

Darwin Jovanny Ramón-Rodríguez; Juan Sebastián Maldonado-Noboa

<https://doi.org/10.35381/i.p.v8i14.4974>

Evaluación experimental y numérica del comportamiento de mampostería con bloques de tierra comprimida

Experimental and numerical evaluation of the behavior of masonry with compressed earth blocks

Darwin Jovanny Ramón-Rodríguez
darwin.ramon.44@est.ucacue.edu.ec
Universidad Católica de Cuenca, Cuenca, Azuay
Ecuador
<https://orcid.org/0009-0006-6334-0469>

Juan Sebastián Maldonado-Noboa
jmaldonadon@ucacue.edu.ec
Universidad Católica de Cuenca, Cuenca, Azuay
Ecuador
<https://orcid.org/0000-0001-5329-2201>

Recibido: 02 de septiembre 2025
Revisado: 03 de octubre 2025
Aprobado: 15 de noviembre 2025
Publicado: 01 de enero 2026

Darwin Jovanny Ramón-Rodríguez; Juan Sebastián Maldonado-Noboa

RESUMEN

El objetivo fue evaluar el comportamiento mecánico y estructural de la mampostería construida con bloques de tierra comprimida (BTC) estabilizados con cemento con suelo local del cantón Saraguro, Ecuador. Se realizaron ensayos de caracterización del suelo, absorción de agua, resistencia a compresión y flexión en unidades, así como ensayos de compresión axial en pilas y carga diagonal en muretes, conforme a normas UNE, ASTM y NEC. Adicionalmente, se desarrolló un modelo computacional mediante el método de los elementos finitos en ABAQUS para analizar la respuesta estructural de muros de mampostería con y sin refuerzo vertical. Los resultados muestran que los BTC cumplen los requisitos de resistencia a compresión para uso estructural, aunque presentan limitaciones a flexión. El análisis numérico evidenció que el sistema tipo LEGO y la incorporación de refuerzo vertical mejoran la rigidez, reducen desplazamientos y controlan esfuerzos, confirmando el potencial de los BTC como una alternativa constructiva sostenible.

Descriptores: Bloques de tierra comprimida; mampostería; ensayos mecánicos; modelado numérico; construcción sostenible. (Tesauro UNESCO).

ABSTRACT

The objective was to evaluate the mechanical and structural behavior of masonry built with cement-stabilized compressed earth (BTC) blocks with local soil from the Saraguro canton, Ecuador. Soil characterization tests, water absorption tests, and compressive and flexural strength tests on individual units were conducted, along with axial compression tests on masonry prisms and diagonal compression tests on wall panels, in accordance with UNE, ASTM, and NEC standards. In addition, a computational model based on the finite element method was developed in ABAQUS to analyze the structural response of masonry walls with and without vertical reinforcement. The results show that the CEBs meet the compressive strength requirements for structural use, although limitations in flexural performance were identified. Numerical analysis demonstrated that the LEGO-type system and the incorporation of vertical reinforcement significantly improve stiffness, reduce displacements, and control stress concentrations, confirming the potential of CEBs as a sustainable construction alternative.

Descriptors: Compressed earth blocks; masonry; mechanical testing; numerical modeling; sustainable construction. (UNESCO Thesaurus).

Darwin Jovanny Ramón-Rodríguez; Juan Sebastián Maldonado-Noboa

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el uso de los bloques de tierra comprimida (BTC) ha despertado un creciente interés en el sector de la construcción por su bajo impacto ambiental, accesibilidad económica y adecuadas propiedades mecánicas (Aranda et al., 2023). Los BTC son unidades de mampostería elaboradas a partir de una mezcla de tierra, agua y estabilizantes como el cemento o la cal, que se compactan en moldes para aumentar su densidad y resistencia, luego se extraen y se dejan secar al aire (Sitton et al., 2018).

Según Cid Falceto et al. (2012), los BTC deben alcanzar una resistencia mínima a la compresión en seco de 2 MPa para garantizar su desempeño estructural. Su fabricación puede realizarse mediante prensas mecánicas o hidráulicas. Además, existen distintos tipos de moldes que permiten obtener bloques macizos, huecos o con formas de ensamble (Dorado et al., 2022).

Frente a la crisis climática y el incremento de las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a los materiales convencionales de construcción, como el hormigón y el ladrillo cocido, surge la necesidad de adoptar soluciones constructivas más sostenibles (Han et al., 2020). El cemento Portland, por ejemplo, es responsable del 6 % de las emisiones globales de CO₂ (Labiad et al., 2022). En este contexto, el uso de materiales alternativos como la tierra ha ganado popularidad por sus beneficios ambientales, económicos y sociales (Elahi et al., 2021; Islam et al., 2020).

Khadka & Shakya (2016) señalan que la tierra, al ser un material ampliamente disponible, permite la participación de personas sin experiencia en construcción, favoreciendo su implementación en comunidades con recursos limitados. Aunque tradicionalmente ha sido considerada como un material de baja resistencia, mediante procesos de estabilización y compactación es posible mejorar su desempeño mecánico. Los BTC representan, en este sentido, una solución viable y eficiente. Ibrahim et al. (2020)

Darwin Jovanny Ramón-Rodríguez; Juan Sebastián Maldonado-Noboa

destacan su bajo costo unitario por metro cuadrado, así como su diseño entrelazado, que elimina la necesidad de revestimientos adicionales y brinda una estética atractiva.

No obstante, el uso de la tierra como material de construcción también presenta desafíos. Azalam et al. (2024) advierten que factores ambientales como la humedad por filtraciones o techos deteriorados pueden afectar la resistencia de las edificaciones. Además, los suelos empleados presentan asentamientos diferenciales, baja resistencia al corte y alta compresibilidad lo que compromete su desempeño estructural.

A pesar de los avances en técnicas constructivas más sostenibles, como el uso de BTC, la construcción con tierra aún enfrenta baja aceptación por la percepción generalizada de su limitada resistencia mecánica, escaso desempeño sísmico y poca durabilidad (Silva et al., 2014). Además, la alta variabilidad del suelo y la falta de control de calidad en los procesos constructivos son factores que afectan su confiabilidad. Bailly et al. (2024) indican que factores ambientales como la humedad por filtraciones o techos deteriorados pueden comprometer la resistencia de estas edificaciones.

A pesar de las limitaciones, la construcción con tierra comprimida se considera una técnica sostenible que puede mantener una eficiencia estructural aceptable (Azalam et al., 2024; da Silva et al., 2024). Sin embargo, las construcciones tradicionales con tierra presentan una resistencia limitada a la compresión y a la flexión, lo que las vuelve vulnerables. Por esta razón, es fundamental profundizar en el estudio de las propiedades mecánicas de los BTC, lo cual permitirá optimizar su uso en diseños estructurales seguros y resilientes, alineados con los principios de sostenibilidad y accesibilidad. Se propone como objetivo evaluar el comportamiento mecánico y estructural de la mampostería construida con bloques de tierra comprimida (BTC) estabilizados con cemento con suelo local del cantón Saraguro.

MÉTODO

a) Materiales

Darwin Jovanny Ramón-Rodríguez; Juan Sebastián Maldonado-Noboa

En el estudio se empleó como materia prima principal el suelo local, utilizado para la fabricación de BTC en el cantón Saraguro, sector Zhindar. Se empleó como estabilizante el cemento hidráulico general tipo GU por su disponibilidad y capacidad para mejorar la resistencia a la compresión; al mezclarse con agua, reacciona con los componentes del suelo formando productos de hidratación que aumentan la cohesión y rigidez.

b) Proceso de fabricación de los BTC estabilizados

En ausencia de una normativa ecuatoriana, se adoptaron los criterios de la norma española UNE 41410 (AENOR, 2023), que establece las propiedades físicas y mecánicas necesarias para su uso. La Figura 1 muestra el proceso de fabricación y los ensayos realizados a los BTC.

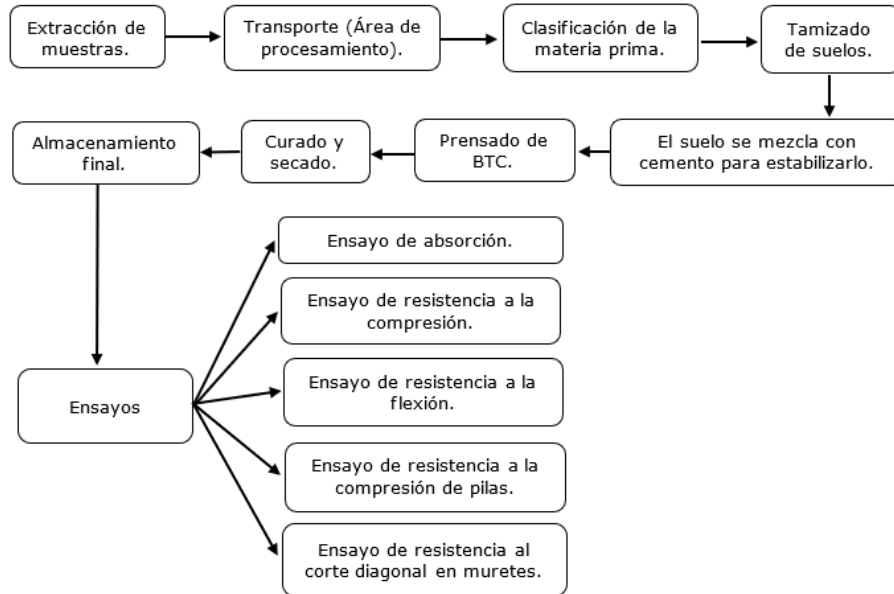


Figura 1. Proceso de fabricación y ensayos de los BTC.
Fuente: Muñoz et al. (2024).

Darwin Jovanny Ramón-Rodríguez; Juan Sebastián Maldonado-Noboa

Tamizado: el suelo fue previamente tamizado con una malla de 4.75 mm para asegurar una granulometría adecuada y una mezcla uniforme para el moldeo. El suelo ideal para este tipo de BTC debe pasar por un tamiz N.º 4.

Mezclado de componentes: se mezcló el suelo con 10 % de cemento respecto a su peso, proporción que cumple con las especificaciones planteadas por la norma UNE 41410:2023. Posteriormente, se añadió agua mediante rociado hasta alcanzar la humedad óptima de la mezcla, establecida en 10 %, en concordancia con Alsudays et al. (2022) sobre la relación del contenido de humedad y resistencia a la compresión de los BTC.

Moldeado y prensado: se utilizó una prensa hidráulica modelo ECO PREMIUM 2700 CH-MA, con una fuerza de compactación de 19 MPa. Este proceso permite aumentar la densidad del material, lo que mejora de sus propiedades mecánicas. Los BTC fabricados tienen dimensiones estándar de 30 × 15 × 10 cm (largo × ancho × alto) y cuentan con dos orificios de 8.5 cm de diámetro.

Secado y curado: el secado se realizó de manera controlada, evitando la exposición directa al sol y al viento para mantener una humedad adecuada y prevenir fisuras por retracción que afecten la resistencia. En 24 horas, los BTC son almacenados en pallets cubiertos con plástico para conservar la humedad necesaria durante el curado.

c) Fabricación de pilas y muretes

Con el objetivo de evaluar el comportamiento estructural de los BTC, se fabricaron pilas y muretes siguiendo procedimientos estandarizados.

- **Pilas para ensayo de compresión axial**

Para la evaluación de la resistencia a compresión axial, se construyeron pilas según lo establecido en el apartado 10.1 de la norma NEC-SE-MP. Cada pila estuvo conformada por un BTC por hilada y cuatro hiladas (dimensiones de 30 cm de ancho por 40 cm de altura). Los BTC fueron ensamblados utilizando un mortero compuesto por cemento y

Darwin Jovanny Ramón-Rodríguez; Juan Sebastián Maldonado-Noboa

agua, con una relación agua/cemento (a/c) de 0.5. Las juntas horizontales y verticales presentaron un espesor entre 2 y 4 mm, para un sistema constructivo con BTC tipo lego, diseñados para ensamblarse con alta precisión y funcionar con juntas delgadas. Cada pila fue curada durante 28 días en condiciones controladas.

- **Muretes para ensayo de cortante diagonal**

Para evaluar la resistencia al esfuerzo cortante y la interacción entre unidades bajo carga diagonal, se construyeron muretes según la norma NEC-SE-MP, apartado 10.2 (MIDUVI, 2015), con dimensiones aproximadas de 60 × 60 cm, conformados por dos BTC enteros por hilada y seis hiladas, formando una configuración rectangular adecuada para este tipo de ensayo. Los BTC se ensamblaron con el mismo mortero, relación agua/cemento de 0.5 y juntas horizontales y verticales delgadas acorde con el sistema tipo lego. Los muretes fueron curados durante 28 días en condiciones controladas antes de su ensayo.

d) Ensayos

Se tomó como referencia la norma española UNE 41410:2023, y la normativa ecuatoriana INEN 297 destinada a ladrillos cocidos, como valor comparativo para resistencia a compresión, flexión y absorción máxima. Se realizaron ensayos de laboratorio para caracterizar el comportamiento mecánico de los BTC y sus elementos estructurales.

- **Ensayos de caracterización del suelo**

Los ensayos de caracterización física se realizaron según las normas UNE 41410:2023 y ASTM correspondientes, para garantizar la calidad y la idoneidad del suelo. El análisis granulométrico mediante tamizado se realizó según la norma ASTM D422-63 (2007), para partículas mayores a 75 μm (retenidas en la malla 200), para determinar la distribución del tamaño de partículas del suelo.

Darwin Jovanny Ramón-Rodríguez; Juan Sebastián Maldonado-Noboa

El contenido de humedad natural del suelo se determinó con el método de secado en horno a 105 ± 5 °C, según la norma ASTM D2216-19, para establecer las condiciones hídricas. Asimismo, se llevaron a cabo ensayos de límites líquido y plástico, conforme a la norma ASTM D4318-17, para evaluar el comportamiento plástico del suelo y su capacidad de deformación bajo diferentes condiciones de humedad. Finalmente, se clasificó el suelo según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, permitiendo identificar su tipo y propiedades relevantes para la fabricación de BTC.

- **Ensayo de absorción de agua en BTC**

Este ensayo se realizó según la norma ASTM C140-23. Los BTC se secaron previamente en horno a una temperatura de 100 °C ± 5 °C hasta alcanzar masa constante, para eliminar toda la humedad interna. Posteriormente, se sumergieron completamente en agua durante un periodo de 24 horas. Luego, se secaron superficialmente con un trapo húmedo y se registró su masa saturada.

- **Ensayo de compresión axial en unidades BTC**

La norma UNE 41410:2023, citada en Calderón Peñafiel (2024), establece los requisitos de resistencia mínima a compresión para diferentes tipos de BTC. El cálculo de la resistencia última a la compresión, así como la descripción y designación de los BTC se realizaron a partir de los elementos especificados en dicha norma.

- **Ensayo de flexión en unidades BTC**

La norma UNE 41410:2023 hace referencia al procedimiento descrito en la normativa UNE-EN 772-6:2002 para la realización del ensayo. No se exige un valor mínimo específico, únicamente se requiere que se declare el valor obtenido del ensayo. Se utilizó el ensayo de flexión a tres puntos. El módulo de rotura se calculó mediante la ecuación válida cuando la falla se produce fuera del centro, corrigiendo el cálculo mediante la distancia promedio del plano de falla al centro de la pieza, medida en la dirección de la línea central de la superficie sometida a tensión (en mm).

Darwin Jovanny Ramón-Rodríguez; Juan Sebastián Maldonado-Noboa

- **Ensayo de compresión axial en pilas**

Para medir la resistencia a compresión axial de la mampostería construida con BTC se utilizaron ensayos en pilas, según la norma NEC-SE-MP, apartado 10.1. Se realizó el cálculo de la resistencia a compresión prismática según se especifica en la norma utilizada en el ensayo, y se determinó el módulo de elasticidad (E) tal como indican Turco et al. (2024). En la norma mexicana NMX-C-464 (ONNCCE, 2010), se presentan los modos de falla típicos en pilas de mampostería bajo carga axial, los cuales permiten comparar y analizar los resultados obtenidos en los ensayos.

- **Ensayo de carga diagonal en muretes**

Para medir la resistencia al esfuerzo cortante en planos inclinados se realizó el ensayo de compresión diagonal en muretes, conforme al apartado 10.2 de la norma NEC-SE-MP. Se realizó el cálculo de la resistencia básica al corte diagonal ($V'm$). En la norma mexicana NMX-C-464:2010, se presentan los principales modos de falla en muretes bajo carga diagonal, útiles para interpretar el comportamiento experimental.

- **Modelo computacional**

Se desarrolló un modelo computacional en el software ABAQUS, empleando las propiedades físicas y mecánicas obtenidas de los ensayos experimentales para representar el comportamiento estructural de un muro de mampostería construido con BTC. El estudio se realizó mediante el método de los elementos finitos, implementando un análisis estático lineal para determinar los esfuerzos, deformaciones y desplazamientos generados en el sistema. En la modelación se consideró la aplicación de una carga uniforme de $0,15 \text{ N/mm}^2$, así como una carga lateral total de 5000 N, aplicada en la parte superior del muro. Se desarrollaron dos modelos de mampostería para evaluar las diferencias en el comportamiento estructural: uno construido con BTC tipo LEGO y otro con BTC convencional.

Darwin Jovanny Ramón-Rodríguez; Juan Sebastián Maldonado-Noboa

Se evaluó la influencia de la incorporación de refuerzos verticales. Se modelaron barras de acero de 10 mm y 12 mm, dispuestas a una distancia de 0,70 m y recubiertas con hormigón de $f'c = 18$ MPa, integradas al conjunto de mampostería.

RESULTADOS

Se presentan los resultados de los diferentes ensayos realizados para caracterizar el comportamiento mecánico y físico de los BTC y sus elementos estructurales.

- **Caracterización del suelo**

El análisis granulométrico mostró que el suelo cumple con los rangos de la norma UNE 41410: 2023, indicando una predominancia de partículas finas, con un 100 % de material pasando el tamiz N.º 4. La limitada presencia de fracciones gruesas y el contenido de finos sitúan al suelo con características intermedias entre arenas y limos. A continuación, la Figura 2 presenta (a) los resultados del ensayo y (b) la comparación con los rangos de la norma UNE 41410.

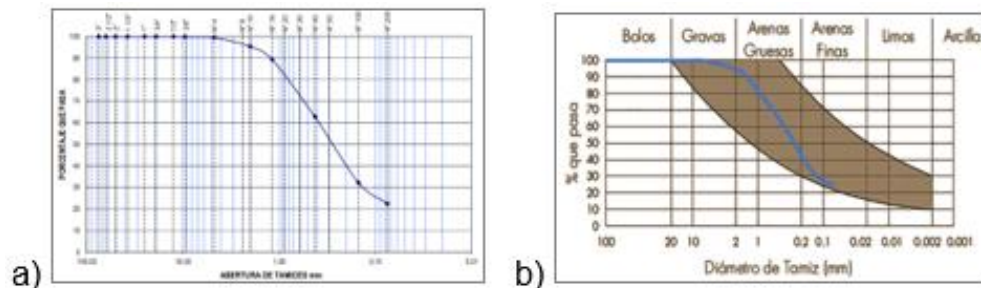


Figura 2. Curva granulométrica.

Elaboración: Los autores.

El contenido de humedad natural determinado fue de 6.01 %, nivel moderado, aceptable para el proceso de mezcla y compactación ajustado con agua. Los ensayos de límites de consistencia (líquido y plástico) fueron registrados como NP (no plástico), lo que indica escasa capacidad de deformación plástica, característico de suelos arenosos o limosos con bajo contenido de arcillas activas. Según los datos granulométricos y de consistencia,

Darwin Jovanny Ramón-Rodríguez; Juan Sebastián Maldonado-Noboa

y siguiendo el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, el suelo fue clasificado como arena limosa, un suelo granular con presencia de finos no plásticos, apto para la fabricación de BTC cuando se estabiliza con cemento, como en el presente estudio.

- **Absorción de agua en los BTC**

En el ensayo se evaluaron cinco muestras, determinando la masa seca (W_s), la masa húmeda en 24 horas de inmersión en agua (W_h) y el porcentaje de absorción de agua (Tabla 1).

Tabla 1.

Resultados del ensayo de absorción de agua en los BTC.

# BTC	W_h (g)	W_s (g)	% absorción
1	6 152.00	5 218.50	17.89
2	6 055.50	5 072.50	19.38
3	6 134.00	5 273.00	16.33
4	6 127.50	5 208.00	17.66
5	6 036.50	5 072.50	19.00

Elaboración: Los autores.

Se obtuvo un promedio de absorción de agua de 18.05 %, característico de materiales porosos no cocidos, una desviación estándar de 1.08 % y coeficiente de variación de 6 % (baja dispersión), que sugiere una producción relativamente homogénea. La densidad aparente promedio se determinó en 1 536.3 kg/m³. El límite de absorción de agua fue de 18.05 %, según las normativas y literatura técnica (Auroville Earth Institute, 2016; NT-E.70, 2006; Ugwuishiwu et al., 2013; UNE 41410, 2023), validando el empleo de los BTC en aplicaciones constructivas.

- **Resistencia a compresión axial en unidades**

Darwin Jovanny Ramón-Rodríguez; Juan Sebastián Maldonado-Noboa

Los BTC estudiados alcanzaron una resistencia promedio a compresión de 5.67 MPa, correspondiente a la categoría BTC Tipo 5, según los requisitos de resistencia mínima a compresión para BTC establecidos en la norma UNE 41410:2023. La designación correspondiente sería: BTC P 5, 300 × 150 × 100, UNE-41410. Se observa una alta uniformidad y consistencia en la calidad de los BTC, avalado por la baja dispersión en los resultados (desviación estándar de 0.67 MPa y coeficiente de variación del 11.80 %), con valores de resistencia a compresión agrupados en torno al promedio.

- **Resistencia a flexión en unidades**

Los ensayos de flexión en BTC mostraron un comportamiento estructural favorable, con un módulo de rotura promedio de 0.80 MPa, con desviación estándar de 0.08 MPa y coeficiente de variación del 10.14 %, indicando alta uniformidad en la calidad. La grieta inicial se originó en la cara inferior del BTC, correspondiente a la zona sometida a tracción, y se propagó hacia la cara de aplicación de la carga. Esto evidenció un modo de falla por flexo-tracción, típico en este tipo de materiales frágiles.

Aunque la norma UNE-41410:2023 no establece un valor mínimo para la resistencia a flexión de los BTC, el resultado promedio (0.80 MPa) se encuentra por debajo de la recomendado del *Auroville Earth Institute* (≥ 1 MPa para BTC Clase A). En consecuencia, si los BTC evaluados cumplen con el requisito de resistencia a compresión (Clase A), no alcanzan la resistencia mínima a flexión recomendada (1 MPa), lo que sugiere ajustes en la dosificación o el proceso de fabricación para mejorar su desempeño a flexión.

- **Resultados de los ensayos de compresión axial en pilas**

Los resultados en cuatro pilas construidas con BTC se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2.
Resultados del ensayo en pilas de BTC.

Muestra	Carga máxima aplicada (KN)	Área neta pila (cm ²)	f'_m (MPa)	Tipo de Falla
Pila-1	148.74	305.75	4.86	Falla vertical y en pieza
Pila-2	134.94	305.91	4.41	Falla vertical y en pieza
Pila-3	151.37	305.78	4.95	Falla vertical y en pieza

Darwin Jovanny Ramón-Rodríguez; Juan Sebastián Maldonado-Noboa

Pila-4	217.92	306.58	7.11	Falla vertical (valor atípico)
--------	--------	--------	------	--------------------------------

Elaboración: Los autores.

Al excluir la Pila-4 como posible valor atípico, la resistencia prismática de la mampostería (f'_m) media obtenida fue de 4.74 MPa, con una desviación estándar de 0.24 MPa y un coeficiente de variación del 4.99 % (Figura 3).

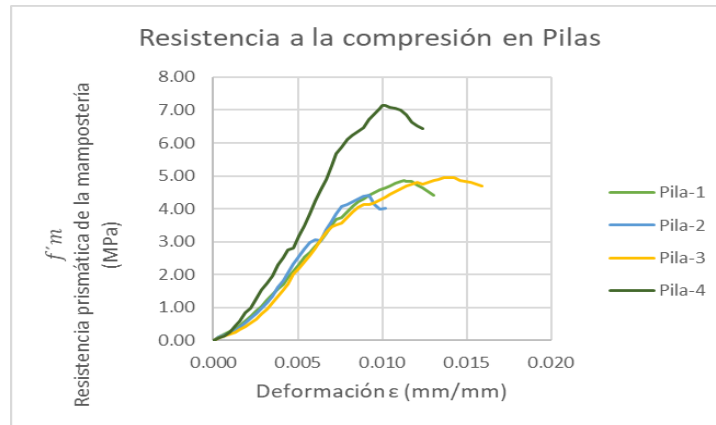


Figura 3. Resultados del ensayo en pilas de BTC.

Elaboración: Los autores.

La Figura 4 ilustra los modos de falla más representativos observados durante estos ensayos: a) falla por agrietamiento vertical y aplastamiento local de la pieza en la Pila-3, y b) falla por agrietamiento vertical en la Pila-4.

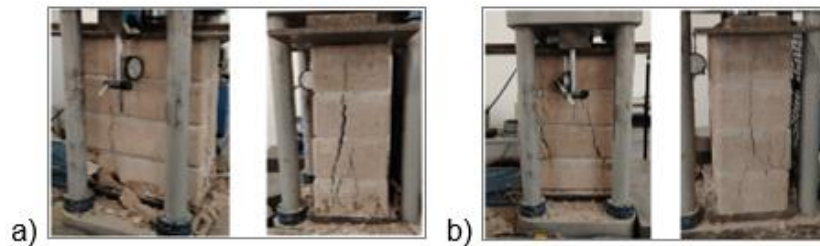


Figura 4. Ensayo de carga axial en pilas.

Elaboración: Los autores.

Darwin Jovanny Ramón-Rodríguez; Juan Sebastián Maldonado-Noboa

El módulo de elasticidad se obtuvo del tramo lineal de la curva esfuerzo-deformación (Tabla 3). El valor atípico en la Pila-4 fue excluido del análisis estadístico. A partir de los valores válidos, el módulo de elasticidad promedio fue de 456.18 MPa, la desviación estándar de 7.16 MPa y el coeficiente de variación de 1.57 %.

Tabla 3.
Resultados módulo de elasticidad.

Muestra	0.05f'm (MPa)	0.33f'm (MPa)	ϵ (mm/mm) 5%	ϵ (mm/mm) 33%	E (MPa)
Pila-1	0.24	1.61	0.000832	0.003862	449.55
Pila-2	0.22	1.46	0.000898	0.003625	452.86
Pila-3	0.25	1.63	0.001304	0.004278	466.13
Pila-4	0.36	2.35	0.001127	0.003869	725.88 (<i>atípico</i>)

Elaboración: Los autores.

- **Resultados del ensayo de carga diagonal en muretes**

El ensayo en cuatro muretes construidos con BTC (Tabla 4) mostró una resistencia promedio al corte diagonal (v'_m) de 1.26 MPa, con desviación estándar de 0.08 MPa y coeficiente de variación de 6.65 %, indicando una dispersión relativamente baja y una buena uniformidad en el comportamiento de las unidades bajo este tipo de carga. La normativa NEC-SE-MP no establece un valor mínimo de resistencia a compresión diagonal para muretes de mampostería, por lo que tomaron como referencia la norma mexicana NMX-C-464 (2010) y la Norma Técnica E.070 (2006) que establecen un valor mínimo para mampostería de ladrillos macizos artesanales (0.2 MPa), y para materiales de arcilla artesanal (0.5 MPa), respectivamente.

Tabla 4.
Resultados del ensayo en muretes.

Murete	Carga máx.	Área diagonal	v'_m	Tipo de falla
--------	------------	---------------	--------	---------------

Darwin Jovanny Ramón-Rodríguez; Juan Sebastián Maldonado-Noboa

	(KN)	(mm ²)	(MPa)	
MT-1	148.11	129353.87	1.15	Falla por tensión diagonal
MT-2	164.08	129729.35	1.26	Falla combinada - cortante - tensión diagonal
MT-3	162.81	128235.98	1.27	Falla combinada - cortante - tensión diagonal
MT-4	174.79	129730.58	1.35	Falla por tensión diagonal

Elaboración: Los autores.

Los muretes de BTC evaluados superaron ampliamente estos valores, lo que evidencia un comportamiento estructura favorable. La Figura 5 muestra los modos de falla: a) falla por tensión diagonal en el murete 1, y b) falla combinada por cortante y tensión diagonal en el murete 2.

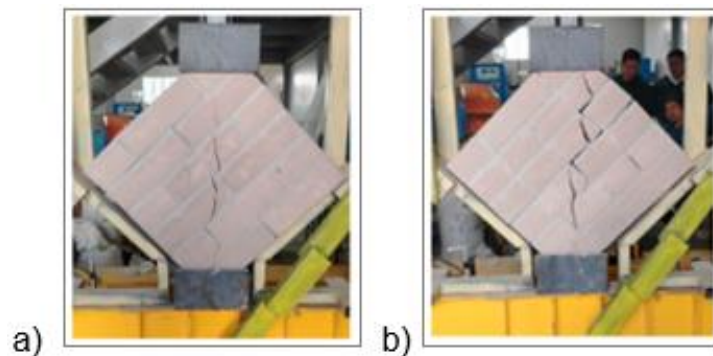


Figura 5. Ensayo de carga diagonal en muretes.

Elaboración: Los autores.

- **Modelado computacional**

La Figura 6 ilustra los resultados del modelo computacional. Para la mampostería de BTC tipo LEGO (a) y la convencional (b) se presentan los modelos de deformación máxima principal, esfuerzo máximo principal y desplazamiento máximo U1.

Darwin Jovanny Ramón-Rodríguez; Juan Sebastián Maldonado-Noboa

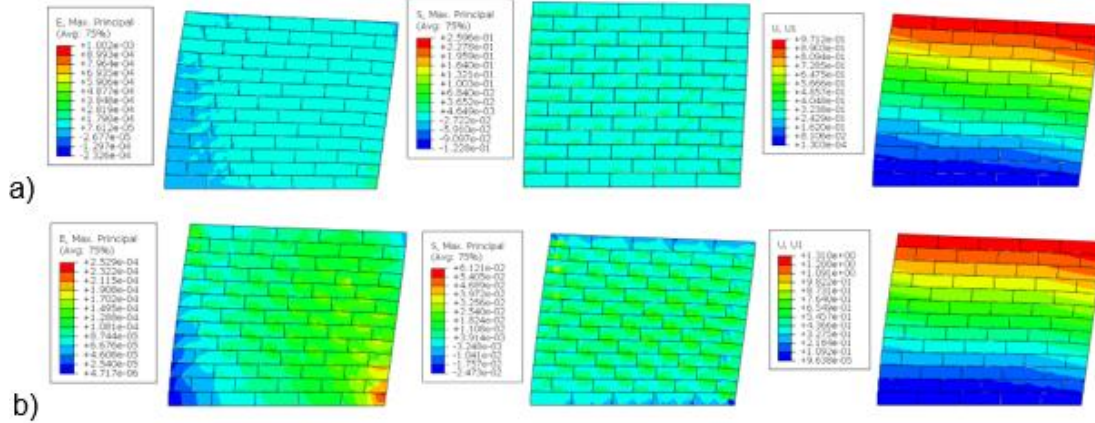


Figura 6. Resultados de los modelos numéricos ABAQUS.

Elaboración: Los autores.

La Tabla 5 muestra que los muretes de BTC tipo LEGO presentan mayores deformaciones y esfuerzos en tracción y en compresión que los BTC convencionales con mayor capacidad resistente y deformable. En este tipo de mampostería, la deformación y el esfuerzo máximos por tracción se concentran en los encastres, mientras que en la convencional se desarrollan más uniforme. Asimismo, el desplazamiento horizontal máximo U1 es menor en el murete de BTC tipo LEGO (0.97 mm) que en el convencional (1.31 mm), indicando mayor rigidez global y mejor desempeño frente a cargas laterales.

Tabla 5.

Resultados del ensayo en muretes.

Variable	Descripción	BTC tipo lego	BTC convencional	Unidades
E – Máx. Principal	Deformación por tracción (fisuración)	1.002 E-03	2.529 E-04	–
E – Mín. Principal	Deformación por compresión (aplastamiento)	-1.969E-03	-1.135 E-03	–
S – Máx. Principal	Tensión por tracción (fisuración)	2.596 E-01	6.121 E-02	MPa
S – Mín. Principal	Tensión por compresión (aplastamiento)	-6.943E-01	-5.322 E-01	MPa
U1	Desplazamiento horizontal (deriva del muro)	9.712 E-01	1.310 E+00	mm

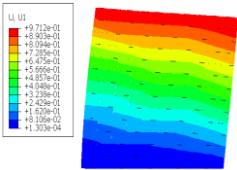
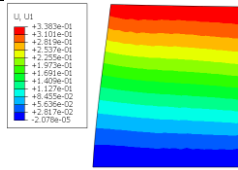
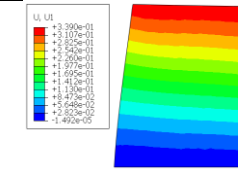
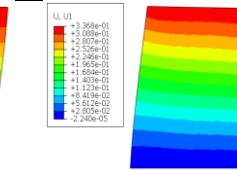
Elaboración: Los autores.

Los valores máximos de desplazamiento horizontal U1 (Tabla 6) muestran que la incorporación de refuerzo vertical (con diámetros 10, 12 y 14) reduce el desplazamiento

Darwin Jovanny Ramón-Rodríguez; Juan Sebastián Maldonado-Noboa

horizontal del muro de mampostería, disminuyendo de 0.971 mm en el modelo sin refuerzo a 0.34 mm en los modelos reforzados. No se evidencian diferencias relevantes entre los diámetros de las barras (10, 12 y 14), lo que indica que la presencia del refuerzo vertical, más que su diámetro, es determinante en la reducción de los desplazamientos.

Tabla 6.
 Resultados del desplazamiento horizontal U1.

Sin refuerzo	Vertical #10	Vertical #12	Vertical #14
			
Distancia del refuerzo (m)			
-	0.7	0.7	0.7
Desplazamiento horizontal U1 (mm)			
9.712 E-01	3.383 E-01	3.390 E-01	3.368 E-01

Elaboración: Los autores.

La Figura 7 muestra la distribución de la deformación máxima y mínima principal (E – Máx. Principal, E – Mín. Principal) obtenidas a partir del modelado numérico en ABAQUS para las distintas configuraciones analizadas: (a) sin refuerzo, (b) con refuerzo #10, (c) con refuerzo #12 y (d) con refuerzo #14.

Darwin Jovanny Ramón-Rodríguez; Juan Sebastián Maldonado-Noboa

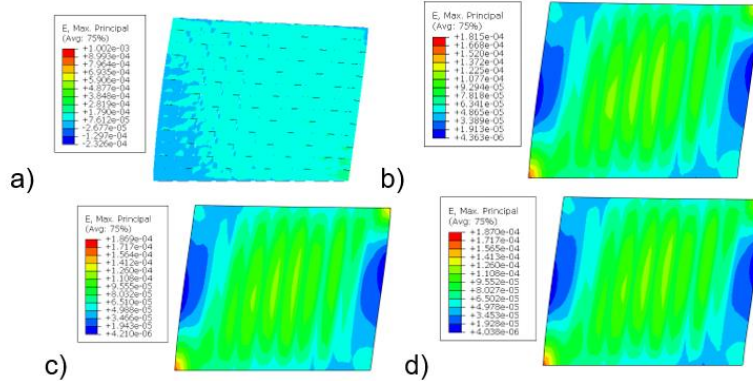


Figura 7. Resultados de la deformación de la mampostería obtenidos en ABAQUS.
Elaboración: Los autores.

En la Tabla 7 se evidencia que el refuerzo vertical en la mampostería reduce significativamente tanto la deformación máxima principal por tracción como la deformación mínima principal por compresión. Asimismo, no se observan diferencias relevantes entre las configuraciones con refuerzo vertical, lo que indica un comportamiento similar en el control de deformaciones para los diámetros analizados.

Tabla 7.
 Resultados de deformación de la mampostería.

Refuerzo	Distancia del refuerzo (m)	E – Máx. Principal	E – Mín. Principal
Sin refuerzo	–	1.002 E-03	-1.969E-03
Vertical #10	0.7	1.815E-04	-3.560E-04
Vertical #12	0.7	1.869E-04	-3.707E-04
Vertical #14	0.7	1.870E-04	-3.472E-04

Elaboración: Los autores.

La Figura 8 muestra la distribución de los esfuerzos principales en la mampostería para las distintas configuraciones analizadas: (a) sin refuerzo, (b) con refuerzo #10, (c) con refuerzo #12 y (d) con refuerzo #14, evidenciándose que la incorporación del refuerzo vertical reduce las concentraciones de esfuerzos de tracción y compresión y favorece una

Darwin Jovanny Ramón-Rodríguez; Juan Sebastián Maldonado-Noboa

distribución más uniforme a lo largo del muro, mejorando el desempeño estructural del sistema reforzado.

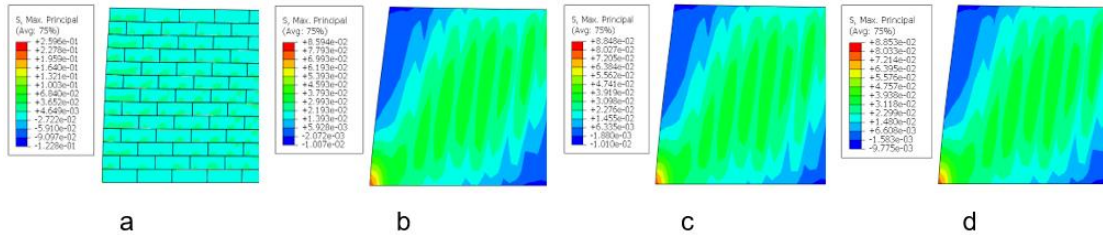


Figura 8. Resultados de esfuerzos de la mampostería obtenidos en ABAQUS.
Elaboración: Los autores.

En la Tabla 8 se confirma que el refuerzo vertical favorece los esfuerzos principales en la mampostería; disminuye el esfuerzo máximo principal, de 0.260 MPa a 0.086–0.089 MPa, entre el modelo sin refuerzo y los reforzados, y el esfuerzo mínimo principal, de –0.694 MPa a aproximadamente –0.165 a –0.175 MPa. Asimismo, no se evidencian diferencias significativas entre los diámetros de refuerzo, indicando un comportamiento estructural similar en términos de control de esfuerzos.

Tabla 8.
 Resultados de esfuerzos de la mampostería.

Refuerzo	Distancia del refuerzo (m)	S – Máx. Principal (MPa)	S – Mín. Principal (MPa)
Sin refuerzo	–	2.596 E-01	-6.943 E-01
Vertical #10	0.7	8.594 E-02	-1.685 E-01
Vertical #12	0.7	8.848 E-02	-1.748 E-01
Vertical #14	0.7	8.853 E-02	-1.644 E-01

Elaboración: Los autores.

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en esta investigación confirman que los bloques de tierra comprimida (BTC) estabilizados con cemento constituyen una alternativa estructural

Darwin Jovanny Ramón-Rodríguez; Juan Sebastián Maldonado-Noboa

viable, al priorizar soluciones sostenibles y de bajo impacto ambiental. La resistencia a compresión promedio de 5.67 MPa alcanzada por las unidades BTC supera el umbral mínimo de 2 MPa establecido en la literatura y evidencia una adecuada estabilización del suelo y un proceso de compactación eficiente. Este comportamiento es consistente con estudios recientes que reportan incrementos significativos en la resistencia mecánica de los BTC mediante la incorporación de cemento y control de humedad, destacando la influencia directa de la dosificación y el proceso de fabricación en el desempeño final del material (Labiad et al., 2022; Turco et al., 2024).

Desde una perspectiva estructural, la resistencia prismática promedio de 4.74 MPa y el módulo de elasticidad de 456.18 MPa evidencian un comportamiento adecuado de la mampostería bajo cargas axiales, con modos de falla característicos de materiales frágiles, como el agrietamiento vertical y el aplastamiento localizado. Estos resultados coinciden con lo reportado por Bailly et al. (2024), quienes señalan que la mampostería de BTC presenta un comportamiento relativamente homogéneo y predecible cuando se emplean juntas delgadas y sistemas de ensamblaje tipo dry-stack, mejorando la transferencia de cargas y reduciendo la variabilidad estructural.

Sin embargo, el desempeño a flexión mostró limitaciones, con un módulo de rotura promedio de 0.80 MPa, inferior al valor recomendado de 1 MPa para BTC de alta calidad. Este resultado pone en evidencia una debilidad inherente del material frente a esfuerzos de tracción. Algunos estudios sugieren que esta limitación puede mitigarse mediante la incorporación de fibras naturales o sintéticas, o mediante ajustes en la granulometría y contenido de finos del suelo, lo que mejora la capacidad de absorción de energía y retrasa la propagación de fisuras (da Silva et al., 2024; Azalam et al., 2024).

En cuanto al comportamiento frente a esfuerzos cortantes, los muretes ensayados alcanzaron una resistencia promedio de 1.26 MPa, superando ampliamente los valores mínimos establecidos en normativas internacionales para mampostería tradicional. Este resultado sugiere una adecuada interacción entre unidades y mortero, así como una

Darwin Jovanny Ramón-Rodríguez; Juan Sebastián Maldonado-Noboa

buena adherencia en el sistema constructivo empleado. Investigaciones realizadas por Calderón Peñafiel (2024) y Muñoz et al. (2024) destacan que la resistencia al corte en mampostería de BTC está fuertemente influenciada por la calidad de las juntas y el grado de confinamiento, siendo estos factores determinantes en el desempeño sísmico de las estructuras.

El análisis numérico desarrollado mediante el método de los elementos finitos permitió profundizar en la comprensión del comportamiento estructural del sistema. Los resultados evidenciaron que la mampostería tipo LEGO presenta una mayor rigidez global y menores desplazamientos en comparación con la mampostería convencional, lo que puede atribuirse a la geometría de ensamblaje y a una mejor distribución de esfuerzos. Este hallazgo coincide con Dorado et al. (2022) que resaltan el potencial de los sistemas modulares en la mejora del desempeño estructural y constructivo de los BTC.

Asimismo, la incorporación de refuerzo vertical demostró ser un factor clave en la mejora del comportamiento estructural, reduciendo los desplazamientos y las concentraciones de esfuerzos. La ausencia de diferencias relevantes entre los distintos diámetros de refuerzo sugiere que la presencia del refuerzo es más determinante que su tamaño, lo cual tiene implicaciones en términos de optimización de costos y diseño estructural. Este comportamiento ha sido reportado por Bailly et al. (2024) que destacan la efectividad del refuerzo vertical en el control de deformaciones y en el aumento de la capacidad portante de la mampostería de tierra estabilizada.

En un contexto más amplio, los resultados de este estudio refuerzan la viabilidad de los BTC como material de construcción sostenible, alineado con las tendencias actuales de reducción de emisiones y uso eficiente de recursos locales. No obstante, persisten desafíos relacionados con la variabilidad del suelo, la durabilidad frente a condiciones ambientales adversas y la limitada resistencia a tracción. Estos aspectos requieren futuras investigaciones orientadas a la optimización de mezclas, incorporación de

Darwin Jovanny Ramón-Rodríguez; Juan Sebastián Maldonado-Noboa

refuerzos alternativos y desarrollo de normativas específicas que regulen su uso estructural en contextos sísmicos.

CONCLUSIONES

El suelo utilizado, clasificado como arena limosa, presentó condiciones adecuadas para la fabricación de bloques de tierra comprimida cuando es estabilizado con cemento, permitiendo obtener unidades con desempeño mecánico satisfactorio. Los BTC estabilizados alcanzaron una resistencia promedio a compresión de 5.67 MPa, cumpliendo con los requisitos de la norma UNE 41410 para la categoría BTC Tipo 5 y evidenciando una producción homogénea. La resistencia a flexión de los BTC resultó inferior a los valores recomendados para su categoría resistente, identificándose este parámetro como el principal aspecto a mejorar del material.

Las pilas de mampostería construidas con BTC mostraron una resistencia prismática promedio de 4.74 MPa y un módulo de elasticidad de 456.18 MPa, confirmando un comportamiento estructural estable. Los muretes de BTC presentaron una adecuada resistencia al corte diagonal, superando valores de referencia internacionales y demostrando un buen desempeño frente a esfuerzos cortantes. El análisis numérico evidenció que la mampostería de BTC tipo LEGO y la incorporación de refuerzo vertical mejoran significativamente la rigidez y reducen desplazamientos y concentraciones de esfuerzos, siendo la presencia del refuerzo más influyente que su diámetro.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no tienen conflicto de interés en la publicación de este artículo.

FINANCIAMIENTO

No monetario.

Darwin Jovanny Ramón-Rodríguez; Juan Sebastián Maldonado-Noboa

AGRADECIMIENTO

A todos los actores sociales involucrados en el desarrollo de la investigación.

REFERENCIAS CONSULTADAS

- AENOR. (2023). *UNE 41410:2023. Bloques de tierra comprimida (BTC) para muros y tabiques: Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo*. Asociación Española de Normalización. <https://n9.cl/r1yitm>
- Alsudays, O. M., Alawad, O. M., & Elkholy, S. M. (2022). Effect of Moisture Content on the Compressive strength of a Local Rammed Earth Construction Material. *IJSCER, International Journal of Structural and Civil Engineering Research*, 11(1), 10-13. <https://doi.org/10.18178/ijscer.11.1.10-13>
- Aranda Jiménez, Y., Zuñiga Leal, C., Moreno Chimely, L., & Robles Aranda, M. E. (2023). Compressed earth blocks (CEB) compression tested under two earth standards. *Cogent Engineering*, 10(1), 1-9. <https://doi.org/10.1080/23311916.2022.2163116>
- Auroville Earth Institute. (2016). *Compressed earth blocks*. <https://dev.earth-auroville.com/compressed-earth-blocks/>
- Azalam, Y., Benfars, M., Alioui, A., Mabrouki, M., & Bendada, E. M. (2024). Improving Adobe's Mechanical Properties through Sawdust Reinforcement: A Comparative Study of the effect of varying Sawdust Dimensions. *1st International Conference on Materials Sciences and Mechatronics for Sustainable Energy and the Environment (MSMS2E 2024)*, 582, 02005. <https://doi.org/10.1051/E3SCONF/202458202005>
- Bailly, G. C., El Mendili, Y., Konin, A., & Khoury, E. (2024). Advancing Earth-Based Construction: A Comprehensive Review of Stabilization and Reinforcement Techniques for Adobe and Compressed Earth Blocks. *Eng*, 5(2), 750-783. <https://doi.org/10.3390/ENG5020041>
- Calderón Peñafiel, J. C. (2024). Diseño de tabiques modulares sostenibles con bloques de tierra comprimida para espacios interiores. *Diseño Arte y Arquitectura- DAYA*, 16(16), 111–147. <https://doi.org/10.33324/DAYA.VI16.770>

Darwin Jovanny Ramón-Rodríguez; Juan Sebastián Maldonado-Noboa

- Cid Falceto, J., Mazarrón, F. R., & Cañas, I. (2012). Assessment of compressed earth blocks made in Spain: International durability tests. *Construction and Building Materials*, 37, 738-745. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2012.08.019>
- da Silva, N. A., Cecchin, D., Rocha, C. A. A., Filho, R. D. T., Pessin, J., Rossi, G., Bambi, G., Conti, L., & Ferraz, P. F. P. (2024). Influence of coconut fiber incorporation on the mechanical behavior of adobe blocks. *Agronomy Research*, 22(S3), 1504-1516. <https://doi.org/10.15159/AR.24.064>
- Dorado, P., Cabrera, S., & Rolón, G. (2022). Contemporary difficulties and challenges for the implementation and development of compressed earth block building technology in Argentina. *Journal of Building Engineering*, 46, 103748. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2021.103748>
- Elahi, T. E., Shahriar, A. R., & Islam, M. S. (2021). Engineering characteristics of compressed earth blocks stabilized with cement and fly ash. *Construction and Building Materials*, 277, 122367. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.122367>
- Han, L. C., Mirasa, A. K. Bin, Saad, I., Bolong, N. B., Asman, N. S. A. B., Asrah, H. B., & Abdullah, E. S. R. Bin. (2020). Use of Compressed Earth Bricks/Blocks in Load-Bearing Masonry Structural Systems: A Review. *Materials Science Forum*, 997, 9-19. <https://doi.org/10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/MSF.997.9>
- Ibrahim, N. A., Magindran, T., Shahrin, M. I., & Yusof, N. A. M. (2020). Sustainable use of laterite soil as compressed cement stabilized earth block for low-cost housing construction. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 849(1), 012027. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/849/1/012027>
- Islam, M. S., Tausif, E. E., Shahriar, A. R., Nahar, K., & Hossain, T. R. (2020). Strength and Durability Characteristics of Cement-Sand Stabilized Earth Blocks. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(5), 04020087. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003176](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003176)
- Khadka, B., & Shakya, M. (2016). Comparative compressive strength of stabilized and un-stabilized rammed earth. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 49(9), 3945-3955. <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0765-5>

Darwin Jovanny Ramón-Rodríguez; Juan Sebastián Maldonado-Noboa

- Labiad, Y., Meddah, A., & Beddar, M. (2022). Physical and mechanical behavior of cement-stabilized compressed earth blocks reinforced by sisal fibers. *Materials Today: Proceedings*, 53, 139-143. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2021.12.446>
- Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda del Ecuador. (2015). *Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC-SE-MP: Mampostería estructural*. MIDUVI. <https://n9.cl/8b7eli>
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento del Perú. (2006). *Norma técnica de edificación E.070: Albañilería*. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. <https://n9.cl/4aod>
- Muñoz, S., Rojas, M., Villena, L., Tepe, V., García, J., & Álvarez, J. (2024). Physical and mechanical characterization of cement-stabilized compressed earth bricks. *Revista Ingeniería de Construcción*, 39(1), 85-95. <https://doi.org/10.7764/RIC.00101.21>
- ONNCCE (2010). *NMX-C-464. Industria de la construcción–Mampostería–Determinación de la resistencia a compresión diagonal y módulo de cortante de muretes, así como determinación de la resistencia a compresión y módulo de elasticidad de pilas de mampostería de arcilla o de concreto–Métodos de ensayo*. Diario Oficial de la Federación. <https://n9.cl/s4jxv>
- Silva, R. A. M., Oliveira, D. V., Miranda, T. F. S., Soares, E., Cristelo, N., & Lourenço, P. B. (2014). Caracterização do comportamento ao corte de alvenaria de blocos de terra compactada com junta seca. *9º Congresso Nacional de Mecânica Experimental*. <https://hdl.handle.net/1822/31216>
- Sitton, J. D., Zeinali, Y., Heidarian, W. H., & Story, B. A. (2018). Effect of mix design on compressed earth block strength. *Construction and Building Materials*, 158, 124-131. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.005>
- Turco, C., Junior, A. P., Jacinto, C., Fernandes, J., Teixeira, E., & Mateus, R. (2024). Influence of Particle Size on Compressed Earth Blocks Properties and Strategies for Enhanced Performance. *Applied Sciences*, 14(5), 1779. <https://doi.org/10.3390/app14051779>
- Ugwuishiwu, B. O., Mama, B. O., & Okoye, N. M. (2013). Effects of Natural Fiber Reinforcement on Water Absorption of Compressed Stabilized Earth Blocks. *IJSR - International Journal of Scientific Research*, 2(11), 165-167. <https://doi.org/10.36106/IJSR>

Darwin Jovanny Ramón-Rodríguez; Juan Sebastián Maldonado-Noboa

©2026 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>)