

BLOQUES DE TIERRA COMPRIMIDA ESTABILIZADOS CON CAL. EVALUACIÓN DE DOSIFICACIONES Y RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

Santiago Cabrera

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe (UTN – FRSF)
e-mail: spcabrera@outlook.com

Ariel González

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe (UTN – FRSF)
e-mail: aagonzal@frsf.utn.edu.ar

Rodolfo Rotondaro

Universidad de Buenos Aires, Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo (UBA – FADU)

Palabras clave: bloque de tierra comprimida, suelo-cal, dosificación, resistencia a compresión

Resumen

El bloque de tierra comprimida o BTC es un mampuesto de fábrica producido mediante la compresión de tierra empleando prensas diseñadas específicamente para dicha tarea. Si bien el material de base lo constituye la tierra, se admite la adición de estabilizantes para mejorar las características físicas del bloque, aumentando así su resistencia a la compresión y al intemperismo.

Es objetivo de este trabajo evaluar la resistencia a compresión de los BTC producidos con tierra de la comuna de Monte Vera estabilizados con cal, y contrastarla con la de sus homólogos sin estabilizar y estabilizados con cemento; a fin de evaluar la factibilidad de reemplazar de manera total o parcial a este último en la fabricación de los BTC, lo cual reduciría significativamente el impacto ambiental y el consumo energético vinculado a su elaboración.

Los resultados obtenidos permiten observar que los valores de resistencia a compresión de los BTC estabilizados con cal hidráulica son bajos respecto de los estándares requeridos para este mampuesto.

1 INTRODUCCIÓN

El bloque de tierra comprimida (BTC) es un mampuesto fabricado mediante el prensado de tierra contenida dentro de un molde, empleando para ello prensas mecánicas o hidráulicas, de accionamiento manual para bajas demandas de producción o automáticas para sistemas industrializados (Fontaine, 2009). Según Salas (1995), el BTC puede ser considerado como un salto tecnológico respecto al tradicional adobe, el cual, sin dejar de mirar por el espejo retrovisor, logra integrarse de manera más acorde a los contextos productivos vigentes en la actualidad, empleando en su proceso de fabricación maquinaria especializada.

Las ventajas generales del BTC, en comparación con otros mampuestos de fábrica, como el tradicional ladrillo cerámico común o hueco o el bloque de hormigón, pueden resumirse en su regularidad de forma (presentando caras lisas y aristas vivas), su alta densidad (generada por la compresión efectuada durante su fabricación), la cual los hace más resistentes a la erosión y a la acción del agua, y la posibilidad de ser reciclado prácticamente en su totalidad (Roux y Espuna, 2012).

En cuanto a la producción del bloque en sí, posee características que la hacen más económica y ambientalmente amigable si se la compara con la fabricación de productos semejantes. Por un lado, la energía utilizada en la producción de estos bloques es mucho menor, lo cual se expresa considerando tanto la técnica en sí, como las acciones necesarias

para conseguir la materia prima previamente; además, los aditivos estabilizantes que se le adicionan representan un porcentaje muy bajo de su composición (Bestraten et al, 2011). En este sentido, es importante considerar que su fabricación se hace aprovechando los recursos del sitio (Vázquez Éspi, 2001). Por otro lado, no se precisa mano de obra altamente calificada para su elaboración, lo cual contribuye a la generación de puestos de trabajo para personal con baja formación. Todos estos factores colaboran para lograr un costo de fabricación menor al de sus pares “tradicionales”.

Si bien el material de base para estos bloques es la tierra, se admite la incorporación de estabilizantes minerales (generalmente cal o cemento Portland) que permitan mejorar las características físicas del mismo, aumentando su resistencia a la compresión y al intemperismo y reduciendo las fisuras provocadas por la retracción de la arcilla (Roux, 2010).

Diversos aditivos han sido empleados en la estabilización de los BTC: desde sustancias naturales como la sábila de mucilago (Roux, 2010), la caseína y la celulosa (Vissac et al, 2017), hasta derivados del petróleo, como lo son las emulsiones asfálticas. Sin embargo, desde los orígenes del BTC, el estabilizante por excelencia ha sido el cemento portland, tal es el caso que en numerosas regiones del país y de Latinoamérica suele llamarse a los BTC como “bloques de suelo cemento”, léxico influenciado por los ingenieros viales.

A pesar del buen desempeño que poseen los BTC estabilizados con cemento, debe considerarse que, además del elevado costo económico de este aglomerante, su fabricación requiere elevados procesos de transformación térmica (superándose los 1400°C), liberando enormes cantidades de CO₂ a la atmósfera. Es por este motivo que en el Laboratorio de Geotecnia de la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe (UTN FRSF), en el marco de una tesis doctoral financiada por el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (CONICET) y de un Proyecto de Investigación y Desarrollo homologado por Rectorado de la UTN, se está evaluando el desempeño de BTC estabilizados con aditivos no cementicios, dándole mayor preponderancia a los aportes potenciales de la cal -dado el menor impacto ambiental que presenta en contraste con el cemento-, ya que la utilización de ésta en la estabilización del suelo, y especialmente de suelos finos, data de épocas muy antiguas y se mantiene vigente en la actualidad, como lo demuestra el la norma mexicana NMX C 508, particularmente abocada a los procedimientos de ensayo y control para BTC estabilizados con cal (ONCCE, 2015).

Se ha demostrado reiteradas veces que la acción de la cal en la estabilización del suelo arcilloso puede advertirse en dos etapas. En una primera etapa, casi inmediata a la incorporación de la cal, se produce una reducción del índice de plasticidad del suelo por incremento de su límite plástico, lo cual lo vuelve menos sensible a los efectos perjudiciales del agua y, particularmente, a los cambios volumétricos. Ya en edades más avanzadas - a partir de los 8 semanas desde el momento de la estabilización (Rigassi, 1985)- se produce un significativo aumento de la resistencia mecánica del suelo, lo cual se atribuye a la formación de nuevos compuestos cementantes (silicatos de calcio y aluminatos de calcio hidratados) al recombinarse los iones de calcio aportados por la cal con los minerales arcillosos del suelo (Diamond y Kinter, 1971).

2 OBJETIVOS

El objetivo general de ésta investigación es el siguiente: reemplazar al cemento portland empleado en la estabilización de los BTC por cal, ya sea de manera total o parcial. En esta instancia de la investigación, se proponen como objetivos particulares los siguientes:

- Evaluar la resistencia a compresión de los BTC estabilizados con cal;

- Contrastar los resultados de los ensayos realizados sobre los BTC de suelo-cal con la de sus homólogos sin estabilizar y estabilizados con cemento.

3 METODOLOGÍA

3.1 Producción de los BTC

Para el desarrollo de este trabajo, fueron confeccionadas 7 series distintas de BTC, empleando tierra de la zona estabilizada con cemento portland (CPC 40 marca Holcim) y cal hidráulica (marca Cacique) en diversas proporciones. En la fabricación de los mismos fue empleada una prensa de accionamiento hidráulico que produce dos bloques por ciclo, fabricada por la empresa brasilera ECO MAQUINAS (<http://ecomaquinas.com.br/esp/>). La presión de molde entregada por la prensa es de 30 kgf/cm² (por bloque). Las dimensiones de los BTC producidos con este equipo de prensado fueron de 7.5 x 15 x 30 cm, con dos huecos de 6 cm de diámetro.

La tierra empleada en la fabricación de los BTC provino de la comuna de Monte Vera, lindante con la ciudad de Santa Fe, y fue clasificada según el sistema SUCS (IRAM 10509, 1982) como un limo arcilloso de baja plasticidad (CL-ML) con bajos contenidos de arena fina (un 25%). Además, mediante el ensayo de hidrómetro estipulado por la norma ASTM D4221 (2011) pudo determinarse que el contenido de arcillas presente en el suelo es del 29%. Dado el escaso contenido de arena presente en el suelo, en las dosificaciones propuestas, además de modificar el tipo de estabilizante empleado, en algunas de ellas se incorporó arena, de manera tal de mejorar la curva granulométrica y obtener bloques más resistentes (Rigassi, 1985). En la tabla 1 pueden apreciarse las series de BTC realizadas con sus respectivas dosificaciones, expresadas en volumen.

Tabla 1. Series de BTC realizadas. Dosificaciones

SERIE	N° BTC producidos	DOSIFICACIÓN (% en volumen)			
		Tierra	Arena	Cemento	Cal
Cal 1	12	90,00	-	-	10,00
Cal 2	12	70,00	20	-	10,00
Cto 1	30	90,00	-	10,00	-
Cto 2	12	70,00	20,00	10,00	-
Tierra 1	12	80,00	20,00	-	-
Tierra 2	12	60,00	40,00	-	-
Tierra 3	12	100,00	-	-	-

Para evaluar la resistencia mecánica de los BTC estabilizados con cal hidráulica y cemento portland, sobre éstos se realizó el ensayo de resistencia a compresión simple.

3.2 Resistencia a compresión

El procedimiento adoptado para determinar la resistencia a compresión simple de los bloques de tierra comprimida fue el estipulado por la norma brasilera NBR 8492 (2013).

La preparación de las probetas se realizó cortando de manera transversal cada bloque en dos partes iguales, sobreponiendo las dos mitades correspondientes de cada uno por la cara a pegar -previamente humedecida- y teniendo cuidado de invertirlas, es decir que la cara de una quede en el mismo plano de la sección de corte de la otra. Se pegan las dos

mitades empleando una capa de mortero 10 mm de espesor, el cual está constituido por una mezcla de tierra y cemento con medidas de 1 parte de cemento por 3 partes de tierra, de manera que el ensayo se pueda hacer después de 48 horas de curado. No fue necesario encabezar las caras de la probeta por ser las mismas perfectamente lisas y paralelas (la norma NBR 8492 brinda esta posibilidad).

Una vez endurecido el mortero se miden las dimensiones de la superficie superior e inferior de las probetas, calculando para cada una de ellas la superficie promedio. Se ubica la probeta sobre el plato de carga, verificando que la misma se encuentre perfectamente centrada; se aplica la carga de manera continua y sin movimientos bruscos a una velocidad constante de 50 Kgf/s hasta alcanzar la rotura de la probeta. Se registra la máxima carga soportada durante el ensayo y luego se divide por la sección bruta de la probeta, obteniendo así la tensión de rotura, en Kgf/cm².

Para la realización de estos ensayos se utilizó un gato hidráulico tipo “botella” con 20 tf de capacidad, una celda de carga con apreciación de 5 kgf y capacidad máxima de 20 tf; un pórtico de carga y dos suplementos metálicos, empleados para transmitir de manera uniforme las cargas aplicadas sobre las caras de contacto. En la figura 1 puede apreciarse el instrumental empleado durante la ejecución del ensayo y la falla de una probeta.



Figura 1. Ensayo de resistencia a compresión simple. Sobre una probeta de la serie “Cal 1”

4 PRINCIPALES RESULTADOS OBTENIDOS

A continuación, en la tabla 2 se exponen los resultados de los ensayos de resistencia a compresión realizados sobre cada serie de probetas, mientras que la Figura 2 se presenta un gráfico de caja (realizado con el software estadístico MiniTab) en el cual pueden apreciarse los resultados obtenidos de manera más clara.

Tabla II. Resultados de los ensayos de compresión

SERIE	N° BTC producidos	Resistencia (Kgf/cm ²)	
		Media	Desv. estándar
Cal 1	12	8.408	1.768
Cal 2	12	8.779	2.2056
Cto 1	30	46.47	6.410
Cto 2	12	36.24	9.620
Tierra 1	12	7.765	1.766
Tierra 2	12	8.672	2.468
Tierra 3	12	6.339	1.861

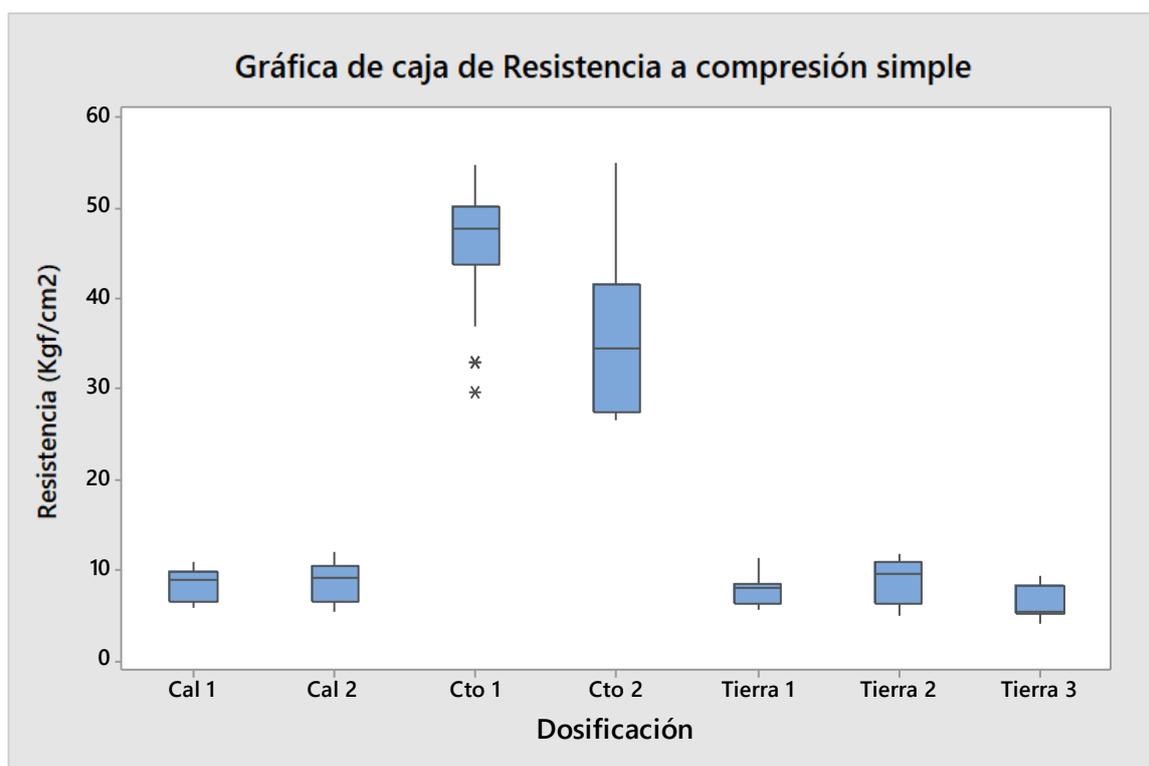


Figura 2. Gráfico de caja Resistencia vs. Serie

5 DISCUSIÓN

5.1 Incidencia del estabilizante

En la figura 2 puede apreciarse claramente como la resistencia a compresión de los BTC estabilizados con cemento (con y sin arena) es ampliamente superior a la de los BTC sin estabilizar, o estabilizados con cal. Así mismo, puede advertirse que las resistencias medias entre los BTC sin estabilizar y los estabilizados con cal no difieren mucho entre sí, independientemente del contenido de arena de la serie. Para apreciar con mayor detalle el

comportamiento de las series estabilizadas con cal y sin estabilizar, en la figura 3 se muestra un gráfico de caja confeccionado únicamente con estas series, excluyendo las series estabilizadas con cemento.

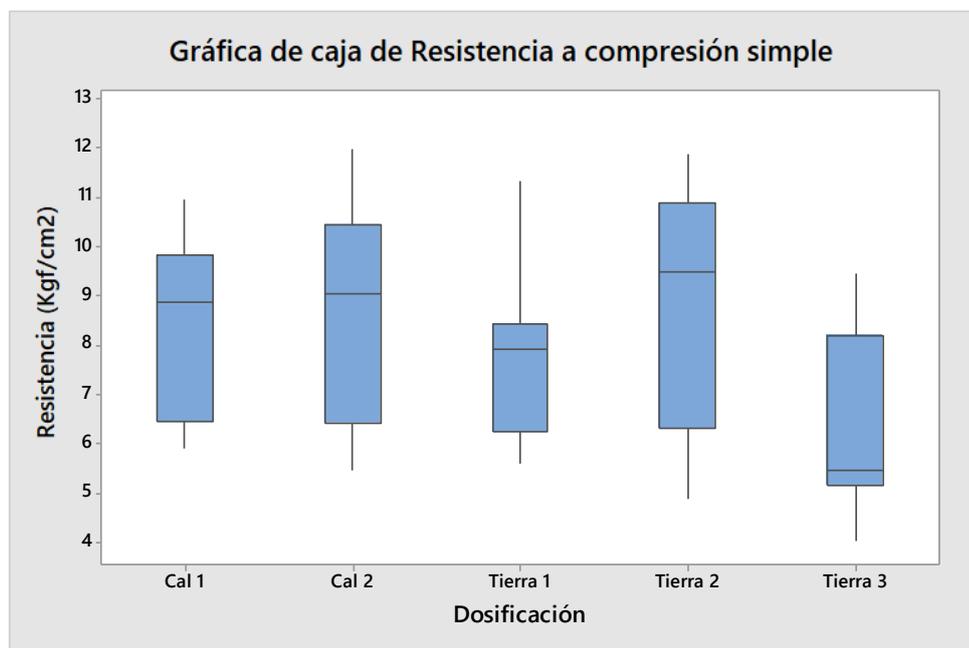


Figura 3. Gráfico de caja Resistencia vs. Serie

5.2 Análisis de variancias (ANOVA)

Para evaluar el comportamiento de cada serie se realizó un análisis de variancias ANOVA, empleando el software MiniTab, luego del cual pudo rechazarse (con un 95% de confianza) la hipótesis nula de igualdad entre las resistencias medias de cada serie, determinándose lo siguiente:

- La resistencia media de la serie Cto 1 (46.47kgf/cm²) es estadísticamente superior a las resistencias medias de las demás series;
- La resistencia media de la serie Cto 2 (36.24 kgf/cm²) es estadísticamente inferior a la resistencia media de la serie Cto 1, pero superior a las resistencias medias de las demás series;
- No existe diferencia estadística entre las resistencias medias de las series sin estabilizar y las estabilizadas con cal, independientemente de su contenido de arena.

5.3 Incidencia del contenido de arena

Tras analizar los datos de la Tabla II y la figura 2, puede advertirse que, independientemente del estabilizante empleado durante la producción de los BTC, el contenido de arena en los mismos tiene gran relevancia en su resistencia a la compresión.

En las series estabilizados con cemento pudo advertirse mediante el análisis de variancias que la resistencia de los BTC sin arena incorporada (Cto 1) es estadísticamente mayor a la resistencia de los bloques con arena (Cto 2), lo cual puede corroborarse de manera gráfica en la figura 4. Sin embargo, este comportamiento debe ser estudiado en mayor detalle, ya que para determinar la resistencia media de la serie Cto 1 fueron ensayadas 30 probetas ensayadas, mientras que para la serie Cto 2, tan solo pudieron ensayarse 12 probetas;

siendo la única serie cuyos datos no superaron la prueba de normalidad y presentaron una varianza extremadamente elevada en comparación con la de las demás series.

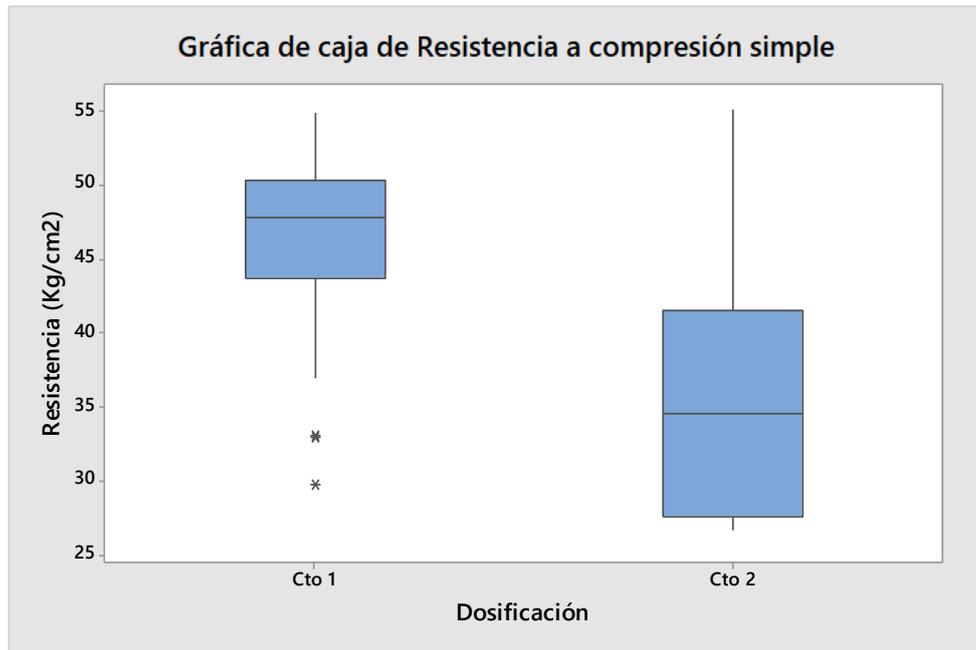


Figura 4. Gráfico de caja Resistencia vs. Serie de las series estabilizadas con cemento

Tanto en las series estabilizadas con cal como en las que no incorporaron estabilizante alguno, el comportamiento de las series fue diferente al de las series estabilizadas con cemento, ya que, a pesar de no presentar resistencias medias estadísticamente diferentes entre sí, las resistencias promedio de cada serie se vieron incrementadas con el contenido de arena, lo cual puede apreciarse en las figuras 5 y 6, en las que se indica con una ⊕ la resistencia promedio de cada serie.

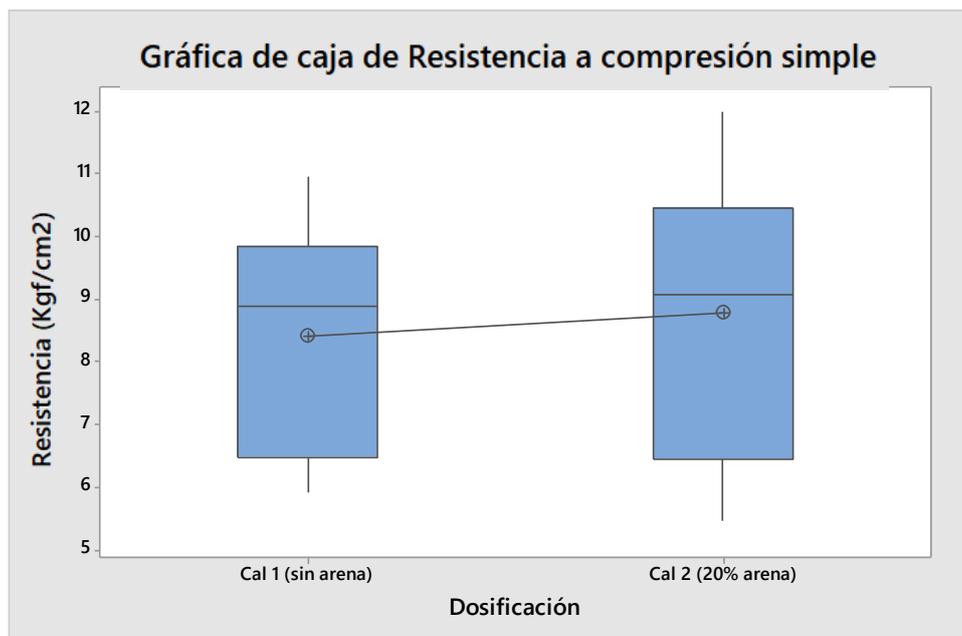


Figura 5. Resistencia a compresión media de los BTC estabilizados con cal

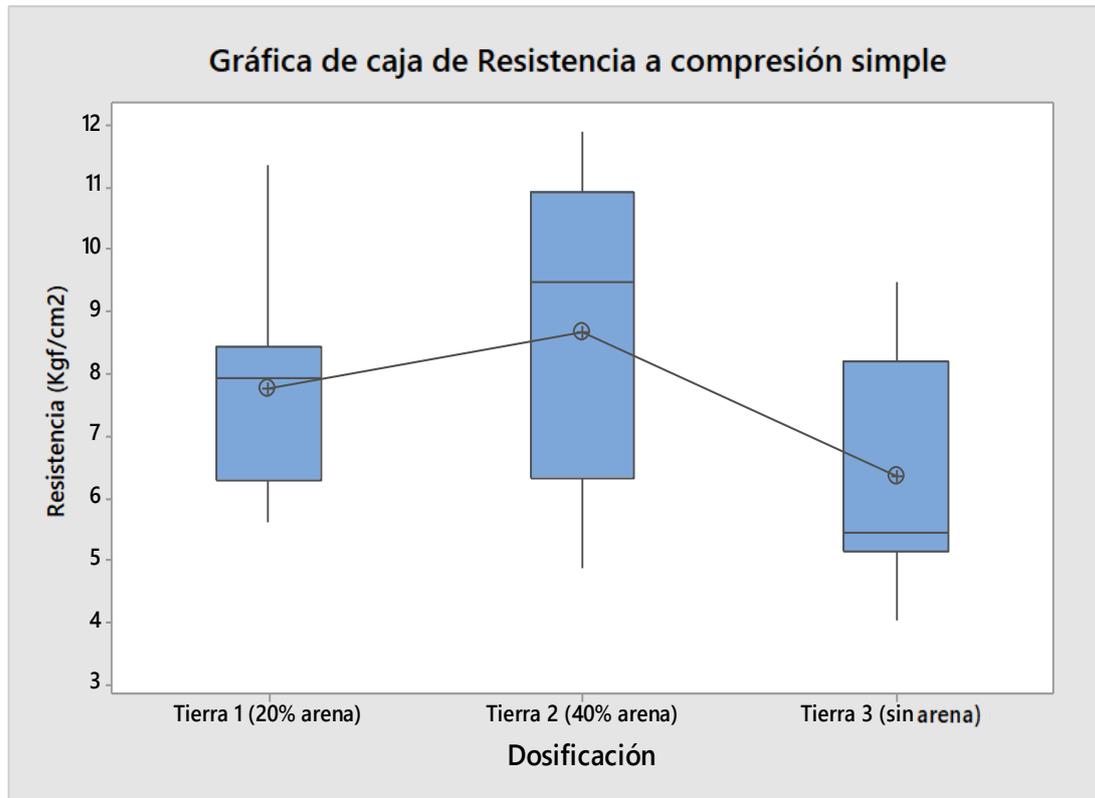


Figura 6. Resistencia a compresión media de los BTC sin estabilizar.

6 CONCLUSIONES Y COMENTARIOS FINALES.

Tras evaluar y discutir los resultados obtenidos, puede concluirse lo siguiente:

- Los BTC estabilizados con cemento presentan una resistencia media a compresión 4 veces superior a la resistencia media de los BTC estabilizados con cal hidráulica.
- No hay diferencia estadística entre la resistencia a compresión de los BTC estabilizados con cal y la de los bloques no estabilizados, con las dosificaciones y método de compresión y evaluación empleados.
- Para los BTC sin estabilizar, el contenido de arena aumenta hasta en un 15% la resistencia media a compresión de los bloques, mientras que, para los BTC estabilizados con cal hidráulica la resistencia media a compresión no se ve modificada por el contenido de arena.

En esta primera etapa de la investigación, los resultados obtenidos permiten observar que los valores de la resistencia en evaluación son bajos respecto de los estándares requeridos para este mampuesto. Los resultados y su evaluación permiten prever que la investigación debería continuar de manera experimental con el empleo de cal aérea hidratada (en lugar de la cal hidráulica empleada en esta etapa), y evaluar no solo su resistencia a compresión simple sino también al intemperismo, mediante ensayos de erosión húmeda. Se propone además determinar el contenido de arena óptimo para el suelo empleado, analizando la granulometría de la arena y el suelo por separados, combinándolos luego de manera tal de lograr que la curva granulométrica se encuentre dentro de los entornos recomendados; de esta manera, podría eliminarse esta variable del análisis.

7 RECONOCIMIENTOS

La realización de este trabajo fue posible gracias a la colaboración de Alejandro Baker, dueño de la empresa Mobak (Arroyo Leyes – Santa Fe) quien nos permitió utilizar las instalaciones de su fábrica para elaborar los BTC empleados en la etapa experimental de esta investigación.

8 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American Society of Testing Materials ASTM (2011). Standard D 4221: Standard Test Method for Dispersive Characteristics of Clay Soil by Double Hydrometer. Pensilvania.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2013). Norma NBR 8492. Tijolo de solo-cimento Análisis dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água - Método de ensaio. Rio de Janeiro.

Bestraten S; Hormías E. & Altemir A. (2011). Construcción con tierra en el siglo XXI. Informe de la Construcción, v. 63, n 523, p.19 - 31.

Diamond, S. & Kinter, E. (1971). Mecánica de la estabilización del suelo – cal. Una revisión interpretativa. Revista Carreteras. V. 12, n 55. Madrid.

Fontaine L. & Anger R. (2009). Batir en terre. Du graind de sable à l'architecture. París: Belin.

Instituto Argentino de Normalización IRAM (1982). Norma 10509: Mecánica de suelos. Clasificación de suelos, con propósitos ingenieriles. Buenos Aires.

Roux, R.; Espuna, J. (2012). Bloques de tierra comprimida adicionados con fibras naturales. México D.F.: Plaza y Valdés S.A.

Roux, R. (2010). Los Bloques de Tierra Comprimida (BTC) en zonas húmedas. México, D.F.: Plaza y Valdés S.A.

Rigassi, V. (1985). Compressed Earth Blocks: Manual of Production. Grenoble: Basin S.A.

Salas, Julián (1995). Habiterra: exposición Iberoamericana de construcción de tierra. Bogotá: Escala.

Vázquez Espi, M. (2001). Construcción e impacto sobre el ambiente: El caso de la tierra y otros materiales. Informes de la construcción. v. 52, n 471, p. 29 – 43

Vissac, A., Bourges, A. & Gandreau, D. (2017). Argiles & Biopolymères. Les stabilisants naturels pour la construction en terre. Grenoble, CRAterre.

Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, s.c. "ONCCE" (2015). Norma mexicana NMX C 508: Industria de la construcción. Bloque de tierra comprimida estabilizado con cal. Especificaciones y métodos de ensayo. México D.F.