



Rehabilitación y reforzamiento de estructuras patrimoniales construidas con tapia pisada del Ecuador para recuperar características estructurales y mecánicas

Vanessa Noemí Colcha Guachamín^{1*}, Luz América Juinia Juiña¹, Luisa Paulina Viera Arrobo¹

¹ Universidad Central del Ecuador, Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Ecuador

* Autor para correspondencia/Corresponding author: vncolcha@uce.edu.ec

Rehabilitation and reinforcement of heritage structures built with rammed earth in Ecuador to restore structural and mechanical characteristics

Resumen

En Ecuador se ha evidenciado que el patrimonio construido con tapia pisada ha presentado un deterioro avanzado debido al paso del tiempo y los factores ambientales, bióticos, intrínsecos y antropológicos. Es importante su preservación y conservación debido a su alto valor cultural e histórico. La presente investigación tiene como objetivo determinar métodos de rehabilitación y reforzamiento aplicables a este tipo de estructuras, orientados a recuperar las características estructurales y mecánicas.

Como paso inicial, se llevó a cabo una investigación bibliográfica que permitió determinar la mezcla óptima de tapia pisada, así como los tipos de reforzamientos aplicables, considerando tanto materiales naturales (bambú) como sintéticos (malla de polipropileno). Siguiendo normativas internacionales de ensayos para muros de tierra, se realizaron pruebas que permitieron comprobar la resistencia y efectividad de las técnicas propuestas.

Se determinó que el método de reforzamiento mediante el uso de entramado de caña guadua ha permitido la recuperación y el incremento de aproximadamente un 53 % en la resistencia a tracción y un 61 % en la resistencia a compresión.

Palabras clave: construcciones de tierra, compresión, tracción diagonal, geomalla, guadua, restauración.

Abstract

In Ecuador, it has been observed that heritage built with rammed earth has suffered advanced deterioration due to the passage of time and environmental, biotic, intrinsic, and anthropological factors. Their preservation and conservation are important due to its high cultural and historical value. The objective of this research is to determine rehabilitation and reinforcement methods applicable to this type of structure, aimed at recovering the structural and mechanical characteristics of earthen elements.

A bibliographic review was carried out to determine the optimal mixture for rammed earth mixture, as well as the types of reinforcement that could be applied, considering



Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial 4.0



Editado por /
Edited by:
Eva O.L. Lantsoght

Recibido /
Received: :
08/10/2025

Aceptado /
Accepted: :
23/12/2025

Publicado en línea /
Published online:
13/07/2026



both natural materials (bamboo) and synthetic materials (polypropylene mesh). Based on international testing standards for earthen walls, tests were conducted to verify the resistance and effectiveness of the proposed techniques.

It was determined that the reinforcement method using a guadua cane framework has allowed for the recovery and increase of approximately 5 % in tensile strength and 61 % in compressive strength.

Keywords: rearmen constructions, compression, diagonal tension, geogrid, guadua, restoration

INTRODUCCIÓN

El patrimonio es el conjunto de bienes que caracterizan la creatividad de un pueblo y que distinguen a las sociedades y grupos sociales, dándoles su sentido de identidad. Su principal particularidad es la autenticidad, al representar un testimonio directo de la experiencia humana y una manifestación del genio creativo. Su valor no radica únicamente en su existencia física o simbólica, sino también en su capacidad de evocar la memoria. Son considerados patrimonios todos los bienes materiales e inmateriales que posean uno o varios de estos valores: histórico, artístico, arqueológico, ético, tecnológico, científico, paleontológico [1].

Las edificaciones construidas con la técnica de tapia pisada se consideran un patrimonio material inmueble. En este tipo de patrimonio se evidencia la característica que lo hace único, especialmente en el conocimiento y aplicación de materiales y tecnologías de la época precolombina, que datan aproximadamente del año 500 a. C. Para la recuperación de estos bienes, se realiza un análisis del nivel de intervención que se requiera, con el objetivo de preservar, conservar o recuperar su integridad. Cada nivel de intervención se determina en función del estado de conservación del bien, su importancia patrimonial y el propósito de la intervención. Estos niveles incluyen el mantenimiento, la conservación, la restauración, la rehabilitación y, en casos excepcionales, la reconstrucción. Cada uno de ellos debe llevarse a cabo con criterios técnicos y éticos respetando la autenticidad del inmueble y asegurando la transferencia de su valor cultural [1].

El tapial es una técnica de construcción tradicional y ampliamente utilizada en edificaciones patrimoniales en varios países latinoamericanos, que enfrenta problemas de deterioro, daños estructurales debido a los movimientos sísmicos y la falta de métodos efectivos de rehabilitación y reforzamiento [2].

La ausencia de estándares normativos para la construcción con tapial es principalmente la causa del desconocimiento sobre esta técnica constructiva, la cual, debido a varias razones ha sido olvidada. Entre estas se pueden mencionar la gran demanda de esfuerzo físico, la necesidad de abundante mano de obra, el empleo de tiempos extendidos para su construcción, la migración hacia las grandes ciudades y la industrialización de nuevas tecnologías y materias primas [3].



La Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC-15 no presenta un desarrollo apropiado para el diseño de estructuras construidas con tierra que se ajuste a la realidad sísmica del país; únicamente refiere la normativa peruana E.80 "Diseño y construcción con tierra reforzada" [4].

Por otra parte, se refiere a la normativa chilena NCh3332 "Estructuras-intervención de construcciones patrimoniales de tierra cruda - Requisitos del proyecto estructural", para los procesos de rehabilitación y reforzamiento; sin embargo, se puede argumentar que recae en la misma limitación, al no ajustarse a la realidad nacional en cuanto a la disponibilidad de materiales ni a las condiciones de sismicidad.

Como se evidencia en la investigación de Cuitiño, Esteves y Rotondaro [5], en varios países latinoamericanos ubicados en el Cinturón de Fuego del Pacífico, la construcción en tierra continúa siendo una práctica extendida, pese a la alta amenaza sísmica de la región. Los censos nacionales muestran que este tipo de edificación representa el 5,3 % de las viviendas en Colombia, el 8 % en Ecuador, el 31 % en Perú, el 37 % en Bolivia, el 2 % en Chile y el 1,9 % en Argentina, destacando el caso peruano por concentrar el mayor número absoluto de edificaciones en tierra.

La alta presencia de edificaciones de tierra en países con elevada sismicidad ha motivado numerosas investigaciones orientadas a mejorar la seguridad y conservación de las estructuras de tapia pisada. Pese a ello, las investigaciones siguen siendo escasas. Autores como Yamín, Phillips y Ruiz [6] han estudiado la vulnerabilidad sísmica y propuesto estrategias de reforzamiento compatibles con el patrimonio; mientras que Gómez, López y Ruiz [7] han evaluado intervenciones con mallas metálicas, entramados de madera y sistemas mixtos que mejoran el comportamiento mecánico sin alterar la autenticidad material. Estas investigaciones han demostrado la eficacia de diversos métodos de rehabilitación y reforzamiento aplicados a estructuras de tapia pisada; sin embargo, aún no se ha logrado garantizar una adecuada compatibilidad entre los materiales constitutivos.

Este escenario resalta la necesidad de explorar nuevas alternativas de refuerzo, no necesariamente tradicionales, pero sí compatibles, como el uso de geomallas biaxiales, fibras sintéticas u otros sistemas livianos y flexibles que mejoren el desempeño estructural sin alterar el equilibrio físico-mecánico de la tapia pisada.

MATERIALES Y MÉTODOS

Esta investigación se desarrolló mediante un enfoque experimental y bibliográfico, con el objetivo de determinar la mezcla óptima para la construcción con tapia pisada y evaluar la efectividad de diferentes técnicas de reforzamiento. El proceso se estructuró en varias etapas, las cuales se detallan a continuación.

Recopilación bibliográfica

Se inició con una revisión y recopilación bibliográfica para obtener las proporciones de grava, arena, limo y arcilla de la tierra a emplear en la mezcla de tapia pisada, como se muestra en la Tabla 1. Esta revisión permitió establecer criterios iniciales para la selección de materiales y definir rangos de mezclas que podrían considerarse óptimos para la fabricación de probetas y muretes experimentales.



TABLA 1. Proporciones de componentes de la tierra para tapia pisada (investigación bibliográfica).

LUGAR DEL ESTUDIO	AUTOR / AUTORES	AÑO	DOCUMENTO	COMPOSICIÓN GRANULOMÉTRICA (%)			
				Gravas	Arenas	Limos	Arcillas
China	Zhou T, Liu B et al.	2018	[8]	15	75	10	
Ecuador	Lara, M. y Bustamante R	2022	[9]	11	17	72	
Colombia	Ruiz D, Bran C, Suesca D, Restrepo M, Alvarado Y. y Barrera N.	2021	[10]	0.2	22.4	77.4	
Colombia	Afanador N, Delgado M,y Bayona M.	2013	[11]	40.07		59.91	
Ecuador	Aguilar E, Cárdenas A, Cárdenas X, Quezada R, Sarmiento J.	2017	[12]	10.84	66.09	23.08	
España	López, F	1999	[13]	10-20	10-40	20-40	10-40
				mínima o nula	50-70	10-25	15-20
Ecuador	Cevallos P	2015	[4]		55-70	15-25	10-20
Ecuador	Cevallos P	1992	[14]		60-75	25-40	
Portugal	Ramírez R, Silva, R, Pereira E, Romanazzi A.	2022	[15]	<15	40-50	20-35	10-20
					50-75	15-30	10-20
España	Hernández, J.	2016	[16]	10-20	10-40	20-40	10-40

De acuerdo con la información recopilada y las recomendaciones basadas en la Red Argentina Protierra 2020 [17], se determinó que la distribución granulométrica para que un suelo sea considerado adecuado para la fabricación de tapia pisada debe estar dentro del siguiente rango: limo: 25 % a 65 %; arcilla: 8 % a 25 %; arena: 35 % a 75 %.

Caracterización de materiales y determinación de la mezcla óptima

Con base en la información bibliográfica, se realizó la selección de materiales a utilizar, de tal manera que su composición sea similar a la información obtenida. Se probaron materiales de diferentes zonas; sin embargo, el material seleccionado fue la tierra proveniente de Otavalo y la arena de la mina de Pífo.

Para caracterizar el material, se realizó en campo la prueba de resistencia seca, recomendada por la normativa E.80. Por otra parte, se evaluaron diferentes mezclas, en las cuales se realizaron ensayos de laboratorio, entre los que se incluyen los indicados en la Tabla 2.

TABLA 2. Normas de ensayo para caracterización del suelo.

Ensayo	Norma	Requerimiento
Tamizado por lavado	ASTM D 6913-17 [18]	Granulometría
Granulométrica de suelos de grano fino utilizando el análisis de sedimentación (hidrómetro)	ASTM D 7928 – 21 [19]	Granulometría de suelos finos (pasantes del Tamiz No. 200)
Determinación del material más fino que pasa el tamiz con aberturas de 75µm (No. 200), mediante lavado	NTE INEN 697:2010 [20]	Porcentaje que pasa el Tamiz No. 200
Límite líquido	ASTM D 4318 -17 [21]	Límites De Atterberg Clasificación SUCS
Límite plástico	ASTM D 4318 -17 [21]	
Proctor modificado	ASTM D1557 – 12 (2021) [22]	Densidad máxima seca, % de Humedad óptimo
Gravedad específica de los sólidos del suelo mediante picnómetro	ASTM D854-23 [23]	Gravedad específica del suelo

Una vez que se cumplió con las recomendaciones de las proporciones, se procedió con la conformación de probetas de 10 x 10 x 15 cm, las cuales se sometieron a ensayos de resistencia a la compresión con el fin de evaluar el comportamiento mecánico de la mezcla. Adicionalmente, se realizaron pruebas de contracción lineal, siguiendo las recomendaciones realizadas en la norma E.80. Los resultados de estos ensayos permitieron seleccionar la mezcla óptima, que combinó resistencia y estabilidad dimensional, constituyendo un material adecuado para la construcción de tapia pisada.

Finalmente, la mezcla óptima fue 75 % de tierra de Otavalo y 25 % de arena de Pífo, la cual permite obtener un suelo ML. A continuación, en la Figura 1 se puede observar la granulometría del material utilizado evidencia el cumplimiento de las recomendaciones internacionales.

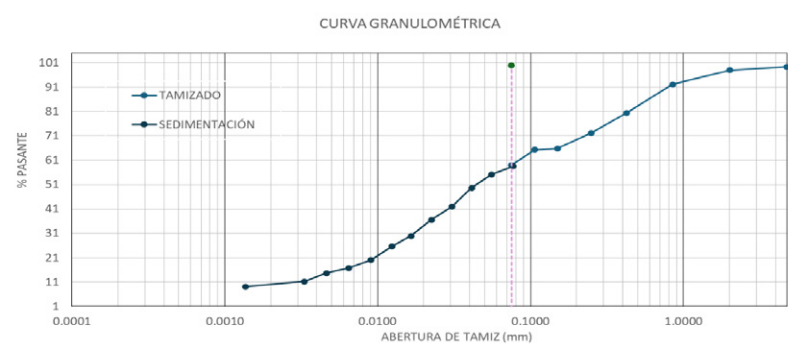


FIGURA 1. Granulometría de la mezcla óptima. El gráfico muestra la distribución granulométrica del material utilizado.

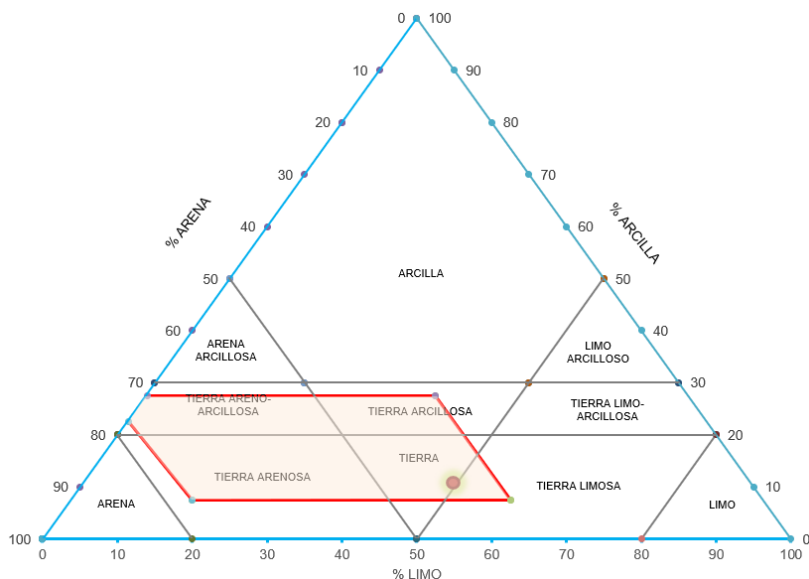


FIGURA 2. Cumplimiento de recomendaciones internacionales para tapia pisada. El gráfico muestra el cumplimiento de recomendaciones internacionales con respecto a la composición del material utilizado.

Construcción de muretes experimentales

Una vez definida la mezcla óptima, se procedió a la fabricación de los muretes de prueba, siguiendo las recomendaciones de la norma peruana E.080 y de la norma colombiana AIS 610-EP-17. En lo referente a la conformación del encofrado, se procuró seguir algunas de las recomendaciones; sin embargo, considerando que la fabricación se realizó en condiciones de laboratorio, se tomaron precauciones adicionales para su fabricación. Para la compactación de material se utilizaron pisones manuales, respetando así las técnicas tradicionales de construcción de tapia pisada, asegurando la correcta compactación por capas y el control de la humedad durante el proceso.

El curado de los muretes se realizó por 56 días, tiempo en el cual se considera que tanto el material constitutivo del murete como el calicostrado alcanzaron un secado homogéneo y lograron resistencias superiores.

Ensayo de compresión y tracción de muretes originales

Para determinar la resistencia a la compresión y a la tracción diagonal, se consideraron la normativa E.80 y las normativas ASTM C 1314 (NTC 3495) y ASTM E 519. Estos ensayos permitieron determinar la resistencia inicial de estos elementos.

En la Figura 1 se puede observar la colocación del murete para el ensayo a tracción, la aplicación de la carga y la falla transversal que va de esquina a esquina.



A Colocación del murete para el ensayo.

B Falla transversal del murete.

FIGURA 3. Murete ensayado a tracción diagonal.

Rehabilitación y reforzamiento de los muretes con falla inducida

Una vez que se realizaron los ensayos de compresión y tracción, se procedió a la rehabilitación de estos muretes mediante el uso de un mortero de tierra, compuesto por la mezcla óptima, mucílago y fibras sintéticas. Adicionalmente, se complementó con el uso de tarugos y sogas de yute para mejorar la adherencia al tapial anterior. A este mortero se le permitió el secado de 14 días antes de la aplicación de las técnicas de reforzamiento.

Para la primera técnica de reforzamiento se implementó una geomalla biaxial, que, aunque no es tradicional, es compatible, liviana, eficiente y no introduce rigideces excesivas. Para la segunda, se empleó un entramado de caña guadua, considerando que este material posee un notable comportamiento a tracción y una buena capacidad de disipación de energía; además es un material ubicuo y tradicional, lo que la convierte en un refuerzo adecuado para estructuras de tierra.

Adicionalmente, cabe indicar que para ambas técnicas se colocó un mortero de revoque a base de cal (proporcionada por la fábrica INCOREG), arena fina y un porcentaje menor al 10 % de resina acrílica.

Ensayo de compresión y tracción de los muretes rehabilitados y reforzados

Una vez que se aplicaron las técnicas de rehabilitación y reforzamiento en los muretes, se permitió el secado de los mismos durante 28 días, considerándose este tiempo como el ideal para que los materiales alcancen su mayor resistencia.



Posteriormente, los muretes rehabilitados y reforzados se sometieron nuevamente a ensayos de compresión y tensión diagonal para determinar el porcentaje de recuperación o aumento de las características mecánicas. Finalmente, se realizó el análisis de los resultados obtenidos de los ensayos ejecutados, con el fin de desarrollar el estudio comparativo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

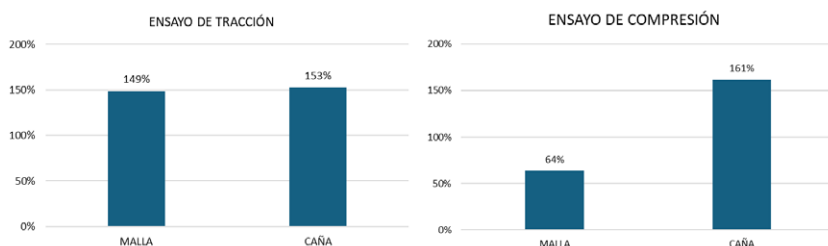


FIGURA 4. Resultados obtenidos.

Las investigaciones previas y los resultados obtenidos demuestran que las técnicas de reforzamiento propuestas contribuyen a la recuperación y al aumento de la resistencia a tracción en muretes de tapia. Sin embargo, en el presente estudio se evidenció que el uso de la geomalla biaxial, aunque no incrementa la resistencia a compresión, actúa como un elemento de contención que contribuye a retrasar el colapso del sistema.

CONCLUSIONES

La metodología aplicada indica que es posible recuperar las características estructurales de los muros de tapia pisada mediante la rehabilitación con mortero de tierra, mucílago y fibras, así como con el reforzamiento utilizando caña guadua y malla de polipropileno. Sin embargo, aún es necesario determinar cuál de los refuerzos es el más óptimo, considerando no solo la eficacia mecánica, sino también factores prácticos como el espacio disponible para su instalación y otras limitaciones inherentes a cada técnica de reforzamiento.

Los resultados obtenidos hasta el momento permiten afirmar la viabilidad general de la recuperación de los muros; no obstante, se requieren estudios adicionales y pruebas comparativas para seleccionar la alternativa más eficiente y adecuada según las condiciones específicas del muro y del entorno de intervención.

El método de reforzamiento mediante el uso de entramado de caña guadua ha permitido la recuperación e incremento de aproximadamente 53 % en la resistencia a tracción y 61 % en la resistencia a compresión. Por otro lado, el uso de mallas poliméricas permite recuperar el 49 % de la resistencia a tracción; sin embargo, en compresión no favorece su recuperación ni incremento.



AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Ingeniera Paulina Viera por sus aportes y comentarios en la redacción del presente documento.

Asimismo, agradecen al Laboratorio de Suelos y Laboratorio de Ensayo de Materiales de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas de la Universidad Central del Ecuador, así como al personal de estas dependencias, por su apertura en la ejecución de las actividades experimentales de la presente investigación.

También agradecen el apoyo de la empresa UNACEM, por la donación de materiales y el apoyo en la caracterización de la cal.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Luz Juinia y Vanessa Colcha concibieron la investigación y realizaron la fase experimental; además, llevaron a cabo el análisis de los resultados obtenidos.

Paulina Viera contribuyó en la revisión y redacción del manuscrito.

DECLARACIÓN SOBRE EL USO DE TECNOLOGÍAS DE IA GENERATIVA Y ASISTIDA EN LA REDACCIÓN

Durante la preparación de este trabajo, las autoras utilizaron ChatGPT con el propósito de perfeccionar la redacción técnica. Posteriormente, las autoras revisaron y editaron el contenido según lo consideraron necesario, asumiendo la plena responsabilidad por la versión final del texto y su contenido publicado.

DECLARACIÓN DE DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los datos generados y analizados durante el presente estudio se encuentran incluidos en este artículo.

CONFLICTO DE INTERÉS

Las autoras declaran no tener conflictos de interés con relación a la publicación de este documento. Todas las autoras han leído y aprobado el manuscrito final y consienten en su publicación.

REFERENCIAS

- [1] Asociación de Municipalidades Ecuatorianas. (2011). *Introducción al Patrimonio Cultural*. <https://biblioteca.culturaypatrimonio.gob.ec/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=210124>
- [2] López, C., Ruiz, D., Jerez, S., Aguilar, S., Torres, J., & Alvarado, Y. (2020). Comportamiento sísmico de edificaciones de tapia pisada reforzadas con marcos de madera y viga de coronación en concreto. *Informes de la Construcción*, 72 (529). <https://doi.org/10.3989/ic.70914>
- [3] Manotoa Villares, J. (2023). *Propuesta de manual de técnicas constructivas con tapial*. [Tesis de Grado, Universidad Tecnológica Indoamérica]. <https://hdl.handle.net/20.500.14809/5875>
- [4] Cevallos, P. (9-13 de noviembre de 2015). *La construcción con tierra en el Ecuador y la necesidad de la norma*. [Resumen de presentación de la conferencia] 15° Seminario Iberoamericano de Arquitectura y Construcción con Tierra. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6086019>
- [5] Guadalupe, C., Alfredo, E., & Rotondaro, R. (2021). Earthen Architecture in Seismic Zones: Latin America and the Pacific Fire Belt. *Journal of Construction Research*, 03(1).
- [6] Yamin, L., Phillips, C., Reyes, J., & Ruiz, D. (2007). Estudios de vulnerabilidad sísmica, rehabilitación y refuerzo de casas en adobe y tapia pisada. *Apuntes*, 20(2), 286–377. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1657-97632007000200009&lng=en&tlng=es
- [7] Gómez, V., López, C., & Ruiz, D. (2016). Rehabilitación sísmica de edificaciones históricas en tapia pisada: Estudio de caso de capillas doctrineras reforzadas con malla de acero y madera de confinamiento. *Informes de la Construcción*, 68(541). <https://doi.org/10.3989/ic.15.017>
- [8] Zhou, T., Liu, B., Zhao, X., & Mu, J. (2018). Experimental testing of the in-plane behavior of bearing modern rammed earth walls. *Advances in Structural Engineering*, 21(13), 2045–2055. <https://doi.org/10.1177/1369433218764978>
- [9] Lara, M. L., & Bustamante, R. (2022). Characterization and Pathology of Earthen Building Walls in the Ecuadorian Andean Area. *Revista Politécnica*, 49(2), 37–46. <https://doi.org/10.33333/rp.vol49n2.04>
- [10] Ruiz, D., Bran, C., Suesca, D., Restrepo, M., Alvarado, Y., & Barrera, N. (2021). Análisis experimental de elementos de confinamiento para la rehabilitación de edificaciones patrimoniales en tapia pisada. *AUSJAL*, 1–18. <https://repositorio.ausjal.org/handle/20.500.12032/98861>
- [11] Afanador, N., Carrascal, M., & Bayona, M. (2013). Experimentación, comportamiento y modelación de la tapia pisada. *Revista Facultad de Ingeniería*, 22(35), 47–59. <https://dialnet.unirioja.es/ejemplar/393207>
- [12] Aguilar, E., Cárdenas, A., Cárdenas, X., Quezada, R., & Sarmiento, J. (2018). Comparación de parámetros físicos y mecánicos entre el adobe y el tapial en el austro del Ecuador. *ASRI: Arte y sociedad. Revista de investigación*, 14, 268–279. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6266272>
- [13] López, F. (1999). Tapias y tapiales. Loggia. *Arquitectura y Restauración*, 8, 74–89. <https://doi.org/https://doi.org/10.4995/loggia.1999.5288>
- [14] Cevallos, P. (1992). Las construcciones en tierra en Ecuador. *Innovaciones Tecnológicas. Revista INVI*, 16, 18–25. <https://doi.org/https://doi.org/10.5354/0718-8358.1992.62012>
- [15] Ramírez, R., Silva, R., Pereira, E., & Romanazzi, A. (2022). Early-age shrinkage and bond of LC-TRM strengthening in rammed earth. *Construction and Building Materials*, 350. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128809>
- [16] Hernández Pocero, J. (2016). *Construcción con tierra: Análisis, conservación y mejora. Un caso práctico en Senegal* [Proyecto de fin de carrera, UPC, Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona, Departamento de Proyectos de Arquitectura]. <https://hdl.handle.net/2117/107822>
- [17] Red Protierra (2020). *Protocolo de ensayos de campo para la identificación de suelos*. <https://redprotierra.com.ar/wp-content/uploads/2020/11/Protocolo-de-ensayos-de-campo-para-la-identificaci%C3%B3n-de-suelos.pdf>
- [18] ASTM International. (2017). *Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis*. (ASTM D6913).



- [19] ASTM International. (2021). *Test Method for Particle-Size Distribution (Gradation) of Fine-Grained Soils Using the Sedimentation (Hydrometer) Analysis*. (ASTM D7928). <https://doi.org/10.1520/D7928-21E01>
- [20] Instituto Nacional de Normalización. (2010). *Áridos. Determinación del Material más fino que pasa el tamiz con aberturas de 75um(No.200), mediante lavado*. (NTE INEN 697)
- [21] ASTM International. (2017). *Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils*. (ASTM D4318). <https://doi.org/10.1520/D4318-17E01>
- [22] ASTM International. (2021). *Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³))*. (ASTM D1557). <https://doi.org/10.1520/D1557-12R21>
- [23] ASTM International. (2023). *Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer*. (ASTM D854). <https://doi.org/10.1520/D0854-23>