



Caracterización de las propiedades mecánicas de un ladrillo no estructural de tierra como soporte de material vegetal en muros verdes

Mechanical characterization of a non-structural earth brick as support of vegetable material in green walls

González-Velandia Krystle Danitza

Facultad de Ingeniería de la Corporación Universitaria Minuto de Dios-UNIMINUTO
 Sede Principal. Bogotá, Colombia
 Correo: kgonzalez@uniminuto.edu
<http://orcid.org/0000-0002-6982-2569>

Sánchez-Bernal Ruth

Facultad de Ingeniería de la Corporación Universitaria Minuto de Dios-UNIMINUTO
 Sede Principal. Bogotá, Colombia
 Correo: ruth.sanchez@uniminuto.edu
<http://orcid.org/0000-0003-0911-1666>

Pita-Castañeda Diber Jeannette

Facultad de Ingeniería de la Corporación Universitaria Minuto de Dios-UNIMINUTO
 Sede Principal. Bogotá, Colombia
 Correo: dpita@uniminuto.edu
<http://orcid.org/0000-0002-7346-1487>

Pérez-Navar Luisa Fernanda

Facultad de Ingeniería de la Corporación Universitaria Minuto de Dios-UNIMINUTO
 Sede Principal. Bogotá, Colombia
 Correo: lpereznavar@uniminuto.edu.co
<http://orcid.org/0000-0002-8821-3902>

Resumen

En la búsqueda de materiales para construcción sostenible, los ladrillos de adobe juegan un papel importante por generar menor impacto que otros materiales. Hay diversas investigaciones y desarrollos para mejorar sus características como resistencia y durabilidad, entre otras. En el presente trabajo, en una primera fase, se estudiaron las propiedades mecánicas de una mezcla de ladrillo en tierra, arcilla, arena y fibras vegetales secas. En la mezcla seleccionada se evaluó la germinación de material vegetal (pasto) en su superficie y sus propiedades mecánicas una vez que el material se desarrolló. Como resultado, se encontró que la mezcla de ladrillo seleccionada presenta menor resistencia a la compresión que otros ladrillos de adobe, pero la fibra incorporada permite que sea más estable. Además, la combinación de materiales posibilitó una menor densidad y mayor absorción de agua, lo que facilitó el desarrollo de material vegetal en su superficie y que se ganara estabilidad al generarse una red entre las raíces. Tales hallazgos permiten concluir que es posible su aplicación en muros verdes con alturas menores de cuatro metros.

Descriptores: Construcción con tierra, ladrillos en adobe, muros verdes, construcción vegetada.

Abstract

In the search for materials for sustainable construction, adobe bricks play an important role in generating less negative environmental impact than other materials. Proof of this is the large number of research projects focused on improving the properties of the bricks such as resistance or durability. The present work studied the mechanical properties of bricks composed by a mixture of soil, clay, sand and dried vegetable fibers. On this selected mixture, the germination of plants on the surface of the brick and its mechanical properties were studied. We found that the selected mixture has less resistance to compression than other adobe bricks, but on the other hand the vegetable fiber confers more stability on them. Additionally, the combination of the materials conduces to obtain less dense bricks, with higher absorption of water, which facilitated the growth of plants on the surface, gaining more stability due to the network of plant roots. These findings allow us to conclude that it is possible the application of these bricks in the construction of medium height green walls.

Keywords: Rammed earth, adobe brick, green wall, green construction.

INTRODUCCIÓN

Se estima que más de 39.6% de la energía que se consume en el mundo se utiliza en la industria de la construcción, la cual, además de participar en la generación de gases de efecto invernadero (Muñoz *et al.*, 2016), es responsable de la generación de 30% de los residuos sólidos mundiales, según datos del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente y la Iniciativa para la Construcción Sostenible (UNEP-SBCI, 2006).

Entre los diferentes materiales usados en construcción, el ladrillo ha sido uno de los más empleados, pero en su proceso de producción se llega a consumir en promedio 2.0 kWh por ladrillo, y se libera una gran cantidad de gases de efecto invernadero, alrededor de 0.41 kg de CO₂ (Reddy & Jagadish, 2003; Zhang, 2013). Con ello, además de impactos ambientales, se generan costos económicos a causa de la degradación ambiental (Sánchez *et al.*, 2007; World Construction Council [WorldGBC], 2008).

Ha surgido entonces la necesidad de construir estructuras con materiales innovadores y amigables con el ambiente, que han dado paso a nuevas tendencias de construcción sustentable con tierra, en combinación con materiales de origen animal, vegetal y mineral, como los ladrillos de adobe. Estos, a diferencia del ladrillo convencional, aunque no se someten a un proceso de cocción, se convierten en un material resistente y de buen comportamiento en cuanto a la erosión (Oskouei *et al.*, 2017; Bedoya, 2011), de modo que para producir un ladrillo en tierra solo se necesita alrededor de 1% de la energía que se requiere para fabricar un ladrillo convencional (Galíndez, 2009).

En torno a los ladrillos en adobe, se han desarrollado diversas investigaciones con el propósito de mejorar sus propiedades mecánicas. Algunos trabajos se han centrado en la adición de fibras vegetales y sintéticas, con lo cual se han logrado mejorar propiedades mecánicas como la resistencia a la compresión, la durabilidad y la erosión. Asimismo, se encontró que los cambios en estas propiedades están influenciados por las características de la fibra — longitud, composición, absorción, porcentaje— que se emplee en el ladrillo y se ha determinado que son preferibles porcentajes inferiores a 3%, respecto al peso del ladrillo (Millogoa *et al.*, 2014; Zak *et al.*, 2016; Salvador & Olivares, 2002; Aymericha *et al.*, 2012; Oskouei *et al.*, 2017). Otro factor influyente en la mejora de las propiedades mecánicas de los ladrillos de adobe es el empleo de materiales aglutinantes; usualmente se emplea arcilla en contenidos mayores de 25% (Parisi *et al.*, 2015; Serrano *et al.*, 2016; Mostafa & Uddin, 2016; Kouakoua & Morel, 2009), preferiblemente

te tierras con mayor plasticidad (Galíndez, 2009), cemento entre 5 y 12% (Lima *et al.*, 2012; Taallah *et al.*, 2014), ceniza de carbón (Niño *et al.*, 2012), y fibras de residuos agrícolas.

Además del desarrollo de materiales que generan menor impacto en el ambiente, el concepto de construcción sostenible incluye el empleo y desarrollo de fachadas y edificios verdes. En esta tendencia de construcción, las fachadas verdes han empezado a adquirir un papel representativo, ya que por su tecnología constructiva, influyen positivamente en la sostenibilidad de los edificios y el ahorro energético, disminuyendo el efecto de calentamiento mitigando la radiación solar de los mismos. (Muñoz & Torres, 2013). Pérez *et al.* (2017) estudiaron una fachada de doble piel verde como herramienta pasiva para el ahorro de energía en edificios y obtuvieron ahorros de energía de hasta 34%. En Japón se estudiaron edificios verdes renovados y en los dos edificios con mejores características se encontró 33% y 26% de reducción en la intensidad del uso de energía, así como 38% y 32% de reducción en la intensidad de las emisiones de CO₂, en comparación con los valores de referencia. La reducción del consumo de energía en estos dos edificios corresponde a un ahorro de energía de USD 1-1.5 millones por año por edificio (Balabana & Puppim de Oliveira, 2016).

El empleo de tierra en la elaboración de ladrillos y la tendencia a incorporar muros verdes en la construcción, llevó a que se planteara la evaluación de las propiedades mecánicas de un ladrillo en tierra como soporte, en el que germine material vegetal, con la intención de determinar sus posibles aplicaciones en muros verdes. En este caso, por la finalidad del ladrillo, se emplearon fibras vegetales para mejorar su resistencia y su estabilidad, pues dichos materiales proporcionarán porosidad para dar paso a la germinación y, a su vez, proveerán estabilidad y cohesión a las moléculas del ladrillo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Las pruebas y procedimientos realizados se enfocaron en seleccionar materiales que permitieran llegar a un modelo de ladrillo de tierra sin cocción, que facilite la germinación de material vegetal incorporado y garantice condiciones de estabilidad para usarse en muros verdes. Se realizaron ensayos experimentales con mezclas que contenían tierra con altos contenidos de materia orgánica, arcilla, arena y una serie de fibras seleccionadas: heno, cascarilla de arroz y aserrín. Las características físicas-quinámicas como biológicas de la tierra varían de acuerdo con el sitio de donde se extrae, sin embargo,

se empleó tierra con una granulometría equilibrada y con características físicas que permiten el arreglo de las partículas, que es ideal para el uso en jardinería y en la construcción (Karlena *et al.*, 2003; Rivera, 2012), además como principal componente de los bloques de tierra comprimida (BTC), da cuerpo y solidez al bloque (Mansour *et al.*, 2016; Morel *et al.*, 2007; Mostafa & Uddin, 2016; Donkor & Obonyo, 2015; Parisi *et al.*, 2015; Danso *et al.*, 2015; Niño *et al.*, 2012).

La tierra usada presentó una textura franco arcillosa (34% arcillas, 38% arenas, 28% limos) y otras características que se presentan en la Tabla 1. A pesar de que la tierra empleada lleva incorporada arcilla, se utilizó arcilla adicional (textura 57%, 29%, 14%) en el ladrillo para mejorar la cohesión (Fernández, 2012), además se empleó arena (0-4 mm) por su resistencia a las altas temperaturas y porque permite mejor drenaje y la aeration necesaria para la vegetación (López & Ortiz, 2015). Las fibras vegetales se añadieron para aumentar la cohesión, reducir las fisuras y la retracción; además, porque incrementan levemente la resistencia a la tensión y a la compresión (Millogoa *et al.* 2014; Danso *et al.*, 2015; Donkor & Obonyo, 2015; Cuiñas & Nuñez, 2010). A cada uno de los materiales empleados se le realizó una caracterización física que incluyó el tamaño en tres dimensiones medida: longitudinal (a), diámetro transversal mayor (b) y profundidad (c), se determinó la densidad aparente a partir de la relación entre masa y volumen que ocupaba el material contemplando los poros, y el contenido de humedad calculado a partir de la relación entre la cantidad de agua y masa empleando el método de la estufa, asimismo se realizaron 6 repeticiones de cada prueba.

Se eligieron nueve combinaciones para el ladrillo, en las cuales se variaron las cantidades de tierra, entre

40 y 60%; arena, entre 12 y 16%; arcilla, entre 20 y 55%; y fibras, entre 2 y 4% teniendo en cuenta rangos mencionados por diferentes autores (Roux & Espuna, 2012; Donkor & Obonyo, 2015; Parisi *et al.*, 2015; Danso *et al.*, 2015) y buscando altos contenidos de tierra y porosidad para en el futuro facilitar el material vegetal. Se prepararon muestras rectangulares para cada mezcla con un peso promedio de 400 g, con dimensiones de 5 cm de ancho, 5 cm de alto y 10 cm de largo, estas mezclas se sometieron a un proceso de secado entre 110 °C y 115 °C, durante 24 horas, hasta que el peso se estabilizó y en dos pesajes sucesivos a intervalos de 2 horas no se presentó una pérdida de masa superior a 0.2%, luego se sometieron a ensayos de resistencia a la compresión aplicando una fuerza constante controlada por una velocidad de desplazamiento de 0.02mm/s, según la Norma Técnica Colombiana (NTC) 5324 y el Estándar de la American Society for Testing and Materials (ASTM C67-17), cada prueba se repitió 6 veces.

A partir de las pruebas de resistencia se seleccionaron las mezclas con mayores valores resistencia para dos de las fibras propuestas, las mezcla A1 caracterizada por fibras resistentes y largas y la C1 con mayores contenidos de arcilla y fibras más cortas; se prepararon ladrillos con la técnica de prensado, una de las más usadas en la creación de bloques de tierra comprimida (Donkor & Obonyo, 2015; Salvador & Olivares, 2002; Mansour *et al.*, 2016; Danso *et al.*, 2015; Niño *et al.*, 2012). Para el ladrillo se eligió una forma prismática hexagonal por la facilidad de armar con esta figura diferentes tramas. El molde hexagonal tenía dimensiones de 12 cm de alto y 10 cm de lado, con un volumen de 3118 cm³. Para la selección de la mezcla se aplicaron ensayos de resistencia a la compresión (NTC 5324) y se realizaron 6 repeticiones para cada mezcla después de

Tabla 1. Características de los materiales empleados para los ladrillos

Material	DIMENSIONES			Densidad aparente (g/cm ³)	Contenido humedad (%)
	a (cm)	b (cm)	c (cm)		
Suelo franco arcilloso	-	-	-	1.12 ± 0.133	41 ± 4.155
Arcilla	-	-	-	1.59 ± 0.126	35 ± 2.79
Arena	-	-	-	1.01 ± 0.022	17 ± 1.261
Heno	12.4	0.2	0.09	0.04 ± 0.016	12.3 ± 1.02
Cáscarilla arroz	0.85	0.3	0.23	0.26 ± 0.056	8.5 ± 1.134
Viruta	1.6	2.13	0.66	0.17 ± 0.014	18.5 ± 2.176

*Valores promedio y desviaciones estándar

Fuente: Elaboración propia

ser sometida a un proceso de secado hasta que el peso se estabilizó y en dos pesajes sucesivos a intervalos de 2 horas no se presentó una pérdida de masa superior a 0.2% (Tabla 3).

Una vez seleccionada la mezcla de ladrillo que presentó mayor valor de resistencia y sus componentes, se evaluaron las propiedades mecánicas mediante ensayos de resistencia a la compresión (Figura 1), el porcentaje de absorción de agua, la tasa inicial de absorción de agua y la resistencia a la erosión. También se evaluó el tiempo promedio de secado.

La prueba de absorción de agua se empleó para determinar la cantidad de agua que logra retener el ladrillo. El ensayo se evaluó como el cociente entre el peso de agua que absorbe la muestra hasta saturación y su propio peso seco (ASTM C67-17) Se expresa en porcentaje y se calcula mediante la siguiente ecuación:

Ecuación 1. Absorción de agua

$$\text{Absorción de agua (\%)} = \frac{W_{\text{sat}} - W_{\text{seco}}}{W_{\text{seco}}} \times 100$$

donde

W_{sat} = masa de espécimen saturado y

W_{seco} = masa del espécimen seco

Tabla 2. Composición de ladrillos de tierra

Combinación	Tierra %	Arcilla %	Arena %	Heno %	Cascarilla %	Aserrín %	Resistencia (Mpa)*
A1	60	20	16	4	-	-	1.923 ± 0.148
A2	55	25	16	4	-	-	1.706 ± 0.175
A3	60	22	15	3	-	-	0.951 ± 0.231
B1	82	-	16	-	2	-	0.447 ± 0.013
B2	85	-	12	-	3	-	1.203 ± 0.151
B3	80	-	16	-	4	-	0.699 ± 0.089
C1	30	55	-	-	-	15	1.819 ± 0.04
C2	50	35	-	-	-	15	1.462 ± 0.10
C3	40	40	-	-	-	20	1.443 ± 0.017

*Valor promedio de las resistencias y desviación estándar

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3. Resistencia a la compresión de ladrillos de tierra

Combinación	Resistencia (Mpa)*	Contenido humedad (%)
A1	0.52±0.071	18.8 ± 2.124
C1	0.32±0.058	21 ± 2.855

*Valores promedio y desviaciones estándar

Fuente: Elaboración propia.

Se estimó la tasa inicial de absorción, esta determina la cantidad de agua que absorbe un ladrillo en un minuto, pues es un material poroso, lo que puede tener influencia en la selección de morteros. La tasa inicial de absorción de agua se mide durante 1 min., expresada en g/cm²/min, (ASTM C67-00), se expresa en porcentaje y se calcula como se indica en la ecuación 2.

Ecuación 2. Coeficiente de absorción de agua por minuto

$$T.I.A.(\%) = \frac{100 * (W_f - W_0)}{A_c}$$

donde

T.I.A. = coeficiente de absorción de agua por minuto (%)

W_f = masa final (g)

W_0 = masa inicial (g)

A_c = área neta de contacto con el agua (cm²)

La resistencia a la erosión por agua de la tierra apisonada se adopta frecuentemente como indicador de rendimiento para la durabilidad (Silva *et al.*, 2013). Dicho ensayo, para efectos de este estudio se hizo midiendo la profundidad del hoyo causado por el goteo de agua, según la Norma Española UNE 41410. Una vez evalua-



Figura 1. Ensayo de resistencia a la compresión

Fuente: Fotografías tomadas por los autores de la investigación

das las propiedades físicas y mecánicas del ladrillo (Tabla 4), se probó su desempeño al incorporar material vegetal (Tabla 5)—para este caso específico, semillas de pasto—, sometiéndolo a pruebas de germinación. Se utilizó la variedad Futura 3000, por ser una mezcla de gramíneas utilizada en gramas decorativas, en prados o campos de Golf, con adaptación entre 1.800 y 3000 m.s.n.m, para aplicar en suelos no alcalinos que proporcionan una excelente cobertura del suelo, soporta actividades deportivas y se utiliza en este caso específico porque requiere de un bajo mantenimiento y tiene bajo crecimiento, además de raíces finas. Se evaluó el proceso de germinación con seis repeticiones para incorporarlo al ladrillo, 100 g de semillas (3.33% de su peso) bajo condiciones de riego constante. Estos ladrillos finalmente, se sometieron a pruebas de compresión en seco y en húmedo, es decir, con humedad cercana a 50% para establecer cómo se alteran sus propiedades físicas con el proceso de germinación que requiere de riego. También se evaluó el porcentaje de expansión,

este hace referencia a que una vez sometido el ladrillo a riego, su volumen puede cambiar y puede aumentar al absorber agua.

RESULTADOS

En la Tabla 4 se resumen las propiedades mecánicas de los ladrillos de tierra seleccionados.

Después de evaluar las propiedades físicas y mecánicas del ladrillo, se probó su desempeño al incorporar material vegetal. Así, a los 5 días del montaje del ladrillo se inició el proceso de germinación controlada en su cara superior y a los 23 días se obtuvo una longitud de 12 cm. El ladrillo conservó su color característico y mantuvo su forma presentando un porcentaje de expansión menor a 4.3% (Tabla 5); en su interior se desarrollaron las raíces, generando una red que ayudaba a mantener su estabilidad a simple vista (Figura 2).

Los resultados de las pruebas físicas del ladrillo con el material vegetal germinado se muestran en la Tabla 5.

Tabla 4. Propiedades mecánicas de los ladrillos de tierra

Muestra	R (Mpa)	CH seco (%)	R húmedo (Mpa)	CH húmedo (%)	Absorción de agua (%)	TIA (%)	Erosión (cm)	D aparente (kg/m ³)
A1	0.56 ± 0.074	17.6 ± 1.936	0.07 ± 0.018	58 ± 3.233	41.59 ± 2.286	29.10 ± 5.104	0.92 ± 0.117	989.59 ± 40.907

R = resistencia; CH = Contenido de humedad; TIA = tasa inicial de absorción; D = densidad.

*Valores promedio y desviaciones estándar

Fuente: Elaboración propia.



Figura 2 . Ladrillo de tierra germinado

Fuente: Fotografías tomadas por los autores de la investigación

Tabla 5. Ensayo de resistencia a la compresión en seco y húmedo de los ladrillos con material vegetal, tiempo de duración de la prueba hasta la falla, erosión y expansión en ladrillos germinados

Resistencia en seco (Mpa)*	Tiempo hasta la falla – en seco (min)	Resistencia en húmedo (Mpa)	Tiempo hasta la falla – en húmedo (min)	Erosión (%)	Expansión (%)
0.3596 ± 0.088	20.89 ± 2.198	0.097 ± 0.022	14.89 ± 1.380	0	3.189 ± 0.596

*Valores promedio y desviaciones estándar

Fuente: Elaboración propia

DISCUSIÓN

En la primera fase se buscó una mezcla para el ladrillo que presentara condiciones de resistencia cercanas a las de un ladrillo de tierra y los resultados mostraron que usar fibras puede incrementar la resistencia a la compresión, pero se observó que no es recomendable incorporar altos porcentajes de fibra a la mezcla, ya que disminuye la resistencia a la compresión como se pudo apreciar con las tres fibras en la Tabla 2. Se encontraron valores de resistencia entre 0.44 y 1.93 MPa, menores que los hallados en otros estudios con ladrillos de tierra y fibras. Esto, debido a que, en primer lugar, se usaron contenidos de arcilla entre 20 y 25%, menores a los reportados en otras investigaciones (Serrano *et al.*, 2016; Mostafa & Uddin, 2016; Parisi *et al.*, 2015; Danso *et al.*, 2015; Donkor & Obonyo, 2015; Niño *et al.*, 2012), en segundo lugar, no se emplearon estabilizantes como cemento porque no se deseaba afectar el desarrollo del material vegetal, y en tercer lugar, se utilizaron fibras con la intención de mejorar la porosidad del ladrillo y su estabilidad para garantizar que el material vegetal se pueda desarrollar.

Con el molde seleccionado se buscaba tener un ladrillo con dimensiones que garantizaran un peso en húmedo del ladrillo de fácil manipulación y resistencia. A partir de los análisis de resistencia aplicados a las muestras A1 y C1, se encontró que la mezcla con aserrín —C1— tenía una menor densidad (646.19 kg/m³) porque tenía un mayor porcentaje de fibras; sin embargo, como se registra en la literatura, las fibras aumentan la resistencia en bajas proporciones (Yetgin *et al.*, 2008; Mostafa & Uddin, 2016; Danso *et al.*, 2015; Donkor & Obonyo, 2015; Niño *et al.*, 2012; Taallah *et al.*, 2014). Aunque entre las primeras muestras esta mezcla mostró mayores valores de compresión en comparación con las otras mezclas, un hallazgo asociado a su contenido de arcilla, tuvo menor resistencia respecto al ladrillo que contenía heno —A1—, lo cual, se debe a que las fibras de heno son más largas y resistentes, y a que se agregó en bajas proporciones (4%). De manera que la mezcla A1 llegó a tener una resistencia 60% por encima

de la mezcla C1. También se observó que la mezcla C1 tenía un mayor contenido de humedad, asociado a su menor densidad y a que las fibras de aserrín son más absorbentes, lo que podría afectar la estabilidad e impedir que el ladrillo mantenga su forma al estar en contacto con el agua para pruebas de germinación.

La mezcla seleccionada —compuesta por 60% tierra, 20% arcilla, 16% arena y 4% heno— presentó una resistencia media de 0.56 MPa. Aunque este valor se encuentra por debajo del estipulado en la norma ASTM C67-17, coincide con lo reportado en estudios de ladrillos reforzados con fibras, en los cuales se han obtenido resistencias entre 0.20 y 3.16 MPa (Parisi *et al.*, 2015; Mansour *et al.*, 2016). Sin embargo, es menor que el de otras investigaciones en las cuales se emplearon fibras; por ejemplo, para un ladrillo en el que se incorporaron fibras de banano se obtuvieron resistencias de 6.19 MPa (Mostafa & Uddin, 2016); con fibra de maíz se alcanzó una resistencia de 3.253 MPa; con festuca, de 2.884 MPa, y con paja, de 2.908 MPa. (Serrano *et al.*, 2016). Esto puede deberse a que en las últimas investigaciones mencionadas, se emplearon estabilizantes y que en la presente investigación no se usaron.

El porcentaje de absorción obtenido —42%— se debe a la porosidad de los materiales utilizados. En este caso se buscaba aumentar la porosidad del ladrillo y, por esta razón, se empleó 4% de fibras, que ayudan a disminuir la erosión. Se utilizó además tierra y arena, y no se usaron estabilizantes como el cemento (Danso *et al.*, 2015). En comparación con otros ladrillos de tierra con fibra, este ladrillo presenta valores altos, pues los rangos de absorción encontrados en otros estudios varían entre 9.5% y 27.94% (Danso *et al.*, 2015; Taallah *et al.*, 2014; Niño *et al.*, 2012; Lima *et al.*, 2012). Este alto porcentaje de absorción es favorable para la germinación de las semillas, sin embargo, afecta la resistencia a la compresión del ladrillo.

Según la prueba de erosión acelerada Swinburne (SAET) para bloques de tierra comprimida, el ladrillo presenta valores de erosión aptos, debido a que el orificio causado por el goteo de agua fue de 9.2 mm, es decir, se encuentra entre 0 y 10 mm, según se especifica en

la Norma Española UNE 41410. Estos resultados de erosión se obtuvieron antes de que se iniciara el proceso de germinación asociado al empleo de fibras de heno. Los valores coinciden con los rangos que presentan otros ladrillos de tierra en los que se emplea material vegetal (Suárez, 2001; Cid *et al.*, 2012) ya cuando el ladrillo germinó los valores de erosión fueron de cero, lo que puede ser favorable para muros verdes.

En este caso, se buscaba que, además de valores aceptables de resistencia, el ladrillo tuviera características que facilitaran la germinación de material vegetal. La resistencia media individual de un ladrillo de tierra húmedo es de 0.70 kgf/cm² y seco, de 5.6 kgf/cm². De acuerdo con estos valores se permitiría inicialmente armar muros verdes entre 0.48 y 4.90 metros de altura teniendo en cuenta con estos valores el peso máximo que podría soportar un ladrillo de acuerdo con las pruebas.

El porcentaje de absorción de agua del ladrillo y su baja densidad facilitaron el proceso de germinación del material vegetal. En condiciones controladas de agua, el desarrollo del material vegetal fue satisfactorio y generó una red que da estabilidad. Las semillas germinaron normalmente y alcanzaron la altura característica de la variedad. La resistencia en seco al germinar el material vegetal disminuyó 35%, pero el tiempo en el que alcanzó la rotura fue mayor, y se evidenció en húmedo un leve aumento de resistencia posiblemente asociado a la red que forma las raíces. Al respecto, es importante considerar que, aunque el ladrillo se quiebra, las raíces del material vegetal ayudan a que las partes no se separen con facilidad, esto, sumado al efecto de las fibras de heno.

El ladrillo, al absorber agua y en el proceso de germinación, presentó un porcentaje de expansión de 3.6%. El desarrollo de las raíces no alteró la forma del ladrillo, sin embargo, es recomendable usar una malla en caso de que se desee un porcentaje de expansión menor. Al realizar las pruebas de erosión al ladrillo germinado, se observaron valores cercanos a cero, lo que representa una ventaja para los ladrillos de tierra, donde los porcentajes oscilan entre 4 y 9 mm (Cid *et al.*, 2012; Galíndez, 2007).

CONCLUSIONES

Este estudio proporciona una base para continuar trabajando en el desarrollo de ladrillos de tierra con inclusión de fibras que permitan el desarrollo de material vegetal e impulsen fachadas verdes y construcciones que puedan llegar a generar menores impactos. Los resultados de este estudio muestran bajos valores de resistencia a la compresión, asociados a la fibra incluida y al bajo porcentaje de arcilla y arena utilizadas por la

necesidad de facilitar el desarrollo del material vegetal. A pesar de ello, los valores se encuentran en el rango de resultados obtenidos por otros estudios con ladrillos de tierra.

El ladrillo con material vegetal presentó menor resistencia que el ladrillo solo, debido a que se necesitan garantizar niveles de humedad para que germe y se mantenga el material vegetal. Sin embargo, los ladrillos germinados presentan un mayor tiempo para llegar a falla, el material vegetal impide la erosión del ladrillo y las redes que se crean entre las raíces permiten mayor estabilidad del ladrillo. Estos resultados podrían emplearse en estudios futuros de muros verdes para lograr mayores resistencias y uso de estabilizantes sin que se comprometa el desarrollo del material vegetal.

REFERENCIAS

- Aymericha, F., Fenub, L., Melonic, P. (2012). Effect of reinforcing wool fibres on fracture and energy absorption properties of an earthen material. *Construction and Building Materials*, 27(1), 66-72. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.008>
- Balabana, O. y Puppim de Oliveira, J. (2016). Sustainable buildings for healthier cities: assessing the co-benefits of green buildings in Japan. *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.01.086>
- Bedoya, C. (2011). *Construcción sostenible: Para volver al camino*. Meddín: Biblioteca Jurídica Diké; Mares Consultoría Sostenible.
- Cid-Falceto, J., Mazarrón, F., 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>
- Cuñas, C. y Nuñez, S. (2010). La tierra como material. Inclusión del barro en el imaginario (Trabajo final del nivel V en el Taller de Diseño Industrial, Universidad de Buenos Aires). Recuperado de http://diana.fadu.uba.ar/8/1/TESIS_FINAL_VII_2010.pdf
- Danso, H., Martinson, D.B., Ali, M., Williams, J.B. (2015). Physical, mechanical and durability properties of soil building blocks reinforced with natural fibres. *Construction and Building Materials*, 101(1), 797-809. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.069>
- Donkor, P. y Obonyo, E. (2015). Earthen construction materials: Assessing the feasibility of improving strength and deformability of compressed earth blocks using polypropylene fibers. *Materials & Design*, 83, 813-819. <https://doi.org/10.1016/j.matedes.2015.06.017>
- Fernández, M. (2012). *Resistencia a compresión de bloques de tierra comprimida estabilizada con materiales de sílice de diferente tamaño de partícula* (Trabajo de fin de máster, Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica). Recuperado de http://oa.upm.es/10672/3/ESIS_MASTER_MIGUEL_CARCEDO_FERNANDEZ.pdf

- Galíndez, F. (2007). *Bloques de tierra comprimida (BTC) sin adición de cemento*. Argentina: Fundación MAPFRE.
- Galíndez, F. (2009). Bloques de tierra comprimida sin adición de cemento (BTC). *Seguridad y medio ambiente*, 29(115), 62-73.
- Karlena, D.L., Ditzlerb, C.A., Andrews, S.S. (2003). Soil quality: why and how? *Geoderma*, 114, 145-156. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00039-9](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00039-9)
- Kouakoua, C. y Morel, J. (2009). Strength and elasto-plastic properties of non-industrial building materials manufactured with clay as a natural binder. *Applied Clay Science*, 44(1), 27-34. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2008.12.019>
- Lima, S., Varum, H., Sales, A., Neto, V. (2012). Analysis of the mechanical properties of compressed earth block masonry using the sugarcane bagasse ash. *Construction and Building Materials*, 35, 829-837. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.127>
- López, I. y Ortiz, D. (2015). Propiedades físicas de los materiales de construcción tradicionales. Recuperado de https://www.academia.edu/15088689/propiedades_f%C3%ADsicas_de_materiales_de_construcci%C3%B3n_tradicionales?auto=download
- Mansour, M., Jelidi, A., Cherif, A., Jabrallah, S.B. (2016). Optimizing thermal and mechanical performance of compressed earth blocks (CEB). *Construction and Building Materials*, 104, 44-51. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.024>
- Millogoa, Y., Morel, J.C., Aubert, J.-E., Ghavami, K. (2014). Experimental analysis of Pressed Adobe Blocks reinforced with Hibiscus cannabinus fibers. *Construction and Building Materials*, 52, 71-78. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.094>
- Morel, J.C., Pkla, A., Walker, P. (2007). Compressive strength testing of compressed earth blocks. *Construction and Building Materials*, 21(2), 303-309. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.08.021>
- Mostafa, M. y Uddin, N. (2016). Experimental analysis of Compressed Earth Block (CEB) with banana fibers resisting flexural and compression forces. *Case Studies in Construction Materials*, 5, 53-63. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2016.07.001>
- Muñoz, P., Morales, M., Letelier, V., Mendívil, M. (2016). Fired clay bricks made by adding wastes: Assessment of the impact on physical, mechanical and thermal properties. *Construction and Building Materials*, 125, 241-252. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.024>
- Muñoz-Campillo, L.M. y Torres-Sena, R.D. (2013). Las fachadas verdes como herramienta pasiva de ahorro energético en el bloque administrativo de la Universidad Pontificia Bolivariana, seccional Montería. Dearq. *Revista de Arquitectura*, (13), 140-149.
- Niño, M., Spinosi, V., Ríos, C., Sandoval, R. (2012). Effect of the addition of coal-ash and cassava peels on the engineering properties of compressed earth blocks. *Construction and Building Materials*, 36, 276-286. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.056>
- Norma Española UNE 41410. (2008). *Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo*. Madrid, España: Asociación Española de Normalización y Certificación (Aenor).
- Norma Técnica Colombiana NTC 5324. (2004). *Bloques de suelo cemento para muros y divisiones. Definiciones. Especificaciones. Métodos de ensayo. Condiciones de entrega*. Bogotá: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (Icontec).
- Oskouei, A., Afzali, M., Madadipour, M. (2017). Experimental investigation on mud bricks reinforced with natural additives under compressive and tensile tests. *Construction and Building Materials*, 142, 137-147. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.065>
- Parisi, F., Asprone, D., Fenu, L., Prota, A. (2015). Experimental characterization of Italian composite adobe bricks reinforced with straw fibers. *Composite Structures*, 122, 300-307. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.11.060>
- Pérez, G., Coma, J., Sol, S., Cabeza, L.F. (2017). Green facade for energy savings in buildings: The influence of leaf area index and facade orientation on the shadow effect. *Applied Energy*, 424-437.
- Reddy, B. y Jagadish, K. (2003). Embodied energy of common and alternative building materials and technology. *Energy build*, 35(2), 129-137. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(01\)00141-4](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(01)00141-4)
- Rivera, J.C. (2012). El adobe y otros materiales de sistemas constructivos en tierra cruda: caracterización con fines estructurales. *Apuntes*, 25(2), 164-181. Recuperado de: <http://revistas.javeriana.edu.co/index.php/revApuntesArq/article/viewFile/8763/6974>
- Roux, R. y Espuna, J. (2012). *Bloques de tierra comprimida adicionados con fibras naturales*. México: Universidad Autónoma de Tamaulipas.
- Salvador, R., y Olivares, M. (2002). Utilización de ladrillos de adobe estabilizados con cemento Portland a 6% y reforzados con fibras de Coco, para muros de carga en Tampico. *Informes de la Construcción*, 53(478), 39-50.
- Sánchez, E., Ahmed, K., Awe, Y. (2007). *Prioridades ambientales para la reducción de la pobreza en Colombia: un análisis ambiental del país para Colombia*. Washington: Banco Mundial; Mayol Ediciones.
- Serrano, S., Barreneche, C., Cabeza, L. (2016). Use of by-products as additives in adobe bricks: Mechanical properties characterisation. *Construction and Building Materials*, 108, 105-111. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.01.044>
- Silva, R., Oliveira, D., Miranda, T., Cristelo, N., Escobar, M., Soares, E. (2013). Rammed earth construction with granitic residual soils: The case study of northern Portugal. *Construction and Building Materials*, 47, 181-191. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.047>
- Suárez-Díaz, J. (2001). *Control de erosión en zonas tropicales*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- Taallah, B., Guettala, A., Guettala, S., Kriker, A. (2014). Mechanical properties and hygroscopicity behavior of compressed earth block filled by date palm fibers. *Construction and Building Materials*, 59, 161-168. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.058>

- UNEP-SBCI. (2006). Iniciativa de construcción y construcción sostenible. Recuperado de http://www.unepsbci.org/SBCI_2006.pdf
- World Construction Council (WorldGBC). (2008). *Construction and WorldGBC to collect data on global green trends to advance information exchange and green intelligence*. Nueva York: McGraw-Hill.
- Yetgin, S., Cavdar, O., Cavdar, A. (2008). The effects of the fiber contents on the mechanic properties of the adobes. *Construction and Building Materials*, 22(3), 222-227. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.08.022>
- Zak, P., Ashour, T., Korjenic, A., Korjenic, S., Wu, W. (2016). The influence of natural reinforcement fibers, gypsum and cement on compressive strength of earth bricks materials. *Construction and Building Materials*, 106, 179-188. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.031>
- Zhang, L. (2013). Production of bricks from waste materials-a review. *Construction and Building Materials*, 47, 643-655. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.043>