

# Physical and Mechanical Properties of Compacted Blocks Stabilized with Calcined Scallop Shell and Sugarcane Ash

Karina Rojas-Ramírez, Ing.<sup>1</sup>, Cinthya Alvarado, MSc.<sup>2</sup> and Hernán Alvarado-Quintana, Dr.<sup>3</sup>

<sup>1,3</sup>Universidad Nacional de Trujillo, Perú, rojasramirez8@gmail.com, halvarado@unitru.edu.pe

<sup>2</sup>Universidad Privada del Norte, Perú, cinthya.alvarado@upn.edu.pe

*Abstract— The study examined the impact of the dosage of calcareous residues from calcareous fan shells, sugarcane bagasse ash, and soil on the physical and mechanical properties of compacted and stabilized soil blocks. The study included cylindrical specimens to determine the compressive strength, parallelepiped specimens to determine the modulus of rupture, and compacted and stabilized soil blocks to determine the capillary suction index. The stabilizing materials were characterized by XRD and thermal analysis, and these finely ground pozzolanic materials interacted, generating a CSH gel from which acicular crystals were produced that filled the pores, acquiring improved physical and mechanical properties. After 14 days of curing, the A3 dosage with 80% S, 5% RCCA, and 15% CBCA showed better results, with a maximum compressive strength of 2.90 MPa, a modulus of rupture of 0.98 MPa, and a suction index of 0.98 MPa, complying with UNE 41410.*

*Keywords— stabilized bricks, compressive strength, modulus of rupture, capillary suction index, scallop shell, cane bagasse.*

**Digital Object Identifier:** (only for full papers, inserted by LACCEI).

**ISSN, ISBN:** (to be inserted by LACCEI).

**DO NOT REMOVE**

# Propiedades Físicas y Mecánicas de Bloques Compactados y Estabilizados con Conchas de Abanico Calcinadas y Ceniza de Caña de Azúcar

Karina Rojas-Ramírez, Ing.<sup>1</sup>, Cinthya Alvarado, MSc.<sup>2</sup> and Hernán Alvarado-Quintana, Dr.<sup>3</sup>

<sup>1,3</sup>Universidad Nacional de Trujillo, Perú, rojasramirez8@gmail.com, halvarado@unitru.edu.pe

<sup>2</sup>Universidad Privada del Norte, Perú, cinthya.alvarado@upn.edu.pe

**Resumen**– El estudio examinó el impacto de la dosificación de residuos calcáreos de conchas de abanico calcáreo, cenizas de bagazo de caña de azúcar y suelo sobre las propiedades físicas y mecánicas de los bloques de tierra compactada y estabilizada. El estudio incluyó probetas cilíndricas para determinar la resistencia a la compresión, probetas en forma de paralelepípedos para determinar el módulo de rotura y bloques de tierra compactada y estabilizada para determinar el índice de succión capilar. Los materiales estabilizantes se caracterizaron mediante DRX y análisis térmico, estos materiales puzolánicos finamente molidos interactuaron generando un gel CSH a partir del cual se produjeron cristales aciculares que rellenaron los poros adquiriendo propiedades físicas y mecánicas mejoradas. Tras 14 días de curado, la dosificación A3 con 80% de S, 5 % de RCCA y 15 % de CBCA mostró mejores resultados, con una resistencia máxima a compresión de 2,90 MPa, un módulo de rotura de 0,98 MPa y un índice de succión de 0,98 MPa, cumpliendo la norma UNE 41410.

**Palabras clave** -- ladrillos estabilizados, resistencia a la compresión, módulo de rotura, succión capilar, concha de abanico, bagazo de caña.

## I. INTRODUCCIÓN

Uno de los métodos constructivos más antiguos empleados por el hombre, actualmente en uso, es la construcción con tierra [1]. Aproximadamente el treinta por ciento de los habitantes del planeta residen hoy en casas de tierra [2]. Sin embargo, los materiales de tierra se han ido marginando en los últimos cincuenta años en favor de materiales modernos y manufacturados con mejores cualidades físico-mecánicas, como son los ladrillos de arcilla cocida y los bloques de hormigón. La necesidad de restaurar los edificios patrimoniales de tierra existentes y la baja energía incorporada de los materiales y procesos basados en la tierra han provocado un reciente resurgimiento del interés en el contexto más amplio del desarrollo sostenible [3].

La industria de la construcción ha tenido históricamente un importante impacto medioambiental debido a su elevada demanda de materias primas y energía [4]. A pesar de las mejoras en las tecnologías de fabricación, sigue agravando la explotación de los recursos naturales, la contaminación atmosférica y el agotamiento del agua, lo que afecta a los ecosistemas y a la salud humana.

La construcción con tierra es rentable en los países en desarrollo, pero carece de resistencia y durabilidad debido a que

la tierra no está estabilizada. Es susceptible a la intemperie y a la actividad sísmica, por lo que su estabilización es crucial para superar estas limitaciones [5].

Un bloque de tierra compactada (BTC) es un material de construcción sostenible y ecológico, puesto que no es sinterizado a alta temperatura. Se le utiliza para construir paredes, muros y otras estructuras en la arquitectura y la construcción. Para mejorar su resistencia y durabilidad se le estabiliza mecánicamente y/o químicamente. La estabilización mecánica se logra optimizando la mezcla de los componentes, en cuanto a sus granulometrías, hasta alcanzar la máxima compacidad, asimismo, incrementando la presión de prensado y conformándolo a su humedad de máxima compactación [6], [7]. Últimamente, la construcción con bloques de tierra comprimida y estabilizada (BTCE) está ganando popularidad. Los BTCE se forman comprimiendo tierra tratada con un estabilizador químico [8]. Los estabilizadores químicos más comunes son el cemento portland, la cal y algunas puzolanas naturales. La utilización de cemento y cal genera impactos ambientales, debido a que en su producción se emiten gran cantidad de gases de efecto invernadero [9]. En los últimos años La estabilización química con residuos industriales aparece como una alternativa ecológica y económica que valoriza dichos residuos para la fabricación de ladrillos de tierra [10]. La creciente industria de la acuicultura genera a nivel mundial aproximadamente 8 millones de toneladas al año de residuos calcáreos de concha de abanico (RCCA) [11], también se dispone de abundantes cantidades de residuos de ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBCA) obtenidos de la industria azucarera. Los estabilizantes afectan a las cualidades de durabilidad, resistencia, permeabilidad, porosidad, densidad y cohesión. Los componentes finos actúan como aglutinantes, mientras que la compactación de fabricación contribuye en gran medida a mejorar la cohesividad de los BTCE en estado húmedo [12].

Los BTCE se fabrican utilizando una mezcla de tierra, arena, cemento u otros estabilizadores ecológicos (puzolanas naturales u obtenidas de residuos industriales), y en algunos casos, también pueden incluir aditivos como fibras naturales o sintéticas. La mezcla se comprime utilizando una prensa mecánica o hidráulica de forma uniaxial en moldes para formar bloques sólidos y duraderos [13].

La principal necesidad de investigación deducida del análisis previo es desarrollar un nuevo ladrillo que sea ecológico, es decir, que no necesite cocción a alta temperatura, que su resistencia lo adquiera estabilizándose con residuos industriales. La principal novedad que aporta este estudio es la fabricación de ladrillos ecológicos estabilizados con RCCA y CBCA, que finamente molidos interactúan entre ellos mediante la reacción puzolánica que genera un gel CSH (similar al producido en la hidratación del cemento) a partir del cual se producen cristales aciculares que rellenan los poros entre las partículas del suelo adquiriendo propiedades físicas y mecánicas mejoradas, siendo ladrillos de tipo sin cocer, exentos de alta temperatura de cocción y de procesos de fabricación convencionales. Esto permitiría generar materiales de construcción bioclimáticos de bajo coste y baja demanda energética adecuados para aplicaciones de construcción, al tiempo que se fomentaría un proceso industrial de fabricación sostenible más limpio, con un notable ahorro de energía y reducción de las emisiones de carbono.

## II. MATERIAL Y MÉTODOS

### A. Material

El objeto de estudio de esta investigación fue un bloque de tierra compactada y estabilizada. Para lo cual se utilizó suelo arenoso 40% mezclado con 60% de suelo arcilloso, proporción que se determinó en un estudio preliminar a través del ensayo Proctor que se observa en la Tabla III. Esta mezcla de suelos (S) se estabilizó con residuo calcáreo de conchas de abanico (RCCA) calcinada a 800°C obtenido del terminal pesquero de la playa de Buenos Aires y ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBCA) obtenido del complejo agroindustrial “Azucarera Laredo”, ambos situados en el departamento de La Libertad, Perú.

### B. Diseño experimental

En este estudio se busca encontrar la proporción de mezcla óptima en cuanto a sus propiedades físicas y mecánicas. En la Tabla I se observa el diseño experimental de los 10 niveles de estudio. Estas proporciones fueron determinadas según el método de Simplex Lattice, que distribuye los niveles de forma uniforme en un triángulo equilátero [14].

En la Figura 1 se observan las dimensiones de las probetas de resistencia a la compresión, módulo de rotura e índice de succión capilar respectivamente.

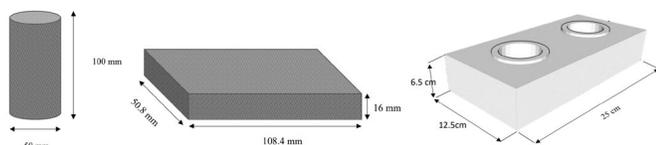


Fig. 1 Dimensiones de las probetas

TABLA I  
DISEÑO EXPERIMENTAL

Variable Independientes de Estudio	Nivel de Estudio
Factor A	a1 = RCCA=5, CBCA=5, S=90
	a2 = RCCA=15, CBCA=5, S=80
	a3 = RCCA=5, CBCA=15, S=80
	a4 = RCCA=10, CBCA=5, S=85
	a5 = RCCA=5, CBCA=10, S=85
	a6 = RCCA=10, CBCA=10, S=80
	a7 = RCCA=6.67, CBCA=6.67, S=86.67
	a8 = RCCA=11.67, CBCA=6.67, S=81.67
	a9 = RCCA=6.67, CBCA=11.67, S=81.67
	a10 = RCCA=8.33, CBCA=8.33, S=83.33
Variables Dependientes de Estudio	
Resistencia a la compresión (MPa)	
Módulo de rotura (MPa)	
Índice de succión capilar (kg/m <sup>2</sup> .min)	

### C. Procedimiento experimental

La caracterización del suelo (S) consistió en la determinación, según normas ASTM, de su análisis granulométrico (D-422), humedad (D-2216), índice de plasticidad (D-4318) y el Proctor modificado (D-1557).

La caracterización del residuo calcáreo de conchas de abanico (RCCA) y de la ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBCA) consistieron en análisis de: difracción de rayos X (DRX) y térmicos (TG y DTA).

Se elaboraron las probetas mezclando S-RCCA-CBCA según las proporciones de mezcla indicadas en la Tabla I y conformándolas por prensado uniaxial. Para determinar el óptimo de resistencia a la compresión se elaboraron probetas cilíndricas, con las dimensiones mencionadas en la Figura 1, a una presión de prensado de 2 MPa y curadas durante 7 días envueltas en plástico para conservar la humedad. Posteriormente, se retiraron los plásticos y se colocaron bajo sombra durante 7 días más y luego se ensayaron a compresión en una prensa Humboldt con una celda de carga de 50 KN.

Asimismo, se elaboraron probetas en forma de paralelepípedos (baldosas) para el ensayo de módulo de rotura en tres puntos. Para esto se utilizó la misma prensa Humboldt, con un molde acero inoxidable, para producir probetas con las dimensiones indicadas en la Figura 1, a una presión de prensado de 2 MPa y curadas de la misma forma anterior.

Después se elaboraron bloques de tierra compactada y estabilizada (BTCE), con la forma y dimensiones mostradas en la Figura 1, utilizando una prensa Cinva-Ram manual de 2 MPa de presión y curadas de la misma manera, para el ensayo de capilaridad según la norma UNE 41410.

Finalmente se determinó la microestructura SEM del patrón y se comparó con el BTCE con mejores resultados. Las probetas se curaron según el procedimiento mencionado anteriormente durante 14 días y se los dejó 14 días más para que completen los 28 días luego del cual se observó en un microscopio electrónico de barrido Tescan Vega 3.

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 2 muestra las granulometrías de cuatro tipos de suelo con porcentajes variables de suelo arenoso y arcilloso. El suelo 100% arenoso tiene una granulometría de mayor tamaño que el resto de los tipos de suelos. El suelo con 40% de suelo arenoso y 60% de suelo arcilloso tiene partículas menores de 0,074 mm, clasificado como suelo CL- (A-2-4) suelo arenoso-arcilloso. Esto ayuda a la compactación, el empaquetamiento, la reducción de huecos y la resistencia al adobe.

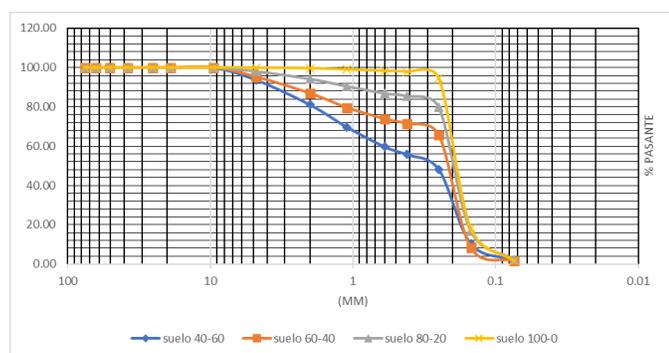


Fig. 2 Curvas granulométricas de mezclas de suelos

Las tablas II y III muestran que la adición de material fino al suelo arenoso mejora su trabajabilidad y plasticidad, ayudando a la fabricación de adobes estabilizados. El ensayo Proctor modificado muestra que la humedad máxima de compactación aumenta con el material fino, y la densidad máxima de compactación aumenta con el suelo arenoso, siendo la densidad máxima de 3,5 g/cm<sup>3</sup> cuando la mezcla de suelo es 40% arena/ 60% finos.

TABLA II  
LÍMITES DE CONSISTENCIA DE MEZCLAS DE SUELOS

Material	Limite líquido (%)	Limite plástico (%)	Índice de plasticidad (%)
Suelo arenoso	NP	NP	NP
80 arena + 20 Finos	36.5	NP	NP
60 arena + 40 Finos	17.8	NP	NP
40 arena + 60 Finos	23.1	13.7	9.5

TABLA III  
ENSAYO PROCTOR MODIFICADO

Material	Humedad óptima (%)	Máxima densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )
Suelo arenoso	11	0.29
80 arena + 20 Finos	8.80	0.30
60 arena + 40 Finos	12.3	0.31
40 arena + 60 Finos	15.0	3.5

El ensayo de difracción de rayos X mostrado en la Figura 3 permitió identificar la estructura y la composición química de las conchas de abanico calcinadas a 800°C. Las conchas mostraron la presencia de carbonato de calcio, óxido de calcio e hidróxido de calcio. La estructura cristalina del RCCA se mantuvo hasta 800°C debido a la biopolimerización. La presencia de hidróxido de calcio se debe a que el material es altamente hidróscopico.

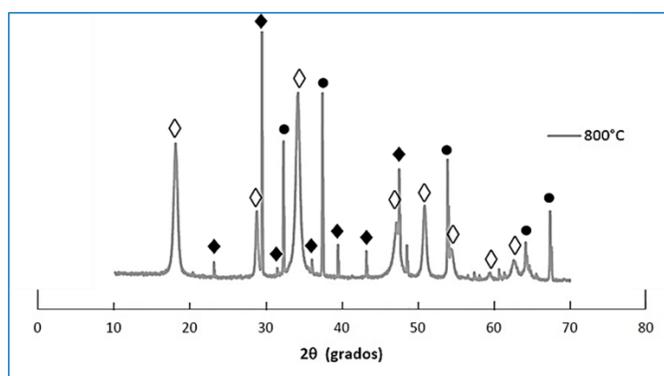


Fig. 3 DRX de muestra de RCCA

La Figura 4 muestra un análisis térmico TGA de las conchas de abanico, mostrando descomposición y pérdida de masa hasta 700°C, confirmando los hallazgos del análisis de difracción de rayos X de descomposición del CaCO<sub>3</sub> en CaO y la reacción con el agua del ambiente para producir Ca(OH)<sub>2</sub>. Esto está en concordancia con el TGA de la referencia [15].

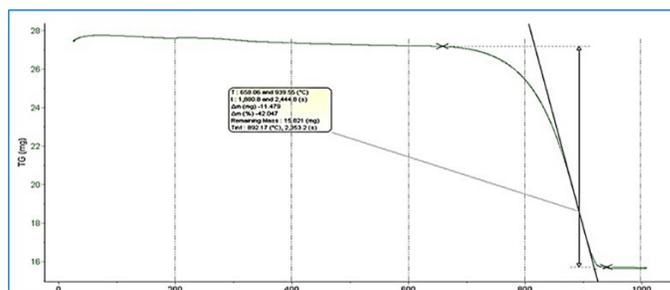


Fig. 4 Curva TGA de muestra de RCCA

La curva DTA de una muestra de concha de abanico de la Figura 5 revela tres picos endotérmicos a 120, 270 y 900°C, siendo el tercer pico el más pronunciado, lo que indica un cambio de fase de carbonato de calcio a óxido e hidróxido de calcio. Esto concuerda con el DTA de la referencia [15].

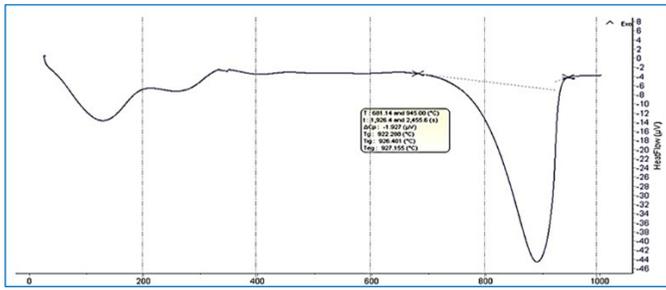


Fig. 5 Curva DTA de muestra de CA

El análisis de difracción de rayos X reveló partículas amorfas, que se revelan por el ruido en la base del espectro y una composición de 65% de óxido de silicio y 15% de óxido de aluminio en la ceniza de bagazo de caña de azúcar.

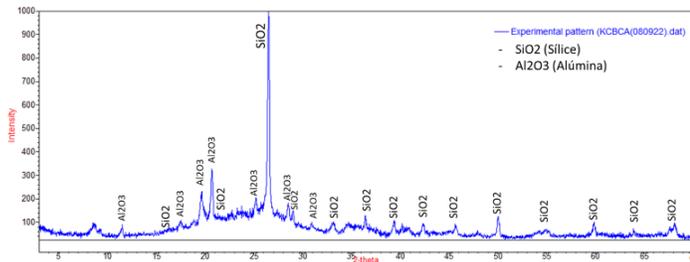


Fig. 6 DRX de muestra de RCCA

El análisis térmico TGA del bagazo de caña de azúcar de la Figura 7 muestra una inflexión inicial a 150°C debida al secado y a la liberación de agua. A 200°C, el bagazo comienza a degradarse, provocando una disminución de la masa. Una tercera etapa se produce entre 400°C y 700°C, liberando cadenas compuestas de mayor peso molecular como la celulosa y la lignina. A partir de 700°C, se obtiene un material carbonoso con carbono fijo y cenizas.

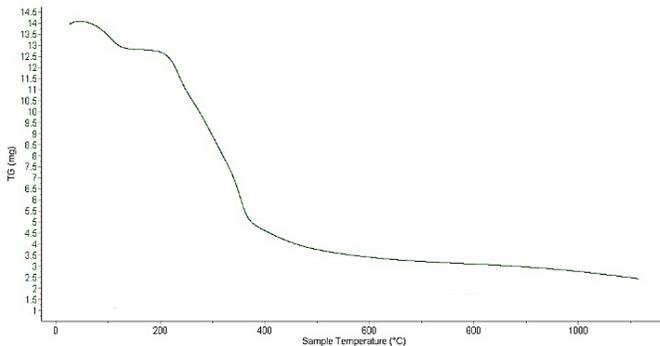


Fig. 7 Curva TGA de muestra de BCA

El análisis DTA del bagazo de caña de azúcar de la Figura 8 revela picos en el consumo de energía debido a la pirólisis, produciéndose la primera etapa endotérmica entre 100-150°C, liberándose volátiles hemicelulósicos ligeros entre 200-400°C, y craqueándose volátiles pesados entre 400-900°C.

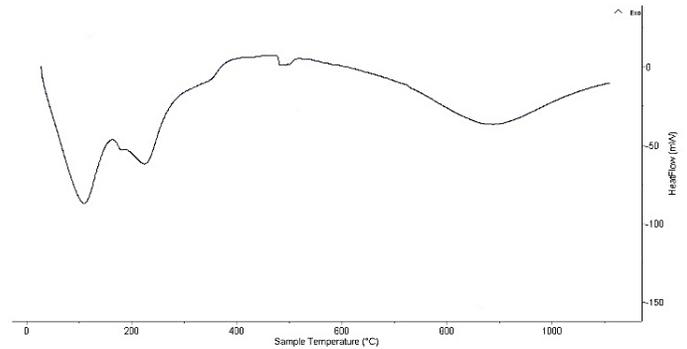


Fig. 8 Curva DTA de muestra de BCA

Los ensayos de resistencia a la compresión en probetas cilíndricas de la Figura 9 mostraron que el aumento de la cantidad de CBCA incrementaba la resistencia en comparación con las probetas estándar. La mayor resistencia se alcanzó con una mezcla A3 (S=80%, RCCA=5%, y CBCA= 15%), dando como resultado 2,90 MPa. La resistencia mejoró hasta un 5% con RCCA, pero disminuyó con S y CBCA. El porcentaje óptimo de RCCA fue del 5%, mientras que el CBCA aumentó la resistencia debido a una reacción entre el RCCA y el CBCA.

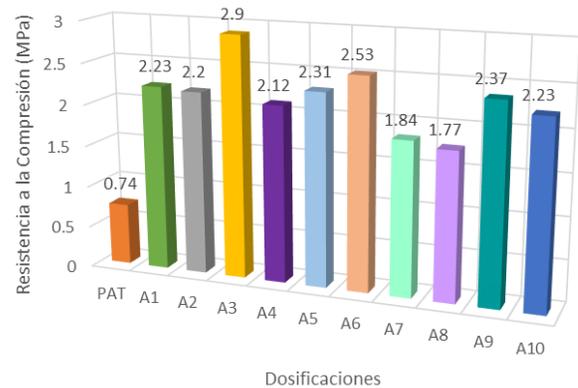


Fig. 9 Resultados del ensayo de Resistencia a la Compresión

La resistencia a flexión de una baldosa aumenta con porcentajes crecientes de CBCA, con el valor más alto en A3 (S=80%, RCCA=5%, y CBCA= 15%). Sin embargo, mayores cantidades de estabilizante disminuyen el módulo de rotura. Este aumento se debe a las reacciones exotérmicas que forman silicatos cálcicos, que pueden afectar a las prestaciones finales del material.

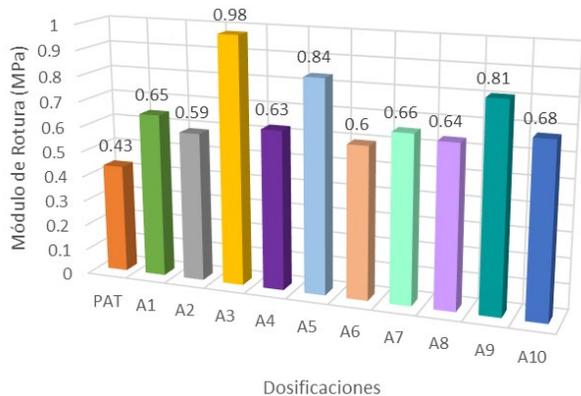


Fig. 10 Resultados del ensayo de Resistencia a la Flexión

Los ensayos de índice de succión capilar de los adobes estabilizados con residuos calcáreos y cenizas de bagazo de caña de azúcar mostraron una disminución con el aumento de los porcentajes de RCCA y CBCA. El valor más alto de succión fue de 5,55 kg/m<sup>2</sup>.min para las muestras estándar.

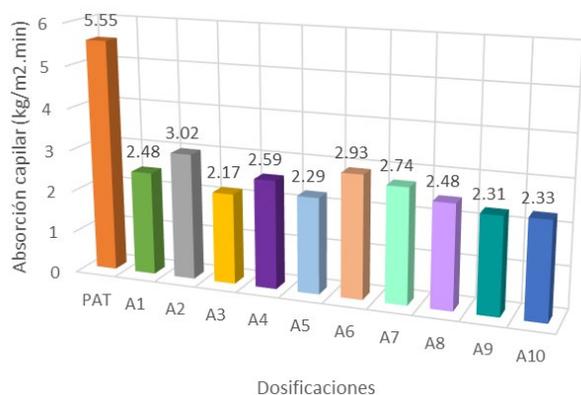


Fig. 11 Resultados del ensayo de índice de succión

La Figura 12 muestra fotografías SEM de la muestra patrón (sin estabilizantes) y la Figura 13 (a) de una muestra con la dosificación A3 (S=80%, RCCA=5%, y CBCA= 15%), que mostró mejores resultados en las pruebas de resistencia a la compresión y a la flexión y un índice de succión capilar más elevado. La muestra A3 presentaba cristales blanquecinos formados a partir del gel CSH, que rellenan los poros, lo que hace aumentar la resistencia mecánica y disminuir la succión capilar. Las fotografías SEM demuestran que los bloques estabilizados tienen mejores propiedades físicas y mecánicas debido a la cristalización del gel CSH producto de la reacción puzolánica dada entre el RCCA y el CBCA. En la Figura 13 (b) se observa la misma probeta A3, pero a 10000x, por lo que se ve más aumentado el crecimiento de nuevos cristales a partir del gel CSH producto de dicha reacción puzolánica.

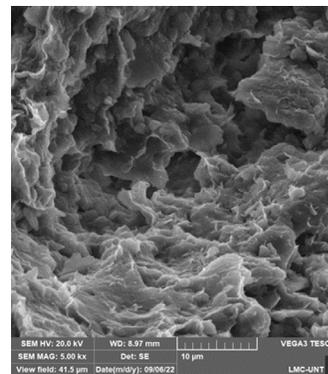


Fig. 12 Microscopía SEM de muestra patrón a 5000x

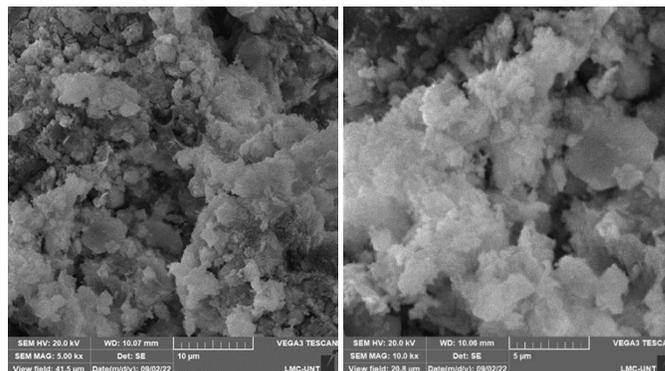


Fig. 13 Microscopía SEM de muestra A3 (a) 5000x (b) 10000x

Finalmente, se sugiere en una investigación posterior realizar pruebas adicionales para evaluar otras propiedades relevantes de los BTCE, como la densidad, la absorción de agua y la conductividad térmica. Esto proporcionaría una evaluación más completa de la idoneidad de los bloques para su uso en diferentes aplicaciones y condiciones ambientales. Asimismo, se recomienda a futuro realizar un análisis de durabilidad a largo plazo, como exposición a condiciones climáticas adversas o ciclos de congelación y descongelación. Esto ayudaría a determinar su resistencia a condiciones más severas.

#### IV. CONCLUSIONES

El estudio constató que la adición de residuos calcáreos y cenizas de bagazo de caña de azúcar al suelo de adobe mejora la resistencia a la compresión, el módulo de rotura y el índice de succión en comparación con el adobe estándar. La dosificación óptima de la mezcla de suelos fue 40% de suelo arenoso y 60% de suelo arcilloso, con una humedad de máxima compactación del 15%. La dosificación óptima del bloque de tierra compactada y estabilizada resultó ser la dosificación A3 (S=80%, RCCA=5%, y CBCA= 15%), con una resistencia a la compresión de 2,90 MPa, un módulo de ruptura de 0,98 MPa y un menor índice de succión capilar de 2,17 kg/m<sup>2</sup>.min. Esto mejoró significativamente al patrón que era de una resistencia a la compresión de 0.70 MPa (aumentando un 292%), un

módulo de ruptura de 0,43 MPa (aumentando un 128%) y un menor índice de succión capilar de 2,17 kg/m<sup>2</sup>.min (disminuyendo un 61%).

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Privada del Norte y a la Universidad Nacional de Trujillo por su apoyo para la publicación de esta investigación y por proporcionar los recursos necesarios para su realización.

#### REFERENCIAS

- [1] G. Kiki, P. Nshimiyimana, C. Kouhadé, A. Messan, A. Houngan, and P. André, “Physico–mechanical and durability performances of compressed earth blocks incorporating quackgrass straw: An alternative to fired clay,” *Constr Build Mater*, vol. 403, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.133064.
- [2] R. Mebarkia, M. Bouzeroura, and N. Chelouah, “Study of the effect of cement kiln dust on the mechanical, thermal and durability properties of compressed earth blocks,” *Constr Build Mater*, vol. 349, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128707.
- [3] R. Panagiotou, M. A. Kyriakides, R. Illampas, and I. Ioannou, “An experimental approach for the investigation of the performance of non-stabilized Compressed Earth Blocks (CEBs) against water-mediated weathering,” *J Cult Herit*, vol. 57, pp. 184–193, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.culher.2022.08.009.
- [4] S. Lahbabi, R. Bouferra, L. Saadi, and A. Khalil, “Evaluation of the void index method on the mechanical and thermal properties of compressed earth blocks stabilized with bentonite clay,” *Constr Build Mater*, vol. 393, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132114.
- [5] S. Paul, M. S. Islam, and M. I. Hossain, “Suitability of Vetiver straw fibers in improving the engineering characteristics of compressed earth blocks,” *Constr Build Mater*, vol. 409, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.134224.
- [6] G. Lan, T. Wang, Y. Wang, and K. Zhang, “Seismic performance of interlocking compressed-earth block composite walls,” *Compos Struct*, vol. 308, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.compstruct.2023.116704.
- [7] J. Ouma *et al.*, “Acoustical properties of compressed earth blocks: Effect of compaction pressure, water hyacinth ash and lime,” *Case Studies in Construction Materials*, vol. 18, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.cscm.2023.e01828.
- [8] A. Thennarasan Latha, B. Murugesan, and B. Skariah Thomas, “Compressed earth block reinforced with sisal fiber and stabilized with cement: Manual compaction procedure and influence of addition on mechanical properties,” *Mater Today Proc*, 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2023.04.373.
- [9] F. Belayali, W. Maherzi, M. Benzerzour, N. E. Abriak, and A. Senouci, “Compressed Earth Blocks Using Sediments and Alkali-Activated Byproducts,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 14, no. 6, Mar. 2022, doi: 10.3390/su14063158.
- [10] K. Al-Jabri, A. W. Hago, S. Al-Saadi, P. Amoatey, and I. Al-Harthy, “Structural and thermal performance of sustainable interlocking compressed earth blocks masonry units made with produced water from oilfields,” *Case Studies in Construction Materials*, vol. 17, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.cscm.2022.e01186.
- [11] C. Alvarado, A. Guerra, I. V. Alfaro, and H. Alvarado-Quintana, “Improvement of access roads to agricultural areas using sediments from the clarification of irrigation water and industrial waste,” in *Proceedings of the LACCEI international Multi-conference for Engineering, Education and Technology*, Latin American and Caribbean Consortium of Engineering Institutions, 2022. doi: 10.18687/LACCEI2022.1.1.381.
- [12] M. Valenzuela *et al.*, “CEBs with GRC: Fabrication, characterization, modeling, and correlation with microstructural fracture features,” *Mater Today Commun*, vol. 37, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.mtcomm.2023.107028.
- [13] P. Dorado, S. Cabrera, and G. Rolón, “Contemporary difficulties and challenges for the implementation and development of compressed earth block building technology in Argentina,” *Journal of Building Engineering*, vol. 46, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.jobbe.2021.103748.
- [14] C. Alvarado, D. Martínez-Cerna, and H. Alvarado-Quintana, “Geopolymer Made from Kaolin, Diatomite, and Rice Husk Ash for Ceiling Thermal Insulation,” *Buildings*, vol. 14, no. 1, Jan. 2024, doi: 10.3390/buildings14010112.
- [15] C. Alvarado and H. Alvarado-Quintana, “Thermal Decomposition of Seashell Powder,” in *Proceedings of the LACCEI international Multi-conference for Engineering, Education and Technology*, Latin American and Caribbean Consortium of Engineering Institutions, 2022. doi: 10.18687/LACCEI2022.1.1.545.