

11. Estabilización de mezclas de tierra para la elaboración de BTC



MARCO ANTONIO NAVARRETE SERAS*

HUGO LUIS CHÁVEZ GARCÍA**

JORGE ALBERTO BORREGO PÉREZ***

JOSÉ ALBERTO GUZMÁN TORRES****

LUIS ALBERTO GONZÁLEZ LUNA*****

WILFRIDO MARTÍNEZ MOLINA*****

DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.300.11>

Resumen

En esta investigación se estudiaron mezclas de tierra estabilizadas con arena triturada, cal y cemento para elaborar bloques de tierra comprimida (BTC). Las características de las mezclas fueron mejoradas durante su proceso de elaboración, variando los porcentajes de estabilizantes, comprimiéndose a través de un proceso manual. Usualmente, este material es utilizado en muros de carga donde se sustituye el ladrillo convencional. El uso de estos bloques ayuda a reducir la contaminación al medioambiente, impactando directamente en la emisión del CO_2 . En comunidades cercanas a la región Morelia es viable utilizar este tipo de bloques debido a que se cuen-

* Doctor en Ciencias de la Ingeniería Física. Profesor-investigador en la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4582-9387>; correo electrónico: mnavarrete@umich.mx

** Doctor en Ciencias. Profesor-investigador en la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6114-4900>

*** Doctor en Ciencias Fisicomatemáticas con orientación en Nanociencias. Investigador estatal de Michoacán, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6302-1958>

**** Doctor en Ingeniería Física. Investigador estatal de Michoacán, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9309-9390>

***** Maestro en Ciencias en Ingeniería Ambiental. Adscrito a la Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-2085-2504>

***** Doctor en Ingeniería. Investigador en la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3301-4949>

ta con la materia prima necesaria para la elaboración de estos bloques. Además, con el uso de este material local se contribuye a la activación de la economía circular de la zona. Se realizaron pruebas de mecánica de suelos, clasificación del tipo de suelo, granulometría y pruebas no destructivas que permitieron comparar y clasificar las mezclas en estudio. Durante la investigación, se comparó tres tipos de materiales, ubicados en las zonas de Ajuño, Erongaricuario y Santiago Undameo. Para esta investigación, las mezclas que se ajustaron a estándares de apariencia y maleabilidad para la elaboración de BTC con mejores propiedades fueron las seleccionadas.

Palabras clave: *BTC, tierra estabilizada, bloques, contaminación, economía circular, mecánica de suelos, pruebas no destructivas.*

Introducción

Los materiales de tierra se han utilizado en la construcción de ingeniería civil en todo el mundo con diferentes formas, como el barro, el adobe, la tierra apisonada y los ladrillos (Malkanthi et al., 2021). La estabilización de bloques de tierra comprimida es un proceso fundamental para incentivar el uso de la tierra como material de construcción e implica acciones químicas, físicas y mecánicas. Así se dispone de estabilizadores químicos: cal apagada o cal viva y, además, la estabilización física, que implica la mezcla de suelos y uso de fibras de refuerzo (Galarza-Viera et al., 2022). El objetivo del BTC es obtener una alternativa de construcción en muros de vivienda, ya que en los últimos años se ha contribuido con las emisiones de CO² al medioambiente, elemento contaminante que es producto de la fabricación de diferentes materiales de construcción. Los bloques de tierra comprimida estabilizada muestran un impacto ambiental significativamente menor que los bloques convencionales de concreto, debido al uso reducido de cemento y la adopción de suelos locales como materia prima (Arduin et al., 2022).

Dentro de los alcances de esta investigación se logró estabilizar tres tipos de suelos diferentes utilizando arena triturada, cal y cemento. Dentro de la metodología empleada se requiere el estudio de las propiedades índice de

cada suelo para su posterior estabilización. Los bloques de tierra comprimida (BTC) resultan ser una alternativa amigable con el medioambiente y una oportunidad para construir vivienda sostenible.

Desarrollo del trabajo

Metodología

De acuerdo con la norma NMX-C-508-ONNCCE (2015), el bloque de tierra comprimida (BTC) se define como un elemento constructivo empleado en la edificación de muros de carga, divisorios y bóvedas. Este tipo de bloque presenta, por lo general, una forma prismática y compatibilidad geométrica entre unidades. Su elaboración se realiza mediante un proceso de compresión estática o dinámica de una mezcla de tierra húmeda y materiales estabilizantes, seguido de un desmoldeo posterior.

Existen diferentes investigaciones que han estudiado el suelo con diferentes adiciones que mejoran sus características físico-mecánicas: (Laguna-Torres et al., 2024) demostraron la importancia de las propiedades físicas, químicas y mineralógicas en la selección de suelos estabilizados con puzolana natural activada (PNA). Se identificaron cinco bancos de suelos y se seleccionaron dos: B1Z por su contenido en SiO_2 y la presencia de Montmorillonita y B3M por su granulometría y plasticidad. Se midió la conductividad eléctrica (CE) para controlar la reactividad probando dos estabilizantes, ANP y cal, caracterización mecánica de bloques de tierra comprimida (CEB) estabilizados con cemento reciclado termoactivado (RC) como una alternativa más sostenible al cemento Portland ordinario (OPC). Se encontró que el CR mostró un alto potencial como alternativa ecoeficiente al OPC en la estabilización de tierras (Bogas et al., 2023). Guillén et al. (2021) obtuvieron resultados que describen un notable mejoramiento en el comportamiento de la tierra como bloque comprimido cuando se realiza el ajuste granulométrico. Con la mezcla diseñada se incrementó la resistencia del BTC de 32.5 kg/cm^2 a 54.75 kg/cm^2 al ajustar el porcentaje de agua y presión nominal de elaboración. Cabrera et al. (2020) estudiaron BTC producidos por establecimientos de Argentina, confeccionaron probetas con diferentes geometrías y

determinaron su resistencia a compresión, cabeceándolos con placas de neopreno y sin cabecear. Los resultados obtenidos indican que la probeta más adecuada para determinar la resistencia a compresión no confinada en BTC es un bloque entero o medio bloque, ambos en posición horizontal y sin cabeceado alguno. Contrastaron una serie de BTC sometidos a ensayos de compresión con las normas brasileñas, colombianas y las mexicanas, con suelos arcillosos de la región, identificando las desviaciones entre los resultados y sus posibles causas. (Aranda-Jiménez et al., 2023) observaron que el procedimiento de ensayo de compresión varía para cada norma, siendo similares las normas brasileña y colombiana, y estas, a su vez, se apegan más al sistema constructivo, mientras que con la norma mexicana los resultados son superiores a la anterior ya que la norma exige ensayar el bloque completo.

En esta investigación se seleccionaron tres tipos de suelos ubicados en tres diferentes sitios: Ajuno y Erongaricuaró, ubicados en la zona lacustre del Lago de Pátzcuaro, y Santiago Undameo, ubicado en las cercanías de Morelia, todos ellos en el estado de Michoacán, México. También se seleccionó el banco de materiales triturados AGC, que se encuentra en la ciudad de Morelia, del cual se obtuvo arena triturada que se adiciona a la mezcla de BTC.

Las proporciones en masa utilizadas para elaborar los bloques fueron 55 % de suelo, 30 % de arena triturada, 10 % de cemento Portland y 5 % de cal. Previo a la elaboración de los bloques se realizó la prueba de compactación Proctor estándar variante A. Posteriormente se realizaron en promedio 15 bloques por cada tipo de suelo, y fueron seleccionados cinco bloques de cada tipo con la finalidad de cortarlos con la máquina de corte en cubos de 8 cm · 8 cm · 8 cm. Los cubos sirvieron para obtener la prueba no destructiva de resistividad eléctrica.

A continuación, se detalla cada una de las pruebas que son necesarias para clasificar y caracterizar el suelo antes de elaborar los BTC.

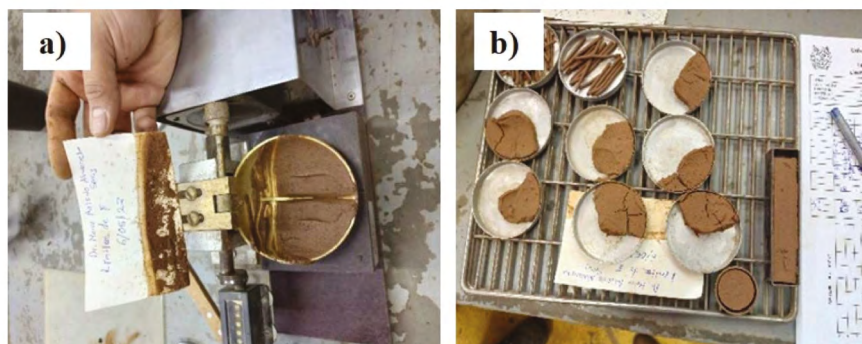
Límites de consistencia y clasificación SUCS

Para realizar esta prueba se utilizó la norma NMX-C-493-ONNCE que establece los procedimientos para determinar la plasticidad de la muestra de

suelo que pasa la malla 0.425 (No. 40), por medio del límite líquido (figura 1a), límite plástico y el índice de plasticidad. Esta norma también indica que el estado líquido es aquel en el que exhibe propiedades y apariencia de una suspensión, el estado semilíquido es aquel que exhibe propiedades de un fluido viscoso, el estado plástico es aquel en el que se puede moldear y deformar, el estado semisólido es aquel que tiene la apariencia de un sólido, pero aun disminuye su volumen si se sigue secado y el estado sólido es aquel en el que el suelo ya no varía al secarse. El límite líquido: el contenido de agua, en porcentaje, de un suelo en la frontera definida convencionalmente entre el estado semilíquido y el estado plástico. Límite plástico: el contenido de agua, en porcentaje, de un suelo en la frontera definida convencionalmente entre el estado plástico y el estado semilíquido. Plasticidad: es la propiedad de un material por la cual es capaz de soportar deformaciones rápidas, sin rebote elástico, sin variación volumétrica apreciable y sin desmoronarse y agrietarse (NMX-C-493-ONNCCE-2018). El límite plástico en el suelo se define como el mínimo contenido de agua de la fracción que pasa la malla número 0.425 (N° 40), para que se puedan formar con ella rollos de 3 mm, sin que se rompan o se desmoronen. Para obtener el contenido de humedad se requiere una muestra de 10 g obtenida una vez que se registran el número de golpes necesarios para que los bordes inferiores de la ranura se pongan en contacto en una longitud de 13 mm; aunado a lo anterior, se obtuvo la contracción lineal y contracción volumétrica del suelo (figura 1b).

Para la clasificación del suelo se utilizó la norma NMX-C-526-ONNCCE-2017, que establece el procedimiento para clasificar los materiales para terracerías, que pueden ser fragmentos de roca o suelos, mediante pruebas índice. Estas pruebas permiten estimar algunas de las propiedades físicas y mecánicas del material y, con base en estas determinar su tipo de acuerdo con un sistema de fragmentos de roca y suelos previamente definido. La misma norma describe los procedimientos para clasificar los suelos para propósitos de ingeniería basada en la determinación en el laboratorio de las características granulométricas, límite líquido e índice plástico (NMX-C-526-ONNCCE-2017).

Figura 1. a) *Copa de Casagrande para determinar el límite líquido de un suelo y b) rollos de suelo para determinar el límite plástico, muestras para determinación de agua, contracción lineal y contracción volumétrica*



Fuente: elaboración propia.

Prueba granulométrica

La composición granulométrica de cada tipo de suelo es diferente, por lo que además de su composición mineralógica influye en la elaboración de BTC. La prueba se realizó según lo establecido en la norma NMX-C-496-ONNCCCE-2014. Material y equipo: juego de mallas (N° 4, 10, 20, 40, 60, 100 y 200 y ensamblar en este mismo orden), agitador de mallas, charolas, vaso metálico, cepillo de cerdas, balanza con aproximación 0.1 g y horno.

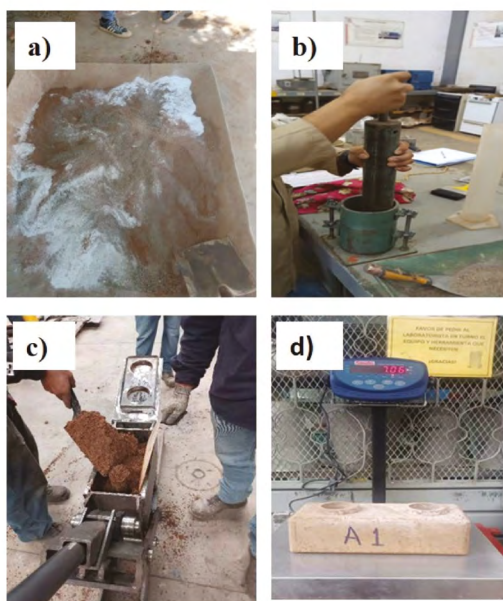
Prueba de compactación dinámica estándar y elaboración de BTC

La prueba de compactación dinámica estándar se realizó mediante la norma NMX-C-476-ONNCCCE, ensayo de compactación dinámica estándar y modificada. En este caso se utilizó el ensayo estándar para determinar, mediante la curva de compactación, la masa volumétrica seca máxima y el contenido óptimo de los materiales térreos. La masa volumétrica seca máxima es la mayor relación de la masa entre volumen que se obtiene en un material con el contenido de humedad óptimo al reducir al mínimo los vacíos entre sus partículas sólidas al aplicar mecánicamente una energía específica de

compactación (NMX-C-476-ONNCCE2019). La importancia de la compactación en los suelos estriba en el aumento de resistencia y disminución de capacidad de deformación que se obtienen al sujetar el suelo a técnicas convenientes que aumenten su peso específico seco, disminuyendo sus vacíos (Juárez y Rico, 2005). Cada prueba, según su tipo, se realizará compactando el material con el pisón; y el número de golpes para este caso en particular se utilizó la variante A, que se aplica a materiales que pasan la malla N° 4 (4.75 mm) y se compactan en el molde de 101.6 mm de diámetro interior. Se llena el molde en tres capas cada una con 25 golpes.

Respecto a la elaboración de los BTC se utilizó la norma (NMX-C-508-ONNCCE-2015), además de la clasificación del suelo, límites de consistencia y análisis granulométrico, se realizó la prueba de compactación para determinar la humedad óptima de humedad a utilizar. En dicha prueba se realizaron mezclas con arena triturada, cemento y cal en los porcentajes señalados con anterioridad (figura 2a). Cada mezcla con los tres tipos de

Figura 2. a) Mezcla del suelos con estabilizantes, b) prueba de compactación dinámica estándar, c) elaboración de BTC con la máquina CETA-RAM II y d) bloque de tierra comprimida con suelo de



Fuente: elaboración propia.

suelo fueron mezclados y se agregó con diferentes porcentajes de agua potable para obtener la masa volumétrica seca máxima (figura 2b) que permitió la máxima compactación del material.

Posteriormente se procedió a verter el suelo con la humedad óptima en la máquina CETA-RAM, que es una prensa portátil, de operación manual, concebida para fabricar bloques huecos de suelo-cemento para construcción (figuras 2a y b), finalmente se cubrieron los BTC con bolsas de plástico durante 28 días con la intención que con su propia humedad se curaran los bloques, debido a que el cemento y la cal reaccionan con el suelo.

Resistividad eléctrica

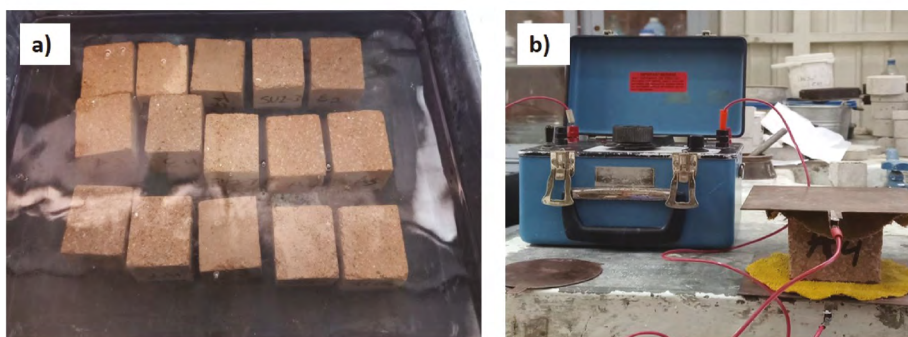
El objetivo de este ensayo es determinar la resistividad eléctrica del concreto en campo o en el laboratorio. La resistividad eléctrica es una propiedad de cada material y corresponde al recíproco de su conductividad; su unidad de medida es el ohm-cm u ohm-m. Depende en gran proporción del grado de saturación de los poros del concreto y en menor grado de la hidratación de la pasta y de la presencia de sales disueltas en la fase acuosa. Es función de variables tales como el tipo de cemento, las adiciones inorgánicas, la relación agua/cemento, la porosidad de la estructura, entre otras (DURAR, 1997). Las muestras se dejaron saturando en agua durante 24 horas, ya que esta prueba se debe realizar en muestras saturadas.

La resistividad es una de las magnitudes físicas con mayor variación para diversos materiales y, por supuesto, para los suelos. Su valor depende de diversos factores, como temperatura, humedad o presión, relación de vacíos, peso volumétrico, etc. En un medio conductor homogéneo e isótropo, el valor de la resistencia en cualquier punto es igual. Sin embargo, el suelo es un medio heterogéneo y anisótropo, por tanto, es de esperarse que los valores de resistividad dependan de varios factores. Se pueden mencionar los siguientes: naturaleza del tipo de suelo o material, humedad, temperatura, concentración de sales disueltas, estratigrafía, variaciones estacionales y compactación (Natalia et al., 2010).

El procedimiento se realizó según la norma NMX-C-514-ONNCCE-2016); esta norma está diseñada para concretos y no para BTC o adobes.

Se utilizó el equipo Soil Resistance Meter, Nilsson Electrical Laboratory Inc. Modelo 400 y los especímenes cúbicos de $8 \cdot 8 \cdot 8$ cm. Una descripción gráfica de este proceso se puede apreciar a continuación (figura 3).

Figura 3. a) Saturación en agua de las muestras cúbicas de BTC durante 24 horas y b) prueba de resistividad eléctrica de las muestras saturadas



Fuente: elaboración propia.

Discusiones y resultados

En la tabla 1 se muestran los límites de consistencia para cada tipo de suelo en su estado natural. Se debe observar que el comportamiento del suelo de Erongaricuario y Ajuno tienen valores muy similares en cuanto al límite líquido y límite plástico. Sin embargo, el índice plástico es más grande para el suelo de Erongaricuario. El suelo de Erongaricuario presenta mayor contracción lineal y volumétrica que el suelo de Ajuno. Es importante mencionar que ambos se clasifican como limos de baja compresibilidad. Para el suelo de Santiago Undameo tanto el límite líquido, límite plástico resultan ser menores que los suelos de Erongaricuario y Ajuno. El límite plástico y la contracción lineal son mayores, pero la contracción volumétrica menor comparado con los suelos de Erongaricuario y Ajuno. El suelo de Santiago Undameo se clasifica como arcilla de baja plasticidad.

Tabla 1. Límites de consistencia

Límites de consistencia, contracción lineal y clasificación SUCS	Ajuno (A)	Erongaricuario (E)	Santiago Undameo (SU)
Límite líquido (LL),%	49.9	48.78	34.46
Límite plástico (LP), %	33.33	31.25	14.00
Índice plástico (IP), %	11.57	17.53	20.26
Contracción lineal (CL), %	7.00	7.65	8.67
Contracción volumétrica (CV), %	47.61	58.97	36.84

Fuente: elaboración propia.

Los límites de los tamaños de las partículas que constituyen un suelo ofrecen un criterio obvio para una clasificación descriptiva del mismo. Con el advenimiento de la técnica del cribado, fue posible efectuar el trazo de curvas granulométricas, contando con agrupaciones de las partículas del suelo en mayor número de tamaños diferentes. Actualmente se pueden ampliar notablemente las curvas en los tamaños finos, gracias a la aplicación de técnicas de análisis de suspensiones. Según la clasificación internacional los suelos se pueden clasificar de acuerdo con la tabla 2 (Juárez y Rico, 2005). Para este caso en estudio los suelos se clasifican como gruesos debido a que más del 50 % de las partículas de la fracción gruesa tienen tamaño mayor que 0.075 mm (malla N°. 200) (M.MMP.1.02/03, 2003).

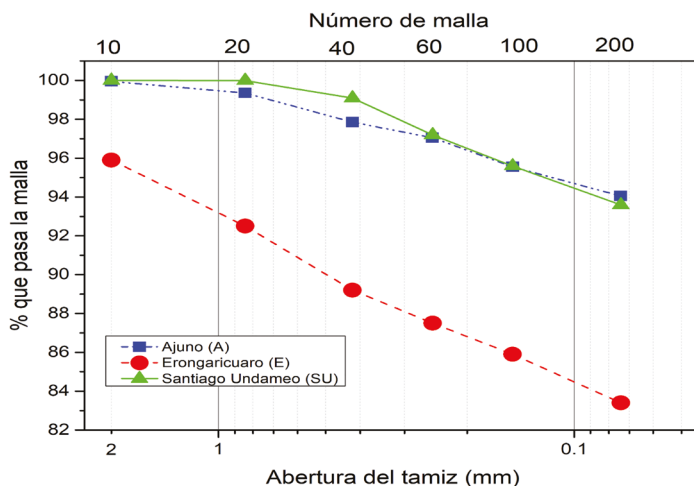
Tabla 2. Clasificación internacional

2	0.2	0.02	0.002	0.0002	
	Arena gruesa	Arena fina	Limo	Arcilla	Ultra-Arcilla (coloides)

En la figura 4 se observan las curvas granulométricas de los suelos de Ajuno, Santiago Undameo y Erongaricuario. Los primeros tienen una composición granulométrica muy parecida, sin embargo, el suelo de Erongaricuario presenta mayor porcentaje retenido de arena.

El problema de la identificación de suelos es de importancia fundamental en la ingeniería; identificar un suelo es, en rigor, encasillarlo dentro de un sistema previo de clasificación. Es colocarlo en alguno de los grupos del sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS). La identificación permite conocer en forma cualitativa, las propiedades mecánicas e hidráulicas del suelo, atribuyéndole las del grupo en que se sitúe; naturalmente, la

Figura 4. *Curvas granulométricas para los suelos de Santiago Erongaricuario, Ajuno y Santiago Undameo*



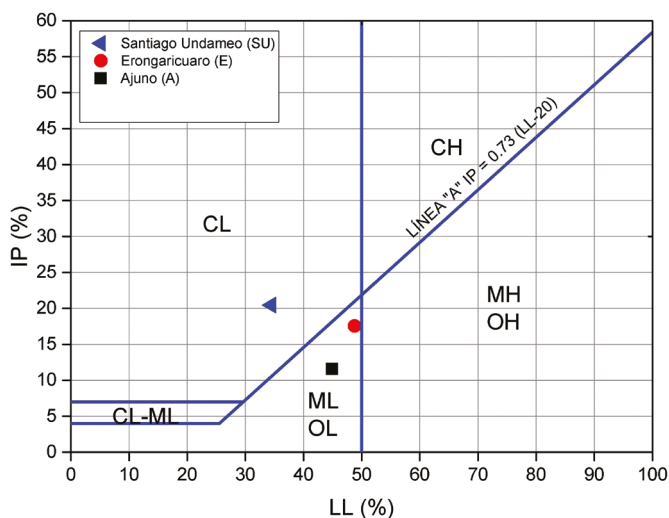
Fuente: elaboración propia.

experiencia juega un papel importante en la utilidad que se pueda sacar de la clasificación (Juárez y Rico, 2005).

El suelo fino se clasifica como limo cuando su límite líquido (LL) y su índice plástico (Ip), determinados como se indica en la norma NMX-C-493-ONNCCE-2014, define un punto ubicado en las zonas I o III de la carta de plasticidad y se identifica con el símbolo M (del sueco mo y mja-la). Si dicho punto se aloja en la zona I, el material se clasifica como limo de alta compresibilidad y se identifica con el símbolo ML (NMX-C-526-ONNCCE-2017). De acuerdo con lo anterior y con la Figura 5 se observa que el suelo de Erongaricuario y Ajuno se clasifican como limo de baja compresibilidad.

El suelo fino se clasifica como arcilla cuando su límite líquido (LL) y su índice plástico (IP), determinados como se indica en la norma NMX-C-493-ONNCCE-2014, definen un punto ubicado en las zonas II o IV de la carta de plasticidad y se idéntica con la letra C (del inglés Clay) (NMX-C-526-ONNCCE-2017). Por lo tanto el suelo de Santiago Undameo se ubica en la zona II por lo que se clasifica como una arcilla de baja compresibilidad (CL) (figura 5).

Figura 5. Carta de plasticidad (SUCS)



Fuente: elaboración propia.

Para ilustrar la variación del peso específico seco máximo y la humedad óptima con el método de compactación, F.N. Haveem presentó resultados obtenidos de varios suelos, que cubren la gama desde piedra triturada que pasa la malla 4 hasta arcilla limosa. Estos suelos se estudiaron según varios procedimientos de compactación que incluyó Proctor Estándar American Association of State Highway Officials (AASHO estándar), el Proctor Modificado (AASHO modificado), el método de compactación por impacto de California y un método que usa un compactador mecánico. Aunque todos estos métodos compactan el suelo por el impacto de un pistón, existen diferencias en el peso y la altura de caída libre del mismo, así como en el número y espesor de las capas del suelo. Por lo tanto es evidente que el procedimiento que da los mayores pesos específicos secos máximos corresponde a una menor humedad óptima. La humedad óptima es una variable que depende de la energía de compactación. Así la compactación se aplica a suelos con el fin de mejorar sus características de compresibilidad, relación esfuerzo-deformación y resistencia (Juárez y Rico, 2005).

En la figura 6 se observan los resultados de la prueba de compactación dinámica estándar (Prueba proctor estándar) variante A, se observa que el

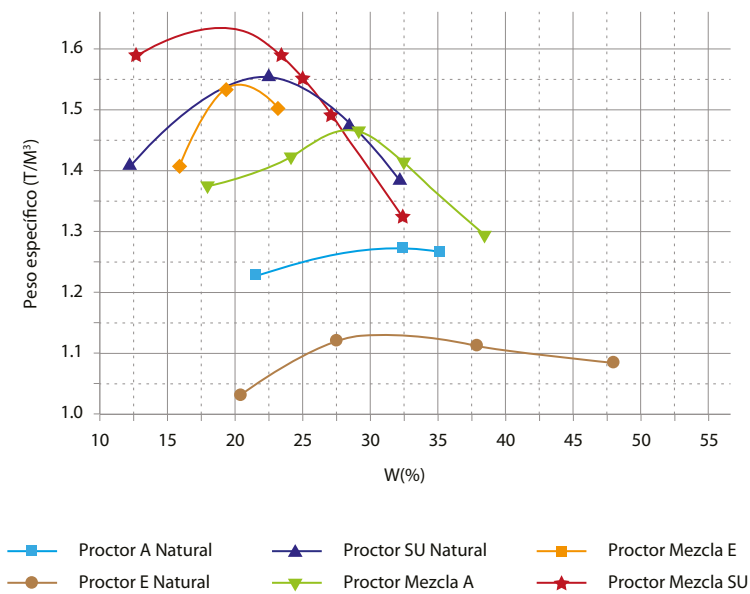
peso volumétrico específico seco es menor para aquellos suelos sin estabilizante, y es el caso contrario al mezclarlos con arena triturada, cemento y cal, como puede observarse, por ejemplo, para el caso de Erongaricuaru donde es notable que aumentó considerablemente su peso específico seco al estabilizarlo. También es evidente que se mejoraron las características del suelo de Ajuno y Santiago Undameo. Por ejemplo, el suelo de Santiago Undameo registró el mayor incremento de peso específico seco al ser estabilizado. Esta prueba básicamente nos proporciona la humedad óptima para proceder con la compactación, en este caso para la elaboración de BTC. Esta mejora en el peso específico seco del suelo se atribuye a las siguientes consideraciones.

El estabilizante es un material que, como su nombre lo indica, permitirá mejorar las características físicas del suelo, ya sea aumentando la resistencia a la compresión, a la tracción, o bien reduciendo las fisuras provocadas por la retracción de la arcilla (Rubén y Gutiérrez, 2010).

El cemento Pórtland I es un conglomerante hidráulico que resulta de la pulverización del clínker a un grado de finura determinado al cual se le adiciona sulfato de calcio (yeso) o agua a criterio del fabricante para mejorar su fraguado. El clínker se compone por silicatos, aluminatos y ferroaluminatos cálcicos; estos elementos, al ser mezclados con agua, reaccionan para posteriormente formar cristales entrelazados. Cal: el intercambio de iones ocurre en el barro con cal como estabilizador si existe suficiente humedad. Los iones de calcio de la cal se intercambian con los iones metálicos de la arcilla formando uniones estabilizadoras (Minke, 2001).

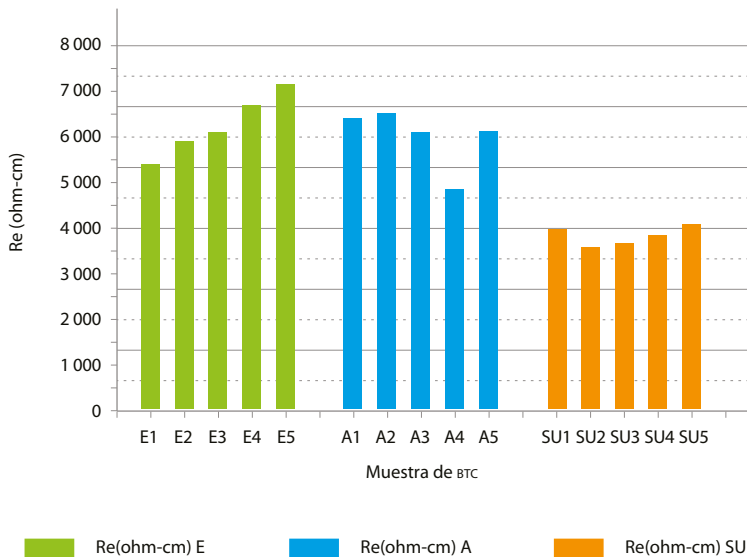
La prueba no destructiva de resistividad eléctrica se utiliza comúnmente para determinar la resistividad en el concreto. Cuanto mayor es la resistividad eléctrica, menor es la porosidad del concreto; por tanto, mayor será su impermeabilidad y resistencia mecánica, al contener más fase sólida por volumen. Además, si el concreto no se encuentra saturado de agua, la resistividad crece, debido a que el concreto no posee propiedades conductivas, es decir, las cargas eléctricas se transmiten a través de la fase acuosa presente dentro de la microestructura de poros, por lo que también es un indicador de su grado de saturación. Por lo tanto, la resistividad eléctrica es un indicador de la calidad del concreto al indicar, indirectamente, su porosidad y grado de saturación (Torres et al., 2019).

Figura 6. Curvas de ensayo de compactación dinámica



Fuente: elaboración propia.

Sin embargo, en esta investigación se aplicó la prueba de resistividad eléctrica a las muestras de BTC. En la figura 7 se observa mayor resistividad eléctrica en las muestras de Erongaricuario (en promedio 6 193.84 ohm-cm) y Ajuno (en promedio 5 920.10 ohm-cm), comparado con las muestras de Santiago Undameo (en promedio 3 761. 58 ohm-cm). También se realizó la prueba de porcentaje de absorción (D18.12, 2015; Navarro et al., 2011) obteniendo como resultado 9.71 % de absorción en promedio para las muestras elaboradas con suelo de Ajuno (A), 9.71 % de absorción para muestras de Erongaricuario (E) y 3.50 % para muestras elaboradas con suelo de Santiago Undameo (SU), cabe señalar que la prueba se pudo realizar debido a que en 24 horas de saturación en agua potable, no hubo pérdida de material en las aristas de las muestras cúbicas.

Figura 7. Resultados de prueba de resistividad eléctrica en muestras de 8 cm · 8 cm · 8 cm saturadas

Fuente: elaboración propia.

Conclusiones

Se logró elaborar bloques de tierra comprimida (BTC) con diferentes tipos de suelo Erongaricuario, Ajuno y Santiago Undameo. Los estabilizantes utilizados fueron los adecuados debido a que se pudieron cortar muestras cúbicas, lo que nos indica una compactación bastante adecuada y con fuertes uniones cohesivas entre sus componentes. Se requieren las pruebas de mecánica de suelos, como la determinación límites de consistencia, curvas granulométricas, clasificación del suelo y prueba de compactación Proctor estándar definitivamente, antes de elaborar los bloques de BTC, para estimar su comportamiento físico-mecánico y, sobre todo, conocer la humedad óptima de compactación. Al agregar arena triturada, cemento Portland y cal aumenta el peso específico seco de las mezclas, lo cual se pudo demostrar con las curvas de compactación siendo más evidente en las mezclas de Erongaricuario al compararlo con el mismo suelo sin estabilizantes (con

estabilizantes 1.55 T/m^3 y sin estabilizante 1.14 T/m^3). En cuanto la prueba no destructiva empleada en esta investigación permite clasificar las diferentes mezclas, sin embargo no se puede comparar con las condiciones de un concreto hidráulico, por lo que se debe contrastar con pruebas mecánicas destructivas tales como resistencia a compresión uniaxial y prueba Point Load. Es importante señalar que las muestras cúbicas de BTC de Santiago Undameo son las que poseen menor porcentaje de absorción y en construcciones con suelo se busca que los materiales empleados sean durables sobre todo en presencia de agua, coincidentemente al ser estabilizado este tipo de suelo y realizar la prueba de compactación proctor se obtuvo el mayor peso específico seco comparado con el resto de las mezclas. La disposición de los materiales lo convierte en un material sostenible debido a que en Erongaricuaró, Ajuno y Santiago Undameo son lugares donde se utiliza el suelo con bastante regularidad para elaboración de ladrillo rojo recocido. Por lo que con la elaboración de BTC se reducen las emisiones de CO_2 al medio ambiente, debido a que no se requiere la quema de ningún combustible para su cocción. En sí representa una alternativa viable para la construcción de vivienda, que con mayor difusión de las propiedades físicas y mecánicas, se puede convertir en una alternativa más de construcción en las zonas cercanas a Morelia Michoacán, México.

Se pretende seguir con la investigación agregando diferentes estabilizantes a las mezclas de suelo, con la finalidad de contrastar los resultados obtenidos. Finalmente, se observó que los estabilizantes propuestos lograron mejorar las características de las mezclas con los diferentes tipos de suelo, por lo que se recomienda utilizarlos en la construcción de vivienda sostenible.

Agradecimientos

El autor agradece el soporte de la Coordinación de la Investigación Científica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, CIC-UMSNH; del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología, CONAHCYT, con los Proyectos de Ciencia de Frontera de Grupo, CF-2023-G-985, con el de Investigadores Consolidados, CBF 2023-2024-1613, y el PRONACE 321260; del ICTI, Instituto de Ciencia Tecnología e Innovación del Gobierno del

Estado de Michoacán con los Apoyos a las Capacidades Científicas; y el soporte técnico y humano del Laboratorio Ing. Luis Silva Ruelas del Departamento de Materiales de la Facultad de Ingeniería Civil de la UMSNH.

Referencias

- Aranda-Jiménez, Y., Zuñiga-Leal, C., Moreno-Chimely, L. y Robles-Aranda, M. E. (2023). Compressed earth blocks (CEB) compression tested under two earth standards. *Cogent Engineering*, 10(1). <https://doi.org/10.1080/23311916.2022.2163116>
- Arduin, D., Caldas, L. R., Paiva, R. de L. M. y Rocha, F. (2022). Life cycle assessment (LCA) in earth construction: A systematic literature review considering five construction techniques. *Sustainability*, 14(20), 13228. <https://doi.org/10.3390/su142013228>
- ASTM C127-04. (2015). *Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of coarse aggregate*. American Society for Testing Materials (ASTM).
- Bogas, J. A., Real, S., Cruz, R. y Azevedo, B. (2023). Mechanical performance and shrinkage of compressed earth blocks stabilised with thermoactivated recycled cement. *Journal of Building Engineering*, 79, 107892. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.107892>
- Cabrera, S., González, A. y Rotondaro, R. (2020). Resistencia a compresión en bloques de tierra comprimida. Comparación entre diferentes métodos de ensayo. *Informes de la Construcción*, 72(560). <https://doi.org/10.3989/ic.70462>
- DURAR. (1997). *Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado*. CYTED, Red temática XV.B- Durabilidad del Hormigón.
- Galarza-Viera, J. L., Hernández-Olivares, F. y Arcones-Pascual, G. (2022). Estabilización de bloques de tierra comprimida (BTC) por adición de ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBCA) y óxido de calcio recuperado de conchas marinas = Stabilization of compressed earth bricks (CEB) by adding (SBA) sugarcane bagasse ash and CaO re. *Anales de Edificación*, 7(1), 30. <https://doi.org/10.20868/ade.2021.4768>
- Guillén Guillén, C. A., Muciño Vélez, A., Guerrero Baca, L. F. y Cruz Farrera, F. J. (2021). Optimización del proceso de elaboración de bloques de tierra comprimida (BTC) mediante el control granulométrico de las partículas del Suelo. *Nova Scientia*, 13(27). <https://doi.org/10.21640/ns.v13i27.2891>
- Hveem, F. N. (1957). *Maximum density and optimum moisture of soils: What do these terms mean?* 36th Annual Meeting of the Highway Research Board [ponencia], Washington, D. C., United States.
- Juárez Badillo, E. y Rico Rodríguez, A. (2005). *Mecánica de suelos. Tomo 1. Fundamentos de la mecánica de suelos*. Limusa.
- Laguna-Torres, C. A., González-López, J. R., Guerra-Cossío, M. Á., Guerrero-Baca, L. F., Chávez-Guerrero, L., Figueroa-Torres, M. Z. y Zaldívar-Cadena, A. A. (2024). Effect of physical, chemical, and mineralogical properties for selection of soils stabilized by alkaline activation of a natural pozzolan for earth construction techniques such as

- compressed earth blocks. *Construction and Building Materials*, 419, 135449. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135449>
- Malkanathi, S. N., Wickramasinghe, W. G. S. y Perera, A. A. D. A. J. (2021). Use of construction waste to modify soil grading for compressed stabilized earth blocks (CSEB) production. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00717. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00717>
- Minke, G. (2001). *Manual de construcción en tierra. La tierra como material de construcción y su aplicación en la arquitectura actual*. Editorial Fin de Siglo.
- Natalia, P. G., Paul, G. A., Víctor Hugo, D. y Noe, L. (2010). *Evaluación de la resistividad en campo y en laboratorio y su aplicación a pavimentos*. Secretaría de Comunicaciones y Transporte.
- Navarro, L., Martínez, W. y Espinoza, A. (2011). *Análisis de materiales, manual de análisis de materiales, resistencia de materiales*. FIC-UMSNH.
- NMX-C-476-ONNCCE. (2019). *Industria de la construcción-geotecnia-materiales térreos-compactación dinámica estándar y modificada-métodos de ensayo*. Diario Oficial de la Federación.
- NMX-C-493-ONNCCE. (2018). *Industria de la construcción-geotecnia-límites de consistencia de Suelos-Método de Ensayo*. Diario Oficial de la Federación.
- NMX-C-496-ONNCCE. (2014). *Industria de la construcción-geotecnia-materiales para terracerías-determinación de la composición granular*. Diario Oficial de la Federación.
- NMX-C-508-ONNCCE. (2015). *Industria de la construcción-bloques de tierra comprimida estabilizados con cal-especificaciones y métodos de ensayo*. Diario Oficial de la Federación.
- NMX-C-514-ONNCCE. (2016). *Industria de la construcción-resistividad eléctrica del concreto hidráulico-especificaciones y métodos de ensayo*. Diario Oficial de la Federación.
- NMX-C-526-ONNCCE. (2017). *Industria de la construcción-geotecnia-materiales térreos-clasificación de fragmentos de roca y suelos-método de ensayo*. Diario Oficial de la Federación.
- Rubén, S. y Gutiérrez, R. (2010). *Los bloques de tierra comprimida en zonas húmedas*. Plaza y Valdés.
- Secretaría de Comunicaciones y Transporte. (2003). *MMP. Métodos de muestreo y prueba de materiales*. Secretaría de Comunicaciones y Transporte.
- Torres Acosta, A. A., Moreno Valdés, A., Rodríguez Mendo, G., Lomelí González, M. G. y Matínez Madrid, M. (2019). *Efecto de la temperatura de prueba y la resistividad eléctrica húmeda en cilindros de concreto*. Secretaría de Comunicaciones y Transporte.