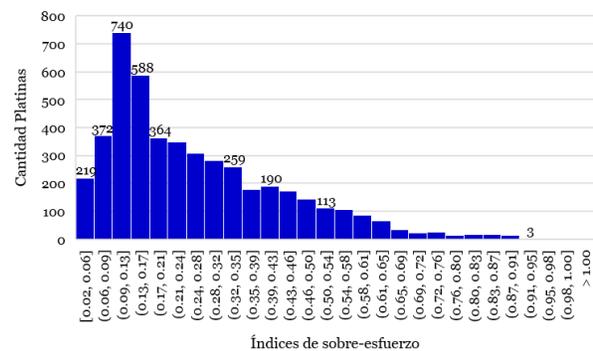


Figura 28. Histograma de frecuencias de índices de sobre-tensión de platinas modelo a espaciamento de 1,0m vivienda de 1 piso optimizado

Con este nuevo modelo, se encontró que hay una disminución en peso de 1,47 Ton con respecto al modelo realizado con platinas de calibre de 1/4" también espaciadas a un metro.

8.3. Presupuestos de las casas de estudio de 1 y 2 pisos

Para cada una de las estructuras se determinaron las cantidades de obra y análisis de precios unitarios, con lo cual se pudo determinar el costo por metro cuadrado de construcción (Ver Tabla 10 y Tabla 11).

Tabla 10. Precios de construcción por metro cuadrado de área en planta y por metro cuadrado de área vertical para la edificación de 1 piso.

Casa 1 piso	
Modelo	Valor por m ² de área en planta (EURO)
Reforzado con platinas de acero a 0,5m	€ 236
Reforzado con platinas de acero a 1,0m	€ 187
Reforzado con platinas de acero a 2,0m	€ 138
Reforzado con madera a 1,0m	€ 197

Tabla 11. Precios de construcción por metro cuadrado de área en planta y por metro cuadrado de área vertical para la edificación de 2 pisos.

Casa 2 pisos	
Modelo	Valor por m ² de área en planta (EURO)
Reforzado con platinas de acero a 0,5m	€ 240
Reforzado con platinas de acero a 1,0m	€ 210
Reforzado con platinas de acero a 2,0m	€ 205
Reforzado con madera a 1,0m	€ 228

Cada uno de los datos usados para la determinación de estos costos están apoyados con base en información suministrada por ingenieros y arquitectos restauradores, quienes han aplicado estos métodos de reforzamiento en la actualidad.

Se evidencia que el costo del reforzamiento con listones de madera separados cada 1.0 m, comparado con el reforzamiento en platinas de acero al mismo espaciamiento, es mayor, debido a que se deben realizar regatas más profundas en los muros al momento de la instalación de los listones de madera (por sus mayores dimensiones comparadas con las platinas). Esto provoca que el volumen de pañete de acabado y la mano de obra incrementen, por consiguiente, el costo de la obra será mayor.

A continuación, en la Tabla 12 y Tabla 13, se muestra el porcentaje de mano de obra de cada uno de los modelos realizados.

Tabla 12. Porcentaje de la mano de obra para la edificación de 1 piso.

Casa 1 piso	
Modelo	Mano de obra (%)
Reforzado con platinas de acero a 0,5m	47%
Reforzado con platinas de acero a 1,0m	48%
Reforzado con platinas de acero a 2,0m	48%
Reforzado con madera a 1,0m	61%

Tabla 13. Porcentaje de la mano de obra para la edificación de 2 pisos.

Casa 2 pisos	
Modelo	Mano de obra (%)
Reforzado con platinas de acero a 0,5m	53%
Reforzado con platinas de acero a 1,0m	54%
Reforzado con platinas de acero a 2,0m	54%
Reforzado con madera a 1,0m	63%

Se evidencia que, en todos los modelos la mano de obra representa un gran porcentaje del costo y para el caso de las viviendas reforzadas con madera, este porcentaje incrementa por las intervenciones necesarias para poder realizar su correcta instalación.

De manera alternativa, se realizó el análisis del costo por metro cuadrado de muro reforzado de las viviendas de uno y dos pisos (Ver Tabla 14 y Tabla 15).

Tabla 14. Valor por metro cuadrado de área neta y bruta de muros casa de un piso.

Casa 1 piso	
Modelo	Valor por m ² de área neta de muro (EURO)
Reforzado con platinas de acero a 0,5m	€ 125
Reforzado con platinas de acero a 1,0m	€ 84
Reforzado con platinas de acero a 2,0m	€ 45
Reforzado con madera a 1,0m	€ 263

Tabla 15. Valor por metro cuadrado de área neta y bruta de muros casa de dos pisos.

Casa 2 pisos	
Modelo	Valor por m ² de área neta de muro (EURO)
Reforzado con platinas de acero a 0,5m	€ 107
Reforzado con platinas de acero a 1,0m	€ 77
Reforzado con platinas de acero a 2,0m	€ 51
Reforzado con madera a 1,0m	€ 235

Finalmente, se encontró que el costo por metro cuadrado de muro reforzado con platinas de acero está en el orden de los 80 euros para las condiciones recomendadas por la norma AIS 610. En el caso de las casas reforzadas con listones de madera cada 1000mm el costo de reforzamiento por m² de muro oscila alrededor de los 250 euros.

9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A partir del análisis estadístico de la información recopilada de los muros de 16 edificaciones patrimoniales en tierra de un nivel y de 15 de dos niveles, se establece que el espesor promedio de muros en inmuebles de dos niveles es 0.695m y para un piso es de 0.619m. Así mismo, en las casas de dos niveles se presentan alturas promedio de 3.518m en primer piso y 3.014m en segundo nivel, mientras que las casas de un nivel tienen una altura promedio de 3.105m.

La evaluación de las edificaciones de 1 piso y 2 pisos patrimoniales de Tapia Pisada con base en los procedimientos establecidos 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 este tipo de 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 Pisada (25 kPa).

Los periodos de vibración de las edificaciones en Tierra bajo estudio disminuyen hasta en un 20% al implementar el refuerzo con platinas de acero.

El refuerzo implementado con platinas de acero 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 platinas.

La instalación de las platinas 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 platinas 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 experimentales de (Bran & Suesca, 2021) y la norma AIS 610-EP-2017 indican que la tensión máxima del acero, usado en la Tapia Pisada reforzada con platinas, no debe superar 75 MPa. Los resultados de la modelación numérica indican que el 100 % de las platinas no superan dicha tensión para la edificación de 1 nivel reforzada con platinas cada 500 mm, 1000 mm y 2000 mm. Por su parte, en el peor de los casos el 93% de las platinas cumplirían esta restricción de 75 MPa para el caso de la edificación patrimonial en Tapia Pisada de 2 niveles.

El costo por metro cuadrado en planta de la rehabilitación sísmica con platinas de acero está en el orden de los 200 euros para las condiciones recomendadas por la norma AIS 610 (distancia entre platinas de refuerzo inferior a 1000 mm).

El reforzamiento mediante entramados de madera en comparación con el reforzamiento con platinas de acero, es una alternativa que también proporciona disminución en los niveles de daño por flexo-tracción, pero se evidencia que implementar este tipo de reforzamiento puede conllevar a mayores costos por su mano de obra, debido a la necesidad de realizar regatas de mayores profundidades lo cual podría ocasionar posibles daños a los muros. Por otro lado al ser un material natural, presenta un comportamiento higroscópico, donde puede absorber la humedad del entorno y a pesar de tener la posibilidad de la aplicación de barnices, podrían presentarse aparición de insectos que podrían afectar la estructura.

Las secciones planteadas por la AIS 610, en los entramados de madera, podrían disminuirse, debido a que se evidenció que en las casas de uno y dos niveles espaciadas cada metro, la tensión máxima alcanzada no supera la tensión máxima admisible de 16kPa de los elementos de madera.

Se recomienda realizar variaciones en los calibres de las platinas para realizar los reforzamientos. Con lo obtenido se evidencia que las mayores tensiones pueden presentarse en los vanos de puertas y ventanas, donde se podrían instalar platinas de un calibre mayor. Por otro lado, podría disminuirse el calibre de las platinas horizontales ya que estas presentan índices de sobre esfuerzo inferiores a 0.5, lo cual disminuiría los costos de este tipo de intervenciones.

Finalmente, la implementación de una viga de concreto y tierra como diafragma rígido, contribuye a minimizar daños ocasionados al momento de un evento sísmico, ya que como se evidenció en los modelos sin reforzamiento, los mayores esfuerzos se presentan en la parte superior de la estructura, presentando posible desprendimiento entre muros y posterior colapso de la cubierta debido a la baja resistencia del material en esta zona. Es indispensable que esta viga cuente con la transición de tierra a concreto debido a la compatibilidad de materiales como fue presentado por (Jerez et al., 2017).

Para trabajos futuros, se espera poder implementar en un modelo a escala, la disminución del calibre de las platinas según su ubicación en la estructura como también disminuir el espesor de los entramados de madera para realizar comparaciones entre estas dos alternativas de reforzamiento.

10. REFERENCIAS

- AIS. (2004). *Manual para la rehabilitación de viviendas construidas en adobe y tapia pisada*.
<http://www.asosismica.org>
- AIS. (2010). *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10*.
- AIS. (2017). *Evaluación e intervención de edificaciones patrimoniales de uno y dos pisos de Adobe y Tapia Pisada*.
- AISC. (2005). *Specification for structural steel buildings*.
- 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>
- Bran, C., & Suesca, D. (2021). *Análisis experimental de elementos de confinamiento para la rehabilitación de edificaciones patrimoniales en tapia pisada*. Pontificia Universidad Javeriana.
- Bui, Q. B., Morel, J. C., Venkatarama Reddy, 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>
- 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>
- Bui, T.-T., Bui, Q.-B., Limam, A., & Maximilien, S. (2014). Failure of rammed earth walls: From observations to quantifications. *Construction and Building Materials*, 51, 295–302.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.053>
- CIMOC. (2015). *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*.
- 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))
- De Investigación, G., Documentación -Dirección, Y., & Patrimonio, D. E. (2017). *Lista de bienes declarados Bien de interés cultural del ámbito nacional*.
- FADU, C. de investigación H. y E. e I. de arte A. (2012). *Construcción con Tierra N° 5*.
<https://publicacionescientificas.fadu.uba.ar/index.php/construccioncontierra/issue/view/100>
- Garzón, P. (2011). *Evaluación de la Amenaza Sísmica de Colombia mediante análisis de valores extremos históricos* [Universidad Nacional de Colombia].
https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/8466/299996.2011_pte._1.pdf?sequence=5&isAllowed=y
- Gomes, M. I., Lopes, M., & de Brito, J. (2011). Seismic resistance of earth construction in Portugal. *Engineering Structures*, 33(3), 932–941. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.12.014>
- Gómez, V., López, C., Ruiz, D., & Resumen, J. (2016). Rehabilitación sísmica de edificaciones históricas en tapia pisada: estudio de caso de capillas doctrineras reforzadas con malla de acero y madera de confinamiento ; Seismic rehabilitation of rammed-earth heritage buildings: study case of doctrinal church. *Informes de La Construcción*, Vol. 68, 5. <https://doi.org/10.3989/ic.15.017>
- Gonzales Mora, F. (2012). *Estudio de Haciendas jesuitas*.
- Hall, M., & Djerbib, Y. (2004). Rammed earth sample production: context, recommendations and consistency. *Construction and Building Materials*, 18(4), 281–286.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2003.11.001>
- Illampas, R., Charmpis, D. C., & Ioannou, I. (2014). Laboratory testing and finite element simulation of the structural response of an adobe masonry building under horizontal loading. *Engineering Structures*, 80, 362–376. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.09.008>
- Jerez, S., López, C., Ruíz, D., Aguilar, S., Uribe, J., & Campagnoli, S. (2017). *Seismic behaviour of rammed earth dwellings reinforced with wood elements and upper concrete beam*.
- 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>
- Lopez Pérez, C. T. (2021). *Las Haciendas como modelo de producción económica en la Nueva Granada*-

Evaluación estructural, técnica y económica del reforzamiento estructural de dos edificaciones patrimoniales en tierra (1 piso y 2 pisos) usando las recomendaciones del documento ais-610-ep-2017 y las prácticas de los arquitectos/ingenieros restauradores.



Bogotá y Cali.

- Melo Delgado, E., & Olivos Lombana, A. (2006). *Historia de Cota: Quota en la historia* (E. B. Semilla (ed.)). Alcaldía Municipal de Cota.
- Decreto 2113 del 25 de Noviembre del 2019*, (2119) (testimony of ciudad y territorio. República de Colombia. Ministerio de vivienda).
- 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>
- Reyes, J. C., Smith-Pardo, 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/https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109477>
- 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>
- Ruiz Valencia, D., López Pérez, C., & Rivera, J. C. (2012). Propuesta de normativa para la rehabilitación sísmica de edificaciones patrimoniales. *Apuntes. Revista de Estudios Sobre Patrimonio Cultural*, 25(2 SE-). <https://revistas.javeriana.edu.co/index.php/revApuntesArq/article/view/8767>
- Sánchez Gama, C. E. (2007). Earthen architecture in Colombia, constructive processes and cultures (Spanish); 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. <http://www.scielo.org.co/pdf/apun/v20n2/v20n2a06.pdf%0Ahttps://biblat.unam.mx/hevila/ApuntesBogota/2007/vol20/no2/5.pdf>
- 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-Storeyed Rammed Earth Building with Possible Strengthening Interventions* (pp. 1557–1565). https://doi.org/10.1007/978-3-319-99441-3_167
- Shrestha, K. C., Aoki, T., Miyamoto, M., Wangmo, P., Pema, Zhang, J., & Takahashi, N. (2020). Strengthening of rammed earth structures with simple interventions. *Journal of Building Engineering*, 29, 101179. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101179>
- Sísmica, A. C. de I. (2017). *Evaluación e intervención de Edificaciones Patrimoniales de uno y dos pisos en Adobe y Tapis Pisada - AIS-610-EP-2017*.
- Uniandinos. (2019). *Convenios club y deportes Uniandinos*. <https://convenios.uniandinos.org.co/>
- Uribe Kaffure, C., López Pérez, C. T., & Ruiz Valencia, D. M. (2014). Casas consistoriales en Cundinamarca. Estudio de caso de la casa del municipio de Cogua. *Apuntes. Revista de Estudios Sobre Patrimonio Cultural*, 27(1). <https://doi.org/10.11144/Javeriana.APC27-1.ccce>
- Yamin, L. E., Rodríguez, Á. E., Fonseca, L. R., Reyes, J. C., & Phillips, C. A. (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; Núm. 18 (2003)*. <https://ojsrevistaing.uniandes.edu.co/ojs/index.php/revista/article/view/492>
- Yamín Lacouture, L. E., Phillips Bernal, C., Reyes Ortiz, J. C., & Ruiz Valencia, 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. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1657-97632007000200009&lng=en&nrm=iso&tlng=
- Zegarra, Luis, San Bartolome, Angel, Quiun, Daniel y Giesecke, A. (1997). *Manual Técnico para el reforzamiento de las viviendas de adobe existentes en la costa y la sierra, Lima-Peru*.