

Análisis experimental de elementos de confinamiento para la rehabilitación de edificaciones patrimoniales en tapia pisada.

Ruiz D.^a, Bran C.^a, Suesca D.^a, Restrepo M.^a, Alvarado Y. ^a, Barrera N. ^a.

^a Pontificia Universidad Javeriana, Colombia, Carrera 7 No. 40-62, Bogotá 110231, Colombia

HIGHLIGHTS

- Se determinó la influencia de la cuantía de acero en el comportamiento estructural de muros de tapia reforzados con platinas de acero.
- Se caracterizaron experimentalmente las propiedades mecánicas y físicas de la tapia pisada.
- Se realizaron ensayos de corte directo cíclico a probetas de tapia pisada.
- Seis vigas de tapia pisada reforzadas con platinas de acero se sometieron a ensayos de flexión.
- Se realizó una modelación numérica en elementos finitos para vigas en tapia pisada.

RESUMEN

La construcción en tierra es una de las técnicas más antiguas de la que se tiene conocimiento. Sin embargo, su comportamiento estructural presenta problemas de vulnerabilidad debido a diferentes variables como una mala conformación del sistema estructural y bajas propiedades mecánicas de la tierra. Es por esto que en el 2019 fue vinculada al reglamento colombiano de construcción sismo resistente la norma AIS-610-EP-2017 en la cual se estipula la evaluación e intervención de edificaciones patrimoniales de uno y dos pisos de adobe y tapia pisada. Basados en esta normativa se realizaron ensayos de flexión a vigas de tapia pisada con entramados de acero. Los resultados arrojan que un incremento del área de acero en los muros supone un aumento de al menos el 300% en la resistencia a la flexión en muros sometidos a cargas perpendiculares al plano.

Palabras Clave: tapia pisada, resistencia, ensayos de flexión, corte directo cíclico, elementos finitos.

ABSTRACT

Earth construction is one of the oldest known techniques. However, its structural behavior presents vulnerability problems due to different variables such as poor conformation of the structural system and low mechanical properties of the earth. For this reason, in 2019 the AIS-610-EP-2017 standard was added to the Colombian seismic-resistant construction regulations, which stipulates the evaluation and intervention of one and two-story adobe and rammed earth heritage buildings. Based on this standard, flexural tests were carried out on steel-framed footing adobe beams. The results show that an increase in the area of steel in the walls represents an increase of at least 300% in the flexural resistance of walls subjected to perpendicular loads to the plane.

Keywords: rammed earth, resistance, bending tests, cyclic direct cutting, finite elements.

1. Introducción

La tapia pisada es conocida como uno de los materiales más antiguos utilizados para la construcción y conformación de las primeras comunidades y sociedades en la historia (Silva R. et al., 2018). Esta técnica consiste en la compactación artesanal de varias capas de tierra humedecida utilizando un encofrado generalmente de madera conocido como “tapial”, el cual ayuda a conformar el sistema de muros de dichas edificaciones (Ávila et al., 2021), (Reyes et al., 2020). El nacimiento de esta

técnica se atribuye a los pueblos nativos “bereberes” quienes se instalaron en el norte de África en la región comprendida entre Marruecos y Argelia. Fueron ellos mismos los encargados de introducir estas técnicas a los pueblos europeos alrededor de los años 700 EC (Daniel Ruiz et al., 2015). Con el paso del tiempo, esta técnica llegó a América durante las exploraciones, conquista y colonia por parte de los pueblos hispanos y portugueses al nuevo continente. Es por esto que las construcciones de adobe y la tapia pisada son la base fundamental de los centros históricos del país, en particular en la zona andina

colombiana. La Tapia Pisada se mezcló con técnicas de construcción nativas de la época como el Bahareque (en Colombia) o el Taquezal (en Nicaragua) (Daniel Ruiz et al., 2015). Según el Centro de investigación en materiales y obras civiles CIMOC, 2015; D. Ruiz et al., 2017, se estima que cerca del 30% al 50% de la población mundial vive o trabaja en edificaciones construidas en tierra, especialmente en áreas rurales de las cuales aproximadamente 35 Millones de personas se sitúan en el continente Sur Americano.

Las propiedades de la Tapia Pisada (con la que se han construido algunas edificaciones reconocidas por la UNESCO como patrimonio histórico de la humanidad (Pontificia Universidad Javeriana, 2019; Ruiz Valencia et al., 2012) tienen algunas características que incrementan su vulnerabilidad ante fenómenos naturales como los eventos sísmicos. Además de la deficiente conformación del sistema estructural de las edificaciones patrimoniales en tierra, existen otras características que acentúan su vulnerabilidad cuando se someten a solicitaciones importantes como los sismos. Ejemplos de estas características son: bajas propiedades cementantes del material, deterioro de las propiedades mecánicas con el paso de los años y una alta susceptibilidad a la erosión e infiltraciones de agua (Day, 1993).

Importantes investigaciones a lo largo del mundo han generado diversas técnicas para la rehabilitación y el mejoramiento del comportamiento ante eventos sísmicos de edificaciones en tierra. En los últimos años autores han propuesto diferentes tipos de reforzamiento para edificaciones construidas en tierra, Ruiz Valencia et al., 2012 propone generar diafragmas rígidos con plaquetas de concreto. Ruiz Valencia et al., 2012; M. Silva et al., 2017; Yamín et al., 2007 proponen utilizar elementos de confinamiento de madera que se conectan transversalmente con pernos de acero. Ruiz Valencia et al., 2012 también propone utilizar vigas corona en concreto reforzado o en madera encima de los muros y López P. et al., 2020b propone utilizar elementos de confinamiento de madera y combinarlo con vigas corona para garantizar un confinamiento en los muros. López P. et al., 2020a; Ruiz Valencia et al., 2012 También proponen reforzar los muros con malla de acero con venas y cubierto con pañete. Finalmente, Liu et al., 2015 han propuesto la utilización de fibras externas para el confinamiento de los muros en tierra.

En Colombia ya existe una norma que reúne diferentes tipos de evaluación y reforzamiento para edificaciones construidas con tierra, AIS, 2017 reúne información para la rehabilitación de la tapia pisada, este manual explica el comportamiento de este

material y diferentes tipos de fallas presentadas en este tipo de edificaciones. También incluye métodos de evaluación para calificar el estado de la estructura además de diferentes métodos de reforzamiento las cuales según el Decreto No2113 de 2019, 2019 son avaladas para el reforzamiento en Colombia.

AIS, 2017 recomienda inicialmente disminuir el peso de la estructura para disminuir las fuerzas actuantes en la estructura. Para mejorar el entrepiso y generar un diafragma proponen utilizar plaquetas de concreto y vigas corona mencionadas anteriormente y además un entablado complementario el cual consiste en colocar sobre el entablado original un entablado secundario apoyado en viguetas de madera ancladas con tornillos. Para rehabilitar muros propone utilizar mallas de acero con pañete y el uso de elementos de confinamiento.

Estas técnicas de reforzamiento han generado buenos resultados en la mejora del comportamiento de los muros cuando se someten a esfuerzos originados por cargas perpendiculares y paralelas al plano del muro (cortante y flexión). La presente investigación se centra en la alternativa de refuerzo basada en elementos de confinamiento con elementos de acero. Dichos elementos consisten en platinas de 100 mm de ancho y 6.35 mm de espesor instalados en ambas caras de los muros y tanto en dirección vertical como en dirección horizontal. (Ver figura 1).

De esta manera se configuran sistemas de anillos horizontales y verticales que confinan los muros a la vez que aportan resistencia a la flexo-tracción y al cortante. De acuerdo con el Decreto N°2113 de 2019, 2019 la máxima distancia horizontal y vertical de las platinas de refuerzo es de 1000 mm. Una parte fundamental del sistema de refuerzo son los pernos pasantes espaciados máximo cada 500 mm.

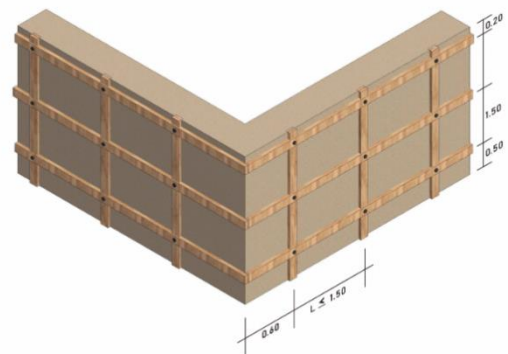


Figura 1-Esquema de refuerzo con elementos de confinamiento.

De acuerdo con lo reportado por Reyes et al., 2020 esta técnica de reforzamiento asegura un control de daños debido a las fracturas frágiles que sufren este tipo de edificaciones cuando no están reforzadas. De la misma manera, el reforzamiento con platinas de

acero aumenta la capacidad de ductilidad al desplazamiento de los muros en tierra de edificaciones patrimoniales y retrasa el colapso de las edificaciones durante eventos sísmicos.

Las dimensiones de las platinas y la separación de estas se incluyeron en AIS 610 con base en las recomendaciones de los ingenieros y arquitectos dedicados a la restauración de monumentos arquitectónicos. No obstante, nunca se ha hecho una valoración del impacto de la cuantía de acero en la resistencia de la sección transversal de la tapia pisada reforzada, vacío que pretende llenar la investigación presentada a continuación.

2. Metodología de ensayos

La metodología para desarrollar los ensayos experimentales comprendió en primera instancia una caracterización general de las propiedades físicas de la tierra con la que se construyeron los muros de tapia pisada y la ejecución de ensayos de caracterización mecánica del material de manera que pudiese conocer dicho comportamiento cuando es sometido a diferentes esfuerzos. Finalmente, se realizó la construcción de los muros en tapia pisada con su respectivo sistema de reforzamiento para los ensayos de flexión a cada uno de los especímenes que serán instrumentados para una posterior interpretación de los resultados arrojados.

2.1 Caracterización física

El suelo que fue utilizado para la construcción de los especímenes fue extraído de la demolición de una edificación en tierra que data de al menos 100 años de antigüedad. Este fue sometido a ensayos de laboratorio para determinar propiedades como distribución granulométrica, límite líquido, límite plástico, contenido de humedad, entre otros ensayos.

El material fue sometido a ensayos de granulometría para conocer la distribución del tamaño de las partículas. Los resultados de la Tabla 1, demuestran que la tierra a utilizar en su mayoría está compuesta por partículas finas (<0.002mm) y con un porcentaje de gravas prácticamente nulo.

Distribución Granulométrica		
Grava	Arena	Fino
0.2%	22.4%	77.4%

Tabla 1- Distribución granulométrica de la tierra

Algunas investigaciones como Aubert et al., 2015; Gomes et al., 2014 proponen que la distribución granulométrica de la tierra con que se construyen las edificaciones en tapia pisada no

debería ser un parámetro excluyente al momento de hacer la selección del material.

Sin embargo, para este tipo de mezclas se vuelve relevante la presencia de un alto porcentaje de partículas finas como las arcillas y limos (<0.002mm) ya que, estas partículas tienden a proporcionar cohesión a la mezcla de tierra y a conformarse como el único material con propiedades aglutinantes entre las demás partículas de suelo. (Ávila et al., 2021). La figura 2 relaciona los valores obtenidos en la presente investigación con la distribución del tamaño de partículas de otras investigaciones que confirman la importancia de asegurar un porcentaje alto entre arcillas y arenas en la mezcla.

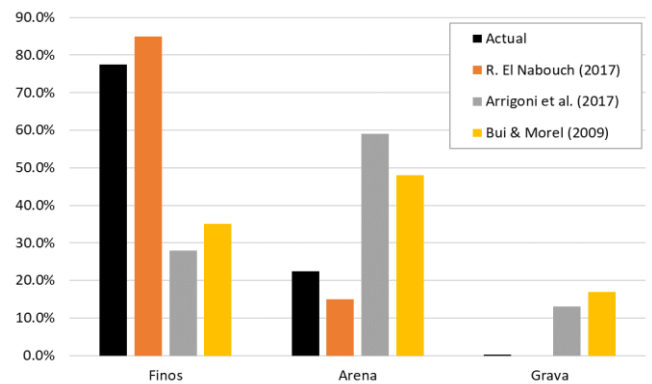


Figura 2- Distribución granulométrica para tapia pisada: valores usados por (EL Nabouch, 2017), (Arrigoni et al., 2017) y (Q. B. Bui & Morel, 2009).

Por otra parte, el contenido de humedad del suelo es una de las variables que modifican el comportamiento mecánico de la tapia pisada. Para la investigación se realizaron ensayos de compactación Proctor modificado obteniendo un porcentaje de humedad óptima de 16.7%, como se observa en la Figura 3.

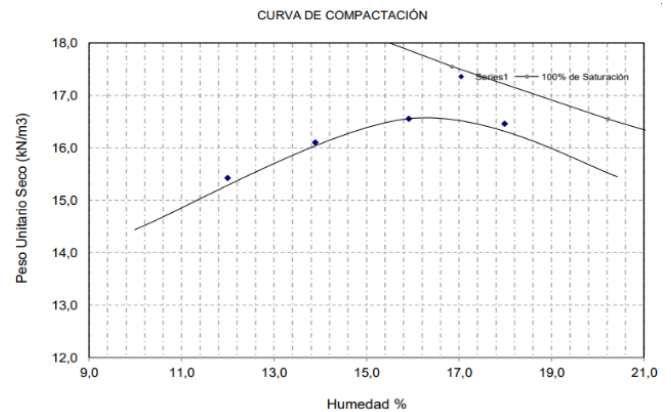


Figura 3 - Curva de compactación Proctor modificado

Sin embargo, la energía de compactación con la que se realizan los ensayos de compactación Proctor

difiere en gran medida de los métodos artesanales de compactación de la tapia pisada, lo cual conduce a que se generen valores óptimos de humedades excesivamente altos (Ávila et al., 2021; Mesbah et al., 1999).

Es por esto por lo que durante la ejecución de los ensayos se tomaron muestras para analizar el contenido de humedad de las probetas que se construyeron utilizando tapias de madera.

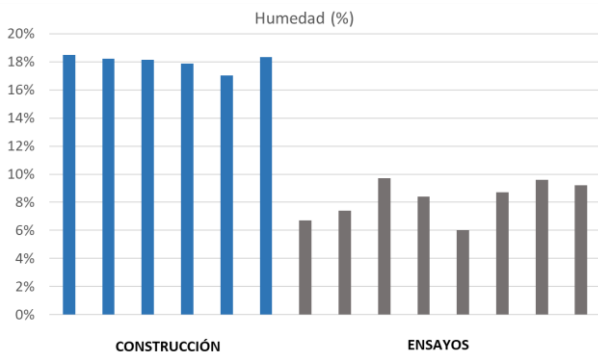


Figura 4 - Contenido de humedad para muestras durante construcción y durante etapa de ensayos

Como se observa en la Figura 4, los valores de humedad obtenidos durante la construcción de las probetas fueron similares al porcentaje de humedad óptima obtenido por el método de compactación Proctor.

Sin embargo, estas probetas estuvieron por 28 días en una etapa de secado en la que la humedad se disminuyó produciendo así una ganancia de la resistencia de los elementos.

Por otra parte, el contenido de humedad de una muestra se relaciona directamente con el comportamiento mecánico del material, de hecho, algunas investigaciones como Mesbah et al., 1999; Morel et al., 2007 han investigado la influencia del contenido de humedad y la energía de compactación en el comportamiento mecánico de la tierra, encontrando que la resistencia a la compresión es proporcional a la energía de compactación.

En la Figura 5 se muestra una comparación entre los valores obtenidos en la literatura del contenido de humedad respecto al promedio de las humedades obtenidas en el momento de realizar los ensayos.

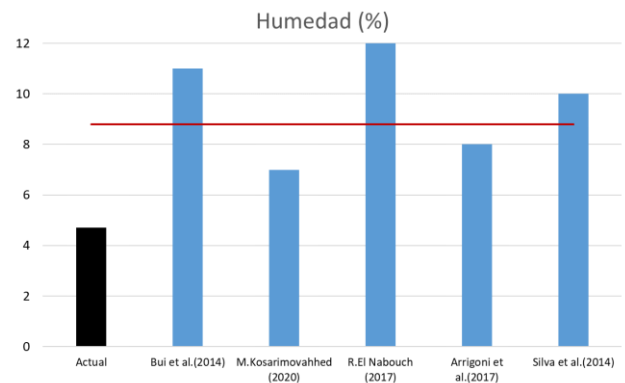


Figura 5 - Contenido de humedad para tapia pisada: valores usados por (T. T. Bui et al., 2014), (Kosarimovahhed & Toufigh, 2020), (EL Nabouch, 2017), (Arrigoni et al., 2017) y (R. A. Silva et al., 2014)

Adicionalmente, un parámetro que está ligado con la resistencia a la compresión y al contenido de humedad del suelo es la densidad máxima seca, ya que según el contenido de humedad durante la compactación y la energía que se aplica durante la misma, es posible obtener diferentes valores de densidades del material (Ávila et al., 2021).

Para el caso de la investigación, se logró obtener un valor medio de densidad seca de 1940 kg/m^3 el cual se encuentra dentro del rango de los valores de densidades reportados por otras investigaciones.

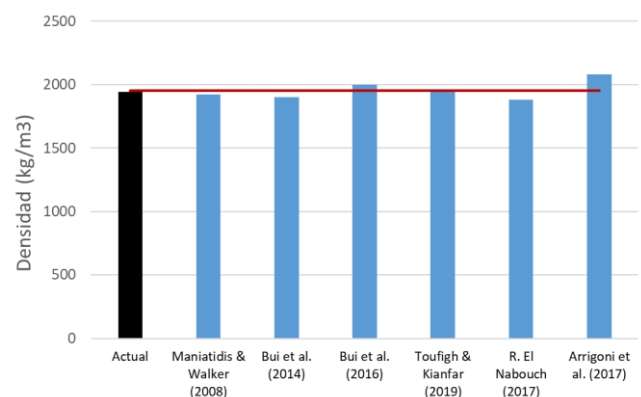


Figura 6 - Densidad de la tapia pisada: valores usados por (Maniatidis & Walker, 2008), (T. T. Bui et al., 2014) (T. T. Bui et al., 2016), (Toufigh & Kianfar, 2019), (EL Nabouch, 2017), y (Arrigoni et al., 2017).

Finalmente, se realizaron ensayos para obtener los límites de consistencia o límites de Atterberg del suelo. Debido al alto contenido de fino que presenta el material utilizado, se obtuvieron valores representativos de este tamaño de partículas. (Ver Figura 7).

El índice de plasticidad reportado para el material evidencia un material gobernado por arcillas que aportan una plasticidad y compresibilidad intermedia.

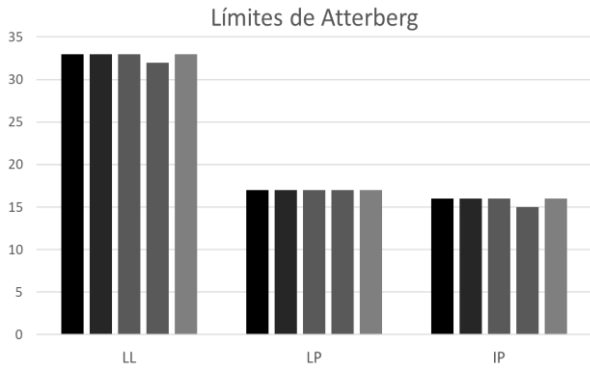


Figura 7 - Límites de Atterberg para la tapia pisada

La tabla 2, presenta un resumen de los resultados obtenidos de los ensayos de caracterización física del material. Estos parámetros forman un componente fundamental para la alimentación de los parámetros de entrada de la modelación numérica que se realizó en la investigación.

Peso unitario (kN/m ³)	Limite Líquido	Limite Plástico	Contenido humedad %
19.4	32.80	17.00	16.7%

Tabla 2 - Caracterización física de la tierra

2.2 Caracterización mecánica

Para realizar la caracterización mecánica de los materiales se llevaron a cabo ensayos de compresión simple y ensayos de corte directo cíclicos. Estos, con el objetivo de determinar la resistencia a la compresión no confinada de las probetas de suelo y de conocer los parámetros de cohesión y resistencia al corte de este, respectivamente. En la Tabla 3 se muestran las dimensiones y número de probetas construidas para cada ensayo.

Tipo de ensayo	Ancho (m)	Alto (m)	Largo (m)	Cantidad
Compresión	0.25	0.50	0.50	6
Corte directo	0.3	0.3	0.30	10

Tabla 3 - Resumen de probetas para caracterización mecánica de la tapia

Las probetas por ensayar se construyeron utilizando tapias de madera y conformando capas de 10 cm de espesor, posteriormente, fueron dejadas en etapa de secado durante al menos 28 días desde su construcción.

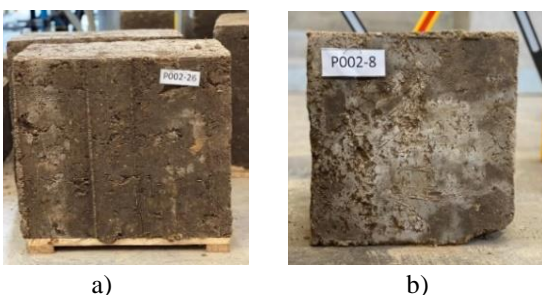


Figura 8 - Especímenes para ensayos de caracterización mecánica: a) Compresión, b) Corte Directo

El ensayo a compresión se ejecutó en la máquina universal de ensayos MTS que se encuentra en los laboratorios de ingeniería de la Pontificia Universidad Javeriana a la cual fue necesario instalarle una placa de acero en la parte inferior como aditamento que funcionó como soporte o base para las probetas de tapia.



Figura 9 - Ensayo a compresión en muretes de tapia

El ensayo consiste en aplicar carga axial controlada a cada uno de los muretes y recopilar información por medio de los instrumentos de medición (extensómetro de contacto y laser) con los cuales se obtuvieron gráficas de esfuerzo vs deformación que permitieron caracterizar mecánicamente el material. En la figura 10, se muestra el procedimiento de instrumentación de las probetas y uno de los casos de falla generalizados en el ensayo.

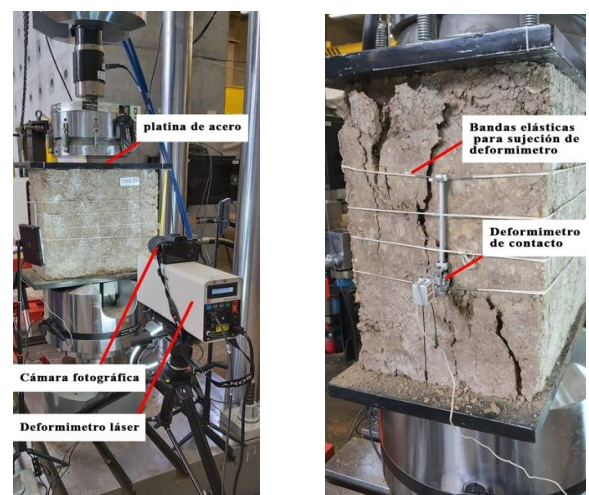


Figura 10 - Instrumentación para ensayo de compresión

En la figura 11 y tabla 4 se presentan los resultados obtenidos para las probetas construidas, estos resultados se obtuvieron recopilando la fuerza que generaba el actuador hidráulico y el desplazamiento registrado con los deformímetros.

Como se especificó en anteriores apartados de la presente investigación, variables como la densidad y el contenido de agua son parámetros que interfieren en la resistencia a la compresión de las probetas. Según Ávila et al., 2021, un incremento en la densidad del material conduce a valores mayores de

resistencia a la compresión confinada, aunque con una dispersión significativa.

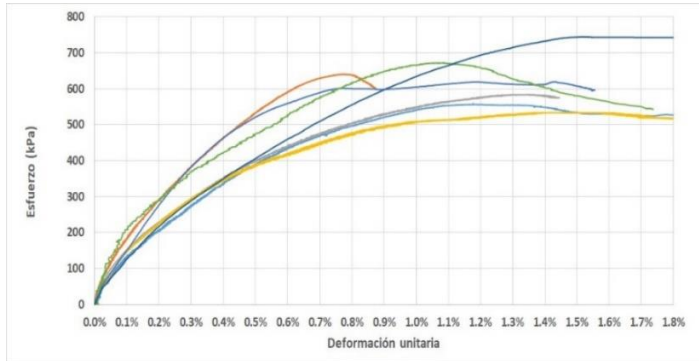


Figura 11 -Resultados de la resistencia a compresión en probetas de tapia pisada

Probeta	Esfuerzo resistente (kPa)	Modulo de elasticidad (kPa)
002_023	745	80436
002_024	559	80698
002_025	641	120239
002_026	584	82153
002_027	534	89577
002_029	620	125459
002_030	673	103909
PROMEDIO	622.29	97495.86
DES.V.EST	72.17	19199.11
C.VARIACIÓN	0.12	0.2

Tabla 4 - Resumen de resultados para ensayos a compresión

Los valores reportados por la literatura se sitúan entre el rango de 810 kPa y 1850 kPa (Ver figura 12). Sin embargo, el tamaño de las muestras con el que se realizaron los ensayos varía considerablemente entre las diferentes investigaciones, lo cual, debido a una alta heterogeneidad del material, la dispersión entre los resultados tiende a ser elevada.

la pendiente de la zona elástica en la gráfica de esfuerzo vs deformación de la tierra. Para la presente investigación se obtuvo un valor promedio de 97495 kPa, sin embargo, al igual que los anteriores parámetros, las características físicas del material modifican y crean una dispersión alta entre los valores reportados por otros autores (Ver Figura 13).

De hecho, Q. Bui et al., 2009 realizaron ensayos de compresión confinada para diferentes tamaños de probetas, concluyendo que la resistencia a la compresión obtenida con probetas pequeñas era mayor que la arrojada por las probetas de grandes escalas (las cuales representan de manera más acertada el comportamiento de un muro en tapia pisada en escala real).

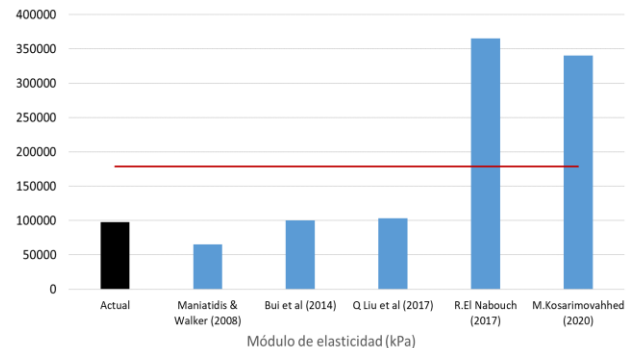


Figura 13 - Modulo de Young para la tapia pisada: valores usados por (T. T. Bui et al., 2014; EL Nabouch, 2017; Kosarimovahhed & Toufigh, 2020; Maniatidis & Walker, 2008; Qiang & Liping, n.d.).

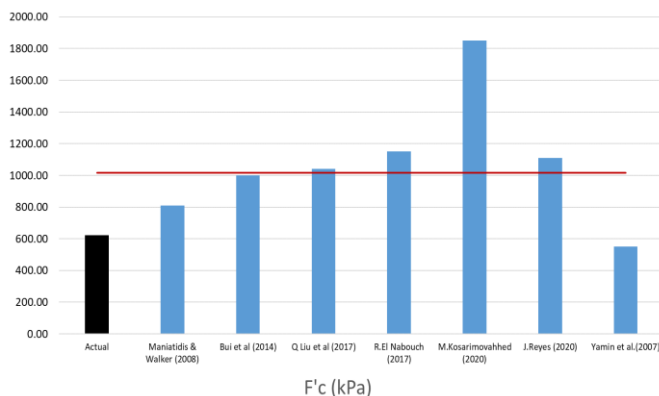


Figura 12 - Resistencia a la compresión para tapia pisada: valores usados por (T. T. Bui et al., 2014; EL Nabouch, 2017; Kosarimovahhed & Toufigh, 2020; Maniatidis & Walker, 2008; Qiang & Liping, n.d.; Reyes et al., 2020).

Por otra parte, también fue posible obtener el módulo de Young del material, el cual se obtiene con

Adicionalmente, con ayuda de cámaras fotográficas fue posible registrar la distribución de deformaciones que se presentaron durante el ensayo a compresión. La figura 14 evidencia para el caso de dos probetas que la alta heterogeneidad del material dificulta registrar un patrón de deformaciones en la sección de los muros. Esto demuestra entre otras cosas, la gran dispersión que han arrojado los resultados obtenidos por diferentes autores, además, evidencia la importancia de asegurar un adecuado proceso constructivo de los muros ya que las mayores concentraciones de deformaciones se localizan principalmente a lo largo de las capas de compactación de los elementos.

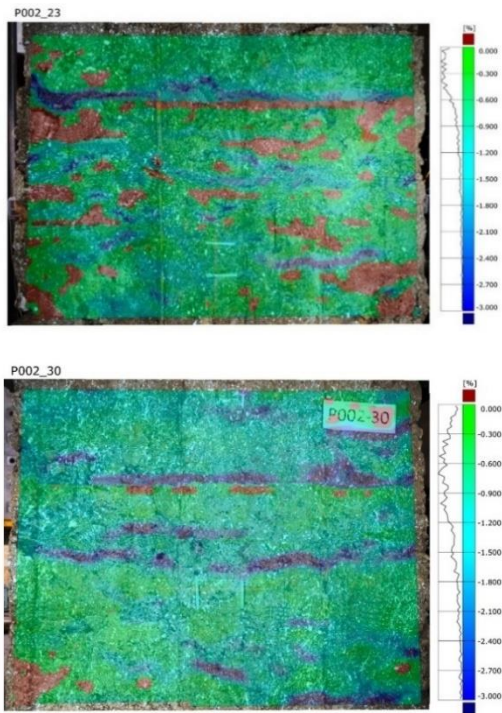


Figura 14 - Distribución de deformaciones en ensayos a compresión (Probetas 002_23 y 002_30)

En cuanto al ensayo de corte directo, este se realizó utilizando un montaje con dos actuadores MTS, uno para aplicar carga vertical y otro para aplicar la carga horizontal que genera el corte en la probeta. La carga vertical se mantuvo constante y se usaron tres diferentes esfuerzos axiales, dentro del rango de los esfuerzos por carga gravitacional al que están sometidas las edificaciones de 1 y 2 pisos en tierra. Posteriormente se aplicó una carga cíclica por control de desplazamiento para generar los esfuerzos cortantes en los especímenes. Este desplazamiento se obtuvo del protocolo de carga FEMA 461 como se observa en la figura 15.

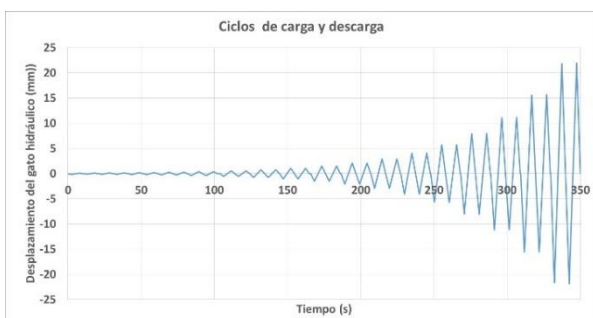


Figura 15 - Protocolo de carga cíclica para ensayo de corte directo

Esta carga se aplicó por medio de un actuador hidráulico con una capacidad máxima de 10 Toneladas. Adicionalmente, se aplicó una carga axial en la probeta utilizando un actuador hidráulico con una capacidad máxima de 25 Ton (Ver figura 16).

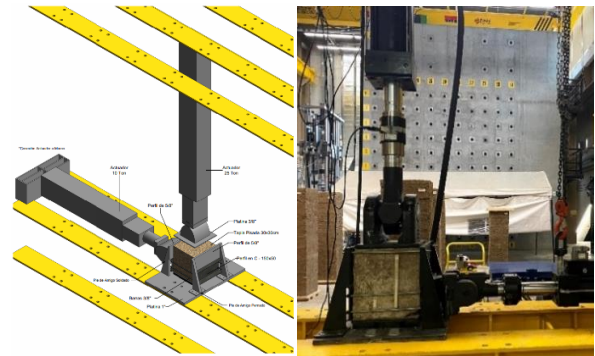


Figura 16 - Protocolo para ensayo de corte directo

En la tabla 5, se presentan los resultados obtenidos del ensayo de corte directo cíclico, para este ensayo se fallaron 10 probetas las cuales fueron agrupadas en 3 grupos correspondientes a un incremento en las cargas axiales de las mismas. De los resultados se logró obtener un ángulo de fricción de 49° y una cohesión de 124 kPa.

Debido a que el ensayo a corte directo se realizó aplicando cargas cíclicas en las probetas, fue posible obtener los ciclos de histéresis para los diferentes escenarios de carga axial que se ensayaron.

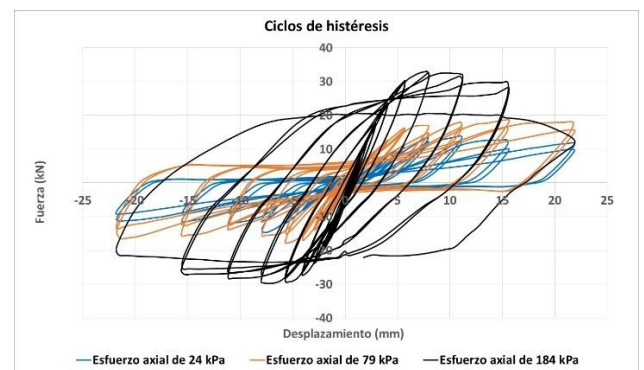


Figura 17 - Ciclos de histéresis para probetas de tapia pisada

La figura 17 demuestra que las probetas ensayadas con la mayor carga axial (184 kPa) presentan una mayor área encerrada dentro de la curva que se traduce en una mayor capacidad de disipación de energía. Por otra parte, a diferencia de las probetas con los menores esfuerzos axiales (24 kPa y 79 kPa), la probeta ensayada con el mayor esfuerzo (184 kPa) presenta un mecanismo de degradación de la rigidez distinto puesto que las pendientes para dichos ciclos tienden a ser más prolongadas y con una menor pendiente.

Finalmente, de la Figura 19 se puede inferir que se presentaron principalmente dos mecanismos de falla en las probetas ensayadas. El primer tipo de falla se localiza a lo largo de la capa de compactación y el segundo tipo de falla se localizó a lo largo de la mitad de las capas de compactación de las probetas.

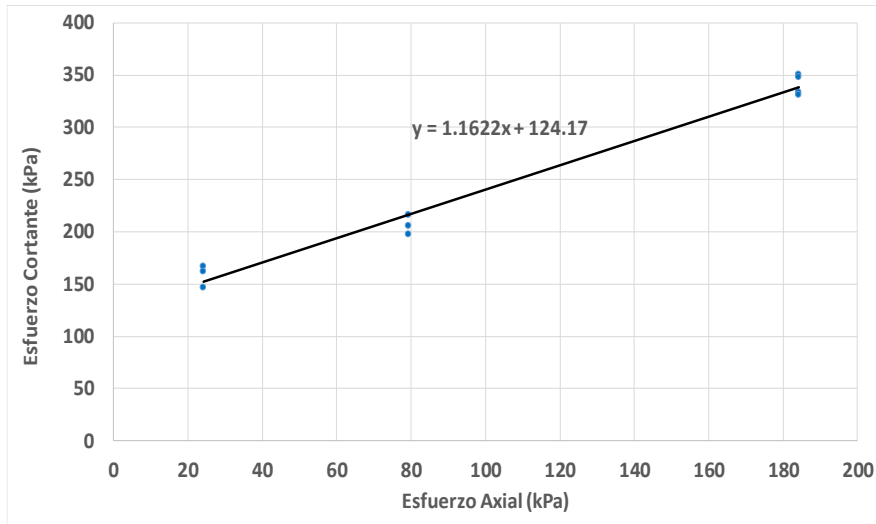


Figura 18 - Gráfica de esfuerzo cortante vs esfuerzo axial

Probeta	Esfuerzo Axial (kPa)	Esfuerzo Cortante (kPa)
1.7kN-020	24	167
1.7kN-012	24	162.3
1.7kN-022	24	146.8
6.7kN-016	79	205.8
6.7kN-010	79	197.6
6.7kN-013	79	216.5
16kN-009	184	333.7
16kN-017	184	350.7
16kN-014	184	330.7
16kN-021	184	348.1

Tabla 5- Resultado de ensayos de corte directo cíclico

PROBETA	Esfuerzo Axial (kPa)	TIPO DE FALLA	Foto
P002_09	184 kPa	Mitad de Capa de Compactación	
P002_21	184 kPa	Mitad de Capa de Compactación	
P002_17	184 kPa	Capa de Compactación	
P002_14	184 kPa	Mitad de Capa de Compactación	
P002_13	79 kPa	Mitad de Capa de Compactación	
P002_10	79 kPa	Mitad de Capa de Compactación / Capa de Compactación	
P002_16	79 kPa	Mitad de Capa de Compactación	
P002_12	24 kPa	Capa de Compactación	
P002_22	24 kPa	Capa de Compactación	
P002_20	24 kPa	Mitad de Capa de Compactación	

Figura 19- Tipos de falla para ensayos de corte directo cíclico

2.3 Ensayo a flexión

Según AIS, 2017, cuando se utilicen platinas de acero para el reforzamiento o rehabilitación de los muros en tapia pisada se recomienda utilizar elementos de acero con un espesor de ¼" (6.35mm) y un ancho de. Se recomienda además que estos elementos tengan una separación no superior a los 1500mm, aunque típicamente se han utilizado separaciones de 1000mm y que se instalen en ambas caras del muro.

De esta manera, para un muro de tapia pisada con un espesor promedio de 60cm es posible deducir la cuantía de acero que requiere por longitudes aferentes.

$$[1] \quad \rho = \frac{b_w}{s}$$

donde, b_w , es el ancho de la platina de acero y s es la separación entre ejes de las platinas de acero.

De esta manera, se puede deducir que una platina de acero con un espesor de $\frac{1}{4}$ " (6.35mm) y un ancho de 50mm en una viga de 500 mm de ancho representa las condiciones recomendadas por AIS, 2017 para la rehabilitación y reforzamiento de muros en tapia pisada.

Ya que el objetivo principal de la investigación requiere analizar la influencia que tiene la cuantía de acero en la resistencia de muros de tapia pisada, se construyeron 4 tipos de vigas. El primer tipo de muro/viga se construyó sin sistema de reforzamiento, al segundo tipo se instalaron platinas de $\frac{1}{4}$ " por 5cm de ancho correspondientes a lo especificado en la expresión [1]. El tercer tipo contiene platinas de $\frac{1}{4}$ " por 2.5cm de ancho correspondientes a la mitad de la cuantía especificada requerida; y finalmente, el cuarto tipo de muro contiene platinas de $\frac{1}{4}$ " por 10cm de ancho que corresponden al doble de la cuantía requerida según AIS, 2017.

Las vigas fueron construidas compactando tierra en capas de 10 cm y utilizando tapias de madera, (Ver Figura 20) de manera que el proceso constructivo tuviera una gran similitud con los mecanismos artesanales de compactación con los que son construidas las viviendas de tapia pisada en el país. Adicionalmente, esta construcción fue llevada a cabo por maestros tapieros de la región quienes han dedicado su vida a la construcción de este tipo de edificaciones.



Figura 20 - Compactación de capas de tierra para muros

Una vez construidos los muros, pasaron a una etapa de secado por al menos 28 días antes de dar inicio al proceso de instalación de los elementos de reforzamiento (pernos y platinas de acero).

Para asegurar la correcta ubicación de los pernos de acero, en los muros de tapia fue necesario ubicar guías para taladrar el ancho total del muro, esto debido a que es importante asegurar una horizontalidad a lo largo de la perforación para que fuese posible soldar los pernos en las conexiones con las platinas.



Figura 21 - Perforaciones en muros de tapia pisada

Una vez se conformaron todas las perforaciones de los muros, se procedió a realizar la instalación de los pernos de acero y a llenar los excesos de aire con mortero inyectado. La conexión entre los elementos de acero se realizó creando una soldadura en cada una de las aberturas por donde se conectaban los pernos a las platinas.



Figura 22 - Inyección de mortero en perforaciones y soldadura de conexiones entre pernos y platinas.

Como se explicó anteriormente, para cada tipo de reforzamiento se construyeron 2 ejemplares que fueron ensayados en el marco de acero de la Pontificia Universidad Javeriana (Bogotá, Colombia) para un total de 6 vigas de tapia pisada con reforzamiento y 2 vigas sin sistema de reforzamiento.

La Figura 23 muestra el resultado final de la instalación de los elementos de confinamiento de las vigas correspondientes a los 3 tipos de cuantía a ensayar.



Figura 23 - Tipos de reforzamiento en muros de tapia pisada en función de la cuantía de acero requerida

La tabla 6 muestra un resumen de los tipos de vigas utilizadas y las dimensiones con que fueron construidas.

Tipo	Dimensiones viga (m)	Dimensiones platinas		Cuantía	As (cm ²)	Cantidad
	b x h x l	Espesor (")	Ancho (m)			
Viga T1	0.45 x 0.4 x 1.4	N/A	N/A	N/A	N/A	2
Viga T2	0.5 x 0.6 x 1.8	1/4	0.05	0.00106	3.18	2
Viga T3	0.5 x 0.6 x 1.8	1/4	0.025	0.00053	1.59	2
Viga T4	0.5 x 0.6 x 1.8	1/4	0.1	0.00212	6.36	2

Tabla 6- Resumen de dimensiones en vigas y refuerzos para ensayo a flexión.

El ensayo a flexión se instrumentó utilizando deformímetros laser en una cara y un LVDT en la parte inferior para medir el desplazamiento de la viga, como se muestra en la Figura 24.



Figura 24 - Sensores de desplazamiento laser y LVDT

El ensayo a flexión consiste en aplicar una carga controlada perpendicular al plano de las vigas.

Las vigas se apoyaron sobre rodillos que generen apoyos de primer grado y previendo que los entramados de acero se ubiquen sobre las caras de la viga en donde se aplicaron las cargas como se muestra en la Figura 25.

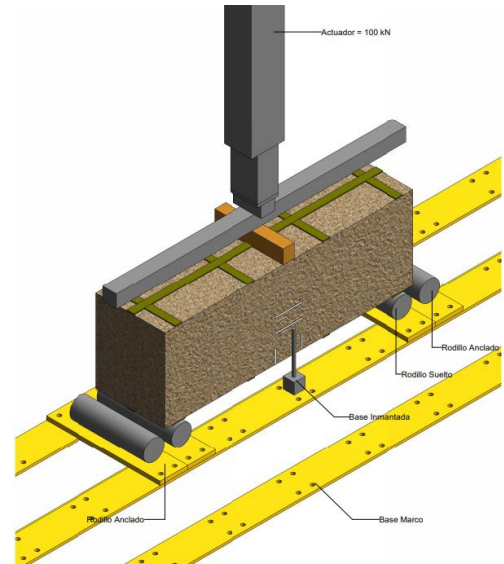


Figura 25 - Diseño del montaje experimental del ensayo a flexión.

La Figura 27 muestra los resultados obtenidos para del ensayo de flexión para cada una de las vigas reforzadas.

El comportamiento cada una de las curvas indica que existe una influencia directa de los elementos de reforzamiento sobre la resistencia de cada una de las vigas de tapia pisada. Los resultados advierten que un incremento en el área de acero en las vigas representa una mayor resistencia presentando además una mayor ductilidad, lo que permite que los elementos alcancen desplazamientos altos sin generar un mecanismo de colapso.

Por otra parte, se evidencia el gran beneficio de utilizar entramados de acero como alternativa de reforzamiento en muros de tapia pisada, ya que, incluso cuando se utilice una baja cuantía de acero la resistencia se incrementará en al menos 3 veces en comparación con muros sin ningún sistema de reforzamiento.

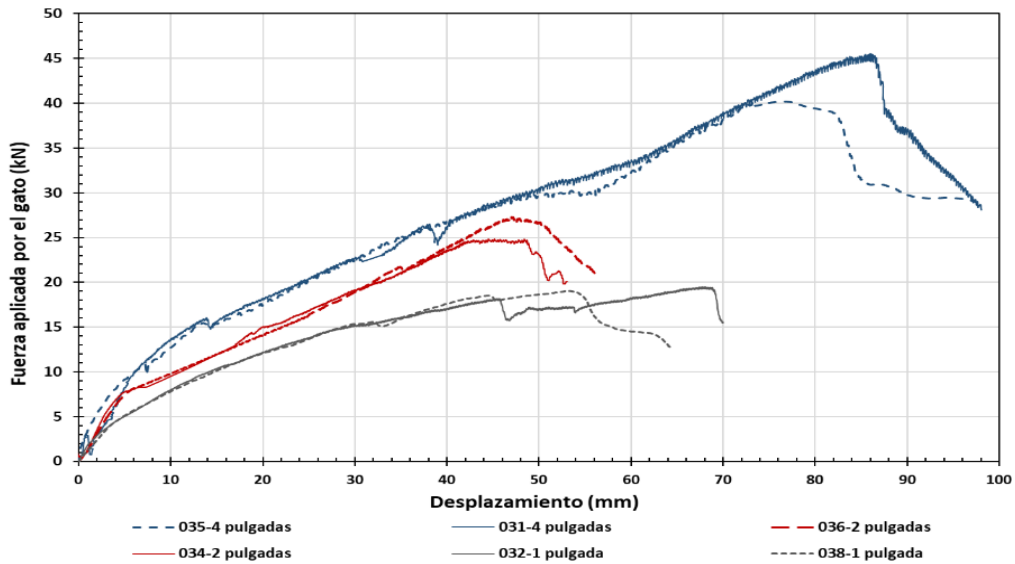


Figura 26 - Gráfica de fuerza vs desplazamiento para ensayos a flexión.

Las Figuras 28 muestran los mecanismos de falla para cada una de las probetas que tenían sistema de reforzamiento.

Por otra parte, para el caso de las vigas que no incorporaban platinas ni pernos de acero, no fue posible lograr obtener información con los instrumentos de medición, pues la resistencia a la flexión de este tipo de vigas apenas alcanzó a soportar el peso propio de las mismas cuando se apoyaron sobre apoyos separados 800 mm. Esto implica que la resistencia a la flexo-tracción de la Tapia Pisada sin refuerzo está en el orden de los 25 kPa. La figura 29 muestra el mecanismo de falla para estos tipos de vigas.






Numero Especimen	Tipo	Caso de Falla	Observaciones
P002_31	Col. 1.8 - 0.10		Grietas iniciales por Flexión
P002_35	Col. 1.8 - 0.10		Grietas iniciales por Flexión
P002_34	Col. 1.8 - 0.5		Grietas iniciales por Flexión
P002_36	Col. 1.8 - 0.5		Grietas iniciales por Flexión
P002_32	Col. 1.8 - 0.25		Grietas Iniciales por Flexión
P002_38	Col. 1.8 - 0.25		Grietas Iniciales por Flexión

Figura 27 - Mecanismos de falla para vigas con reforzamiento sometidas a flexión.



Figura 28 - Mecanismo de falla para vigas sin reforzamiento sometidas a flexión.

3. Modelación en elementos finitos

El método de los elementos finitos es usualmente utilizado para representar el comportamiento mecánico no lineal de diversos materiales con ayuda de modelos constitutivos que permitan representar todos los estados de esfuerzos del material en cualquier punto (Juan David Sandoval Triana, 2018) (Dere, 2017). En vista de que realizar una modelación numérica del comportamiento plástico de los materiales resulta muy complejo, se han desarrollado algunos softwares de modelación

especializados en elementos finitos con diversas opciones y/o alternativas. En este estudio la modelación se realizó mediante el software ABAQUS/SIMULIA.

3.1 Modelo de daño plástico

El modelo de daño plástico está basado en la investigación desarrollada por Lubliner et al., 1989 con el cual se representa el comportamiento de daño del concreto en función de dos mecanismos de falla: la fisuración por tensión y el aplastamiento por compresión. Pese a que este modelo constitutivo se desarrolló en base a materiales como el concreto reforzado, es posible representar otros materiales (como la tapia pisada) debido a que este tiene una respuesta distinta cuando se encuentra sometido a esfuerzos de tensión uniaxial y de compresión uniaxial. (Reyes et al., 2019).

En investigaciones realizadas por Juan David Sandoval Triana, 2018 y Reyes et al., 2019 se utilizó el modelo de daño plástico para modelar las edificaciones en tierra. Por esto, para el presente estudio se utilizaron los mismos parámetros ajustados a las características de la tapia pisada.

A diferencia de la teoría clásica de la plasticidad, este modelo supone que el daño se puede representar incorporando parámetros y variables independientes que modifiquen el módulo de elasticidad inicial a compresión y a tensión de los materiales (Juan David Sandoval Triana, 2018) (Ver Figura 30). Además, una característica importante de este modelo es que presenta una función de fluencia la cual es la responsable de limitar la respuesta elástica del material, esta superficie de fluencia está controlada principalmente por dos variables de endurecimiento: la deformación unitaria a tensión $\tilde{\epsilon}_t^{pl}$ y la deformación unitaria a compresión $\tilde{\epsilon}_c^{pl}$ (Hafezolzhorani et al., 2017).

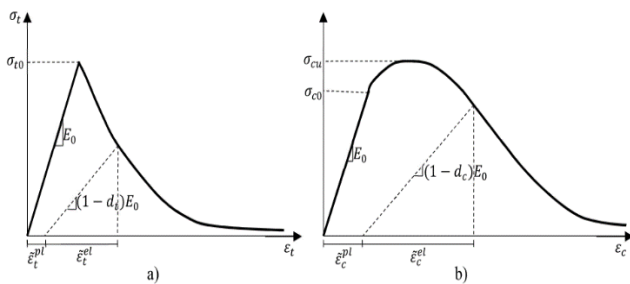


Figura 29 -Respuesta del modelo de daño plástico del concreto sometido a cargas uniaxiales: a) Tensión; b) Compresión. SIMULIA (2014).

Finalmente, la superficie de fluencia adicionalmente incluye parámetros independientes como el módulo de elasticidad inicial E , el módulo de Poisson ν , los factores de restauración de la

rigidez en tensión y compresión W_t y W_c , la relación entre el límite elástico uniaxial y biaxial F_{b0}/F_{c0} , la relación entre la segunda invariante de esfuerzos a tensión y a compresión K_c y un parámetro de viscosidad μ . Por otra parte, para la regla de flujo, el modelo constitutivo hace uso de la función hiperbólica de “Drucker-Prager” la cual determina la presión para la que un material ha sobrepasado el límite elástico (Lubliner et al., 1989) y que depende de un ángulo de dilatación ψ y de un factor de excentricidad ϵ .

Para efectos de la investigación, los valores obtenidos durante la caracterización física y mecánica de la tierra fueron utilizados para la calibración de los modelos a excepción de los parámetros independientes mencionados anteriormente, los cuales fueron adaptados y extraídos de la investigación realizada por Juan David Sandoval Triana, 2018. (Ver tabla 7 y Figura 31)

E (MPa)	ν	γ (kN/m^3)	W_t	W_c
97.5	0.15	19	0	0
ψ (°)	ϵ	$Fb0/fc0$	K_c	μ
56	0.1	1.16	0.667	0.01

Tabla 7 - Parámetros para el modelo de daño plástico.

Las propiedades utilizadas para el acero se muestran en la tabla 8.

Peso unitario (kN/m^3)	E (MPa)	ν	F_y (MPa)
78.5	200	0.3	240

Tabla 8 -Propiedades acero.

Uno de los principales objetivos de los ensayos de caracterización mecánica radica en la obtención de las gráficas de esfuerzo vs deformación del material cuando es sometido a cargas uniaxiales, como las aplicadas durante el ensayo de compresión de la tapia.

Como se mencionó anteriormente, los parámetros de resistencia del material obtenidos experimentalmente suponen la base fundamental de la modelación numérica con elementos finitos. La figura 31 muestra los parámetros de resistencia vinculados al modelo numérico que emulan el comportamiento obtenido mediante los ensayos en el laboratorio.

Esta calibración permitió que se pudieran comparar con mayor certeza los resultados obtenidos durante el ensayo a flexión en el laboratorio.

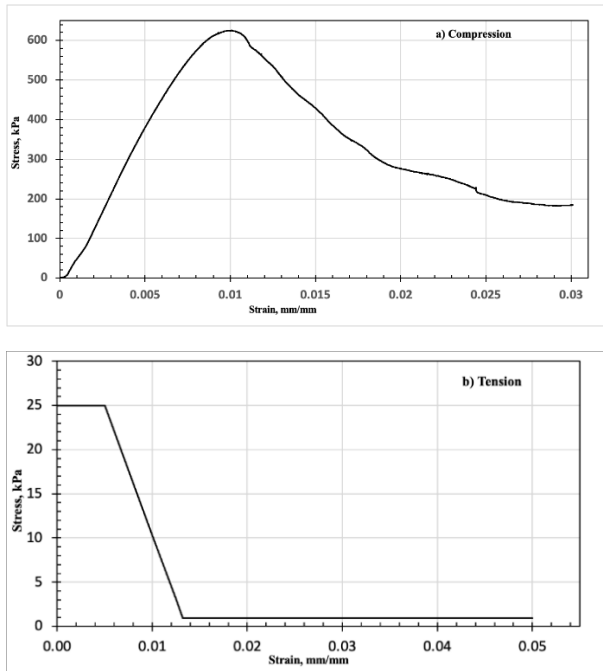


Figura 30 - Modelo constitutivo de esfuerzo vs deformación para la tapia pisada.

Por otra parte, las vigas fueron sometidas a esfuerzos flectores aplicando un desplazamiento de 10cm en la cara superior del elemento y ubicado en el centro de la luz no soportada por apoyos de primer grado, como se muestra en la Figura 32.

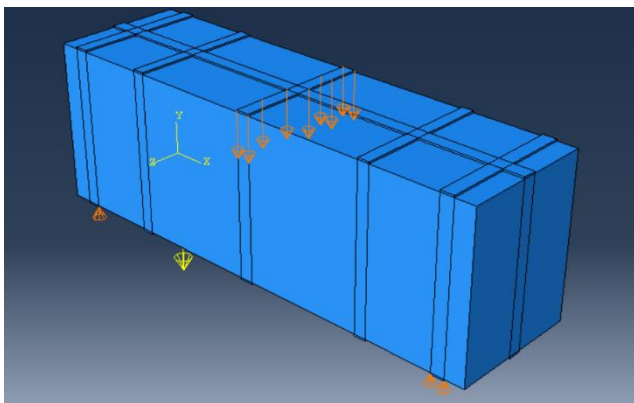


Figura 31- Condiciones de contorno de viga.

Además, en el modelo numérico presenta una condición de contacto especial entre los materiales modelados. El contacto entre las superficies de tierra vs acero fue modelado como una superficie no rígida que genera fricción en ambas caras. Para esta superficie se estableció un coeficiente de fricción de 0.30.

Por otra parte, la interacción entre las platinas de acero y los pernos que conectan ambos elementos se definió mediante un contacto de tipo rígido que

restringe el desplazamiento de los elementos asemejando una soldadura. En la figura 33 se pueden observar las condiciones de contacto aplicadas a la modelación.

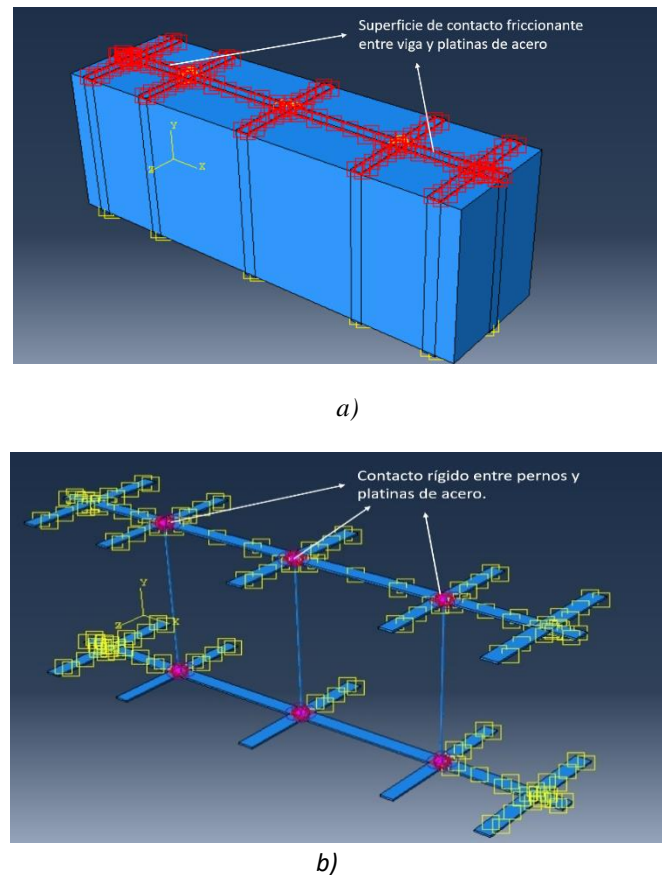


Figura 32 - Interacciones entre los elementos: a) Contacto friccionante entre viga y platinas, b) Contacto rígido entre pernos y platina.

Una vez se completó la definición de las variables e interacciones de los materiales se procedió a definir los diferentes tipos de elementos finitos y los tamaños de la malla a utilizar. Es importante aclarar que el parámetro de definición de los tamaños y tipos de elementos finitos corresponde a un ejercicio iterativo en el cual se analizó la sensibilidad o influencia de los diferentes tamaños de malla en el resultado de las resistencias y desplazamientos del modelo.

Por otra parte, dichos tamaños también se definieron basados en el tiempo de convergencia durante el análisis del programa. Para las vigas reforzadas se decidió utilizar un elemento de tipo cúbico con 8 nodos (Ver figura 34) y que contempla una dimensión de arista de 4cm de largo. Este tipo de elemento finito se ajusta de manera adecuada a la geometría rectangular de las vigas y de las platinas de refuerzo.

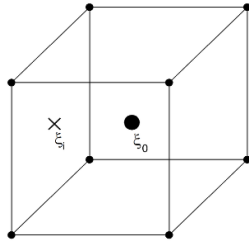


Figura 33 - Tipo de elemento finito cúbico con 8 nodos

Sin embargo, los resultados obtenidos con los elementos cúbicos presentaron inconsistencias en la zona en donde las platinas se conectan con los pernos ya que en estas zonas se presenta una concentración de esfuerzos que generaban valores no esperados.

Para solventar este inconveniente se decidió modificar el enmallado de los elementos cambiando solo en las zonas de contacto entre las platinas y los pernos los elementos cúbicos por elementos prismáticos que permitieran una mejor interacción de los elementos en esta zona.

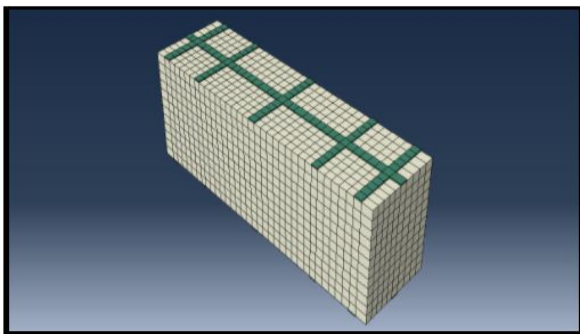


Figura 34 - Enmallado para modelo de viga reforzada

En la figura 36 se muestra el resultado de la distribución de desplazamientos para las vigas

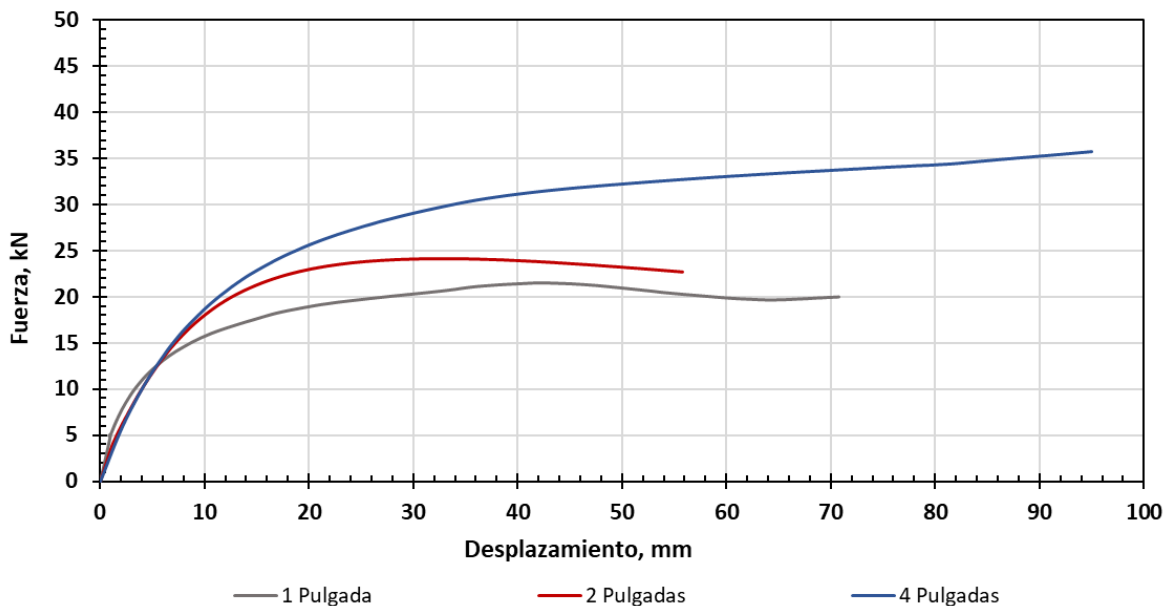


Figura 36 - Gráficas de fuerza vs desplazamiento para 3 tipos de cuantías en vigas de tapia pisada.

reforzadas, en este análisis se puede evidenciar que las interacciones mencionadas anteriormente permiten que los elementos se desplacen y separen en las caras en donde se aplicaron los contactos friccionantes.

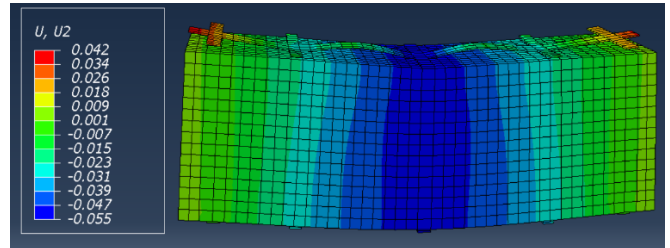


Figura 35 - Distribución de desplazamientos en viga reforzada en metros.

Los anteriores ejercicios se desarrollaron para la totalidad de las vigas reforzadas con el objetivo de comparar y analizar la viabilidad de la modelación de un material complicado de modelar utilizando aproximaciones como los elementos finitos. En la Figura 37 se presentan los resultados obtenidos para cada distribución de cuantía reforzada en los modelos.

En primera instancia, los resultados obtenidos mediante la modelación numérica con elementos finitos muestran una buena aproximación sobre los resultados arrojados durante los ensayos experimentales ya que existe una similitud en los valores de las resistencias obtenidas en el laboratorio vs teóricamente (Ver Figura 37). Como se evidenció anteriormente, un incremento en la cuantía de acero supone una mayor resistencia del material compuesto.

Sin embargo, a pesar de que se obtuvieron resultados similares con los ensayos experimentales, la modelación numérica difiere en aspectos como la pendiente de la gráfica y los mecanismos de ruptura o colapso de los elementos.

Dichas inconsistencias en los resultados se ven atribuidas esencialmente a un conjunto de variables que a pesar de que son palpables en la realidad, difícilmente se lograrían simular en una modelación numérica. Una de estas variables tiene que ver con la energía de compactación de la tapia pisada. Si bien, durante los ensayos de caracterización física del material se lograron obtener valores promedio de la densidad máxima seca, resulta muy difícil saber el estado final de las capas de compactación de las vigas, entendiéndose que dichas zonas fueron las encargadas de iniciar mecanismos de agrietamiento y colapso durante los ensayos a flexión en las vigas.

Por otra parte, el contacto friccionante entre las superficies ignora que en la realidad no existe una perfecta unión entre las platinas de acero y las vigas de tapia. Esto se debe a que el proceso constructivo de los elementos es llevado a cabo mediante procesos artesanales que dificultan tener un control preciso de las dimensiones y continuidad de los elementos.

En principio, uno de los objetivos de la modelación numérica en elementos finitos y considerando la no linealidad de los elementos que se estudian, se basó en determinar las diferencias que se pueden obtener cuando se realizan este tipo de análisis respecto a un análisis lineal que además considera una compatibilidad de deformaciones entre los materiales. La figura 38 representa el comportamiento de una modelación que considera una compatibilidad de deformaciones entre los

materiales que fueron utilizados (a) y el comportamiento cuando se incluye en los análisis variables como un coeficiente de fricción y conectores rígidos entre los entramados de acero (b).

Como se muestra en la figura 38, al incluirse en la modelación otras variables como el coeficiente de fricción entre los materiales se puede apreciar que la compatibilidad de deformaciones no se conserva, en este caso, se puede evidenciar que las platinas de acero sufren un desprendimiento de la superficie de contacto con la tierra y en las longitudes no soportadas con los pernos de conexión.

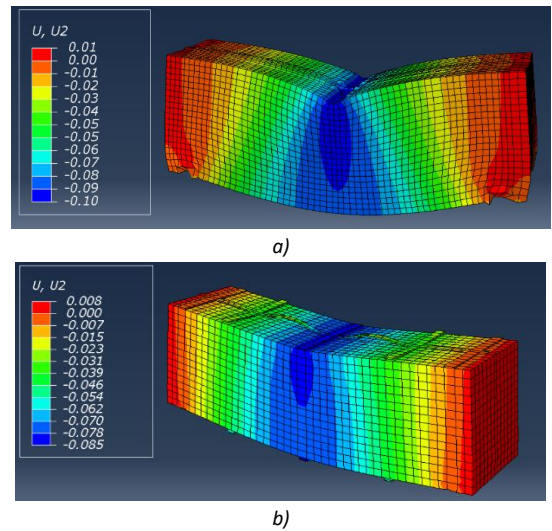


Figura 37 - Resultados de la modelación en elementos finitos para vigas en tapia pisada: a) Sin superficies de contacto, b) Con superficies de contacto.

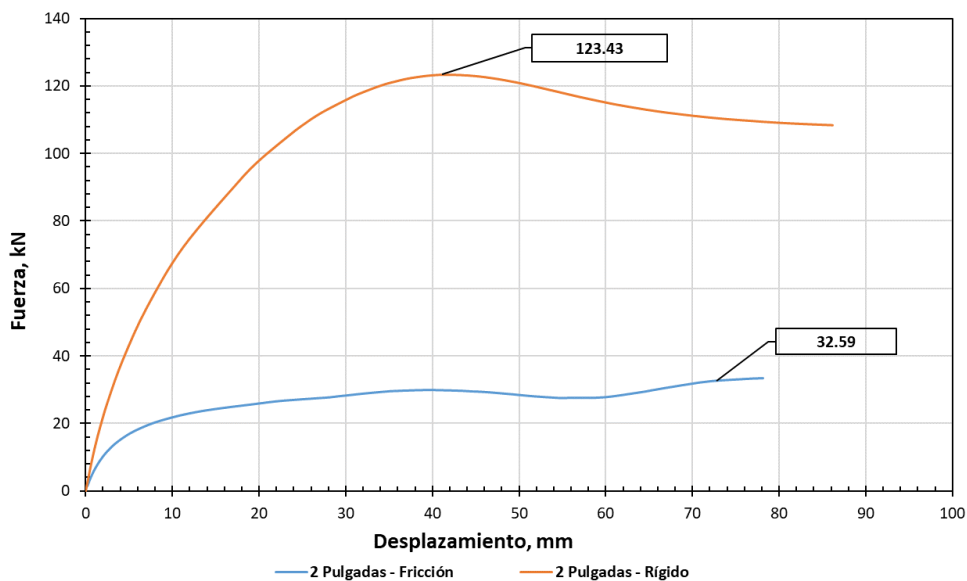


Figura 38 - Resultados de la resistencia a flexión en muros de tapia pisada.

Este comportamiento además se ve reflejado en las diferencias entre las resistencias de cada uno de los especímenes modelados. Como se muestra en la figura 39, existe una importante disminución en la resistencia a flexión de los muros cuando se tienen en cuenta superficies de contacto friccionantes y que permitan además el desprendimiento entre los materiales. La expresión [5] compara la resistencia que tendría un sistema como sección compuesta con la resistencia que arrojaría un sistema que vincula superficies de fricción.

$$[5] \quad \%R_n = \frac{CF_f}{CF_r} = \frac{32.59 \text{ kN}}{123.43 \text{ kN}} = 0.26$$

Donde, $\%R_n$ es el coeficiente de reducción a la resistencia de los elementos, CF_f La capacidad a flexión con superficies de contacto con fricción y CF_r la capacidad a flexión de elementos con superficie de contacto rígida. El resultado obtenido del coeficiente en [5] advierte que cuando se realicen análisis que consideren superficies de fricción, en el mejor de los casos el sistema estaría trabajando al 26% de la consideración del sistema como sección compuesta (Tapia pisada + platinas de acero). Lo anterior quiere decir que en caso de que se realice un análisis para determinar la resistencia nominal a flexión de un elemento en tapia pisada que no tenga en cuenta variables como la fricción entre elementos se debe aplicar una reducción a la resistencia de 0.26 según el coeficiente obtenido o de 0.30 según Decreto N°2113 de 2019, 2019.

4. Conclusiones

Para los resultados de los ensayos a compresión se obtuvo un valor mínimo de resistencia de 810 kPa y un valor máximo de 1850 kPa. Para la presente investigación se utilizó una resistencia promedio de 622 kPa. Este valor resulta ser inferior a los valores de resistencia máxima a la compresión reportados en diferentes investigaciones, a excepción de los reportados por Yamín et al., 2007. Esta dispersión en los resultados se debe a una gran heterogeneidad del material la cual se magnifica cuando se realizan ensayos con probetas de grandes dimensiones. Del mismo modo, los valores del módulo de Young para la tapia pisada se ven afectados por los tamaños de las probetas a ensayar y por la alta heterogeneidad del material. Esto indica entonces que los resultados reportados en la presente investigación se ajustan o representan en mejor medida el comportamiento de la tapia pisada a escala real y por lo tanto, son valores que pueden ser utilizados como puntos de partida para futuras investigaciones y/o durante el ejercicio de diseño estructural de este tipo de estructuras.

Los ensayos de corte directo cíclico han evidenciado el mecanismo de falla predominante para la tapia pisada. La figura 28 demuestra la alta influencia que tienen las capas de compactación en los mecanismos de agrietamiento y colapso de los elementos, los cuales generan planos de falla para esfuerzos cortantes a lo largo de las capas de compactación y a lo largo de la mitad de las capas de compactación. Una alternativa para mitigar estos mecanismos de falla se podría orientar hacia la ubicación de los pernos de conexión transversales en las zonas donde se genere una concentración de esfuerzos cortantes.

Los resultados de los ensayos a flexión han evidenciado la influencia del área de acero en las vigas de tapia pisada (cuantía de acero). Un incremento en la cuantía se traduce en una mayor resistencia de la sección compuesta (tapia pisada + platinas de acero). Lo cual evidencia el gran beneficio de incluir entramados de acero como propuesta de rehabilitación de edificaciones construidas en tapia pisada ya que mientras las vigas sin refuerzo no soportan su propio peso, las vigas con la menor cantidad de acero de refuerzo resiste al menos 3 veces su propio peso y aquellas con la mayor cantidad de acero de refuerzo resistieron una carga equivalente a 5 veces su propio peso.

Para el caso de la modelación numérica se puede concluir que es posible realizar una aproximación del comportamiento experimental de la tapia pisada mediante métodos numéricos como los elementos finitos. Sin embargo, durante el ejercicio de la modelación de las condiciones de contorno se dificulta vincular variables importantes de la realidad, como las capas de compactación, las cuales influyen en gran medida en el mecanismo de falla y colapso de los elementos.

Por otra parte, los resultados de los modelos numéricos confirmaron la influencia de la cuantía de acero en la resistencia de los elementos de tapia pisada. Dejando entrever un aumento de la resistencia a la flexión en la medida que se incrementa el área de acero en las vigas o muros de tapia pisada. Finalmente, se confirma el coeficiente estipulado en el numeral 8.5.2 del documento AIS-610-EP del 2017.(Decreto N°2113 de 2019, 2019), encontrando la influencia de la superficie de fricción en la resistencia a flexión de muros sometidos a cargas perpendiculares al plano del muro, la cual demuestra que cuando se realicen análisis que consideren superficies de fricción, en el mejor de los casos el sistema estaría trabajando al 26% de la consideración del sistema como sección compuesta (tapia pisada + platinas de acero).

Agradecimientos

Este trabajo fue posible gracias a la financiación proveniente del Patrimonio Autónomo Fondo Nacional de Financiamiento para la Ciencia, la Tecnología y la Innovación Francisco José De Caldas de MinCiencias, República de Colombia. En

particular por la financiación del proyecto código 120385269649– MGI Id: 6988 (Rehabilitación sísmica de edificaciones en tierra –patrimoniales- de dos niveles), de acuerdo con los resultados de la Convocatoria No 852-2019.

Referencias

- AIS. (2017). Manual para la rehabilitación de viviendas construidas en adobe y tapia pisada. In *AIS*.
- Arrigoni, A., Pelosato, R., Dotelli, G., Beckett, C. T. S., & Ciancio, D. (2017). Weathering's beneficial effect on waste-stabilised rammed earth: a chemical and microstructural investigation. *Construction and Building Materials*, *140*, 157–166. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.009>
- Aubert, J. E., Marcom, A., Oliva, P., & Segui, P. (2015). Chequered earth construction in south-western France. *Journal of Cultural Heritage*, *16*(3), 293–298. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2014.07.002>
- Ávila, F., Puertas, E., & Gallego, R. (2021). Characterization of the mechanical and physical properties of unstabilized rammed earth: A review. *Construction and Building Materials*, *270*(xxxx). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121435>
- Bui, Q. B., & Morel, J. C. (2009). Assessing the anisotropy of rammed earth. *Construction and Building Materials*, *23*(9), 3005–3011. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.04.011>
- Bui, Q., J. M., S. H., & N., M. (2009). *Compression behaviour of non-industrial materials in civil engineering by three scale experiments : the case of rammed earth*. 1101–1116. <https://doi.org/10.1617/s11527-008-9446-y>
- 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>
- Bui, T. T., Bui, Q. B., Limam, A., & Morel, J. C. (2016). Modeling rammed earth wall using discrete element method. *Continuum Mechanics and Thermodynamics*, *28*(1–2), 523–538. <https://doi.org/10.1007/s00161-015-0460-3>
- Centro de investigación en materiales y obras civiles 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. In *Universidad de los Andes* (Vol. 5, Issue 1). <https://doi.org/10.1016/j.jbankfin.2017.09.006>
- 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))
- Dere, Y. (2017). Nonlinear FE Modeling of Reinforced Concrete. *International Journal of Structural and Civil Engineering Research*, *6*(1), 71–74. <https://doi.org/10.18178/ijscer.6.1.71-74>
- EL Nabouch, R. (2017). *Mechanical behavior of rammed earth walls under Pushover tests Comportement mécanique des murs en Pisé*. 217.
- Gomes, M. I., Gonçalves, T. D., & Faria, P. (2014). Unstabilized rammed earth: Characterization of material collected from old constructions in south portugal and comparison to normative requirements. *International Journal of Architectural Heritage*, *8*(2), 185–212. <https://doi.org/10.1080/15583058.2012.683133>
- Hafezolzghorani, M., Hejazi, F., Vaghei, R., Jaafar, M. S. Bin, & Karimzade, K. (2017). Simplified damage plasticity model for concrete. *Structural Engineering International*, *27*(1), 68–78. <https://doi.org/10.2749/101686616X1081>
- Juan David Sandoval Triana, J. C. R. O. (2018). Estudio experimental y modelación del comportamiento de estructuras en adobe. *Journal of Chemical Information and Modeling*, *110*(9), 1689–1699.
- Kosarimovahhed, M., & Toufigh, V. (2020). Sustainable usage of waste materials as stabilizer in rammed earth structures. *Journal of Cleaner Production*, *277*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123279>
- Liu, K., Wang, M., & Wang, Y. (2015). Seismic retrofitting of rural rammed earth buildings using externally bonded fibers. *Construction and Building Materials*, *100*, 91–101. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.09.048>
- López P., C., Ruiz, D., Jerez, S., Aguilar, S., Torres, J. F., & Alvarado, Y. A. (2020a). Comportamiento sísmico de edificaciones de tapia pisada reforzadas con marcos de madera y viga de coronación en concreto. *Informes de La Construcción*, *72*(559), 347. <https://doi.org/10.3989/ic.70914>
- López P., C., Ruiz, D., Jerez, S., Aguilar, S., Torres, J. F., & Alvarado, Y. A. (2020b). Seismic behaviour of rammed earth buildings reinforced with wood elements and an upper concrete beam. *Informes de La*

- Construcción*, 72(559), 347. <https://doi.org/10.3989/ic.70914>
- Lublinter, J., Oliver, J., Oller, S., & Onate, E. (1989). A Plastic-Damage Model. *International Journal of Solids and Structures*, 25(3), 299–326.
- Maniatidis, V., & Walker, P. (2008). Structural Capacity of Rammed Earth in Compression. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 20(3), 230–238. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0899-1561\(2008\)20:3\(230\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0899-1561(2008)20:3(230))
- Mesbah, A., Morel, J. C., & Olivier, M. (1999). Clayey soil behaviour under static compaction test. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 32(223), 687–694. <https://doi.org/10.1007/bf02481707>
- Decreto N°2113 de 2019, Pub. L. No. AIS 610-EP-17, 62 (2019).
- Morel, J. C., Pkla, A., & Walker, P. (2007). Compressive strength testing of compressed earth blocks. *Construction and Building Materials*, 21(2), 303–309. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.08.021>
- Pontificia Universidad Javeriana. (2019). *Rehabilitación sísmica de edificaciones en tierra (patrimoniales) de dos niveles* (Issue Presentación). Pontificia Universidad Javeriana.
- Qiang, L. I. U., & Liping, T. (n.d.). *Engineering Properties of Unstabilized Rammed Earth with Different Clay Contents*. 32(4), 914–920. <https://doi.org/10.1007/s11595-017-1690-y>
- 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., 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, D., Silva, M., Cerón, L., & López, C. (2017). Evaluación del comportamiento sísmico de casas consistoriales de tapia pisada reforzadas con maderas de confinamiento. *Revista Ingeniería de Construcción de Construcción*, 32(2), 25–44. <https://doi.org/10.4067/s0718-50732017000200003>
- Ruiz, Daniel, López, C., Unigarro, S., & Domínguez, M. (2015). 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), 1–17. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0000605](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000605)
- 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 - Journal of Cultural Heritage Studies*, 25(2), 226–239.
- Silva, M., Ruiz, D., Cerón, L., & López, C. (2017). Seismic performance of rammed earth town halls reinforced with confinement wooden elements. *Revista Ingeniería de Construcción*, 32(2), 25–44. <https://doi.org/10.4067/s0718-50732017000200003>
- Silva, R. A., Oliveira, D. V., Schueremans, L., Lourenço, P. B., & Miranda, T. (2014). Modelling the structural behaviour of rammed earth components. *Civil-Comp Proceedings*, 106(September). <https://doi.org/10.4203/ccp.106.112>
- Silva R., Mendes, N., Oliveira, D. V., Romanazzi, A., Domínguez-Martínez, O., & Miranda, T. (2018). Evaluating the seismic behaviour of rammed earth buildings from Portugal: From simple tools to advanced approaches. *Engineering Structures*, 157(June 2017), 144–156. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.12.021>
- Toufigh, V., & Kianfar, E. (2019). The effects of stabilizers on the thermal and the mechanical properties of rammed earth at various humidities and their environmental impacts. *Construction and Building Materials*, 200, 616–629. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.050>
- Yamín, L. E., Carlos, J., & Ortiz, R. (2007). Estudios de vulnerabilidad sísmica, rehabilitación y refuerzo de casas en adobe y tapia pisada. *Apuntes. Revista de Estudios Sobre Patrimonio Cultural*, 17.