

Evaluación físico-mecánica de un bloque de arena comprimida impermeabilizado con reciclaje de asfalto triturado

Physical-mechanical evaluation of a block compressed sand waterproofed with recycling of crushed asphalt

Haidee Yulady Jaramillo



Universidad Francisco de Paula
Santander, Colombia

July Andrea Gómez Camperos



Universidad Francisco de Paula
Santander, Colombia

Wilder Quintero Quintero



Universidad Francisco de Paula
Santander, Colombia

OPEN ACCESS

Recibido: 09/12/2021

Aceptado: 23/03/2022

Publicado: 10/05/2022

Correspondencia de autores:
hyjaramillo@ufpso.edu.co



Copyright 2020
by Investigación e
Innovación en Ingenierías

Resumen

Objetivo: Determinar las propiedades físico-mecánicas del Bloque de Arena Comprimida (BTC) impermeabilizado de 15×10×30 cm con dos orificios de 7 cm de diámetro, con reciclaje de asfalto triturado. **Metodología:** El diseño de mezclas de la materia prima se llevó a cabo con adición de 3 diferentes porcentajes del reciclado de asfalto triturado (3, 6 y 9%), teniendo en cuenta los parámetros de la norma NTC-5324, para la caracterización de las propiedades físico-mecánicas. De esta manera, los bloques fueron sometidos a ensayos de absorción, capacidad de carga, y de durabilidad y erosión. **Resultados y conclusiones:** Los resultados demostraron que los bloques de arena comprimida son alternativas sostenibles, con propiedades mejoradas mediante la adición de materiales reciclados (asfalto triturado), disminuyendo de esta manera la vulnerabilidad de los bloques ante los cambios de humedad en regiones donde se requiere que los bloques de mampostería para la construcción sean adecuados para este tipo de ambientes.

Palabras clave: Granulometría, límite líquido, límite plástico, índice de plasticidad, diseño de mezclas.

Abstract

Objective: Determine the physical-mechanical properties of the waterproofed Compressed Sand Block (BTC) measuring 15×10×30 cm with two holes of 7 cm of diameter, with the recycling of crushed asphalt. **Methodology:** The design of raw material mixtures was carried out with the addition of 3 different percentages of crushed asphalt recycling (3, 6, and 9%), taking into account the parameters of the NTC-5324 standard for the characterization of the physical-mechanical properties. In this way, the blocks were subjected to absorption, load capacity, durability, and erosion tests. **Results and conclusions:** The results showed that compressed sand blocks are sustainable alternatives, with improved properties through the addition of recycled materials (crushed asphalt), thus reducing the vulnerability of the blocks to changes in humidity in regions where the blocks are required to masonry for construction are suitable for these types of environments.

Keywords: Granulometry, liquid limit, plastic limit, plasticity index, mixture design.

Introducción

La arena como material de construcción tiene un uso muy antiguo, casi como la misma historia de la humanidad. Se han encontrado hallazgos donde se evidencia que los primeros hombres construían con suelo (arena), conformando con ella muros para proteger las entradas de sus cavernas [1]. Los hallazgos más antiguos de construcción con suelo (Egipto, Irán, China, entre otros) datan de 9.000 años atrás [2], donde los distintos procesos de invasión y colonización permitieron la expansión de las técnicas de construcción con arena [3, 4, 5].

Según estimaciones realizadas por la Organización de la Naciones Unidas (ONU), cerca del 30% de la población mundial, más de 1.000 millones de personas, viven en construcciones en arena (Tapial, Bahareque y bloques de arena comprimida o BTC), encontrándose el porcentaje más alto en países en vía de desarrollo [6]. En particular, los BTC han recobrado gran importancia en las últimas décadas, debido principalmente a la búsqueda de medidas para la protección del medio ambiente, el desarrollo humano, auto fabricación, reducción de costos de transporte, fácil disposición de desechos industriales, entre otros [2, 7, 8].

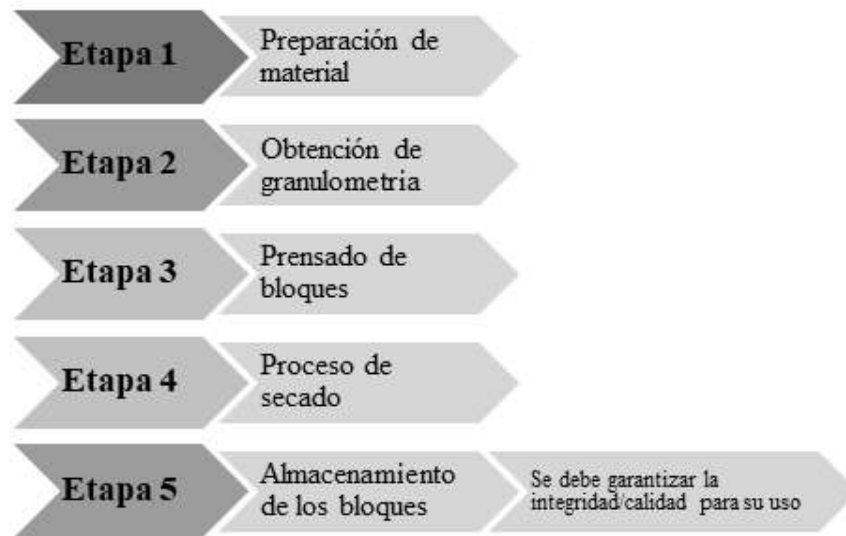
El Bloque De Arena Comprimida “BTC” con cementante (cemento), es un bloque sostenible debido a que para su fabricación no se emiten gases nocivos para el medio ambiente, como el dióxido de carbono, pero tienen una gran falencia y es que después de su fabricación y ser utilizado en viviendas u otro tipo de infraestructura en el cual se pueda utilizar según su ficha técnica, es susceptible a la humedad debido a que no es petrificado, es decir, al entrar en contacto con el agua por eventos naturales o de otro tipo por labores cotidianas, sufre procesos de pérdida de sus propiedades físicas y mecánicas al comenzar a desmoronarse y a perder resistencia estructural [9].

Específicamente en Ocaña, Norte de Santander, Colombia, existen grandes extensiones de material arcilloso ideal para la fabricación de bloques de arena comprimida. Además, permanentemente se está trabajando con pavimento flexible (asfalto) para labores de reparcho o pavimentación normal, donde se generan grandes producciones de material residual en forma de escombros los cuales son 100% reciclables. Sin embargo, hasta la fecha no se han utilizado estos materiales para la fabricación de BTC en la ciudad, por lo que no se conoce de las mejoras que pueden obtenerse en lo referente a la impermeabilización, ni las propiedades tanto físicas como mecánicas al adicionar cementantes (cemento), proceso que se ha realizado en diversos lugares del mundo con el fin de buscar bloques alternativos para construcciones sostenibles.

Los BTC son fabricados mediante un debido proceso de compactación por compresión de suelo empleando el equipo Cinva-Ram. Aunque los bloques están constituidos principalmente de arena, suelen adicionarse aglomerantes como el cemento o la cal, aumentando de esta forma la resistencia de éstos. Existen numerosas recomendaciones sobre las características que debe cumplir la arena a emplear en los bloques, en especial, en cuanto a la cantidad de aglomerante, donde los porcentajes recomendados oscilan entre el 5% y 10% [3, 8].

El proceso de fabricación de los bloques de BTC puede resumirse en las siguientes etapas como se muestra en la Figura 1:

Figura 1. Proceso de fabricación de bloques BTC.



Fuente: [10, 11, 12].

En particular, para Colombia, dichos bloques deben cumplir con la norma NTC 5324 Bloques de Suelo Cemento para muros y divisiones, especialmente los numerales asociados a la absorción, la capacidad de carga y la abrasión [13]. Por otra parte, aunque los BTC presentan altas ventajas, su mayor limitante es la vulnerabilidad a la humedad, por lo cual es común mezclarlos con materiales como las grasas [11, 14]. La anterior situación, motivo esta investigación para que los BTC fueran mezclados con material asfáltico reciclado, mejorando sus propiedades físico-mecánicas y de absorción.

Debido a que los BTC han sido estudiados en ciudades, como en Medellín, Cuenca en Ecuador, Santiago de Chile y en algunas ciudades de España; en el presente trabajo de investigación se quiere demostrar que los BTC son viables en nuestra región, debido a que se cuenta con los materiales necesarios para su fabricación. Además de esto, es importante resaltar que el asfalto es 100% reciclable. Con esta investigación se busca incentivar al reciclaje permitiendo la reutilización y la re significación de los materiales, contribuyendo al cuidado del medio ambiente y generando nuevo conocimiento para el municipio de Ocaña y sus alrededores.

Metodología

La presente investigación, de tipo experimental, tuvo como objetivo determinar las propiedades físico-mecánicas y de absorción de Bloques De Arena Comprimida (BTC) impermeabilizadas con reciclaje de asfalto triturado en la ciudad de Ocaña, Norte de Santander, Colombia.

Etapas de la investigación

Localización

Estudios previos, sugieren el uso de suelos con proporciones de 30-55% de agregados finos (limos y arcillas), 40-65% de arenas, y menos del 15% de gravas; además deben poseer un límite líquido menor al 45% y un índice de plasticidad menor al 18% [3, 5, 15]. Con la finalidad de facilitar la extracción del material, se tomaron muestras de suelos en dos sectores del municipio de Ocaña donde actualmente se extrae material para la fabricación de productos de mampostería para la construcción. Estos sectores son El Limonal

(coordenadas: 914159 m N 681296 m E) y El Hatillo (coordenadas: 913097 m N 681787 m E), ambos cercanos al casco urbano de la ciudad de Ocaña, Norte de Santander, como se muestra en la Figura 2.

Figura 2. Ubicación de sitios de obtención de material.



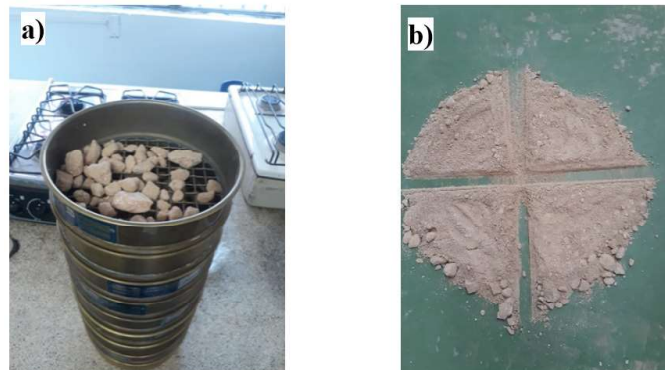
Fuente: Google Earth.

Adicionalmente, la literatura sugirió usar materiales térreos ubicados en los sectores de El Limonal (Coordenadas: 914159 m N 681296 m E) y El Hatillo (Coordenadas: 913097 m N 681787 m E) en el departamento de Norte de Santander; la extracción de suelo se hizo siguiendo las indicaciones establecidas en la norma I.N.V. E-103 [1].

2.1.2. Caracterización del material

Las muestras de suelo obtenidas de los dos sectores mencionados fueron debidamente caracterizadas en el laboratorio de Suelos y Pavimentos de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, con sede en INVIAS (I.N.V.). Las muestras de suelo fueron debidamente extraídas en campo, por medio de un apique del cual se obtuvo material inalterado y alterado siguiendo las indicaciones establecidas en la I.N.V. E-103, I.N.V. E-105, I.N.V. E-126 e I.N.V. E-128, como se muestra en la Figura 3.

Figura 3. a) Granulometría y b) Muestreo de las arcillas.



Fuente: Elaboración propia.

Diseño de mezcla y elaboración de los BTC

Una vez completada la caracterización de la materia prima a utilizarse, se prepararon tres mezclas con diferentes porcentajes del reciclado de asfalto triturado. El diseño de mezcla estuvo basado en lo recomendado en los trabajos de investigación titulados: Técnicas de construcción con arena, y Bloque de arena comprimida como material constructivo, en los cuales recomiendan emplear cemento para garantizar

la integridad de los bloques en un porcentaje superior al 8%. Bajo esta recomendación se decidió utilizar un porcentaje de cemento del 10% en cada bloque [16].

Para evitar la presencia de materiales con tamaños superiores a los sugeridos para estos bloques, se tamizó el suelo por una malla de diámetro aproximado de 4,75 mm (No. 4). Por otra parte, la breca asfáltica empleada fue triturada manualmente y posteriormente cernida por una malla de 1 mm de diámetro. Para determinar el porcentaje de breca asfáltica triturada a emplear en los bloques de arena comprimida, se siguieron las sugerencias presentadas por Cañola *et al.* [9]. Aunque en esta se utilizan emulsiones asfálticas en los bloques, se tomó la indicación de calcular el porcentaje de adición de acuerdo al peso promedio de los bloques sin ningún tipo de material añadido (cemento o breca).

Para ello, se realizó la fabricación de 3 bloques de arena comprimida sin cemento y sin breca, obteniéndose un valor promedio de 5.8 Kg. Este peso se tuvo en cuenta para calcular las cantidades de cemento, breca asfáltica triturada, suelo y agua necesarios para conformar el bloque.

En las Tabla 1 se muestra la proporción de los materiales utilizados en cada mezcla para los bloques de arena comprimida BTC, así como la cantidad de materiales utilizados por mezcla (por cada porcentaje de breca asfáltica triturada), y por bloque de arena comprimida. Bajo dicho diseño de mezclas se fabricaron 45 BTC, 15 bloques por cada porcentaje de reciclado de asfalto triturado.

Tabla 1. Descripción de proporción de materiales para cada mezcla.

Material	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3
Cemento (%)	10	10	10
Reciclaje de asfalto triturado (%)	3	6	9
Arena (%)	74	71	68
Agua (%)	13	13	13

Fuente: Elaboración propia.

Ensayos físico-mecánicos

Siguiendo los lineamientos de la norma NTC-5324, se realizaron ensayos físico-mecánicos que permitieron determinar porcentajes de absorción, capacidad de carga, y la caracterización de la durabilidad y la erosión de los BTC fabricados. Antes de proceder a realizar los ensayos, los ladrillos fueron curados durante 30 días, y se les adicionó agua mediante aspersores manuales previo a la realización de los ensayos respectivos, como se muestra en la Figura 4.

Figura 4. Bloques en proceso de curado luego de ser prensados en el equipo Cinva-Ram.



Fuente: Elaboración propia.

Ensayo de absorción

Teniendo en cuenta lo anterior, se tuvieron en cuenta los siguientes equipos e instrumentos de laboratorio, Balanza de 0,01 gramos, Horno, Recipientes para agua potable, Frasco de 250 ml para puesta de nivel de agua constante, Soportes de igual altura para sostener los bloques de arena comprimida, Regla y un Cronómetro. Asimismo, se tuvo en cuenta el procedimiento mostrado en la Figura 5 y Tabla 2.

Figura 5. Etapas para los ensayos de laboratorio.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2. Descripción del proceso para los ensayos de laboratorio.

Etapa	Descripción
1	Se pesaron los bloques en la balanza y se enumeró a cada uno de ellos.
2	Se secaron los bloques en el horno durante 24 h.
3	Retirados del horno, los bloques se dejaron enfriar por 6 horas
4	Transcurrido el tiempo para el enfriamiento de los bloques, se pesaron nuevamente (P0)
5	Después se llenó el recipiente con agua, de tal manera que los soportes colocados en el recipiente permitieran sumergir una cara del bloque a una altura de 5 mm. Se marcó este nivel de agua en los bloques.
6	A medida que transcurría el tiempo del ensayo se fue adicionando agua para mantener el mismo nivel de agua en el recipiente
7	Cada ensayo para cada bloque tuvo una duración de 10 min. Transcurrido este tiempo se retiraron los bloques, se limpiaron con un trapo húmedo, y fueron pesados en la balanza (P1)

Fuente: Elaboración propia.

Se ensayaron un total de 9 bloques de arena comprimida BTC, 3 por cada porcentaje de brea asfáltica triturada. Con los datos: P_0 y P_1 , se calculó el coeficiente de absorción de cada bloque aplicando la ecuación 1, los resultados se muestran en la Tabla 3.

$$C_b = \frac{100(M)}{S\sqrt{t}} \quad \text{Ec. (1)}$$

Dónde: M, es la masa del agua en gramos absorbida por el bloque durante el ensayo (diferencia de P_1 y P_0); S, es la superficie de la cara del bloque sumergida en centímetros cuadrados; y t, es la duración de inmersión del bloque en minutos.

Ensayo de compresión.

El ensayo de compresión fue ejecutado según lo establecido en la NTC-5324. Para realizar este ensayo fue necesario disponer de los siguientes equipos e instrumentos: Prensa Hidráulica para ensayos de compresión, Mortero de proporción 1:5 (cemento: arena), Balanza con capacidad de 20 Kg y regla graduada. El procedimiento efectuado en la Figura 6 y Tabla 3:

Figura 6. Etapas para los ensayos de laboratorio.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. Descripción del proceso para los ensayos de laboratorio.

Etapa	Descripción
1	Se preparó la mezcla de mortero de proporción 1:5 (Cemento: Arena)
2	La mezcla de mortero fue esparcida en una capa de 5 mm sobre dos caras de los bloques en la posición en la que se recomienda utilizar en obra. Para garantizar el endurecimiento de la mezcla se dejaron almacenados en el laboratorio por un período de 48 horas
3	Conformación de capa de mortero en los bloques de arena comprimida
4	Transcurrido este tiempo, los bloques fueron ubicados en la prensa hidráulica aplicando una velocidad de carga de 0,02 mm/s hasta su rotura

Fuente: Elaboración propia.

Ensayo de abrasión

Este ensayo se encuentra descrito en la NTC-5324. Para su realización fue necesario disponer de los siguientes implementos: Báscula para 20 Kg, precisión de lectura de 5 gramos, Un cepillo metálico en acero con una carga de 3 Kg. El procedimiento efectuado en el ensayo se muestra en la Figura 7 y Tabla 4:

Figura 7. Etapas para los ensayos de laboratorio.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4. Descripción del proceso para los ensayos de laboratorio.

Etapa	Descripción
1	Se pesaron y enumeraron cada uno de los bloques a ensayar, nueve en total, ver figura 20.
2	Cada bloque se ubicó sobre una superficie horizontal. Se colocaba el cepillo sobre el bloque y se realizaban un cepillado a razón de una ida y venida por segundo durante 1 min, sin aplicar fuerzas verticales sobre el cepillo. El ancho del cepillado consistía en el ancho del cepillo
3	Se registró el peso final de los bloques después del ensayo

Fuente: Elaboración propia.

El procedimiento efectuado permitió calcular el coeficiente de abrasión de los bloques a partir de la ecuación 2.

$$C_a = \frac{S}{m_o - m_1} \quad \text{Ec.2.}$$

Donde C_a es el coeficiente de abrasión expresado en cm^2/g , m_o es la masa inicial de los bloques, m_1 es la masa final de los bloques, y S , es el área cepillada de los bloques, en este caso corresponde a 30 cm de longitud de los bloques por 2.6 cm de ancho del cepillo para un total de 78 cm^2 .

Ensayo de erosión a la sombra y a la intemperie

Con el fin de observar el comportamiento de los bloques al estar expuestos a condiciones ambientales diferentes, se ubicaron 3 bloques a la sombra, uno por cada porcentaje de brea asfáltica triturada, y al mismo tiempo, se colocaron 6 bloques a la intemperie, dos por cada porcentaje de brea asfáltica triturada, en un lugar donde recibían la luz del sol, lluvias y demás condiciones del ambiente. De cada conjunto de bloques, a la sombra y a la intemperie, se registró el peso inicial de cada bloque. Fueron sometidos a las condiciones de estudio durante 30 días. Transcurrido este período se registraron los pesos finales de cada bloque.

Resultados

A continuación se describen los resultados obtenidos en cada una de las etapas de la investigación.

Ensayos de caracterización de la arena

En la Tabla 5 se muestran los resultados obtenidos para los dos sectores en estudio, ambos presentan distribuciones granulométricas que cumplen con lo recomendado para la elaboración de estos bloques, sin embargo, en cuanto a los valores de plasticidad, solo la muestra del sector de El Limonal cumple con la normas I.N.V., por lo que se decidió fabricar la totalidad de los bloques con el material de este sector. Los resultados son similares a los reportados por [17], para una zona geológica similar. Por otra parte se observa que los dos sectores donde se obtuvieron las muestras de materia prima presentan unas distribuciones granulométricas que cumplen con lo recomendado para la elaboración de bloques de arena comprimida; sin embargo, en los valores de plasticidad, solo las muestras del sector de El Limonal, cumplen con lo recomendado, al presentar un límite líquido menor a 45% y un índice de plasticidad menor al 18%, por lo que se determinó extraer de este sector el material para la fabricación de los bloques.

Tabla 5. Resultados de los ensayos de caracterización.

Propiedad	Muestra	
	Limonal	Hatillo
Clasificación S.U.C.S	SM	ML
Límite Líquido (%)	32,15	45,68
Límite Plástico (%)	26,04	22,98
Índice de Plasticidad (%)	6,110	22,71
Peso unitario Seco	1,470	1,670
Gravedad específica	2,640	2,650
Agregados finos (%)	47,27	51,11
Arena (%)	50,70	48,43
Gravas (%)	2,080	0,470

Nota: Nótese que también ML, representan limos inorgánicos y arenas finas, limos limpios, arenas finas, limosas o arcillosas, o limos arcillosos con leve plasticidad (Limo arenoso de plasticidad media con Tamaño Máximo de Partícula de 3/8”) y SM, representan arenas limosas con más de 12% de finos pasantes (Arena limosa de plasticidad media con Tamaño Máximo de Partícula de 1/2”) [18].

Fuente: Elaboración propia.

Ensayo de absorción

La NTC-5324 define la clasificación de los bloques de acuerdo al coeficiente de absorción obtenido, de esta manera se determina el coeficiente de absorción (C_b) bajo las siguientes consideraciones: $C_b \leq 20$ y $20 > C_b \leq 40$ son bloques débilmente capilares y poco capilares, respectivamente. Teniendo en cuenta lo anterior, los bloques BTC ensayados corresponden en su totalidad a la descripción de bloques débilmente capilares, ya que poseen un coeficiente menor a 20. El ensayo consistió en sumergir parcialmente los bloques secados previamente durante 10 min, para un área de superficie sumergida de 300 cm² en promedio para los

bloques, posteriormente se registraron las variaciones de peso como se muestra en la Tabla 6. Nótese que se presenta la desviación estándar de los resultados para garantizar la validez estadística de los resultados acorde con las normas técnicas colombianas.

Tabla 6. Resultados ensayo de absorción en los bloques de arena comprimida BTC.

Brea asfáltica triturada (%)	Peso Seco (gr)	Peso Inicial Po (gr)	Peso final P1 (Kg)	Masa absorbida (gr)	Coficiente de absorción (Cb)
3	5513.33±165.1	5921.67±98.6	5654.67±170.0	141.33±5.1	14.9±0.56
6	5393.67±42.5	5823.33±28.8	5547.67±53.7	154.00±12.7	16.17±1.24
9	5371.00±75.6	5773.33±76.8	5501.67±75.2	130.67±6.6	13.8±0.72

Fuente: Elaboración propia.

Dado que el coeficiente de absorción indica la capacidad del bloque de absorber humedad, se busca que este valor sea lo más bajo posible para garantizar su peso y estabilidad, por tanto, los resultados de la tabla 6 muestran que los bloques que presentan mejor comportamiento ante el agua son los que tienen una adición del 9% de brea asfáltica triturada.

Ensayo de compresión

Los bloques fueron ensayados en una prensa hidráulica aplicando una velocidad de carga de 0,02 mm/s hasta su rotura, para bloques con 75 de envejecimiento. La Tabla 7 muestra los resultados obtenidos en el ensayo de compresión para cada uno de los porcentajes de reciclado de asfalto triturado.

Tabla 7. Resultados ensayo de capacidad de carga.

Brea asfáltica triturada (%)	Resistencia mecánica a la compresión (MPa)
3	0.6297±0.033
6	0.726±0.070
9	0.635±0.078

Fuente: Elaboración propia.

Según la NTC 5324, respecto a la capacidad de carga, los resultados sugieren que ninguno de los bloques ensayados cumple con los mínimos requerimientos de capacidad de carga; sin embargo, y teniendo en cuenta que su finalidad no es estructural, pueden ser considerados como elementos divisorios no estructurales; la Tabla 8 presenta estos resultados.

Tabla 8. Clasificación de los bloques de acuerdo a su capacidad de carga.

Bloque	BSC 20	BSC 40	BSC 60
Capacidad de carga mínima, en MPa	2	4	6

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a los resultados de la Tabla 7, y la clasificación de la Tabla 8, se evidencia que ninguno de los bloques ensayados cumple con los mínimos requerimientos de resistencia a la compresión [19]. Aunque la función de estos bloques es servir de elementos divisorios no estructurales, el cumplir con los requerimientos establecidos en la NTC-5324 es indispensable para ser considerados como adecuados

para su uso en construcciones. Por tal motivo, se decidió realizar dos ensayos diferentes para determinar la durabilidad y/o erosión de los bloques. El primero de ellos fue el ensayo de abrasión establecido en la NTC 5324. El segundo fue un ensayo de erosión a la sombra y a la intemperie para observar la variación de humedad que presentan los bloques al estar expuestos a estas condiciones.

Ensayos de durabilidad y erosión

Para esto se realizaron ensayos de abrasión, así como ensayos de erosión a la sombra y a la intemperie, para garantizar condiciones reales de los bloques.

Ensayo de abrasión

El ensayo consistió en realizar movimientos horizontales de ida y vuelta, con un cepillo de aproximadamente 3 Kg sobre una de las caras del bloque BTC durante 60 s en un área de aproximadamente 78 cm²; cabe resaltar que no fueron aplicadas cargas verticales al cepillo. Asimismo, se tuvieron en cuenta los resultados de la Tabla 6, y los valores de coeficiente de abrasión se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9. Resultados ensayo de abrasión.

Porcentaje de Reciclado de asfalto triturado (%)	Coefficiente de abrasión promedio
3	4.06±1.05
6	4.76±0.75
9	7.13±0.65

Fuente: Elaboración propia.

La abrasión indica el desgaste que produce en los bloques el rozamiento mecánico, dado que un mayor coeficiente de abrasión indica una mayor resistencia del material para ser removido por fuerzas actuantes en el medio, se evidencia que los bloques que presentan mejor comportamiento son aquellos con 9% de brea asfáltica triturada.

Ensayo de erosión a la sombra y a la intemperie

El ensayo consistió en someter a un conjunto de bloques a condiciones de sombra y a otro conjunto a condiciones de intemperie (recibían la luz del sol y las lluvias) durante 30 días. Se registró el peso inicial y final de cada bloque, para luego calcular la variación en peso. En la Tabla 10 se muestran las variaciones de humedad registradas para los conjuntos de bloques.

Tabla 10. Resultados para el ensayo de erosión a la sombra y la intemperie.

Porcentaje de Reciclado de asfalto triturado (%)	Variación de humedad erosión a la sombra (%)	Variación de humedad erosión a la intemperie (%)
3	2.89	3.98
6	1.79	4.64
9	1.20	2.89

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de ambos ensayos de erosión muestran que los bloques son susceptibles a las variaciones de humedad del ambiente, siendo los bloques con 9% de reciclado de asfalto triturado los que presentan menor cambio en el peso, es decir, absorben menos humedad. Respecto al desgaste, los bloques no presentaron alteraciones al estar expuestos a la intemperie. Tampoco se observó cambios en cuanto a su forma, textura o color, siendo el cambio de peso, debido a la absorción de aguas lluvias, la única diferencia entre los bloques a la sombra y aquellos expuestos a la intemperie.

En las Tablas 11 muestra las variaciones de humedad presentadas en el ensayo de erosión a la sombra y a la intemperie, respectivamente.

Tabla 11. Resultados ensayo de erosión a la sombra e intemperie.

Brea asfáltica triturada (%)	Peso Inicial Po (gr)	Peso final P1 (Kg)	Masa absorbida (gr)	Variación de humedad (%)
A la sombra				
3	5545	5705	160	2.89
6	5600	5700	100	1.79
9	5420	5485	65	1.2
A la intemperie				
3	5537	5757	220	3.975
6	5515	5770	255	4.63
9	5537	5697	160	2.89

Fuente: Elaboración propia.

De lo anterior se evidencia que los bloques BTC son susceptibles a las variaciones de humedad del ambiente, ya que expuestos a la intemperie tienden a absorber la humedad presente, siendo los bloques con 9% de breas asfálticas trituradas los que presentan menor variación en peso.

Comparación de costos

Comparar los costos de ejecución de un BTC con dimensiones 15×10×30 cm impermeabilizado respecto a un ladrillo común de la zona

En la ciudad de Ocaña, Norte de Santander, es común la utilización de ladrillos de arcilla como elementos de mampostería de las edificaciones, siendo los ladrillos huecos, como el ilustrado en la Figura 8, los más demandados [20].

Figura 8. Bloque de arcilla hueco.



Fuente: [21,22].

Con el fin de analizar las diferencias en el coste directo de producción de los bloques de arena comprimida BTC, respecto a los ladrillos convencionales.

Costo de los bloques de arena comprimida

Para el análisis de costos de los bloques, se estimaron los valores unitarios de los materiales en el mercado. Posteriormente, teniendo en cuenta las cantidades a utilizar por cada uno de los bloques, se obtuvieron los costos mostrados en la Tabla 12.

Tabla 12. Valor unitario BTC con brea asfáltica triturada en diferentes porcentajes.

Material	Unidad	Valor unitario	Total					
			Cantidad Utilizada Brea asfáltica triturada					
			3%		6%		9%	
Cemento	Kg	\$600	0.58	\$348	0.58	\$348	0.58	\$348
Brea asfáltica	Kg	\$5,000	0.174	\$870	0.348	\$1,740	0.522	\$2,610
Tierra	Kg	\$100	4.292	\$429	4.118	\$412	3.944	\$394
Agua	Lt	\$3	0.754	\$2	0.754	\$2	0.754	\$2
Total				\$1.649	-	\$2,502	-	\$3,355

Fuente: Elaboración propia.

De la Tabla 19 se observa que la brea asfáltica triturada BAT representa el material con el mayor costo económico en la fabricación de los bloques. Las dimensiones y los precios comerciales de los 3 bloques de arcilla más empleados en la ciudad de Ocaña, varían de acuerdo al tamaño con dimensiones de 10×20×30, 9×15×28 y 7×12×25 cm con valores de \$800, \$600 y \$300 pesos colombianos (los precios fueron consultados en el mes de julio del 2020), donde se evidencia que el costo está relacionado directamente con las dimensiones, y los aumentos de inflación por año.

Comparando los precios de los bloques de arena comprimida respecto a los precios de los bloques comerciales más demandados en la ciudad de Ocaña (Tabla 12), se observa que todos los BTC fabricados tienen un mayor costo. En la ciudad de Ocaña, Norte de Santander, es frecuente la utilización de ladrillos de arcilla, siendo los bloques perforados (tipo H-10) los más comunes. Por otra parte, los precios unitarios de estos ladrillos y los precios unitarios de los bloques de arena comprimida con adición de reciclado de asfalto triturado (RAT). Los bloques de arena comprimida BTC con adición de brea asfáltica triturada fabricados en esta investigación son de 2 a 11 veces más costosos que los bloques de arcilla más comerciales en la ciudad de Ocaña, por lo que no representarían una competencia para los bloques comerciales. Sin embargo, al ser ecológicos y no requerir la utilización de hornos, representan un ahorro indirecto, además de ser útiles en proyectos de autoconstrucción, no requerir de personal especializado y permitir la reutilización del suelo.

Conclusiones

En la ciudad donde fue seleccionada la materia prima (Ocaña, Colombia), existen suelos (arena) con las características de granulometría necesarias para ser utilizados para la fabricación de bloques de arena comprimida BTC. Sin embargo, se presentan variaciones en cuanto a lo recomendado para los límites de consistencia o plasticidad, siendo esta característica decisiva para seleccionar el material a emplear.

Finalmente, se puede afirmar que los bloques de arena comprimida (BTC) con adición de reciclaje de asfalto triturado, aportan al medio ambiente y a la sociedad al no generar emisiones de gases por la quema en hornos y al convirtiéndose en una alternativa sostenible a tener en cuenta por la comunidad. Ninguno de los bloques de arena comprimida cumplió con los mínimos requerimientos de resistencia a la compresión, por lo que no corresponden a las clasificaciones dadas en la NTC-5324, sin embargo, al ser elementos netamente divisorios, pueden ser considerados en proyectos que promuevan la sostenibilidad en el sector de la construcción.

Los bloques de arena comprimida con adición del 9% de brea asfáltica triturada presentaron el mejor coeficiente de absorción, es decir, absorben menor cantidad de agua por lo que son más estables ante condiciones en las que se presenten cambios considerables de humedad en el ambiente. Todos los bloques estudiados correspondieron según la clasificación de la NTC-5324, a bloques débilmente capilares. En lo referente a durabilidad y erosión, los dos aspectos estudiados: abrasión y erosión a la sombra y a la intemperie indican que los bloques con 9% de brea asfáltica triturada presentan los mejores resultados, ya que son más resistentes a la abrasión con un coeficiente entre 6.5 y 7.8 %; por lo que se requiere mayor fuerza en el medio para remover sus partículas, a la vez que absorben la menor cantidad de agua del ambiente (entre el 2,72% y 3,06% de su peso seco).

En Colombia no existe una normativa específica para los bloques de arena comprimida BTC, por lo que se hace necesario realizar los ensayos descritos en la NTC-5324, considerando que es una norma técnica colombiana válida para este tipo de productos base arcilla. Los bloques de arena comprimida BTC con adición de brea asfáltica triturada fabricados en esta investigación, no son adecuados para ser utilizados en construcción de edificaciones, ya que no cumplen con los mínimos requerimientos de resistencia a la compresión, además de resultar económicamente inviables debido a su alto precio comparado con otro tipo de bloques comerciales, sin embargo, también permiten reducir costos al no requerir equipos avanzados ni personal especializado, además de no generar emisiones de gases por la quema en los hornos, ayudando de esta forma al medio ambiente, y convirtiéndose así en una alternativa sostenible.

El análisis económico muestra que los bloques de arena comprimida BTC con adición de brea asfáltica triturada fabricados en esta investigación son de 2 a 11 veces más costosos que los bloques de arcilla más comerciales en la ciudad de Ocaña, por lo que no representarían una competencia para los bloques comerciales, siendo los bloques con 9% de brea asfáltica triturada los más costosos.

Referencias bibliográficas

1. V. Escobar Galvis, C., León Gómez, J. S., & Salazar Bedoya, “Bloques de tierra comprimida con adición de residuos de concreto y cemento como solución sostenible para la construcción de muros no estructurales,” Tesis doctoral, Universidad Libre Seccional Pereira. Colombia. 2016.
2. R. Salvador, R. Gutiérrez, J. Adán, and E. Mújica, “Bloques de Tierra Comprimida adicionados con fibras naturales,” Plaza y Valdez Ediciones. Ciudad de México, México. 2012.
3. R. A. García-León, C. Acevedo-Peñaloza, and J. P. Rojas-Suarez, *Metodología para la fabricación del bloque H-10 para la industria cerámica de Norte de Santander*, ECOE Ediciones. Bogotá-Colombia, 2019.
4. P. J. Mejía Pacheco, “Bloques de tierra comprimida con agregados de residuos de construcción y demolición como sustitución de los agregados tradicionales en la ciudad de Saraguro, Loja, Ecuador.” Tesis de Maestría Universidad de Cuenca. Ecuador. 2018.

5. R. Vallés., "Arquitectura con tierra: Bio-construcción en cooperativas de viviendas por ayuda mútua," Tesis de maestría, Instituto de Arte Americano, Centro de Investigación Hábitat y Energía, Buenos Aires, Argentina, 2014.
6. A. Vásquez Hernández, L. F. Botero Botero, and D. Carvajal Arango, "Fabricación de bloques de tierra comprimida con adición de residuos de construcción y demolición como reemplazo del agregado pétreo convencional," *Ingeniería y Ciencia*, vol. 11, no. 21, pp. 197–220, 2015, doi: <https://doi.org/10.17230/ingciencia.11.21.10>.
7. J. Hernández, "Construcción con tierra: Análisis, conservación y mejora. Un caso práctico en Senegal.," Tesis de Maestría Universidad Politécnica de Cataluña, 2016.
8. J. J. Falceto, "Durabilidad de los bloques de tierra comprimida. Evaluación y recomendaciones para la normalización de los ensayos de erosión y absorción.," *Tesis Dr. Universidad Politécnica Madrid*, vol. 800, pp. 1–5, 2012.
9. H. D. Cañola, A. Builes-Jaramillo, C. A. Medina, and G. E. González-Castañeda, "Bloques de Tierra Comprimida (BTC) con aditivos bituminosos," *TecnoLógicas*, vol. 21, no. 43, pp. 135–145, Feb. 2018, [Online]. Available: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=344256704009>.
10. J. Seisdedos, "Unidad de producción de bloques de tierra comprimida - BTC," in *Arquitectura construida en tierra, Tradición e Innovación. Congresos de Arquitectura de Tierra en Cuenca de Campos 2004/2009*, 2010, pp. 289–294, [Online]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4473555>.
11. K. T. Medina Arteaga, O. H. Medina, and O. J. Gutiérrez Junco, "Bloque de tierra comprimida como material constructivo," *Revista Facultad de Ingenierías UPTC*, vol. 20, no. 31, pp. 55–68, 2011.
12. R. A. García-León, E. Flórez, and M. A. Acosta, "Análisis estructural de una máquina prensadora para producción de ladrillo macizo para las pequeñas industrias artesanales de materiales cerámicos en Ocaña Norte de Santander y en la región," *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, vol. 1, no. 25, pp. 104–109, 2015, doi: <https://doi.org/10.24054/16927257.v25.n25.2015.2360>.
13. J. T. CORRAL, "Construcción (Ground-Cement as a construction material) José Toirac Corral *," *Ciencia y Sociedad*, vol. XXXIII, p. 53, 2008.
14. J. T. Corral, "El suelo-cemento como material de construcción," *Ciencia y Sociedad*, vol. 33, pp. 520–571, 2008.
15. B. Yuste, "Arquitectura de tierra: caracterización de los tipos edificatorios," Workingpaper. Universidad Politécnica de Cataluña, España. 2018.
16. C. Neves and O. Borges, "Técnicas de construcción con tierra," Bauru, SP: FEB-UNESP/PROTERRA, 2011. Disponible en <<http://www.redproterra.org>>
17. R. A. García-León, J. Gomez Camperos, and H. Y. Jaramillo, "Physical, chemical and thermal characterization of a Colombian clay," *International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering*, vol. 20, no. 05, pp. 225–234, 2020.
18. R. A. García-León, E. Flórez-Solano, and Y. Medina-Cárdenas, "Caracterización física de las arcillas utilizadas en la fabricación de productos de mampostería para la construcción en Ocaña Norte de Santander (Colombia)," *Revista. Espacios.*, vol. 39, no. 53, pp. 1–6, 2018.
19. N. Afanador, A. Carolina, I. Jaime, C. Alberto, and L. Durán, "Caracterización de arcillas empleadas en pasta cerámica para la elaboración de ladrillos en la zona de Ocaña, Norte de Santander," *Epsilon*, vol. 20, no. 1, pp. 101–119, 2013.
20. K. Polo Bornachera., D.D. López Juvinao, and A. Henríquez Jaramillo, "Transferencia tecnológica para la producción limpia en la minería de materiales aluviales en La Guajira, Colombia," *Investigación e*

- Innovación en Ingenierías ., vol. 8, pp. 6–20, 2020. DOI: <https://doi.org/10.17081/invinno.8.1.3535>
21. R. A. García-León, R. Bolívar-León, and E. Flórez-Solano, “Validación de las propiedades físico-mecánicas de bloques H-10 fabricados en Ocaña Norte de Santander y la región,” *Ingenio UFPSO*, vol. 10, no. 2011–642X, pp. 17–26, 2016, doi: <https://doi.org/10.22463/2011642X.2075>.
 22. S. Rozo, J. Sánchez, and D. Álvarez, “Propiedades físico mecánicas de bloques H10 fabricados en el área metropolitana de Cúcuta,” *Ciencia e Ingeniería. Neogranadina*, vol. 24, no. 1, pp. 67–78, 2014, doi: <https://doi.org/10.18359/rcin.8>.