

REFUERZO SÍSMICO DE EDIFICACIONES HISTÓRICAS CON TIERRA DE DOS PISOS CON PLACAS DE ACERO, EN BOGOTÁ, COLOMBIA

Daniel M. Ruiz¹, Natalia Barrera², Juan C. Reyes³, Juan C. Rivera⁴

Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de Ingeniería, Colombia,

¹daniel.ruiz@javeriana.edu.co, ²natalia.barrera@javeriana.edu.co

³Universidad de los Andes, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, jureyes@uniandes.edu.co

⁴Patrimonio e Ingeniería, patrimonioeingenieria@gmail.com

Palabras clave: Edificaciones históricas en tierra, edificaciones de dos pisos, tapia pisada, ensayos de mesa vibratoria, ensayos pseudo-estáticos

Resumen

Las edificaciones en tierra hacen parte del patrimonio arquitectónico de Colombia (incluyendo la capital, Bogotá), puesto que durante cuatro siglos el adobe y la tapia pisada fueron usados para la construcción de edificaciones de uno y dos pisos en las poblaciones colombianas. No obstante, los terremotos a nivel mundial han mostrado que las edificaciones en tierra sin refuerzo son sísmicamente vulnerables. Por esta razón, en los últimos años, los autores han propuesto un sistema de refuerzo sísmico para edificios históricos de tierra basado en placas de acero. Sin embargo, los estudios se han centrado en ensayos de muros de un piso sometidos a cargas pseudo-estáticas en el plano o a cargas dinámicas en mesa vibratoria uniaxial. No obstante, una fracción importante de las edificaciones patrimoniales de Colombia son de dos pisos y los movimientos sísmicos generan desplazamientos multiaxiales. Por ello en el presente documento se presentan los resultados de la evaluación del comportamiento sísmico de modelos de edificios de tierra de dos pisos, sin reforzar y reforzados con placas de acero, mediante ensayos biaxiales de mesa vibratoria de muros de tapia pisada. De la misma manera se evaluó el comportamiento sísmico en el plano de un muro de tierra de dos pisos reforzado y no reforzado mediante ensayos pseudo-estáticos. Los resultados experimentales de ensayos en el plano y en la mesa vibratoria biaxial mostraron que la capacidad de carga y de desplazamiento (en el plano y fuera del plano) de los muros de tierra reforzados con placas acero se incrementa significativamente.

1 INTRODUCCIÓN

La tierra es uno de los materiales más antiguos utilizados para la construcción desde aproximadamente el año 10000 a. C (Ruiz et al. 2023a). En cuanto a Colombia, las primeras construcciones de tierra se remontan al periodo indígena (500 a.C.), cuando tribus, como la muisca, ocupaban la mayor parte de la región andina (Sánchez, 2007). Los muiscas construían las casas con una antigua técnica de tierra llamada "bahareque" (quincha en Perú), una técnica de construcción que consiste en barro reforzado con palos o cañas. En el siglo XV, cuando los españoles llegan a América, inicia el periodo de la conquista seguido de la colonia. Los españoles que llegaron al altiplano andino de Sudamérica trajeron dos de las técnicas de construcción utilizadas en Europa: el adobe y la tapia pisada.

Si bien los adobes ya eran usados en el territorio actual que ocupa Perú, en la zona Andina Colombiana no eran usados para la construcción. La técnica del adobe consiste en muros hechos con ladrillos de barro secados al sol y el sistema de tapia pisada consiste en una mezcla de tierra humedecida que se golpea y compacta vigorosamente en un encofrado de madera (Ruiz et al., 2014). Estas técnicas son la base de la arquitectura que se construyó en el Nuevo Reino de Granada (norte de Sudamérica) durante cuatro siglos, incluyendo: estructuras civiles, edificios para el gobierno y edificaciones religiosas. Muchas de estas construcciones forman parte de los 1133 Monumentos Nacionales y 47 Centros de Ciudades Históricas de Colombia, de los cuales se estima que el 80% está construido en tierra (Ruiz et al., 2014).

Colombia está constituida por 32 departamentos agrupados en diferentes regiones y subregiones; cada subregión desarrolló su propia técnica de construcción en tierra autóctona (Sánchez, 2007) relacionada con las características geográficas, materiales locales y culturales de cada territorio. En la parte central de la región andina (Cundinamarca y Boyacá) predominan el adobe y la tapia pisada. En la parte alta de la región andina (Santander y Norte de Santander), la tapia pisada se utiliza principalmente en muros estructurales y en algunos casos el adobe y el bahareque en muros no estructurales. Asimismo, en la parte occidental de la región andina (Eje Cafetero y Antioquia) predomina la tapia pisada y el bahareque con la inclusión de la guadua como soporte estructural. Finalmente, el Pacífico y el Atlántico (junto a los océanos) desarrollaron principalmente la construcción en bahareque con fibras vegetales como soporte estructural (Acero, 2012). A pesar de que estas edificaciones patrimoniales han estado en pie durante cientos de años desde su construcción, han sufrido importantes problemas estructurales (Tavares et al., 2012) debido a sus características constructivas y a las deficientes propiedades mecánicas de los materiales (comparadas con los nuevos materiales como el acero, el concreto o la mampostería de ladrillo cocido), resultando en una vulnerabilidad sísmica alta.

Entre las características que afectan el comportamiento estructural se incluyen deficiencias del sistema, bajas propiedades de resistencia de los materiales y defectos constructivos. Algunos de estos se presentan a continuación: deficiencias en la cohesión estructural, el hundimiento de los cimientos, altos pesos de entresijos y de cubierta, irregularidades en planta y altura, falta de conexión adecuada entre los muros, ausencia de diafragmas rígidos, entresijos muy flexibles, inadecuada estructuración de la cubierta, ausencia de un cementante de buenas prestaciones mecánicas, baja resistencia a la tensión y al corte de los materiales (AIS, 2004; Bui et al., 2009; Day, 1993; Yamín et al., 2007). La edad de las edificaciones y los diversos factores ambientales como por ejemplo por la erosión o desintegración causada por las lluvias y la infiltración de agua (exceso de humedad en los muros), también contribuyen a su alta vulnerabilidad.

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 (Ruiz et al., 2014). En el caso de Colombia, este aspecto toma aun mayor relevancia, pues la arquitectura vernácula en tierra se ha desarrollado principalmente en zonas de altiplano donde la amenaza sísmica es intermedia y alta. En respuesta a esta problemática, en los últimos años se han desarrollado soluciones para conservar las construcciones de tierra y garantizar la seguridad de sus usuarios. 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 (Yamín et al., 2007). En países como Perú, México y Colombia se han realizado varias investigaciones basadas en el reforzamiento mediante mallas y mortero de cal (Reyes et al., 2019b; Yamín et al., 2007; Zegarra et al., 1997; Blondet et al., 2011).

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 (Yamín et al., 2007). En Colombia se ha propuesto para el refuerzo estructural de los muros tanto de adobe como de tapia pisada la adición de elementos de madera o platinas de acero, los cuales se instalan a ambos lados de los muros en sentido vertical y horizontal formando una retícula, y deben conectarse con varillas de acero que atraviesan los muros (Figura 1a).



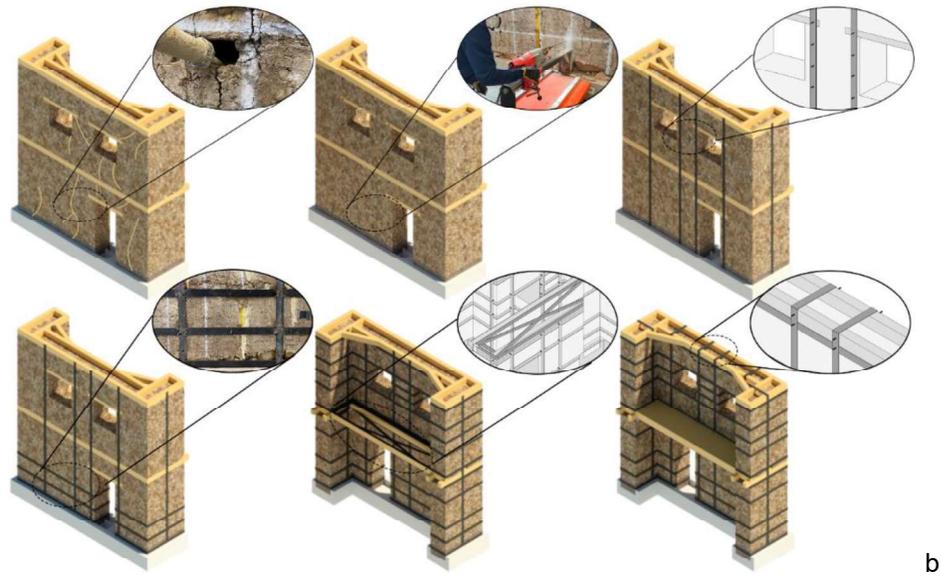


Figura 1. a) Casa de un nivel reforzada con entramados en acero (Ruiz et al., 2022), b) proceso de reforzamiento con placas de acero para un muro de dos pisos (Ruiz et al. 2023a)

En la figura 1b se muestra una imagen del proceso de reforzamiento de un muro de dos pisos (tomado de Ruiz et al. 2023a). Estos elementos verticales y horizontales se cubren con pañete de cal-arena-mortero. Esta técnica de reforzamiento se ha implementado de acuerdo con lo establecido en la norma AIS-610-EP-2017 (AIS, 2017) y sus principales características se enuncian a continuación:

- La técnica fue propuesta por Reyes et al. (2020) y consiste en la instalación de placas de acero estructural A36 de 6,35 mm de espesor y 101,6 mm de ancho, en ambas caras de los muros de tierra (tanto para adobe como para tapia pisada), tal y como se muestra en la figura 1.
- Las placas de acero se configuran en forma de cuadrícula en ambas caras del muro; y los elementos horizontales forman anillos alrededor de los muros. Por su parte las placas de acero verticales se instalan también sobre la superficie de los muros fijándolas a la estructura de cubierta (vigas de corona).
- La distancia horizontal o vertical máxima entre los elementos de acero es de 1200 mm, y en las esquinas, así como en la unión de los elementos verticales con los horizontales, se usa soldadura de alta resistencia para conectar las placas de acero.
- Las placas de acero situadas en la cara interior y exterior de la pared se conectan mediante varillas pasantes de 9,53 mm de diámetro espaciadas un máximo de 600 mm, normalmente de 400 a 500 mm.
- Los orificios de las varillas pasantes pueden rellenarse con material de resina utilizado para mejorar la capacidad de la conexión tierra-acero.
- Las placas de acero y sus conexiones se galvanizan o pintan para protegerlas de la humedad y la corrosión. Tras el proceso de rehabilitación, las paredes se cubren con estuco para devolverles su estética original.
- Si bien los refuerzos en placas de acero implican una intervención importante en los muros de tierra, es una alternativa menos invasiva que la tradicionalmente usada en Colombia (mallas metálicas por ambas caras de los muros). No obstante, es importante anotar que al finalizar el proceso de refuerzo ni las mallas ni las placas de acero quedan a la vista ya que se cubren con un mortero (cal, tierra y arena). De esta manera no se afecta la autenticidad de la edificación ya que el sistema estructural en muros de tierra permanece; pero el refuerzo sísmico garantiza la sismo-resistencia de la edificación. De manera

complementaria, el sector de estudio para la presente investigación fue el barrio de la Candelaria localizado en el centro histórico de la ciudad de Bogotá, en donde residen muchos de los inmuebles declarados Bienes de Interés Cultural. Estas casas construidas bajo una arquitectura colonial están formadas por patios interiores, espacio que determina la morfología en forma de C, O, U o L. En la Figura 2a se muestra imagen de la tipología de edificación histórica a la que se hace alusión. Por su parte en la Figura 2b se muestra un plano del Centro Histórico de Bogotá (barrio La Candelaria).

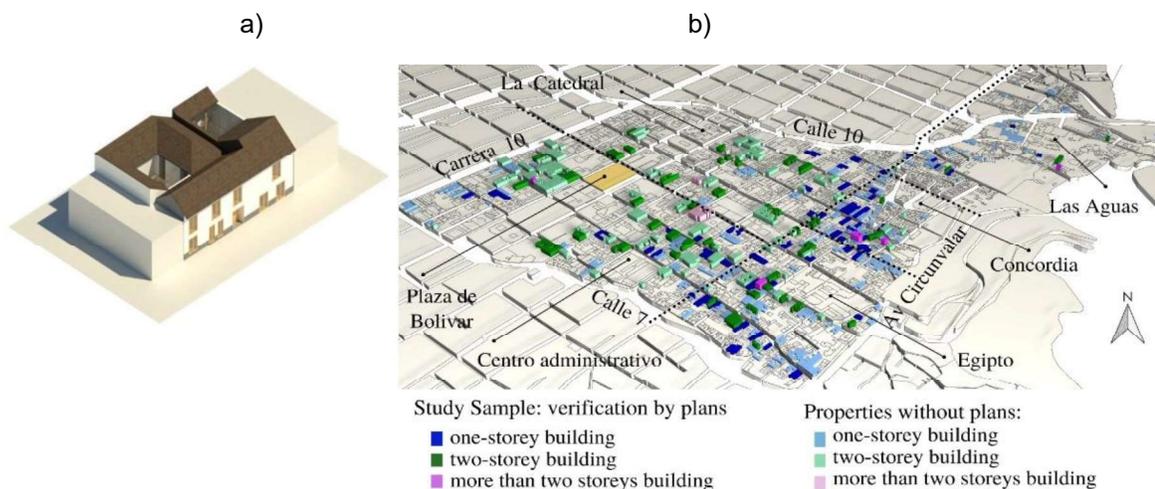


Figura 2. a) Tipología de casas objeto de estudio b) imagen del centro histórico de Bogotá, Barrio la Candelaria (tomado de Ruiz et al. (2023b))

2 CONSTRUCCIÓN DE ESPECÍMENES

La construcción, modelación, análisis y evaluación experimental de edificaciones históricas en tierra de un solo piso, ha sido la constante desde hace más de 20 años en la mayoría de los países donde se indaga en el comportamiento sísmico y desempeño de las estructuras construidas en tierra cruda; así como de las diversas variantes de los sistemas de reforzamiento que se han propuesto y probado.

Considerando que más del 40% de las edificaciones en tierra en la zona histórica de Bogotá son de dos pisos (Ruiz et al. 2023a), se construyeron modelos experimentales a escala real (1:1) y 1:2 para evaluar alternativas de rehabilitación sísmica en el Laboratorio de Estructuras de la Pontificia Universidad Javeriana. En dicho laboratorio (el más moderno de Latinoamérica) se hicieron pruebas en mesa vibratoria biaxial y de carga en el plano del muro de tierra usando para ello la losa y el muro de reacción.

La transferencia del hacer (el oficio) de la técnica constructiva de cada una de las modalidades de la tierra cruda, es una de las preocupaciones que se tiene en el día a día en las diferentes regiones donde aún se practican dichas técnicas constructivas. Por lo cual, este proceso experimental potencia la necesidad de mantenerlas vigentes y con originalidad en la práctica, frente a las particularidades que cada una presenta; pues la selección de los materiales y la composición de la mezcla entre ellos, la humedad de estos en el momento de la operación y puesta en sitio, los rudimentarios y básicos equipos empleados, el equipo humano -la mano de obra con experticia reconocida, así como otros factores menores, pero no prescindibles, garantizan que los especímenes (modelos) ejecutados en el sitio de ensayo representen muy aproximadamente todas las características con que cuentan los bienes inmuebles de interés cultural de interés.

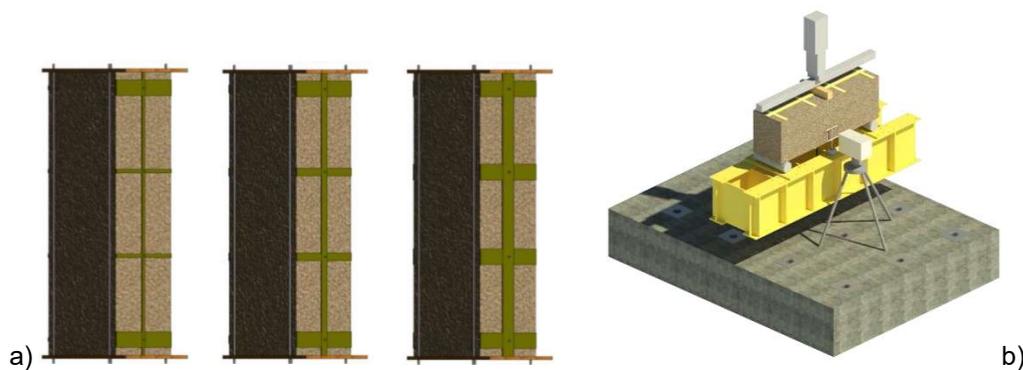
La técnica constructiva denominada tapia pisada (tapial) es una de las diversas formas en las que ancestralmente se ha construido en tierra en Colombia, y de acuerdo con inventarios realizados por grupos de investigación de esta materia, es uno de los que mayor representatividad tiene en el área andina y en las edificaciones patrimoniales. Así mismo estas

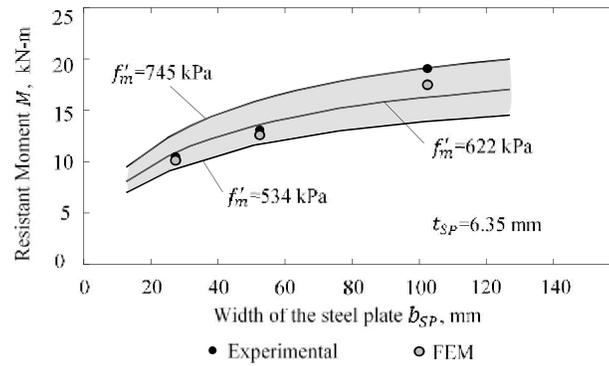
edificaciones están construidas en regiones que tienen el mayor nivel de amenaza sísmica en Colombia. Por lo tanto, fue la modalidad constructiva que se eligió para la investigación además de su facilidad para el reciclaje del material. La secuencia constructiva prevista implicó la elaboración de sistemas de cimentación, entresijos y cubierta, los que formaron parte integral de cada modelo de muro ensayado tanto sobre la mesa biaxial como en los ensayos pseudo-estáticos en el muro de reacción. Con el anterior contexto, debe mencionarse que el material se consiguió en una edificación en demolición del barrio Las Cruces que colinda con el Centro Histórico de Bogotá. De manera complementaria, las probetas fueron construidas por personas del municipio de Barichara (Colombia), lugar en donde la técnica de construcción con tierra ha permanecido a lo largo de los años. Fueron los trabajadores de este municipio quienes hicieron la compactación de los muros en el Laboratorio de Estructuras.

3 COMPORTAMIENTO A FLEXIÓN DE COMPONENTES DE TAPIA PISADA REFORZADOS CON PLACAS DE ACERO

Usando el material recuperado de una casa en demolición y transportado posteriormente en lonas al laboratorio, se construyeron muestras de grandes dimensiones de tapia pisada (de 10 kN de peso cada una) con y sin refuerzo con placas de acero de diferentes dimensiones. Las probetas se sometieron a cargas fuera del plano del muro mediante un ensayo de flexión.

Con los resultados se determinó la influencia que tiene la cuantía de acero en el momento resistente de una sección transversal de tierra. Las pruebas experimentales se hicieron sobre especímenes representativos de una sección de un muro de tapia pisada de 60 cm de espesor, 50 cm de ancho y 180 cm de altura. Los especímenes se reforzaron con placas de acero con anchos de 2.5 cm, 5.0 cm y 10.0 cm como se muestra en la figura 3a. Estas placas de acero se ajustaron al 50%, 100% y 200% de la cuantía indicada en la norma AIS-610-EP-2017. Las pruebas de laboratorio a flexión se configuraron de acuerdo con el montaje mostrado en la figura 3b. Posteriormente, los resultados se ajustaron a un modelo analítico (interlayer slip) y validado con un modelo numérico como se presenta en la Figura 3c y en la referencia Ruiz et al. (2022). En esta figura 3c se tiene el momento resistente en el eje y y el ancho de platina de refuerzo en el eje x . Se comparan los resultados experimentales con los resultados del modelo numérico por elementos finitos (FEM) y en franjas de color gris se representan la predicción del modelo analítico para los valores de resistencia a la compresión (f'_m) obtenidas en el Laboratorio. Los resultados sugieren que el modelo analítico es capaz de predecir la respuesta experimental de elementos de tierra reforzados con placas de acero de diferentes dimensiones (las ecuaciones se presentan en la referencia Ruiz et al., 2022), ya que el error en la predicción entre el modelo analítico y los resultados experimentales se situó entre el 2% y el 15%.





c)

Figura 3. a) Esquema de elementos de tapia pisada reforzados con placas de acero de 25 mm, 50 mm y 100 mm de ancho b) montaje experimental del ensayo de flexión c) comparación de resultados de modelo analítico, experimental y numérico (Ruiz et al., 2022)

4 COMPORTAMIENTO SÍSMICO EN EL PLANO DE UN MURO DE TIERRA DE DOS PISOS A ESCALA REAL REFORZADO CON PLACAS DE ACERO

Con base en las características arquitectónicas encontradas en el inventario de edificaciones de tierra del centro histórico de Bogotá, se construyó un muro de tapia pisada a escala real de dos pisos. Las dimensiones del espécimen son representativas de la zona de estudio para lo cual se analizaron mediante modelos digitales en Revit® (Autodesk) 12 casas de la zona histórica de Bogotá.

El espécimen es similar a un muro interior o de fachada de una casa tradicional de dos pisos con las siguientes dimensiones: 5.95 metros de alto, 6.20 metros de largo y 0.65 metros de espesor (Figura 4a). De manera particular, este muro corresponde a uno encontrado en una edificación histórica de La Candelaria. Adicionalmente, el muro construido en el laboratorio tenía aberturas de dos ventanas en el segundo piso y una puerta en el primer nivel.

El muro fue ensayado con y sin refuerzo con platinas de acero tal como se establece en el documento AIS-610-EP-2017. El muro fue anclado a la losa de reacción por medio de anclajes a la viga de cimentación y se instalaron actuadores encargados de aplicar la carga paralela al plano. Con el fin de tener una construcción representativa, el modelo incluyó la cimentación con piedras, entrepiso en madera y vigas de coronación de la cubierta. El ensayo se realizó con dos actuadores dinámicos (uno en cada nivel del muro) y se le aplicaron cargas paralelas al plano del muro. El procedimiento de ensayo consistió en un primer protocolo de carga del muro sin refuerzo, el cual después de haber sido dañado y fisurado se refuerza por medio de platinas de acero de confinamiento y un mejoramiento del diafragma. En la Figura 4b se muestra un esquema del muro reforzado.

Es importante anotar que en la parte superior del muro se colocó una carga vertical de 48kN mediante ocho elementos de concreto para simular el peso de la cubierta tradicional en este tipo de construcciones. El peso aproximado del muro sin incluir las vigas de cimentación y vigas gravitacionales es de 60 Ton. Las cargas laterales cíclicas se aplicaron con un actuador hidráulico de 250 kN y otro de 100 kN, uno ubicado en la parte superior y otro en el entrepiso. Estos actuadores se conectaron al muro de reacción del laboratorio. Cabe señalar que la prueba se realizó controlando el desplazamiento de los dos niveles del muro simultáneamente programado con el sistema de control MTS y manteniendo una relación de 2:1 entre el desplazamiento del segundo piso y el del primero. Esta relación se obtuvo a partir de modelos numéricos de elementos finitos del muro de tierra sometido a diferentes señales sísmicas y verificando que la relación entre el desplazamiento del segundo piso y el primer piso en los picos de desplazamiento era cercana a 2.0.

La respuesta del muro no reforzado se caracterizó por un patrón de daños que no está uniformemente distribuido; con pocas grietas verticales concentradas que se propagan mayoritariamente en diagonal hacia las esquinas inferiores de los segmentos del muro.

Además, las grietas iniciales de los bloques debidas al proceso de construcción aumentan su ancho durante el ensayo. El patrón de agrietamiento es consistente con la evidencia de otros ensayos de laboratorio e investigaciones de campo (Reyes et al., 2019a). El ensayo cíclico finalizó cuando la carga máxima aplicada comenzó a decaer y el muro alcanzó un daño significativo pero reparable. La relación de deriva impuesta final fue de 0.5% y a esta deriva, se evidenció una grieta notable en el pilar del segundo piso entre las ventanas. Este tipo de grietas también se evidenciaron en el ensayo cíclico de un espécimen de tierra de un piso reportado por Reyes et al. (2019) mostrando que los pilares son altamente vulnerables bajo cargas cíclicas, por lo que requieren especial atención.

Después de someter el espécimen a una deriva máxima cercana al 0,5%, se repararon las grietas y se reforzó el muro de tierra con placas de acero. Para la reparación de grietas se utilizó material de relleno consistente en un mortero de cal y arena en proporción 1:3 (Reyes et al., 2019a). Los agujeros del encofrado se repararon con mortero de grava arcillosa compuesto por arena, cemento, grava gruesa media y fina mezclada con agua. Tras la reparación de las grietas, se instalaron placas de acero A36 de 100 mm x 6,35 mm en el muro y se soldaron con pernos pasantes (de 9,53 mm de diámetro). Los elementos de refuerzo se ubican en las zonas de concentración de esfuerzos, como aberturas o cerca de la cimentación, considerando las siguientes recomendaciones:

- Las placas de acero conforman anillos alrededor del muro en las ubicaciones mostradas en la figura 4b. Las placas se sueldan en las esquinas del muro.
- Las placas de acero son instalados en ambas caras del muro y se conectan con barras de acero pasantes (9,53 mm de diámetro).
- La distancia entre anillos no debe superar los 1200 mm, sin embargo, la distancia entre las tres primeras placas de acero horizontales en la base del muro (anillos de las placas de acero) no debe superar los 500 mm. Como resultado, el muro ensayado tenía 10 anillos de placas de acero horizontales y 12 anillos de placas de acero verticales.
- El refuerzo de los muros se complementa con la mejora del diafragma del primer piso. Este refuerzo consiste en un marco perimetral de placas de acero alrededor del diafragma arriostrado con diagonales de acero. Además, el refuerzo del diafragma está soldado a las placas de refuerzo verticales de los muros.
- Se debe realizar una conexión de las placas de acero con las vigas de madera en la cubierta. Así mismo, las conexiones de las placas de acero con los dinteles y las vigas se realizaron con tornillos de 12,7 mm (1/2 pulgada) de diámetro.

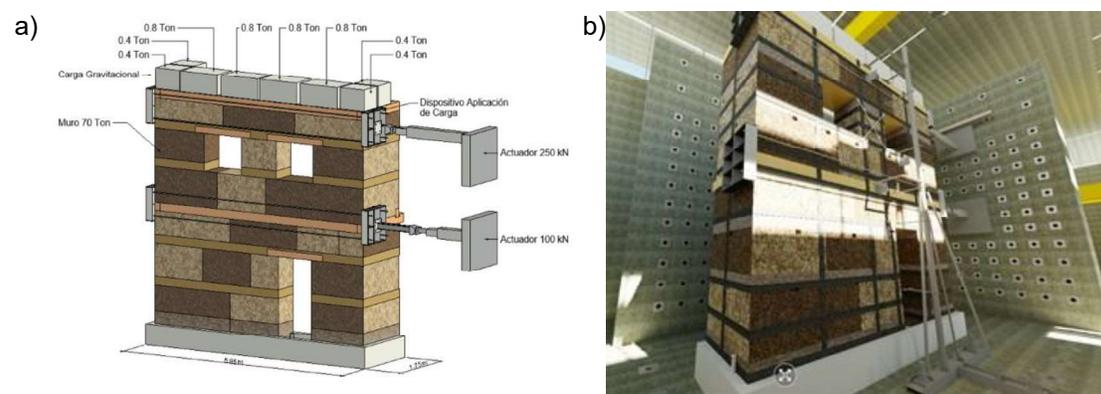


Figura 4. a) Montaje experimental de ensayo pseudo-estático de muro de dos pisos sin refuerzo b) montaje de muro reforzado de dos pisos con placas de acero

Durante la prueba del muro reforzado, se apreciaron daños cuando las placas de acero presentaron altas deformaciones de pandeo. Además, las grietas se hicieron visibles cuando

aparecieron deslizamientos locales en las interfaces entre los bloques de tierra apisonada. Las grietas previas al ensayo, especialmente las constructivas, se hicieron más pronunciadas durante la aplicación de la carga, y también el agrietamiento del muro indujo pérdida de material en muchos puntos. En general, las grietas más críticas se observaron en la base del muro. Como se aprecia en la figura 5, se aplicaron desplazamientos al muro de dos pisos hasta llegar a una deriva cercana al 1.8% (aumento del 260% con respecto al muro sin refuerzo).

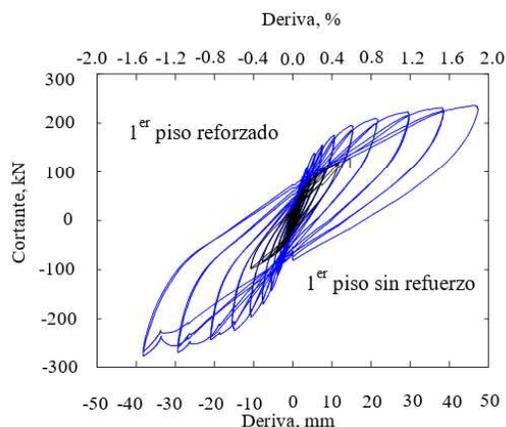


Figura 5. Comparación de ciclos de histéresis de cortante de primer piso para el muro sin refuerzo y muro reforzado. Adaptado de (Ruiz et al. 2023a)

Debe mencionarse que, mientras que en la prueba no reforzada el segundo piso mostraba un mayor nivel de daños y grietas, en el caso del muro reforzado las principales grietas aparecían en el primer piso. Por último, debe considerarse que la resistencia a la carga lateral del muro de Tapia Pisada aumenta un 188% (de 96 kN a 277 kN) y un 227% (de 69 kN a 226 kN) para la primera y la segunda planta, respectivamente. En resumen, el muro no reforzado tenía una resistencia media al esfuerzo cortante en la base de 115 kN y el muro reforzado resistía 252 kN.

El muro rehabilitado con placas de acero presenta ciclos de histéresis más amplios que demuestran una mayor capacidad de disipación de energía que el espécimen no reforzado. En conjunto, los resultados evidencian una mejora relevante en la capacidad de resistencia y deriva, y por tanto una ganancia sustancial en la capacidad de ductilidad. Estos resultados sugieren que el refuerzo con placas de acero mejora el comportamiento sísmico de muros de tierra.

5 ENSAYO DINÁMICO DE MESA VIBRATORIA BIAXIAL DE MURO DE TAPIA PISADA DE DOS PISOS

En el laboratorio de estructuras de la Pontificia Universidad Javeriana se llevaron a cabo ensayos de mesa vibratoria sobre muros de tapia pisada a escala 1:2 (figura 6). En estos ensayos dinámicos, se evaluaron especímenes de dos pisos con planta en forma de "C" (uno no reforzado y otro reforzado), para estudiar el comportamiento en el plano y fuera del plano. Las características de los prototipos en tierra a escala reducida se establecieron siguiendo las dimensiones geométricas promedio encontradas tras el análisis de las casas patrimoniales de dos niveles construidas en tierra en la zona histórica de Bogotá.

La escala 1:2 se determinó teniendo en cuenta la capacidad de la mesa vibratoria biaxial MTS en términos de carga máxima y momento de vuelco (el peso del modelo reforzado es de unos 100 kN) y de sus dimensiones totales de 3 x 3 metros. La mesa vibratoria biaxial proporciona un desplazamiento longitudinal (x) y lateral (y) máximo de ± 250 mm, una aceleración máxima de 10g y una velocidad pico de 1 m/s. Cada muro (reforzado y no reforzado) presentó una altura total de 3140 mm desde la base de los cimientos hasta la parte superior de los muros los cuales tenían un espesor de 320 mm (a escala real serían 640 mm).



Figura 6. Montaje de modelo de muro de dos pisos en mesa vibratoria

Para el protocolo de cargas, se siguió el procedimiento establecido en la referencia Reyes et al. (2020), donde se realizó un análisis de desagregación sísmica para el Barrio La Candelaria (Centro Histórico de Bogotá) utilizando un rango de periodos estructurales entre 0.3 y 1.2 segundos. Para la investigación se definieron tres niveles de sismicidad, caracterizados por períodos de retorno de 31, 225, 475 y 2500 años. Estos periodos de retorno corresponden al sismo de umbral de daño (DT), sismo de seguridad limitada (LI), el sismo diseño (DE), y el sismo último (UL), respectivamente. Además, estos 4 periodos de retorno están relacionados con las siguientes probabilidades de excedencia en 50 años: 80%, 20%, 10% y 2%.

La amenaza sísmica en Bogotá se debe principalmente a eventos corticales con magnitudes entre 6,0 y 7,6 (magnitudes de momento) y distancias a las fallas entre 50 km y 80 km. Con base en estas características, la aceleración del suelo seleccionada para LI, DE y UL se registró en el Aeropuerto Internacional de San Francisco en 1989. Este terremoto tenía una $M_w = 6,9$ y una distancia a la falla de 59 km (terremoto de Loma Prieta).

Para el umbral de daños (DT), se utilizó un registro ajustado basado en el terremoto de Quetame de 2008 ($M_L = 5,7$). Este movimiento del suelo se registró en un tanque de agua llamado Vitelma (Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá) que está a 55-km de la falla. En cuanto a la biaxialidad de los movimientos del suelo, en la referencia Reyes et al. (2020) se estudió el comportamiento sísmico de muros de tierra en una mesa vibratoria uniaxial, pero en el presente estudio se utilizaron registros de aceleración en dos direcciones mutuamente perpendiculares ($x - y$).

Una vez definido el protocolo de carga, se procedió a construir sobre la mesa vibratoria el muro de tapia pisada a escala 1:2 sin refuerzo. En la figura 7 se muestra el procedimiento seguido. La instrumentación de los modelos ensayados en la mesa vibratoria consistió en 20 acelerómetros sísmicos, 18 de ellos instalados en los modelos y 2 de ellos en la plataforma de la mesa de vibración. Diez de los acelerómetros registrarán los movimientos en el eje x y los 10 restantes los movimientos en el eje y . Una vez sometido el espécimen a las señales de aceleración, se evidenciaron daños reparables desde la ejecución del segundo sismo del 20% de probabilidad de excedencia en 50 años.



Figura 7. Proceso Constructivo Muro a Escala 1:2 de dos pisos de tapia pisada

Desde este sismo es posible evidenciar un leve desplazamiento del segundo piso de tapia con respecto al primero, el cual se acentúa e incrementa en los siguientes dos sismos. Los daños severos se presentaron a partir del tercer movimiento sísmico, correspondiente al 10% de excedencia en 50 años; esto finalmente desencadenó el colapso parcial de la estructura para el sismo con probabilidad de excedencia del 2% en 50 años. La figura 8 presenta el patrón de daño del muro después de cada sismo desde perspectivas opuestas, allí se puede evidenciar las grietas predominantes. Es importante resaltar, que el daño del muro sin refuerzo se presenta tanto en el primer nivel cómo en el segundo nivel, aunque, es más crítico en el primero.

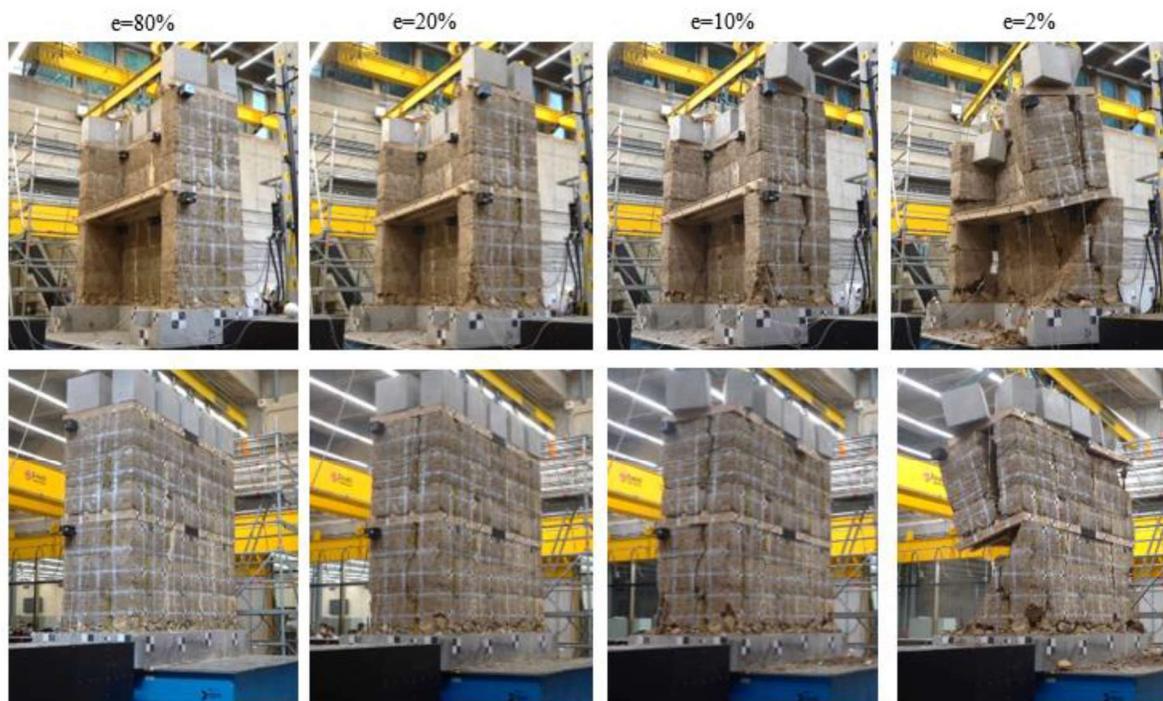


Figura 8. Proceso de agrietamiento y mecanismo de falla de ensayo de mesa vibratoria de muro a escala 1:2 de dos pisos de tapia pisada sin refuerzo

Después de ensayar y fallar el primer modelo de muro de tapia pisada a escala en la mesa vibratoria biaxial, se construyó otro muro idéntico utilizando la misma mano de obra y el mismo material recuperado del colapso de los ensayos anteriores. Tras esperar un mes de secado bajo las condiciones ambientales del Laboratorio de Estructuras, este segundo muro se refuerza con placas de acero. Una vez reforzado (figura 9), se ensaya con el mismo procedimiento seguido para el muro de tapia pisada no reforzado. La propuesta de reforzamiento se hace bajo los lineamientos de la norma AIS 610 – EP17 (AIS, 2017) usando entramados de acero. Para el reforzamiento del modelo de laboratorio y con el fin de cumplir con la escala, se utilizaron platinas de 50.8 mm de ancho y 3.2 mm de espesor (escala 1:2).



Figura 9. Muro de dos pisos a escala 1:2 de tapia pisada de dos pisos reforzado con placas de acero sobre mesa vibratoria biaxial.

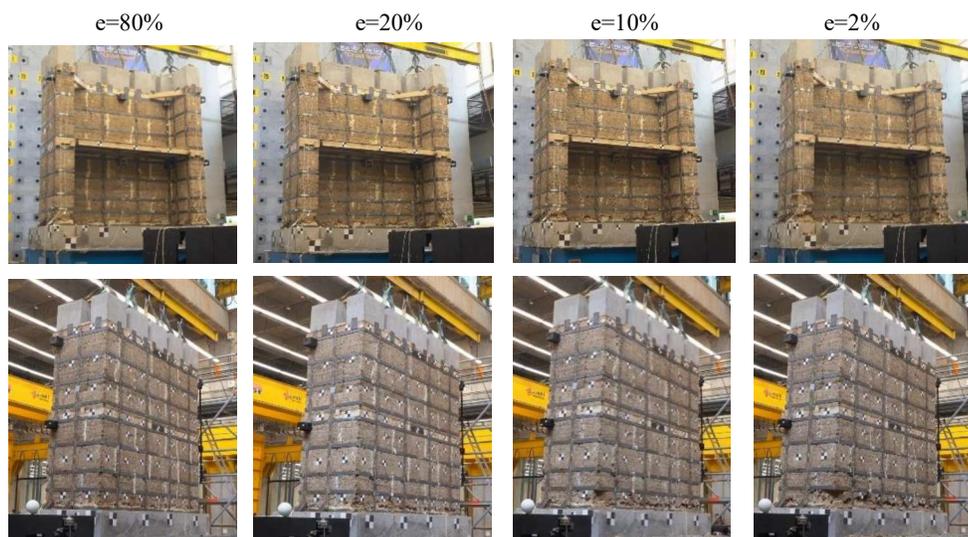


Figura 10. Proceso de agrietamiento de ensayo de mesa vibratoria de muro a escala 1:2 de dos pisos de tapia pisada reforzado

Considerando la figura 10, para el caso del espécimen reforzado, las grietas se concentraron en la base del espécimen y en el primer piso, mientras que en el segundo nivel los daños fueron poco perceptibles. A diferencia del muro sin refuerzo, no se presentó un deslizamiento diferencial entre los dos pisos del muro de tapia, el espécimen se comportó como una unidad. Las fisuras reparables se fueron evidentes desde el sismo del 20% siendo estas, en su mayoría, correspondientes a las uniones constructivas entre los bloques de tapia. Con respecto a la verticalidad del muro se vio afectada a partir del sismo del 20% de excedencia en 50 años y fue incrementando ligeramente debido a la pérdida de material en la base. El daño en la base se evidenció de forma notoria alrededor de todo el muro en sentido horizontal, y en las esquinas. Es evidente al comparar las figuras 8 y 10 que el muro reforzado no presenta daños importantes aún para aceleraciones en la base de 0.53g (correspondientes al

sismo con probabilidad de excedencia del 2% en 50 años). Para ese mismo sismo, el muro sin refuerzo colapsó de manera catastrófica. Finalmente, debe anotarse que el muro reforzado se sometió a una aceleración en la base de 0.76 g (1.52 g en el modelo a escala 1:2), y aún para esta alta aceleración el modelo permaneció en pie sin síntomas de colapso estructural.

6 CONCLUSIONES

El modelo analítico de *interlayer slip* se amplió a una configuración de tres capas: tierra, aire y placas de acero. Al comparar los resultados de los modelos analíticos con los datos experimentales, el error se situó entre el 2% y el 15%.

De acuerdo con los resultados experimentales, los muros históricos de tierra no reforzados son frágiles, pues pierden su capacidad en el plano para una deriva de 0.5%.

La rehabilitación con placas de acero mejora el comportamiento de los muros de tierra de dos pisos porque: (1) duplica su capacidad de carga lateral; (2) aumenta la capacidad de deriva del 0.5% al 1.8%; (3) en el caso de muros dañados, restaura su rigidez inicial; y (4) aumenta el desplazamiento inelástico y la disipación de energía.

El refuerzo con placas de acero dio al muro capacidad para resistir sismos con aceleraciones del terreno de hasta 0.76g sin colapso estructural.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Acero E. (2012). Aproximación al comportamiento estructural de edificaciones en tierra de la arquitectura colonial. Consideraciones para el inventario de bienes del Ministerio de Cultura y la norma de sismo resistencia colombiana. Master's thesis, Universidad Nacional De Colombia.

AIS-Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. (2004). Manual para la rehabilitación de viviendas construidas en adobe y tapia pisada [Manual for the rehabilitation of adobe and rammed-earth buildings].

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.

Blondet, M., Vargas, J., Tarque, N., and 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>

Bui, Q. B., Morel J. C., Venkatarama B. V., and 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>

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))

Reyes, J. C., Smith-Pardo, J. P., Yamín, L. E., Galvis, F. A., Sandoval, J. D., Gonzalez, C. D., and Correal, J. F. (2019a). 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>

Reyes, J. C., Smith, J. P., Yamín, L. E., heritage structures, F. A., Angel, C. C., Sandoval, J. D., and Gonzalez, C. D. (2019b). 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>

Reyes, J. C., Rincon, R., Yamín, L. E., Correal, J. F., Martinez, J. G., Sandoval, J. D., Gonzalez, C. D., and Angel, 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>

Ruiz D., López C., Unigarro S., and 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://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0000605](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000605)

Ruiz, D. M., Reyes, J. C., Bran, C., Restrepo, M., Alvarado, Y. A., Barrera, N., Laverde C. and Suesca, D. (2022). "Flexural behavior of rammed earth components reinforced with steel plates based on experimental, numerical, and analytical modeling". *Construction and Building Materials*, Volume 320, 21 February 2022, 126231. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126231>

Ruiz D. M., Barrera N., Reyes J.C., Restrepo M., Alvarado Y.A., Lozada M., Vacca H. (2023a). "Strengthening of historical earthen constructions with steel plates: Full-scale test of a two-story wall subjected to in-plane lateral load". *Construction and Building Materials*, Volume 363, 11 January 2023, 129877. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129877>

Ruiz D. M., Barrera N., Reyes J.C., López C., Restrepo M. (2023b). "An approach to Colombian Andean earthen architecture in urban environments: a case study of Bogotá Historic Centre". *Journal of Architectural Conservation*, <https://doi.org/10.1080/13556207.2022.2160556>

Sánchez-Gama, C. E. (2007). La arquitectura de tierra en Colombia, procesos y culturas constructivas. *Revista Apuntes: Revista de Estudios Sobre Patrimonio Cultural*, 20(2), 242–255. <https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/23047>

Tavares, A., Costa, A., and Varum, H. (2012). Common pathologies in composite adobe and reinforced concrete constructions. *J. Perform. Constr. Facil.* Volume 26, Issue 4, 389–401. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0000200](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000200)

Yamín L. E., Phillips C., Reyes J. C., and Ruiz D. (2007). Estudios de vulnerabilidad sísmica, rehabilitación y refuerzo de casas en adobe y tapia pisada. *Apuntes: Revista de Estudios Sobre Patrimonio Cultural*, 20(2), 286–303. <https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/23002>

Zegarra L., San-Bartolome A., Quiun D. y Giesecke, A. (1997). Manual Técnico para el reforzamiento de las viviendas de adobe existentes en la costa y la sierra, Lima-Perú. https://www.preventionweb.net/files/7630_manualtecnico.pdf

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue posible gracias al financiamiento de 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, para el financiamiento del proyecto código 120385269649– MGI Id: 6988 (Rehabilitación sísmica de edificaciones en tierra –patrimoniales- de dos niveles), de acuerdo con 852-2019, contrato 510-2020. Esta investigación fue desarrollada por la Pontificia Universidad Javeriana y la Universidad de los Andes (Bogotá, Colombia), quienes contribuyeron al proyecto con recursos de laboratorio y tiempo de profesores e investigadores

AUTORES

Daniel Ruiz, Ingeniero Civil (2000), MSc. en Ingeniería Civil (2001) y Ph.D. (2023); con énfasis en estructuras y sísmica de la Universidad de los Andes. Actualmente, es profesor Asociado de la Facultad de Ingeniería de la Pontificia Universidad Javeriana. Es investigador Sénior del Ministerio de Ciencias de Colombia y ha publicado más de 40 artículos en revistas indexadas. Ha ganado en dos ocasiones el premio Nacional de Ingeniería Diódoro Sánchez de la Sociedad Colombiana de Ingenieros.

Natalia Barrera, es Ingeniera Civil y Arquitecta de la Pontificia Universidad Javeriana (PUJ). Se ha desempeñado como profesora de cátedra del Departamento de Ingeniería Civil de la PUJ durante dos años y es personal investigador (joven investigadora) del Ministerio de Ciencia de Colombia. Actualmente es Becaria del programa Erasmus Mundus Joint Master Degree in Sustainable Design, Construction and Management of the Built Environment – MBUILD.

Juan Carlos Reyes, es actualmente Profesor Titular y Director del Centro de Investigaciones en Materiales y Obras Civiles CIMOC de la Universidad de los Andes. Obtuvo su título de Ingeniería Civil en la Universidad Industrial de Santander (UIS) en 1998 y su Magister en Ingeniería Estructural y Sísmica de la Universidad de los Andes en 2002. En 2009, completó sus estudios de doctorado en la Universidad de California, Berkeley.

Juan Carlos Rivera, es Ingeniero Civil y MSc. Restaurador de Monumentos Arquitectónicos. Es gerente de la empresa Patrimonio e Ingeniería S.A.S. – PEISAS, la cual es la responsable de múltiples trabajos de restauración y reforzamiento de edificaciones patrimoniales en tierra en Colombia.