

Optimización del proceso de elaboración de Bloques de Tierra Comprimida (BTC) mediante el control granulométrico de las partículas del Suelo

Optimization of the process of making Compressed Earth Blocks (CEB) through the granulometric control of soil particles

César Armando Guillén Guillén ¹

Alberto Muciño Vélez ²  0000-0002-6386-0249

Luis Fernando Guerrero Baca ³  0000-0001-8256-4851

Francisco José Cruz Farrera ¹

¹ Universidad Nacional Autónoma de México. Posgrado en Arquitectura

² Universidad Nacional Autónoma de México. Centro de Investigaciones en Arquitectura, Urbanismo y Paisaje  amucino@unam.mx

³ Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco. División de Ciencias y Artes para el Diseño

© Universidad De La Salle Bajío (México)

Palabras clave: granulometría; resistencia a compresión; arquitectura con tierra; materiales regionales; bloque de tierra comprimida; diseño de mezcla; ajuste de límite máximo de partículas; ajuste de límite mínimo de partículas; índice de plasticidad; porcentaje de agua en mezcla; presión de elaboración de bloques de tierra; ajuste granulométrico

Keywords: granulometry; compressive strength; raw earth architecture; regional materials; compressed earth block; mix design; adjustment of maximum limit of particles; adjustment of minimum limit of particles; plasticity index; percentage of water in mixture; pressure of making blocks of earth; grain size adjustment

Recepción: 04 – 05 – 2021 / Aceptación: 15 – 09 – 2021

Resumen

Introducción: el siguiente estudio se enfoca en el análisis granulométrico de suelos, utilizando una tierra¹ de la localidad de Cuauhtémoc, Villa flores, Chiapas, México, para determinar su posible uso en la elaboración de Bloques de Tierra Comprimida (BTC). El fin del estudio es lograr resistencias mecánicas adecuadas sin emplear estabilización química.

Método: el procedimiento de caracterización inicial de las muestras de tierra se desarrolló mediante determinación granulométrica y límites de consistencia, lo que permitió identificar el suelo por su curva granulométrica y resistencia a compresión axial. La discusión surgió de la identificación en la normativa existente para los BTC en España y México que establecen intervalos granulométricos

1. El concepto de tierra tiene una connotación cultural que relaciona a la capa superficial con fundamentos de vida cotidiana y costumbres humanas. “nuestra madre tierra da consejos, alimento y agua” y también materiales para construir vivienda. (Álvarez-Solís et al, 2015). El suelo tiene un significado técnico según la disciplina que lo estudie, se retoma la conceptualización desde la ingeniería que lo define como todo material terroso (Juárez, 2005). Para este estudio un bloque de tierra comprimida es también un bloque de suelo comprimido.

demasiado amplios y no parecen darle importancia a lograr un acomodo óptimo de la curva granulométrica, forzando la estabilización química. Se idealizó un rango granulométrico para BTC ajustando límites máximos y mínimos de los distintos tamaños de partículas que conforman a las muestras y se estableció el porcentaje de agua inicial a partir del índice de plasticidad. Después se elaboró 3 series con cinco probetas de tierra comprimida en cada configuración, variando la curva granulométrica, porcentaje de agua y presión de elaboración con el fin de mejorar su resistencia a la compresión.

Resultados: los resultados 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.

Conclusión: se concluye que es posible optimizar el uso de la tierra para la construcción controlando la granulometría, contenido de agua y presión nominal de la materia prima, lográndose resistencias mecánicas superiores a 50 kg/cm^2 sin emplear cemento, asfalto ni cal como estabilizantes.

Abstract

Introduction: the following study focuses on the granulometric analysis of soils, using a soil from the town of Cuauhtémoc, Villa Flores, Chiapas, Mexico, to determine its possible use in the elaboration of Compressed Earth Blocks (CEB). The purpose of the study is to achieve adequate mechanical strength without using chemical stabilization

Method: the initial characterization procedure of the soil samples was developed by means of granulometric determination and consistency limits, which made it possible to identify the soil by its granulometric curve and resistance to axial compression. The discussion arose from the identification in the existing regulations for CEB in Spain and Mexico that they establish too wide granulometric intervals and do not seem to give importance to achieving an optimal accommodation of the granulometric curve, forcing chemical stabilization. A granulometric range for CEB was idealized by adjusting maximum and minimum limits of the different sizes of particles that make up the samples and the percentage of initial water was established from the plasticity index. Afterwards, 3 series were elaborated with five samples of compressed earth in each

configuration, varying the granulometric curve, percentage of water and elaboration pressure to improve their resistance to compression.

Results: the results describe a notable improvement in the behavior of the soil as a compressed block when the granulometric adjustment is carried out. The CEB mix design was improved from $32.5 \text{ kg} / \text{cm}^2$ to $54.75 \text{ kg} / \text{cm}^2$ by adjusting the percentage of water and nominal brewing pressure.

Conclusion: it is concluded that it is possible to optimize the use of soil for construction by controlling the granulometry, water content and nominal pressure of the raw material, achieving mechanical strengths greater than $50 \text{ kg} / \text{cm}^2$ without using cement, asphalt, or lime as stabilizers.

Introducción

En México el 45 % de las viviendas son vulnerables porque presentan deficiencias estructurales en muros y cubiertas , ya sea por la calidad de la materia prima empleada en la elaboración, o por el proceso constructivo utilizado, estas deficiencias técnico-constructivas, ponen en situación de riesgo estructural a 14 millones de viviendas ante fenómenos naturales y cambio climático, principalmente en las zonas rurales y periurbana (CONEVAL, 2020). En este contexto se busca mejorar los muros de la vivienda por medio del uso de la tierra cruda, como recurso para elaborar bloques de tierra comprimida. Las propiedades y beneficios de construir con tierra han sido ampliamente discutidos (Minke, 2005; Guerrero, 2007; Roux, 2010 y 2011, Zami *et al.*, 2010; Van Damme *et al.*, 2018; Morel *et al.*, 2007; Miccoli, 2014; Mansour *et al.*, 2016; Hafliger, 2017; González-López *et al.*, 2018; Medvey y Dobszay, 2020) gestándose a nivel internacional normas que buscan alinear su uso a los estándares contemporáneos. La tierra como recurso constructivo ha tomado interés en la academia, lo cual se refleja en propuestas para mejorar el hábitat humano, destacando el empleo de Bloques de Tierra Comprimida (BTC) como componente constructivo, por considerarse una alternativa a la construcción tradicional de adobe y tapia, debido a su potencial de desarrollo de manera industrial (INECC, 2018).

Sin embargo, desde el origen de la tecnología de los Bloques de Tierra Comprimida (BTC) generados en Colombia a principios de la década de los años sesenta, se pensó en la necesidad del uso de cemento como un estabilizante químico que podría garantizar el uso de una gama amplia de suelos sin que se tuviera la necesidad de caracterizarlos. Años después, ante el alto costo e impacto ambiental del cemento se empezaron a realizar experimentos para la elaboración de BTC

estabilizados con cal consiguiéndose en México la aprobación de una norma que fue la primera en el país que apoyaba el uso de la tierra como componente constructivo. Aunque se trató de un destacable paso en la aceptación institucional del empleo de un material que desde hace décadas ha sido sistemáticamente menospreciado e incluso rechazado por las instituciones vinculadas con la edificación, la realidad es que el uso del asfalto, el cemento y la cal como estabilizantes de la tierra presentan inconvenientes que requieren ser analizados.

Los BTCs estabilizados químicamente hacen que los componentes constructivos pierdan algunas de las cualidades que presenta la tierra como material constructivo en técnicas tradicionales como el adobe, el bajareque o la tapia pisada, y que se derivan de sus propiedades térmicas y ductilidad estructural. Los BTCs estabilizados químicamente pueden alcanzar elevadas resistencias a la compresión, pero a costa de incrementar la fragilidad de las aristas de las unidades y disminuir la adherencia de los morteros a sus caras. (Rakotomamonjy 2014).

Se considera que la energía incorporada en la tierra como recurso constructivo va de 5-10kWh/m³ comparado con los 600kWh/m³ contenido en los blocks de concreto o los 1140kWh/m³ que corresponden a los ladrillos de arcilla recocidos. (Keefe, 2005)

Y aunque el uso de estabilización química mejora el comportamiento mecánico, el problema es el impacto ambiental cuando las dosificaciones recomendadas rondan el 10 %. Un BTC que por ser sumamente denso pesa entre 8 y 10kg puede llegar a contener entre 900 y 1200g de cemento o de cal, lo que evidentemente lo descarta como un componente constructivo sostenible, a pesar de utilizar tierra. Sólo como una referencia, los bloques convencionales huecos hechos de cemento, arena y grava (tepezil, tepojal o jal) que se emplean masivamente en la construcción en México y muchos otros países, contienen alrededor de 12.5 % de cemento (Bloqueras.org, 2021) y como su relación peso-volumen de material es menor que el BTC por contener aire, involucran menos cantidad de cemento por metro cúbico construido.

Ante esta problemática se planteó un estudio en el que se discute la pertinencia del uso de cemento, las emulsiones asfálticas y la cal, en la mezcla para su elaboración, argumentando el elevado impacto ambiental de estas substancias. Se parte de la hipótesis de que es posible generar BTCs que resistan más de 30kg/cm² mediante un control adecuado de la granulometría de las mezclas. Se define que un diseño de mezcla específico requiere determinar la manera óptima en la cual se combinan las partículas de la muestra de suelo al ser compactadas para generar el bloque. Por tanto, el análisis debe definir la curva granulométrica para el óptimo desempeño mecánico y

determinar la presión nominal de compactación de la mezcla. La fuerza de compactación nominal se definió inicialmente en 320 kgf. El sistema ocupado para describir la muestra fue el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, (SUCS) normalizado por ASTM (1998 y 2005), que permite especificar la textura y tamaño de partículas de un suelo, por ensayos de granulometría, y describir los límites de consistencia del suelo mediante los ensayos de límites de Atterberg.

Las tierras están compuestas de gravas, arenas, limos y arcillas, que al hidratarse se vuelven moldeables, dentro de diferentes estados de consistencia que se derivan de la cantidad de agua absorbida. El procedimiento de evaluación de la relación tierra, agua y consistencia denominado Límites de Atterberg (Barbeta, 2002), permite conocer el Límite líquido, Límite plástico e Índice de plasticidad de la tierra.

La granulometría define los diferentes tamaños de partículas de un suelo, expresado como un porcentaje en relación con el peso total de una muestra seca (Juárez y Rodríguez, 2005). El tamaño de las partículas que componen la mezcla es importante ya que influye directamente en la porosidad, absorción de agua y durabilidad. Una adecuada distribución de tamaños de partículas es conocido como un suelo bien graduado, y permite obtener una mayor resistencia a compresión en las piezas elaboradas con dichas características (Rakotomamonjy, 2014). A menor cantidad de espacios vacíos se reduce la porosidad y se incrementa la resistencia al agua y a esfuerzos mecánicos, ya que los huecos dejados por las partículas grandes son llenados por los medianos y así sucesivamente, generando un mayor contacto entre partículas, lo que provoca un peso volumétrico y una resistencia a compresión mejorada (Juárez y Rodríguez, 2005). De esta manera, una granulometría ideal debe incluir partículas de distintos tamaños y esto se logra al conocer la distribución cuantitativa de los tamaños de las partículas de un suelo. En la fig. 1 se idealiza un esquema en donde los huecos dejados por partículas más grandes son llenados por partículas más pequeñas generando un mayor contacto entre partículas, lo que provoca una reducción de la porosidad, aumento a la resistencia al agua, mayor peso volumétrico y una mayor resistencia a compresión, de lo que podría lograr un suelo integrado por partículas con poca diferencia de tamaños (Juárez y Rodríguez, 2005).

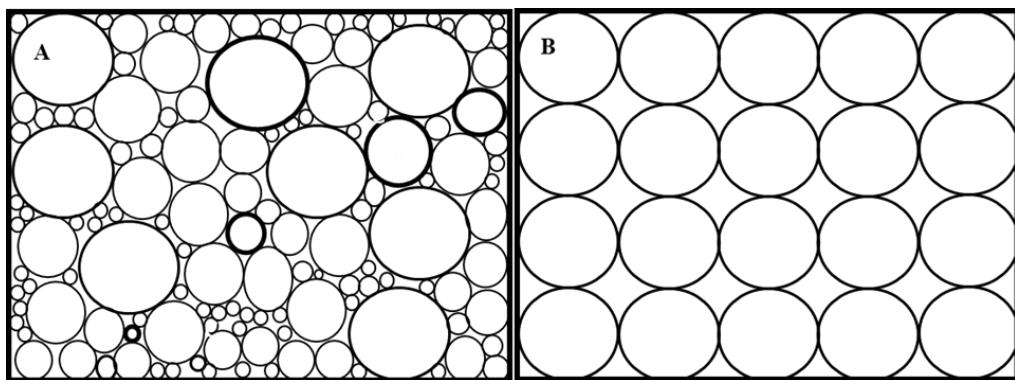


Fig. 1. A) suelo bien graduado; B) suelo mal graduado.

Fuente: Elaborado por los autores, adaptado de [Rakotomamonjy \(2014\)](#) y [Juárez y Rodríguez \(2005\)](#).

Fig. 1. A) well graded soil; B) poorly graded soil.

Source: Prepared by the authors, adapted from [Rakotomamonjy \(2014\)](#) and [Juárez y Rodríguez \(2005\)](#).

Método

Con el fin de contar con los datos necesarios para reconocer las características del material se plantearon tres metas y se realizaron tres series con cinco probetas por cada una:

1. Identificar mediante el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos S.U.C.S ([ASTM, 2010](#)) los tamaños de partículas y los límites de plasticidad de la muestra seleccionada.
2. Diseñar diferentes mezclas para elaborar piezas de tierra comprimida (BTC), estabilizadas granulométricamente y por compactación, con base en la norma UNE 41410.
3. Determinar la resistencia a compresión de las diferentes mezclas. ([ONNCCE, 2015](#)).

Paso 1. Identificar mediante el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos S.U.C.S ([ASTM, 2010](#))

Granulometría y Límites de Atterberg

El procedimiento para definir el punto de partida de la investigación se derivó de la determinación de los Límites de Atterberg, ([ASTM, 2005](#)) comenzando por caracterizar el suelo empleado, según el sistema SUCS, para lo que se tomaron como base las normas: ASTM C117. Método de ensayo normalizado para materiales más finos que una criba N° 200 (75 μm) en agregados minerales mediante lavado. ASTM D421. Práctica estándar para la preparación en seco de muestras de suelo para el análisis del tamaño de partículas. ASTM C136. Método de ensayo normalizado para la determinación granulométrica de agregados finos y gruesos. ASTM E11. Especificación estándar para tamices de prueba. ASTM D4318. Límite líquido, Límite plástico y el Índice de plasticidad de los suelos. ASTM D-427. Método de prueba estándar para factores de contracción de suelos.

Los resultados de la caracterización granulométrica y Límites de Atterberg del material original se muestran en las tablas 1, 2 y 3.

Para validar los resultados del límite líquido fue necesario llevar a cabo cuatro ensayos, el ensayo uno y el dos se tuvieron que descartar debido a que los datos obtenidos de cada uno diferían en más de un punto porcentual (2.19 %) en los ensayos tres y cuatro los resultados no diferían en más de un punto porcentual (0.92 %), en el caso de la valoración plástica se llevaron de igual manera cuatro ensayos en los cuales se comprobó que no existía diferencia de más de un uno por ciento porcentual (tabla 1).

Tabla 1. Resultados límites de Atterberg.

Table 1. Atterberg limit results.

Ensayo de límite líquido ASTM D4318			
No. Muestra	Límite Líquido %	Diferencia %	Media
1	28.24	2.19 %	27.93
2	27.62		
3	28.22	0.92 %	28.09
4	27.96		
Ensayo de Límite Plástico ASTM D4318			
No. Muestra	Límite Plástico %	Diferencia %	Media
1	18.11%	0.77 %	18.04 %
2	17.97%		
3	18.06%	0.22 %	18.04 %
4	18.02%		

Fuente: Elaborado por los autores.

Source: Prepared by the authors.

Tabla 2. índice de plasticidad.

Table 2. Plasticity index.

Límite Líquido %	Límite Plástico %	Índice de Plasticidad %
28.09 %	18.04 %	10.05 %

Fuente: Elaborado por los autores.

Source: Prepared by the authors.

Tabla 3. Clasificación del suelo seleccionado.

Table 3. Classification of the selected soil.

Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (S.U.C.S) ASTM D-2487
SC (Arenas arcillosas)

Fuente: Elaborado por los autores.

Source: Prepared by the authors.

Paso 2. Diseñar diferentes mezclas para elaborar piezas de tierra comprimida (BTC), estabilizadas granulométricamente y por compactación, con base en la norma UNE 41410.

Definición de parámetros de aplicación para BTC

Con el fin de constatar la calidad de los BTC a elaborar, se tomaron como referencias la norma española UNE 41410, la norma mexicana NMX-C-508 y las recomendaciones generadas a partir de las pruebas realizadas en Grenoble, Francia por CRATerre ([Rakotomamonjy, 2014](#)).

La norma UNE 41410 recomienda que la plasticidad del suelo esté dentro de los rangos establecidos en la carta de plasticidad, enfatizando que, si se cumple con lo establecido, las piezas de BTC darán resultados satisfactorios. La zona sombreada de la fig. 2 indica la franja de cumplimiento de dicha norma y el triángulo representa la muestra de tierra de la región que cumple con dicha normatividad.

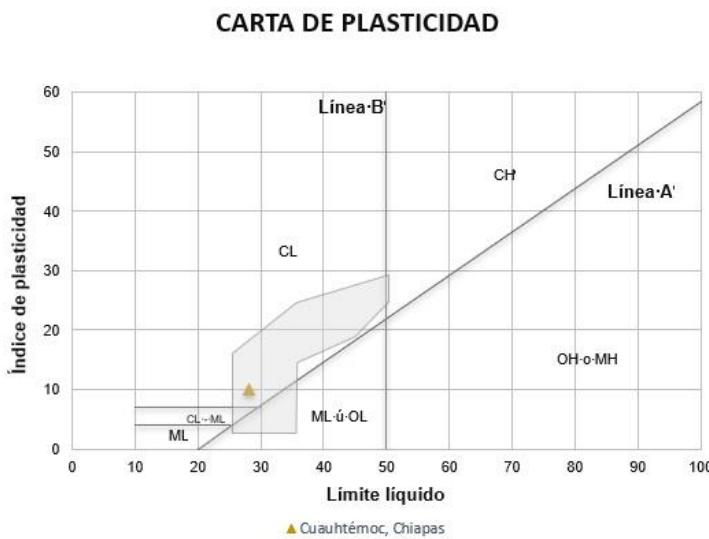


Fig. 2 Resultado en el rango de plasticidad para la elaborar BTC establecido por la UNE 41410.

Fuente: Elaborado por los autores con información de UNE 41410.

Fig. 2 Result in the range of plasticity to elaborate BTC established by UNE 41410.

Source: Prepared by the authors with information from UNE 41410.

Curva granulométrica media

La norma española, define los contenidos de partículas de diferente tamaño y la plasticidad recomendados para la fabricación de piezas de BTC. Esta norma es orientativa y tiene validez internacional, pero, se observó que permite la inclusión de partículas de tamaño máximo de 20 milímetros (gravas), de un alto contenido de limos (hasta un 30 %), y de un contenido de arcillas

mínimo de un 10 %. Por ello se consideró que el rango de la UNE resulta demasiado amplio ya que virtualmente cualquier suelo que tenga más de un 10 % de arcillas cumple con este criterio. En la fig. 3, se muestra la distribución granulométrica que deben tener las partículas de un suelo para cumplir dicha normativa y poder utilizarse en la elaboración de BTC.

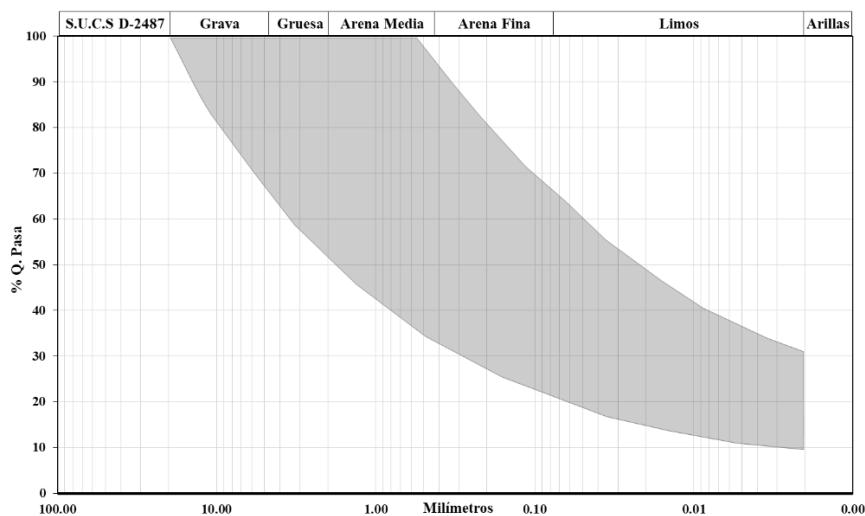


Fig. 3. Distribución granulométrica para BTC según UNE 41410.

Fuente: Elaborado por los autores con información de UNE 41410.

Fig. 3. Granulometric distribution for CEB according to UNE 41410.

Source: Prepared by the authors with information from UNE 41410.

Por su parte, la NMX-C-508 establece que el suelo a ocupar en la fabricación de piezas de BTC, no debe contener gravas ni materia orgánica, debido a esto se generó una condición de cumplimiento descartando las gravas. Se estableció una curva construida a partir de una media aritmética de los tamaños de partículas establecidas por la norma, y a partir de ese dato y la desviación estándar, se propuso una *curva media* (ver fig. 4). Se ocuparon como puntos de referencia los tamaños de partículas normalizados en los tamices de los análisis granulométricos. En la fig. 4, se aprecia el rango de gravas a limos, reconociendo el rango de gravas y la curva media.

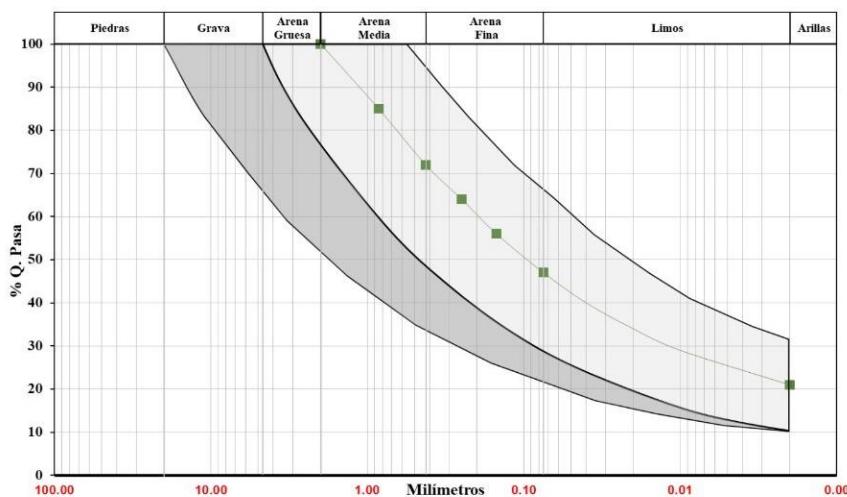


Fig. 4. Rango de partículas y Curva media UNE 41410.

Fuente: Elaborado por los autores con información de UNE 41410.

Fig. 4 Particle range and mean curve UNE 41410.

Source: Prepared by the authors with information from UNE 41410.

Curva granulométrica idealizada y propuesta de intervalo de cumplimiento.

Una vez establecida la curva granulométrica media con respecto a los valores de la UNE 41410, se observó que ésta no se encuentra bien graduada, por lo que, sabiendo que una buena graduación de las partículas mejora la resistencia a la compresión en estado seco, se elaboró una curva idealizada correctamente graduada (ver fig. 5), estableciendo como punto de referencia lo retenido en el tamiz #200 de la curva media. Aunque la curva idealizada nos otorga los porcentajes granulométricos que buscamos en un suelo para la elaboración de BTC, sabemos que difícilmente se cumplirá al 100 % con estos parámetros, inclusive después de estabilizarlo granulométricamente. Debido a esto se decidió determinar el rango de desviación que podrían tener las partículas (ver fig. 6).

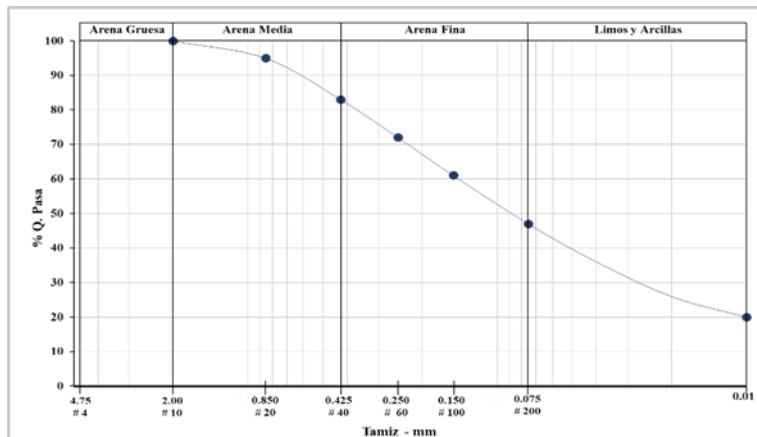


Fig. 5. Curva idealizada bien graduada para BTC.

Fuente: Elaborado por los autores con información de UNE 41410.

Fig. 5. Well-graded idealized curve for BTC.

Source: Prepared by the authors with information from UNE 41410.

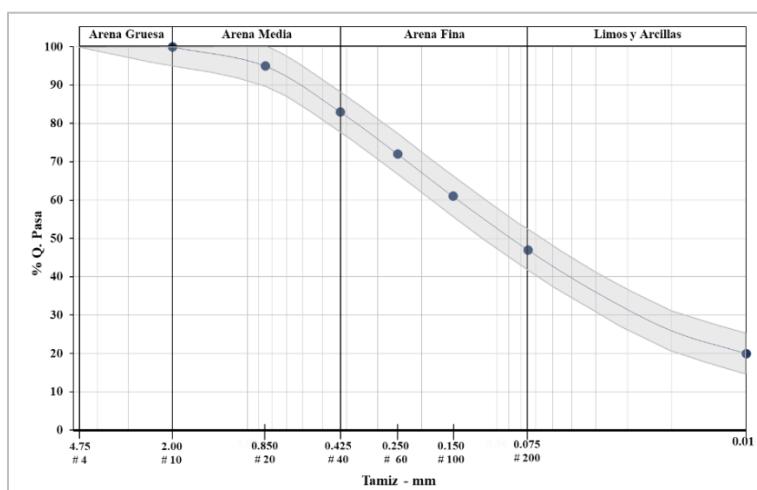


Fig. 6. Rango de la Curva idealizada bien graduada para BTC.

Fuente: Elaborado por los autores.

Fig. 6. Well Graded Idealized Curve Range for CEB.

Source: Prepared by the authors.

Curva granulométrica del suelo seleccionado

En la siguiente etapa se obtuvo la curva granulométrica del suelo seleccionado, empleando el rango reducido (fig. 6) por medio de los análisis granulométricos por lavado y por tamizado en seco. Para validar el resultado de la exploración por lavado fue necesario llevar a cabo dos ensayos y comprobar que los datos obtenidos no difirieran entre sí más de un 2 %. En el caso del análisis en seco sólo fue necesario un ensayo con el que se determinó que el material, después de pasar por los tamices, no perdió más del 3 % de su masa original.

Tabla 4. Análisis granulométrico del suelo seleccionado.

Table 4. Granulometric analysis of the selected soil.

Método de análisis en seco ASTM C-136 (Pérdida en peso del 1.024 %)				
Análisis de fracción gruesa				
Tamiz	Abertura (mm)	Peso Retenido (grs)	% Retenido Parcial	% Que Pasa
4	4.75	0.00	0.00	100.00
10	2	20	4.00	96.00
20	0.85	70.35	14.07	81.93
40	0.425	61.5	12.30	69.63
60	0.25	45.15	9.03	60.60
100	0.15	53.65	10.73	49.87
200	0.075	51.9	10.38	39.49

Método de análisis por lavado ASTM C-117 (Variación del 1.28 %, el dato a ocupar fue la media)				
Análisis de fracción fina				
Fondo		197.45		
Total		496.9		

Fuente: Elaborado por los autores.

Source: Prepared by the authors.



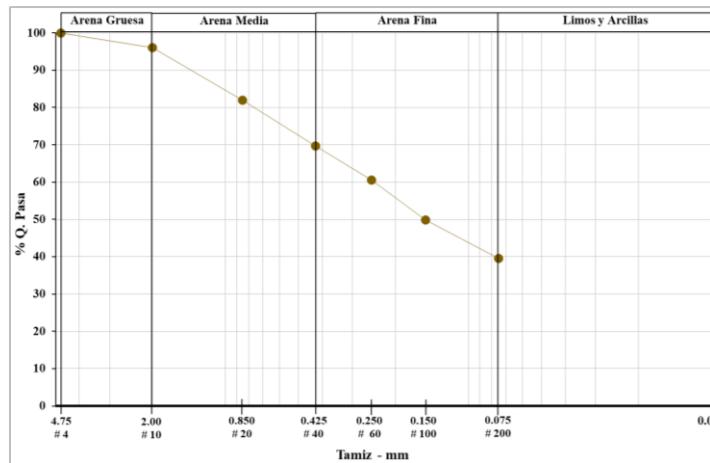
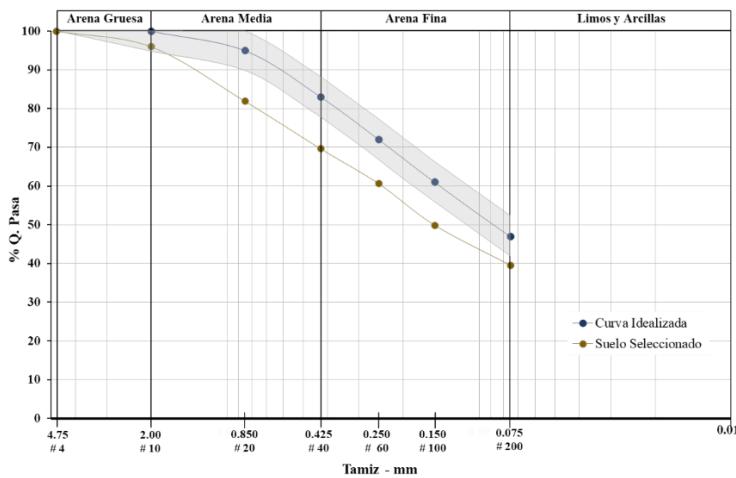
Fig. 7. Distribución del tamaño de partículas por tamiz de la muestra participante.

Fuente: Elaborado por los autores.

Fig. 7. Particle size distribution by sieve of the participating sample.

Source: Prepared by the authors.

La muestra contiene más del 50 % de partículas gruesas, con abundantes finos los cuales se caracterizan por una plasticidad media a alta. (Ver fig. 7) Según los estudios realizados por el Laboratorio de CRAterre, este tipo de suelo es el ideal para la elaboración de bloques de tierra comprimida (Rakotomamonjy, 2014).

**Fig. 8.** Curva granulométrica del suelo seleccionado.**Fuente:** Elaborado por los autores.**Fig. 8.** Granulometric curve of the selected soil.**Source:** Prepared by the authors.**Fig. 9.** Comparación de curva resultante con el rango establecido.**Fuente:** Elaborado por los autores.**Fig. 9.** Comparison of the resulting curve with the established range.**Source:** Prepared by the authors.

La fig. 8 muestra la curva obtenida a partir de los análisis granulométricos y la fig. 9 compara la curva granulométrica obtenida con el intervalo que se estableció previamente de forma teórica.

Paso 3. Determinar la resistencia a compresión de las diferentes mezclas (ONNCCE, 2015)

Diseño específico de mezclas para BTC con textura compensados

Una granulometría óptima en el elemento de tierra da cuerpo y solidez al bloque cuando contiene proporciones adecuadas de arenas, limos y arcillas. La arena y los limos conforman el esqueleto

resistente que soporta las cargas y evita la fisuración, mientras que la arcilla funciona como el conglomerante (Guerrero, 2016). El factor de ajuste granulométrico se modificó para que los tamaños de partículas de la muestra correspondan con el rango propuesto.

En segundo lugar, se debe considerar la importancia del agua como componente que activa las propiedades de los minerales contenidos en las muestras de tierra. Para elaborar BTC se debe evitar una mezcla demasiada fluida que impida una adecuada compresión o una mezcla muy seca, que se disgregue debido a una falta de cohesión entre las partículas. En los estudios hechos por CRATerre (Rakotomamonjy, 2014) se determinó que el contenido de agua óptimo para la elaboración de piezas de BTC, corresponde con su “*estado húmedo*”. El estado húmedo de un suelo es aquél que se encuentra por debajo del límite plástico.

Finalmente, con respecto al proceso de compresión se debe tomar en cuenta que, cuando se aplica una fuerza a un suelo, el material se densifica al intercalarse las partículas de diferentes tamaños y la proporción de huecos disminuye, lo que se relaciona con la reducción de la porosidad, de la permeabilidad y el aumento de la resistencia a compresión (Guerrero, 2016).

Sin embargo, según se ha documentado en pruebas realizadas en Francia por CRATerre (Rakotomamonjy, 2014), las altas presiones de compactación producen una caída en la resistencia y durabilidad de los bloques, por lo que se aconseja limitar la presión nominal de elaboración de 300 a 500 kgf. Para realizar las series de probetas se empleó una fuerza nominal de inicio para compactación de 320 kgf y se elevó a 512 kgf.

Primera serie

En la primera serie se modificó la muestra empleando la granulometría establecida en la curva media (BTC-CM) agregando las cantidades necesarias de material deficitario (ver fig. 9). Posteriormente se elaboró otra mezcla (BTC-CI) en la que se usara la dosificación derivada de la curva idealizada (ver fig. 5). Se estableció la mezcla de control (BTC-N) en la cual no se modificó la granulometría del suelo seleccionado. La cantidad de agua y presión nominal fueron constantes para poder valorar únicamente la influencia de la granulometría en la resistencia a la compresión. Para realizar las muestras de la primera corrida, se utilizaron tres series de probetas cúbicas de 50 mm, descritas en la tabla 5.

Tabla 5. Diseño de mezcla de la primera corrida empleando tres series cúbicas de 50 mm, con agua y presión nominal constante, variando la granulometría.

Table 5. Mix design of the first run using three cubic series of 50 mm, with water and constant nominal pressure, varying the granulometry.

Mezcla de control (BTC-N)	Mezcla Curva Media (BTC-CM)	Mezcla Curva Idealizada (BTC-CI)
Granulometría: sin modificar Agua: 16 % Presión nominal: 320 kgf 5 probetas	Granulometría: Curva Media Agua: 16 % Presión nominal: 320 kgf 5 probetas	Granulometría: Curva Idealizada Agua: 16 % Presión nominal: 320 kgf 5 probetas

Fuente: Elaborado por los autores.

Source: Prepared by the authors.

Segunda serie

En la segunda serie se modificó el porcentaje de agua en la mezcla, tomando como el porcentaje de agua óptimo para la fabricación de un BTC cuando un suelo está húmedo. Se reconoció como un suelo húmedo el que se encuentra en el rango del 10 al 20 % de plasticidad media siguiendo las especificaciones de la norma UNE 41410. De este modo, para las mezclas de la segunda serie se utilizaron las claves BTC 16 %, BTC 14 % y BTC 12 %, valores que se corresponden a la cantidad de agua de cada probeta respectivamente, debido a que el suelo seleccionado tiene un límite de plasticidad del 17 %. En esta serie se incluyó una cuarta corrida (BTC 10 %) empleando 10 % de agua.

El porcentaje de agua adecuado debe permitir comprimir el suelo sin que este pierda su forma al desmoldarlo. Su consistencia no debe ser pegajosa y han de percibirse al tacto las partículas de las arenas; los demás factores se mantuvieron constantes en esta serie (presión nominal de compactación y granulometría), para así poder comprobar la influencia del agua en la resistencia a la compresión. Para el momento de iniciar la segunda serie de probetas ya se contaba con los resultados de la primera serie (en la que se evaluó granulometría sin modificar, granulometría curva media y granulometría curva idealizada, controlando porcentaje de agua y presión nominal de elaboración) y en función de estos se ocupó la distribución granulométrica de partículas con mejor resistencia a compresión. En la tabla 6 se describe el diseño de las series usadas en la segunda corrida.

Tabla 6. Diseño de mezcla de la segunda corrida empleando tres series cúbicas de 50 mm, con granulometría y presión nominal constante, variando el porcentaje de agua.

Table 6. Mixing design of the second run using three cubic series of 50 mm, with granulometry and constant nominal pressure, varying the percentage of water.

Mezcla 1 (BTC 16 %) Granulometría: Mejor resultado en la primera serie Agua: 16 % Presión nominal: 320 kgf 5 probetas	Mezcla 2 (BTC 14 %) Granulometría: Mejor resultado Agua: 14 % Presión nominal: 320 kgf 5 probetas	Mezcla 3 (BTC 12 %) Granulometría: Mejor resultado Agua: 12 % Presión nominal: 320 kgf 5 probetas
---	---	---

Fuente: Elaborado por los autores.

Source: Prepared by the authors.

Tercera serie

Se realizó una tercera serie con la distribución granulométrica con mejor resultado, empleando un 12 % de agua (del peso seco de la muestra) y dos presiones de elaboración de 320Kgf y 512Kgf en una serie de cinco probetas. Se identificó cada corrida con la clave BTC-320 y BTC-512.

Elaboración de molde para probetas sometidas a compresión

Para cumplir con la norma NMX-C-508-ONNCE para BTC, es necesario un mínimo de 5 piezas por cada diseño de mezcla que se tenga. Las probetas han de ser cúbicas y debido a la presión de elaboración, el molde, requiere tener la capacidad de resistir la presión sin deformarse. Por ello, se fabricaron moldes de 50 x 50 mm de base con una altura de 100 mm, elaborados con secciones de perfiles de acero PTR de 2"x2" calibre 16 (ver fig. 10)



Fig. 10. Moldes.

Fuente: Elaborado por los autores.

Fig. 10. Molds.

Source: Prepared by the authors.

Procedimiento para elaborar probetas

Se vierte la mezcla dentro de los moldes y con la ayuda de una prensa hidráulica se ejerce la presión establecida, para cada uno de los diseños de mezcla. Al comprimir la mezcla dentro de los moldes se genera una disminución del volumen, por lo que se decidió que el molde tuviera 100 mm de altura y así obtener una adecuada carrera de compresión para obtener probetas cúbicas de 50 mm. (ver fig. 11)

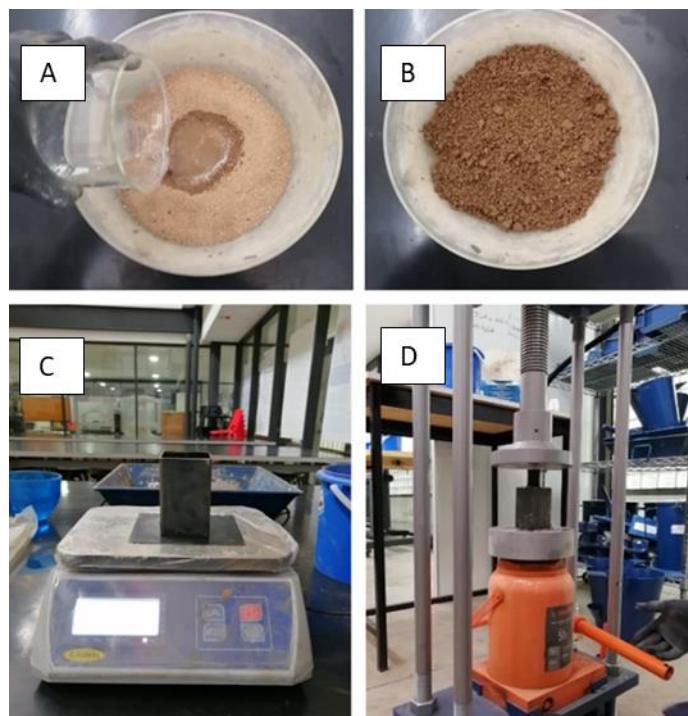


Fig. 11. Procedimiento de elaboración de probetas. **A)** Incorporación del agua en la mezcla. **B)** Aspecto general de la mezcla humectada. **C)** Verificación del peso de cada probeta en cada serie. **D)** Proceso de compactación nominal.

Fuente: Elaborado por los autores.

Fig. 11. Procedure for preparing test tubes. **A)** Incorporation of water into the mix. **B)** General appearance of the wetted mixture. **C)** Verification of the weight of each specimen in each series. **D)** Nominal compaction process.

Source: Prepared by the authors.

Secado de las muestras

El proceso mínimo de secado de las probetas de tierra compactada es de 7 a 14 días. Dependiendo de la humedad del ambiente, la muestra debe dejarse a la sombra, para reducir retracciones o cambios volumétricos bruscos. Para determinar que la muestra está completamente seca, es necesario pesarla a partir del quinto día y secuencialmente los días siguientes hasta que la probeta

ya no pierda peso, ya que de esta forma nos aseguramos de que sus componentes habrán desarrollado la máxima resistencia en cuanto a las posibilidades de esa dosificación (fig. 12). Las condiciones de temperatura en el laboratorio eran de 18.5°C con 44 % de humedad al interior.



Fig. 12. Secado de las muestras.
Fuente: Elaborado por los autores.

Fig. 12. Drying the simples.
Source: Prepared by the authors.

Prueba de compresión

Según la norma NMX-C-508-ONNCE, es necesario que como mínimo el 95 % de las muestras realizadas, mantenga una resistencia a la compresión constante, que la desviación estándar no exceda el 5 % y que ningún valor obtenido sea inferior a 0.8 veces el valor promedio de la resistencia a la compresión. En la norma se establece que los BTC que no serán sometidos a esfuerzos estructurales deberían resistir $30\text{kg}/\text{cm}^2$ y los que sí lo estarán, $60\text{kg}/\text{cm}^2$. Se reconoce una probeta adecuadamente realizada cuando la falla denota una sección conocida como de “reloj de arena”, como la que se muestra en la fig. 13, que se logra cuando una carga es uniformemente distribuida en un espécimen bien preparado.



Fig. 13. Falla característica en probeta bien elaborada por uniformidad de carga.

Fuente: Elaborado por los autores.

Fig. 13. Characteristic failure in a well-crafted specimen due to load uniformity

Source: Prepared by the authors.

Resultados

En la fig. 14 se identifica que se logró 38.9 kg/cm^2 en la mezcla que empleó la denominada curva idealizada. En la fig. 15 se aprecian tres probetas representativas de las series BTC-N, BTC-CM y BTC-CI. En la fig. 16 se utilizó la curva idealizada BTC-CI y se modificó el porcentaje de agua, encontrando en la mezcla con 12 % 50.6 kg/cm^2 . La fig. 17 muestra el valor de 54.75 kg/cm^2 en la mezcla que utilizó la curva idealizada, 12 % de agua y 512 kgf para la elaboración de las probetas.

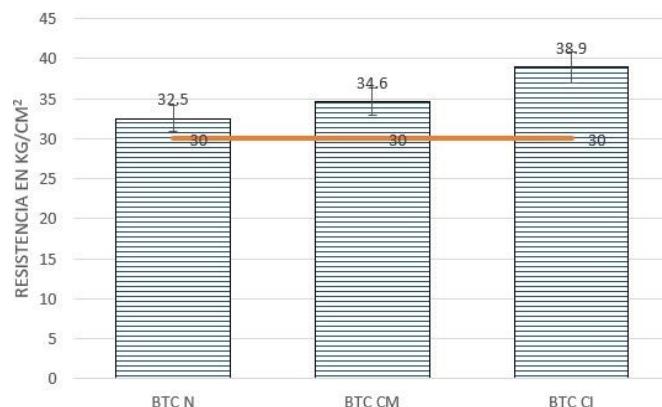


Fig. 14. Resultados de resistencia a compresión (320kgf) y contenido de agua (16 %) constantes y granulometría variable. BTC-N corresponde a la mezcla sin compensar, BTC-CM es la mezcla derivada de la consideración de la curva media y finalmente el BTC-CI coincide con la granulometría de la curva idealizada.

Fuente: Elaborado por los autores.

Fig. 14. Results of constant compressive strength (320kgf) and water content (16 %) and variable granulometry., BTC-N corresponds to the uncompensated mixture, BTC-CM is the mixture derived from the consideration of the mean curve and finally the BTC-CI coincides with the granulometry of the idealized curve.

Source: Prepared by the authors.

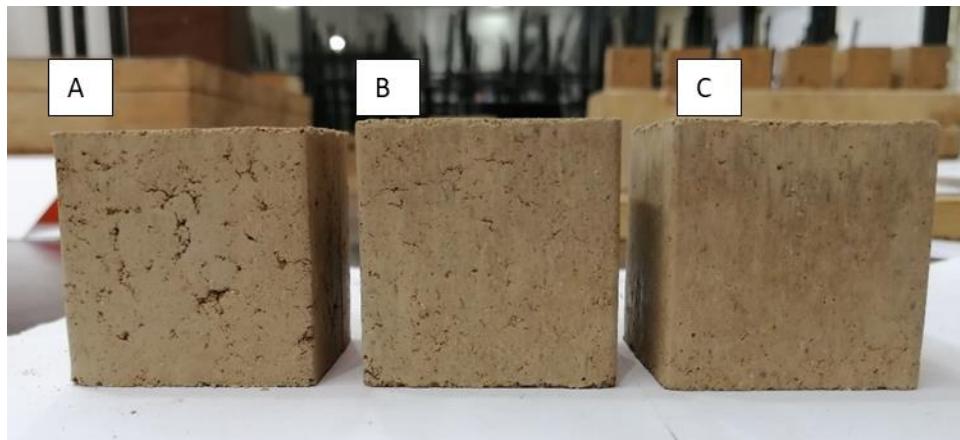


Fig. 15. Comparación de probetas, que cumplen con el rango de la norma. **A)** curva granulométrica sin modificar. **B)** curva granulométrica media. **C)** curva granulométrica idealizada.

Fuente: Elaborado por los autores.

Fig. 15. Comparison of specimens, which comply with the range of the standard. **A)** unmodified curve. **B)** mean curve. **C)** idealized curve.

Source: Prepared by the authors.

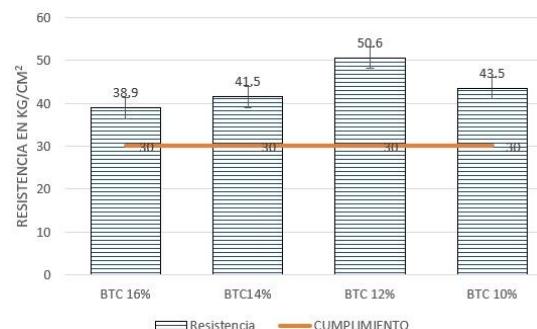


Fig. 16 Resultados a compresión constante (320kgf) variando el porcentaje de agua del 16 %, 14 %, 12 % y finalmente 10 % y utilizando la curva idealizada para la granulometría.

Fuente: Elaborado por los autores

Fig. 16. Results at constant compression (320kgf) varying the percentage of water from 16 %, 14 %, 12 % and finally 10 % and using the idealized curve for the granulometry.

Source: Prepared by the authors.

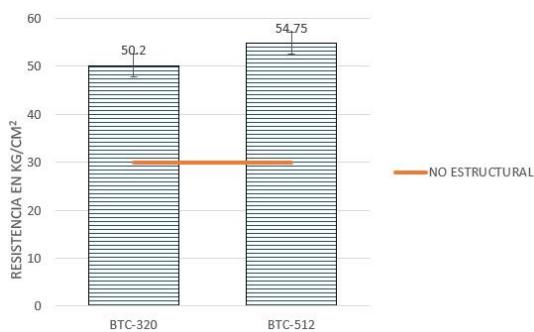


Fig. 17. Resultados de compresión variando presión nominal 320- 512 kgf, con 12 % de agua y curva granulométrica idealizada.

Fuente: Elaborado por los autores.

Fig. 17. Compression results varying nominal pressure 320- 512 kgf, with 12 % water and idealized curve

Source: Prepared by the authors.

Discusión

La clasificación del suelo requirió aplicar ensayos complementarios de granulometría y consistencia como primera aproximación para determinar el diseño de mezcla. La muestra empleada se definió dentro del sistema SUCS como una “Arena arcillosa” (SC) que, con base en la norma española UNE 41410, coincide con el rango para su uso como BTC. Aunque la granulometría de la muestra cumple con los parámetros normados, se decidió modificar los rangos, bajo la hipótesis de que con ello se podría mejorar el desempeño mecánico. Las variables de análisis para el diseño de mezcla consistieron en ajustar la granulometría definida en dos curvas que sustentaron la elaboración de una primera serie en la que el porcentaje de agua (16 %) utilizado para las mezclas fue constante, al igual que la presión de elaboración (320kgf). Los resultados en promedio a compresión de las probetas de la primera serie fueron de 32.5 kg/cm^2 sin modificar (BTC-N), 34.6 kg/cm^2 curva media (BTC-CM) y 38.9 kg/cm^2 curva idealizada (BTC-CI) (fig. 14).

Posteriormente se realizó una segunda serie en la que varió la cantidad de agua de mezcla en 16, 14, 12 y 10 %, (porcentaje sobre el peso seco de la mezcla) empleando la curva idealizada en la granulometría y una presión de elaboración de 320kgf, con lo que se alcanzó una resistencia de 50.6 kg/cm^2 usando 12 % de agua en la mezcla, la elección del 12 % de agua en la mezcla fue porque ese porcentaje presentó mejor desempeño mecánico (fig.16). Se realizó una tercera serie empleando 320 y 512 kgf para elaborar las probetas, en la que se registró un promedio a compresión de 50.2 kg/cm^2 con 320 kgf y 54.75 kg/cm^2 con 512 kgf (ver fig. 17). En la fig. 18 se presentan los mejores resultados. De la serie BTC-CI a BTC-12 % hubo un incremento porcentual de 29 %, con un resultado inicial de 38.9 a 50.2 kg/cm^2 al utilizar una curva idealizada con un ajuste al 12 % de

agua en el diseño de mezcla. Y al cambiar la fuerza de elaboración de las probetas de 320 a 512 kgf, se logró un incremento del 9 %, pasando de 38.9 a 54.75 kg/cm².

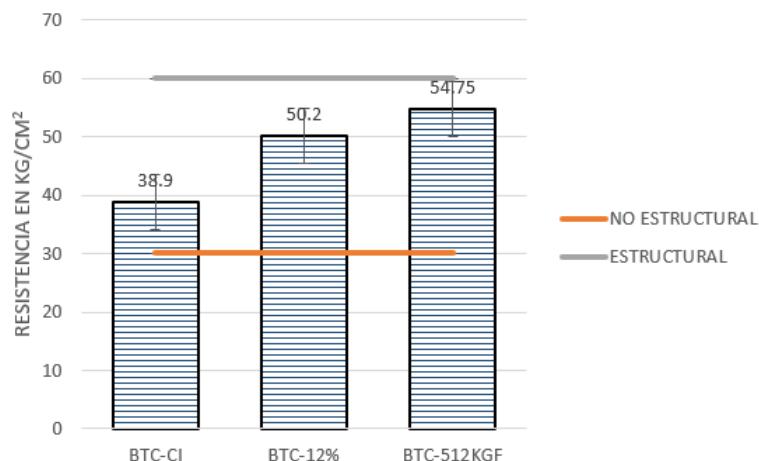


Fig. 18. Mejores resultados a compresión por serie.

Fuente: Elaborado por los autores.

Fig. 18. Best compression results per series.

Source: Prepared by the authors.



Fig. 19. A) 320kgf, 16 % agua, curva sin modificar. **B)** 320kgf, 16 % agua, curva media. **C)** 320kgf, 16 % agua, curva ideal. **D)** 512kgf, 12 % agua, curva ideal.

Fuente: Elaborado por los autores.

Fig. 19. A) 320kgf, 16 % water, unmodified curve. **B)** 320kgf, 16 % water, medium curve. **C)** 320kgf, 16 % water, ideal curve. **D)** 512kgf, 12 % water, ideal curve.

Source: Prepared by the authors.

En la fig. 19 se aprecia la diferencia en la textura de las probetas utilizadas para las series con: A) curva normal (BTC-N), B) media (BTC-CM) y C) idealizada (BTC-CI), apreciándose mejor consistencia en la serie BTC-CI, lo cual está en concordancia a los resultados encontrados ya que

dicha serie obtuvo la resistencia a compresión más alta de las tres curvas analizadas con 38.9 kg/cm^2 . En la fig. 19 se anexó la probeta de la serie 3 (BTC-512) con la que se registró una resistencia a compresión de 54.75 kg/cm^2 en promedio, que al comparar con la fig. 19 A) BTC-N, fig. 19 B) BTC-CM y fig. 19 C) BTC-CI, resulta en una superficie más homogénea, aunque sin apreciar una variación significativa con respecto a la fig. 19 C) BTC-CI.

Conclusión

La normatividad internacional existente para producir BTCS permite que los rangos texturales de los suelos utilizados como materia prima en la fabricación de los BTC, sean demasiado amplios. Ello es debido al hecho que se considera que habrán de ser estabilizados con cemento, emulsión asfáltica o cal. Las empresas que fabrican las prensas o los ingredientes químicos consideran que de este modo quedan “cubiertas” puesto que normalmente en la elaboración de BTC se emplean los suelos locales, sin haber realizado caracterizaciones adecuadas, procesos de compensación granulométrica ni control estricto de la humedad de mezclado requerida.

Esta laxitud de las normas favorece estos procesos y propicia el consumo de los estabilizantes químicos a pesar del costo y el impacto ambiental que su utilización conllevan. La tierra cruda analizada en la presente investigación evaluada en tres series empleando diferentes mezclas cumple con las especificaciones solicitadas para su uso como muros no estructurales, aunque no se alcanzan los 60 kg/cm^2 solicitados para uso estructural. Aun así, es notorio el incremento en la resistencia obtenida de 54.75 kg/cm^2 sin emplear cal o cemento para mejorar la resistencia.

Se ha podido poner en evidencia que al reducir el intervalo granulométrico de las tierras utilizadas en la elaboración de los BTC, no se limita la posibilidad de emplear cualquier tipo de suelos, sino se promueve su análisis granulométrico para optimizar su empleo sin tener que recurrir a procesos de estabilización química. De esta manera el suelo mejora en un 68.46 % su resistencia a la compresión de forma totalmente natural al pasar de 32.5 a 54.75 kg/cm^2 simplemente con una apropiada graduación de sus componentes originales.

Los resultados parciales por series de granulometría demuestran que emplear el rango granulométrico específico para BTC, que se denominó, en este estudio como curva idealizada, mejora el desempeño mecánico. El segundo resultado relevante consistió en la valoración del papel del agua de mezcla dentro del sistema y que, al igual que sucede con la granulometría, requiere ser

adecuadamente dosificado. No es recomendable establecer “recetas” para la hidratación como sucede convencionalmente con las mezclas de cemento y arena.

El porcentaje de agua inicial se fijó en el 16 % para el suelo evaluado. Posteriormente se realizaron ajustes en el porcentaje de agua en la mezcla y se observó que con un 16 % los bloques resistieron 38.9 kg/cm^2 , con 14 % de agua 41.5 kg/cm^2 , agregando 12 % de agua de mezclado 50.6 % kg/cm^2 y finalmente con 10 % de agua resistieron 43.5 kg/cm^2 . El porcentaje ideal de agua para la mezcla según los resultados obtenidos fue de 12 %. Todas las probetas se elaboraron con la curva granulométrica idealizada y la misma presión nominal de 320 kgf. Es evidente que el porcentaje de agua en la mezcla tiene un efecto muy destacable en la resistencia a la compresión y que existe un porcentaje óptimo. Un mayor porcentaje de agua en la mezcla permite mejorar la trabajabilidad, pero disminuye resistencia mecánica. Con un 12 % de agua en la mezcla es posible incrementar en 23.12 % la resistencia a la compresión, en comparación con bloques mezclados con 16% de agua. Finalmente, al incrementar la fuerza de compactación para conformar las probetas de tierra comprimida se mejoró la resistencia a la compresión a 54.75 kg/cm^2 . Pero si se compara el promedio de 50.2 kg/cm^2 de la serie BTC-12 % agua con 320kgf de compactación, se reconoce que un óptimo nivel hídrico es más eficiente que el incremento de la presión de elaboración, cuando se emplea una curva granulométrica idealizada.

Se concluye que resulta evidente que la aplicación de los principios naturales de densificación de suelos es una estrategia sostenible en el desarrollo de componentes constructivos, pero debe complementarse con evaluaciones de capilaridad, durabilidad , resistencia a la abrasión, entre otras, para su empleo intensivo en la edificación

Agradecimientos

Al Laboratorio de Materiales y Sistemas Estructurales de la Facultad de Arquitectura de la Universidad Nacional Autónoma de México y al Laboratorio Nacional de Vivienda y Comunidades Sustentables y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

Referencias

- Álvarez-Solís, J. D., Mendoza-Vega J., Pool-Novelo. (2015). Suelo y Tierra: pautas para la vida. *Ecofronteras*, 19(55), 2-5
<https://revistas.ecosur.mx/ecofronteras/index.php/eco/article/view/1597/1540>

- ASTM D2487. (2010). La práctica de Clasificación de Suelos para la Ingeniería. (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos). West Conshohocken, Estados Unidos. <https://www.astm.org/Standards/D2487.htm>
- ASTM D-427, (2004), “Test methods for shrinkage factors of soil by the mercury method”. West Conshohocken, Estados Unidos. <https://www.astm.org/Standards/D427.htm>
- ASTM Estándar D4318, (2005). Límite Líquido, Límite Plástico y el índice de plasticidad de los suelos. West Conshohocken, PA: ASTM. <https://www.astm.org/Standards/D2487.htm>
- ASTM International C117-17. (2018) Método de ensayo normalizado para materiales más finos que una criba no. 200 (75 μm) en agregados minerales mediante lavado. West Conshohocken, Estados Unidos. <https://www.astm.org/Standards/C117.htm>
- ASTM International C136, (2005). Método de ensayo normalizado para la determinación granulométrica de agregados finos y gruesos. West Conshohocken, PA: ASTM. <https://www.astm.org/Standards/C136.htm>
- ASTM International, (1998). ASTM D421-85 Standard practice for dry preparation of soil samples for particle-size analysis and determination of soil constants. West Conshohocken, Estados Unidos. <https://www.astm.org/Standards/D421.htm>
- ASTM International, E2392 / E2392M. (2010). Guía estándar para el diseño de pared de tierra. West Conshohocken, Estados Unidos. <https://www.astm.org/Standards/E2392.htm>
- ASTM E11 (2018). Standard Specification for Woven Wire Test Sieve Cloth and Test Sieves. Conshohocken, Estados Unidos. <http://www.astm.org/Standards/E11.htm>.
- Barbata Solá, G. (2002). *Mejora de la tierra estabilizada en el desarrollo de una arquitectura sostenible hacia el siglo XXI*. (Tesis doctoral) UPC, Departamento de Construcción Arquitectónica I. Recuperado de <http://hdl.handle.net/2117/93418>
- Bloqueras. Org (2021). Bloques de concreto. <https://bloqueras.org/bloques-concreto/>
- Medvey, B., Dobiszay, G. (2020) Durabilidad de las construcciones de tierra estabilizadas: una revisión. *Geotech Geol Eng* **38**, 2403–2425 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10706-020-01208-6>
- Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social, (2020). *Informe de Evaluación de la Política de Desarrollo Social 2020*. Ciudad de México. Ciudad de México: CONEVAL, 2020. Recuperado de: https://www.coneval.org.mx/Evaluacion/Documents/Informes/IEPDS_2020.pdf

- González-López, J. R., Juárez-Alvarado, C. J., Ayub-Francis, B. & Mendoza-Rangel, J. M., (2018). Compactation effect on the compressive strength and durability of stabilized earth blocks. *Construction and Building Materials*, 163, 179-188. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.074>
- Guerrero, L. (2007). Arquitectura en tierra Hacia la recuperación de una cultura constructiva. APUNTES, 20(02), 182-201. Recuperado de <https://biblat.unam.mx/hevila/ApuntesBogota/2007/vol20/no2/1.pdf>
- Guerrero, L. (2016). El papel de la humedad y la compactación en la elaboración de recubrimientos de tierra. En *Revista Construcción con Tierra* CT7, 11-22. Recuperado de <file:///C:/Users/Administrator/Downloads/988-Texto%20del%20art%C3%ADculo-3837-1-10-20200528.pdf>
- Hafliger, I., Jhon V., Passer A., Lasvaux, S., Ho, E. (2017). Buildings environmental impacts, sensitivity related to LCA modelling choices of construction materials. *J Cleaner Prod.*, 156, 805-816. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.052>
- INECC (2018). *Asesoría para realizar un análisis costo beneficio de las tecnologías y métodos productivos "cero emisiones" para la fabricación de productos sustitutos al ladrillo rojo artesanal en México*. Consultada en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/393461/Entrega_Final_Cero_Emisiones_para_publicaci_n.pdf
- Juárez, E., y Rodríguez, R. (2005). *Fundamentos de la Mecánica de Suelos*. Editorial Limusa México (Tomos I y II). México.
- Keefe, L., (2005). *Earth Building*. Taylor and Francis Group, New York.
- Mansour, B. M., Jelidi, A., Cherif, S. y Jabrallah, 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>
- Miccoli, L., Müller U., Fontana, P. (2014). Mechanical behavior of earthen materials: a comparison between earth masonry, rammed earth, and cob. *Construction and Building Materials* 61, 327-339. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.03.009>
- Minke, G. (2001). *Manual de construcción para viviendas antisísmicas de tierra*. Kassel, Alemania. Fin de siglo. Recuperado de http://sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/2014-08-31_06-39-21109057.pdf

- Minke, G. (2005) *Manual de construcción en tierra*, Montevideo, Uruguay: Fin de siglo. Disponible en: <http://permaconstruccion.org/wp-content/uploads/2017/06/Manual-Construccion-En-Tierra-Minke.pdf>
- Morel, J.-C., Pkla, A. y Walker, P., (2007). Compressive strength testing of compressed earth blocks. *Construction and Building Materials*, 21(2) 303-309. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.08.021>
- NTE E.080. (2017). Norma técnica de edificación para construcción con tierra. Lima, Perú. Recuperado de: https://procurement-notices.undp.org/view_file.cfm?doc_id=109376
- NZS 4297. (1998). Diseño de ingeniería de edificios de tierra. Wellington, Nueva Zelanda. Recuperado de: http://www.eastue.org/project/linea-adobe/norme/NZD4297-1998-Engineering_Design_of_Earth_Buildings.pdf
- NZS 4298. (2020). Materiales y mano de obra para la tierra edificios. Wellington, Nueva Zelanda.
- OCDE. (2015). <http://www.oecd.org/economy/surveys/MexicoOverview-2015%20Spanish.pdf> Recuperado de
- ONNCCE, (2015). NMX-C-508-ONNCCE-2015 Building Industry-Compressed earth blocks of lime stabilized-specifications. Definitions, specifications and testing methods. México: ONNCCE.
- Rakotomamonjy, Bakonirina (2014) *Pertinencia de la arquitectura de tierra para el desarrollo sostenible, y las actividades de CRAterre*. Foro Urbano Mundial 7, Universidad Santo Tomás, Bucamaranga, Región desconocida. (Hal-01159924) Recuperado de: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01159924/>
- Rivera Torres, J. (2012). El adobe y otros materiales de sistemas constructivos en tierra cruda: caracterización con fines estructurales. Apuntes: *Revista de Estudios sobre Patrimonio Cultural*, 25(02), 164-181. Recuperado de: http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S1657-97632012000200002&script=sci_arttext&tlang=pt
- Roux, R. (2010). *Bloques de tierra comprimida BTC en zonas Húmedas*. México: Plaza y Valdés Editores.
- Roux, R. (2011). *BTC Estabilizado con CPO al 6% y refuerzo de fibra de coco, en Muros*. España. EAE, Editorial Academia Española.

Optimización del proceso de elaboración de Bloques de Tierra Comprimida (BTC) mediante el control granulométrico de las partículas del Suelo

UNE 41410, (2008). Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo. Madrid: AENOR.

Van Damme, H. y Houben, H., (2018). Earth concrete. Stabilization revisited. *Cement. Concrete. Research.* 114, 90-102 <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.02.035>

Zami, M., Lee, A. (2010). Economic benefits of contemporary earth construction in low-cost urban housing-State of the art review. *Journal of Building Appraisal*, 5(3), 259-271. <http://doi:10.1057/jba.2009.32>