

BLOQUES DE TIERRA COMPRIMIDA ESTABILIZADA CON CAL Y ADICIONES MINERALES

Virginia Clausen¹, Santiago Cabrera², Ariel González³

Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Santa Fe, Argentina

¹virginiaclausenr@gmail.com; ²spcabrera@outlook.com; ³agonzalez@frsf.utn.edu.ar

Palabras clave: BTC, puzolana, durabilidad, resistencia

Resumen

El objetivo de esta investigación es evaluar las propiedades físicas y mecánicas de los bloques de tierra comprimida (BTC) estabilizada con cal y adiciones minerales de fácil obtención en Argentina: puzolanas naturales y polvo de ladrillo. Para ello se moldearon series de BTC y de probetas cilíndricas con diferentes proporciones de cal y adiciones minerales, evaluando su resistencia a compresión, resistencia a erosión húmeda y absorción de agua; contrastando los resultados con los de series de control. Los resultados obtenidos permiten afirmar que la incorporación en pequeñas cantidades de ambas adiciones en combinación con cal aérea hidratada en la fabricación de BTC, en comparación con las series de probetas estabilizadas únicamente con cal aérea hidratada poseen un efecto negativo en las propiedades físicas y mecánicas de estos bloques.

1 INTRODUCCIÓN

Durante milenios, los seres humanos han utilizado la tierra como material de construcción en diversas formas: encofrada y compactada (tierra apisonada o tapia); mezclado con paja y puesto a mano, ya sea sola (cob) o como relleno y recubrimiento en estructuras de madera (quincha o bahareque); o como bloques de mampostería (adobes), generalmente moldeados a mano y secados al sol (Aubert et al., 2013). Sin embargo, la construcción con tierra tiene diferentes problemas vinculados a los métodos de producción y construcción artesanales, siendo un desafío la mejora de sus propiedades y vida útil. En los modelos productivos vigentes en la actualidad, ésta puede ser factible si los procesos de construcción se estandarizan, se hacen más eficientes y de fácil reproducción (González López et al., 2018). Desde esta perspectiva, los bloques de tierra comprimida (BTC) representan una evolución moderna sobre las técnicas tradicionales de construcción con tierra (Lima et al., 2012), contribuyendo a racionalizar la construcción con tierra, asegurando así la imagen de una técnica moderna, con un buen rendimiento y económica (Dethier; Cohen, 2019).

El BTC es un producto resultante de la mezcla de tierra, estabilizantes (generalmente cal o cemento) y agua, comprimida mediante la utilización de máquinas específicamente diseñadas para dicho fin que aportan una presión de moldeo de aproximadamente 2 MPa (Aranda Jimenez, 2009). Si bien el material de base para estos bloques lo constituye la tierra, si ésta no posee las características ideales para la producción de BTC, puede mejorarse con la incorporación de estabilizantes (Lima et al., 2012) que permitan mejorar sus propiedades físicas, aumentando así la resistencia a compresión y al intemperismo de estos bloques y reducir las fisuras provocadas por la retracción de la arcilla (Aranda Jimenez, 2010). Diversos aditivos han sido empleados en la estabilización de los BTC: desde sustancias naturales como la sábila de mucilago (Aranda Jimenez; Suárez-Domínguez, 2014), la caseína y la celulosa (Vissac et al., 2017) hasta derivados del petróleo, como las emulsiones asfálticas (Arteaga Paucar; Loja Saula, 2018). Sin embargo, desde los orígenes de esta tecnología, el estabilizante por excelencia ha sido el cemento portland (Malkanthi et al., 2020), tal es el caso que en numerosas regiones del país y Latinoamérica se los suele llamar “bloques de suelo cemento” (NBR 8492, 2012; NTC 5324, 2005), jerga muy influenciada por la ingeniería de camino.

A pesar de las buenas prestaciones que poseen los BTC estabilizados con cemento, debe considerarse que, además de su elevado costo económico, la fabricación de este aglomerante requiere de elevados procesos de transformación térmica (debe ser calcinado 1450°C) y una molienda intensiva del clinker (Maddalena et al., 2018), liberando enormes cantidades de CO_2 a la atmósfera. Se estima que por cada tonelada de cemento portland producidas, son liberadas a la atmósfera 0.86 toneladas de CO_2 (Miller et al., 2018).

Las características del proceso de producción de la cal, para el cual se requiere calcinar la piedra caliza a solo 900°C y produce una emisión de CO_2 equivalente del 50% respecto a la del cemento portland (Maddalena et al., 2018), pudiendo ser fabricada a pequeña escala y de manera artesanal, combinada con la capacidad de esta de reabsorber durante su proceso de endurecimiento gran parte del CO_2 liberado a la atmósfera durante su proceso de fabricación (National Lime Association, 2004), la han convertido en una alternativa ampliamente utilizada en la estabilización de BTC en diferentes países, mejorando su resistencia y durabilidad manera aceptable (Ouedraogo et al., 2020).

La utilización de cal en la estabilización de BTC no es nueva (Rigassi, 1985), generando mejoras significativas en la resistencia al intemperismo -particularmente a la erosión generada por lluvias (Falceto, 2012)-; sin embargo, la resistencia a compresión de los bloques estabilizados con cal es significativamente menor que la de sus homólogos estabilizados con igual proporción de cemento, lo cual ha sido advertido por numerosos autores (Cabrera; González, 2019; González López et al., 2018; Laguna, 2011; Malkanthi et al., 2020).

Una alternativa posible para disminuir la brecha entre los niveles de resistencia alcanzados por los BTC de suelo-cal y los estabilizados con cemento portland es el reemplazo parcial de cal por materiales con propiedades puzolánicas, los cuales no poseen por sí solos capacidad cementante significativa, pero molidos finamente y en presencia de agua reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio (componente principal de la cal) para formar compuestos con propiedades cementantes (Bediako, 2018). Estos materiales inorgánicos, naturales o artificiales, son silíceos o silicoaluminosos con pequeñas cantidades de calcio, magnesio, hierro, potasio y sodio que, tras reaccionar con el $\text{Ca}(\text{OH})_2$, forman silicatos bicálcicos hidratados y aluminatos bicálcicos hidratados, encargados de la mayor parte de las propiedades físicas, químicas y mecánicas de los morteros cementicios (Guilarducci, 2018).

El reemplazo parcial de cal por adiciones minerales puzolánicas, comúnmente denominadas “puzolanas”, podría generar productos de mayor resistencia que el CaCO_3 (producto resultante de la reacción de la cal), presentando beneficios ambientales que deben ser considerados: la reducción en la utilización de cal - por ser reemplazada de manera parcial por puzolanas- con la consecuente reducción en las emanaciones de CO_2 y la incorporación de materiales de desecho, como lo son gran parte de los materiales puzolánicos.

2 OBJETIVOS

El objetivo general de la investigación es evaluar las propiedades físicas, mecánicas y químicas de los bloques de tierra comprimida estabilizada con materiales de fácil obtención en la provincia de Santa Fe (Argentina), como lo son la cal y algunas adiciones minerales con propiedades puzolánicas. Para ello se proponen los siguientes objetivos particulares:

- Estudiar la composición mineralógica y el potencial puzolánico de dos adiciones minerales de fácil obtención en la provincia de Santa Fe, Argentina: Polvo de ladrillo y puzolana natural.
- Evaluar el efecto de la incorporación de las diferentes adiciones minerales al hidróxido de calcio (cal), estudiando el desarrollo de las reacciones puzolánicas; haciendo énfasis en la formación de compuestos cementantes, causantes del aumento de la resistencia.

- Evaluar la resistencia a compresión, resistencia a erosión húmeda y absorción de agua de probetas de BTC estabilizados con cal y las adiciones minerales en estudio, contrastando los resultados con los de sus homólogas estabilizadas únicamente con cal o cemento.

3 MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Materia prima

La tierra empleada en la fabricación de los BTC provino de una cantera emplazada en la comuna de Monte Vera, provincia de Santa Fe, destinada a la extracción de suelo para obras viales. La arena utilizada para la corrección granulométrica de la tierra fue adquirida en una arenera de la ciudad de Santa Fe, quienes la obtienen por dragado en la margen oeste del Río Paraná. El polvo de ladrillo empleado se adquirió en un corralón de la ciudad de Santa Fe, quien lo fabrica triturando ladrillos de descartes (rotos o con un grado de coacción inadecuado para su comercialización) proporcionados por diversas ladrilleras próximas a la ciudad. La puzolana utilizada es extraída y comercializada por la empresa “Minera del Sur” cuyas canteras se encuentran a las afueras del poblado Paraditas, junto a la cordillera de Los Andes en la provincia de Mendoza.

Para la estabilización de las diferentes series de BTC se empleó cemento portland tipo CPC 40 (IRAM 50000, 2019) producido por la empresa “Holcim” y cal aérea hidratada marca “Andina”, fabricada por la empresa “Cal FGH” en la provincia de San Juan, producida por la empresa homónima en la provincia de Córdoba.

3.2 Caracterización de la materia prima

La distribución granulométrica de la materia prima (tierra y arena) se evaluó mediante el análisis mecánico de materiales granulares estipulado por la norma IRAM 10512 (1977). Además, para conocer la distribución porcentual de partículas finas presentes en ambos materiales (tamaño inferior a 75 μm) se realizó el tamizado por vía húmeda estipulado por la norma IRAM 10507 (1986).

Para conocer la distribución de tamaños de la fracción fina de la tierra (partículas menores a 75 μm) se realizó el ensayo de sedimentación estipulado por la norma ASTM D422 (1990), midiendo la velocidad de decantación de las partículas dispersas en agua en función de la variación de la densidad de la solución, empleando para ello un hidrómetro normalizado (H-151). Este ensayo se basa en la ley de Stoke, según afirma que la velocidad de caída de las partículas de igual densidad en un mismo líquido aumenta con el cuadrado de su radio.

La plasticidad de la tierra se determinó sobre la fracción pasante por el tamiz #40 (apertura de 0.43 mm) el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad, siguiendo para ello los procedimientos establecidos por la norma IRAM 10501 (2007).

Para evaluar la capacidad puzolánica del polvo de ladrillo y la puzolana se empleó el método “saturated lime test”, el cual determina el potencial puzolánicos empleando como indicador el consumo de Ca^{2+} de una solución saturada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ por g de adición mineral (Donatello et al., 2010). Para ello se agregaron 4 g de adición dentro de un recipiente plástico que contiene de 300 mL de una solución saturada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, reemplazando el aire contenido dentro de los recipientes por N_2 (para evitar el proceso de carbonatación) y sellándolos, tras lo cual se las almacenó a 40°C (Guilarducci, 2018). Finalmente, se determinó el contenido de Ca^{2+} a 7 horas, 1, 5, 8 y 16 días mediante la utilización de autovalorador potenciométrico (methrom titrando 905). Además de las muestras con polvo de ladrillo y puzolanas naturales se prepararon muestras con un aditivo puzolánico a base de metacaolín y la tierra empleada en la fabricación de las muestras. El aditivo puzolánico empleado es una mezcla de metacaolín, kaolín y vidrio expandido (Poraver, 2021), producido por la empresa alemana Poraver y comercializado bajo el nombre de Metapor®.

3.3 Producción de BTC en fábrica

Para evaluar el efecto del reemplazo parcial de cal por adiciones minerales en las propiedades físicas y mecánicas de los BTC, se fabricaron bloques en la planta de producción de la empresa Eco3 Ingeniería, abocada a la fabricación industrializada de BTC en la ciudad de Esperanza, Santa Fe.

Con el equipamiento propio de la empresa se produjeron 7 series diferentes de BTC, cada una de ellas constituida por 15 ejemplares y una dosificación; empleando una relación tierra:arena de 7:3 para todas las series salvo la estabilizada con cemento, cuya relación tierra arena fue 1:1. La cantidad total de aditivos adicionados se mantuvo constante en todas las series confeccionadas, 10 % de la masa de los bloques. Para la fabricación de estas series de bloques, tanto el polvo de ladrillo como la puzolana se molieron de manera manual hasta pasar por la malla ASTM #200 (75 μ m), mientras que los terrones de la tierra se desintegraron empleando una moledora mecanizada. Finalmente, en tabla 1 se resumen las dosificaciones de cada una de las series producidas.

Tabla 1: Dosificación en masa de los materiales de las diferentes series de BTC producidas en la empresa Eco3Ingeniería

Serie		Tierra (%)	Arena (%)	Cal (%)	Cemento (%)	Puzolana (%)	Polvo de ladrillo (%)
I	Tierra/arena 1	70	30	-	-	-	-
II	Tierra/arena 2	50	50				
III	Cemento 10%	63	27	-	10	-	-
IV	Cal 10%	63	27	10	-	-	-
V	Puzolana 3%	63	27	7	-	3	-
VI	Puzolana 5%	63	27	5	-	5	-
VII	P. ladrillo 3%	63	27	7	-	-	3
VIII	P. ladrillo 5%	63	27	5	-	-	5

El proceso empleado en la fabricación de los BTC fue el siguiente: se incorporó la materia prima de cada serie dentro de una mezcladora mecánica de 300 L de capacidad donde se realizó una homogenización en seco mezclando por 2 minutos, luego de lo cual, con la mezcladora en funcionamiento, se incorporó el agua requerida mediante pulverización, evitando así la formación de grumos. Una vez incorporada la totalidad del agua - determinada por el método manual (Neves; Faría, 2011)-, se continuó el mezclado por 2 minutos, luego de los cuales la mezcla húmeda fue transportada mediante cintas transportadoras a la tolva de almacenamiento de la prensa. Inmediatamente después de ser producidos, los BTC fueron curados por 7 días a temperatura ambiente, manteniéndose envueltos en un film de polietileno. Luego de este período, se dejaron secar por 3 semanas a temperatura y humedad ambiente en un depósito de la fábrica, tras lo cual fueron separados en diferentes lotes para evaluar su resistencia a compresión, erosión húmeda y absorción de agua. En la figura 1 se expone el proceso de estas series de BTC.

Estos bloques se fabricaron con una prensa de alta potencia diseñada y fabricada por la empresa Eco3 Ingeniería, la cual produce BTC huecos de 30 x 15 x 6.5 cm con dos agujeros de 6 cm de diámetro entregando una fuerza de compresión de 12 Tn (2,55 MPa).

De los 15 BTC producidos por cada serie en la planta de Eco3 Ingeniería fueron seleccionados 10 para cortarse en 2 mitades iguales, generando así 20 probetas por serie, empleando 15 de ellas para la realización de ensayos, resguardando el resto para cubrir posibles imprevistos. Para garantizar que las probetas se encontraran completamente secas antes de las determinaciones correspondientes, se mantuvieron en estufa a 105 °C durante las 24 h previas a ser ensayados.



Figura 1: Proceso de fabricación de BTC en la planta de Eco3 Ingeniería: Mezclado de la materia prima; prensado de un bloque y acopio de BTC para ser curados

3.4 Elaboración de probetas cilíndricas

Para contrastar las propiedades físicas y mecánicas de los BTC producidos en la empresa Eco3 Ingeniería se moldearon en el Laboratorio de Materiales de la UTN FRSF probetas cilíndricas de 5.0 cm de diámetro y 7.0 cm de altura (figura 2); 15 por cada una de las 8 series producidas en fábrica (tabla 1).

Con el objetivo de generar probetas representativas se adoptaron los siguientes parámetros de diseño: densidad seca: 1.600 kg/m^3 ; tasa de compresión: 35%; humedad de la mezcla: 13%; tamaño del molde: 5 cm de diámetro x 11 cm de alto. Estos parámetros fueron adoptados en función de las características de los BTC producidos con la prensa desarrollada por la empresa Eco3 Ingeniería.

El procedimiento empleado para la confección de las probetas cilíndricas fue siguiente: el material requerido para cada serie (según dosificación de la tabla 2) se mezcló de manera manual, primero en seco y luego incorporando el agua requerida para alcanzar una humedad del 13%. A continuación, se colocó dentro del molde cilíndrico la cantidad requerida para alcanzar la densidad seca establecida (264.2 g de mezcla húmeda), acomodando el material dentro del molde con los dedos. Luego, con ayuda de un pistón hidráulico se comprimió el contenido del molde para llevarlo desde su altura inicial de 11 cm hasta una altura final de 7.1 cm (tasa de compresión del 35%). Finalmente, con la ayuda del mismo pistón se desmolda la probeta, se pesa y miden sus dimensiones. El curado de las series estabilizadas con cemento, cal y adiciones minerales (series III a VIII) se realizó humedeciéndolas con agua y manteniéndolas envueltas en un film de polietileno. En la figura 2 puede apreciarse el procedimiento empleado.



Figura 2: Probetas cilíndricas producidas en el laboratorio de materiales de la UTN FRSF

3.5 Realización de ensayos

Para conocer la densidad aparente de las probetas cilíndricas y BTC producidos en fábrica se determinaron sus dimensiones y peso seco (tras permanecer 24 h en estufa a 105°C), dividiendo luego ambas magnitudes. La densidad se calculó para cada una de las probetas producidas (15 por serie).

La resistencia a compresión seca se evaluó adoptando los protocolos establecidos por la norma IRAM 12586 (2004) para ladrillos cerámicos y española UNE EN 41410 (2008), específica para la realización de ensayos sobre BTC. Este ensayo se efectuó sobre 5 probetas de cada serie, pudiendo apreciarse en la figura 3 su ejecución.



Figura 3: Realización del ensayo de resistencia a compresión seca sobre probetas cilíndricas y BTC

Para determinar el porcentaje de absorción de agua por saturación en las probetas y BTC producidos, se realizó sobre 4 probetas de cada serie el ensayo de absorción por inmersión detallado en la sección 3.3 de la norma brasilera NBR 8492 (2012), pudiendo apreciarse en la figura 4 el procedimiento empleado durante la realización de este ensayo. Se determinó luego la resistencia a compresión saturada, la cual permite cuantificar la disminución de resistencia a compresión de los BTC cuando se encuentran saturados de agua. Para ello, se realiza el ensayo de compresión ya mencionado, pero empleando las 4 probetas saturadas provenientes del ensayo de absorción de agua por capilaridad. Para la realización de este ensayo se adoptó el protocolo estipulado por la norma brasilera NBR 8492 (2012).

Con el fin de conocer la velocidad de absorción de agua por capilaridad en los BTC se realizó a 3 probetas de cada serie el ensayo estipulado por la norma española UNE 41410 (2008). En la figura 5 pueden apreciarse la realización del ensayo sobre BTC y probetas cilíndricas.

Finalmente, para evaluar la resistencia a erosión húmeda de cada serie se realizó una adaptación del ensayo de pulverizado de agua a presión estipulado por las normas neozelandesa NZS 4298 (1998) e indiana IS 1725 (2013). Se introdujo cada probeta dentro del equipo de ensayo (figura 5) de manera tal que el lado expuesto al chorro de agua (una de las caras laterales del bloque) quede a 20 cm de la boquilla de aspersión, accionándose luego el equipo. El tiempo de exposición de cada probeta fue de 60 minutos y la presión del agua pulverizada de 1 bar. Finalmente se midió la profundidad del patrón de erosión con una varilla metálica de 2 mm de diámetro. Este ensayo solo se efectuó sobre las probetas cilíndricas, realizándose a 3 probetas de cada serie.



Figura 4: Probetas cilíndricas y BTC completamente sumergidos para evaluar su absorción de agua por inmersión y resistencia a compresión saturada



Figura 5: Realización del ensayo de absorción de agua por capilaridad (izquierda) y erosión por pulverizado de agua a presión (derecha)

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Caracterización de tierra y arena

En la tabla 2 se presentan los resultados de los ensayos de caracterización física realizados sobre la tierra y la arena. Puede apreciarse como la tierra puede catalogarse como un suelo arcilloso de baja plasticidad, con un bajo contenido de arenas (muy finas); mientras que la arena presenta una granulometría uniforme y fina.

Tabla 2. Características físicas de la tierra y la distribución granulométrica de la arena

Tierra		Arena	
Límite líquido (LL)	27 %	Pasante #3/8" (9.5 mm)	100.0 %
Límite plástico (LP)	16 %	Pasante #4 (4.75 mm)	100.0 %
Índice de plasticidad (IP)	11 %	Pasante #10 (2.00 mm)	99.8 %
Contracción lineal	4.3 %	Pasante #20 (0.85 mm)	95.9 %
Clasificación SUCS / HRB	CL / A-6 (7)	Pasante #40 (0.42 mm)	89.0 %
Contenido de arena fina	14.5 %	Pasante #60 (0.25 mm)	60.6 %
Contenido de limos	53.6 %	Pasante #100 (0.15 mm)	23.8 %
Contenido de arcillas	31.9 %	Pasante #200 (0.075 mm)	0.9 %

4.2 Potencial puzolánico de las adiciones

Los ensayos realizados sobre las diferentes adiciones minerales indican que la capacidad puzolánica del polvo de ladrillo y la puzolana son similares entre sí, consumiendo luego de 16 días de ensayo el 55% y 59% del Ca^{2+} disponible. Sin embargo, en la figura 6 puede apreciarse como, a pesar de tener propiedades puzolánicas, éstas son significativamente inferiores a las del metacaolín, adición de comprobada capacidad puzolánica (Arizzi & Cultrone, 2018) el cual, luego de 16 días de reacción consume el 89.2% de la Ca^{2+} en solución. Se observa además como la tierra empleada en la fabricación de las muestras reacciona con el Ca^{2+} en solución, pero en menor medida que las adiciones en estudio, advirtiéndose que el consumo de calcio de ésta ocurre de manera instantánea, manteniéndose prácticamente constante a lo largo del tiempo, lo cual puede atribuirse al intercambio catiónico entre el Ca^{2+} en solución y los cationes de las capas interlaminares de esméctica (Elert et al., 2015; Jofé, Kraemer, 2011).

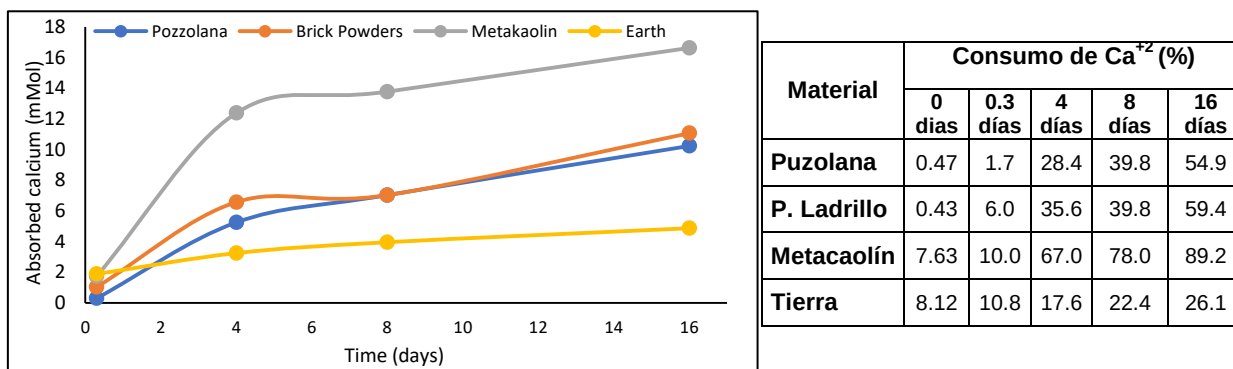


Figura 6. Consumo de calcio de las diferentes muestras ensayadas en mMol (izquierda) y % de calcio en solución (derecha) por el método "saturated lime test".

4.3 Densidad

En la figura 7 se exponen las densidades medias de cada una de las series de probetas. En ella puede apreciarse claramente como la densidad media de las probetas cilíndricas moldeadas en laboratorio no presenta una variabilidad significativa entre series, oscilando entre los 1600 y 1650 kg/m³. Por el contrario, las series de BTC producidos en fábrica presentan una gran variabilidad en su densidad: las densidades de los BTC dentro de cada serie difieren entre sí - lo cual puede advertirse con la elevada desviación estándar - y además, las densidades medias de cada serie de BTC son estadísticamente diferentes entre sí, siendo las series I, II y IV las de menor densidad y las series V y VII las de mayor densidad.

Este comportamiento puede atribuirse a las diferentes condiciones de moldeo empleadas: las probetas cilíndricas se confeccionaron en laboratorio respetando de manera rigurosa - por pesado - la cantidad de material incorporada dentro del molde y la tasa de compresión aplicada, mientras que, por las particularidades del equipo de prensado empleado para la fabricación de los BTC en fábrica, no pudo pesarse la cantidad de material introducida dentro del molde de la prensa, realizándose su llenado "por volumen".

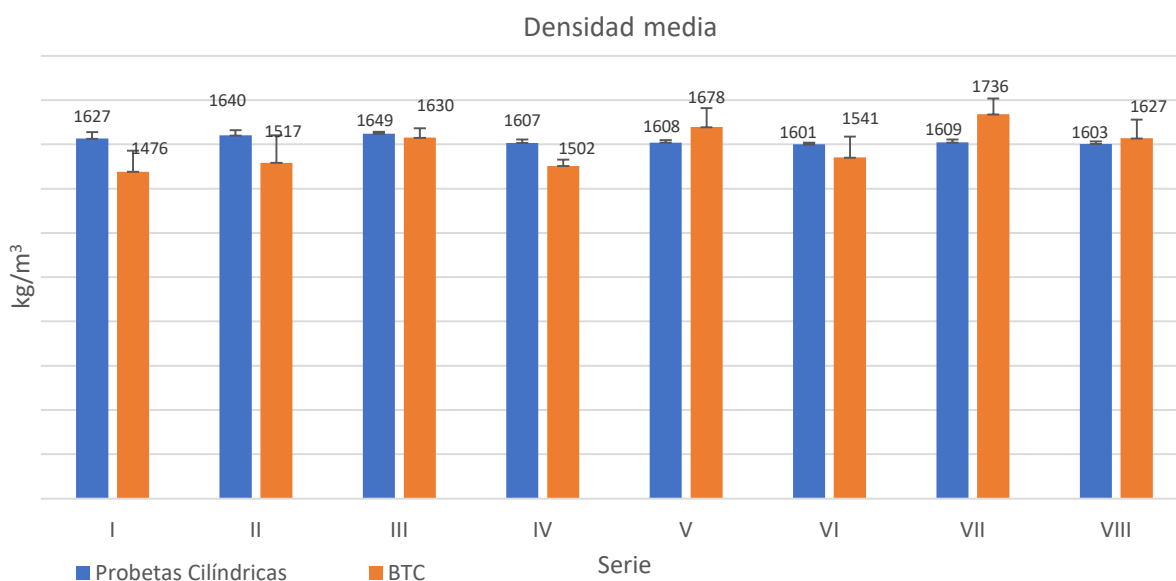


Figura 7. Densidad media de cada una de las series de probetas y BTC confeccionados.

4.4 Ensayos físico-mecánicos

En la figura 8 se exponen la resistencia media a compresión -seca y saturada- y el porcentaje de absorción de agua por inmersión y capilaridad de cada una de las series

ensayadas. En ella se advierte que la resistencia a compresión de las probetas estabilizadas con 10% de cemento supera por más de 6 veces la de las muestras de control, mientras que las resistencias medias a compresión de las series estabilizados con cal es inferior a la resistencia de las series de control; ambos patrones puede apreciarse tanto en las probetas cilíndricas como en los BTC producidos en fábrica. Se observa también que las resistencias medias a compresión seca de las series de probetas cilíndricas estabilizadas con cal y adiciones minerales (series IV a VIII) no presentan diferencias estadísticas entre sí, siendo inferiores a la resistencia media a compresión de la serie de control; lo cual no se aprecia en los ensayos realizados sobre los BTC producidos en fábrica, en los cuales puede apreciarse una mayor resistencia a compresión de las series V y VII. Esta variación en los resultados de resistencia a compresión de las probetas cilíndricas y los BTC producidos en fábrica puede atribuirse a la diferencia en las densidades de moldeo de cada serie de BTC, propiedad directamente vinculada con la resistencia a compresión.

En lo que respecta a la resistencia a compresión saturada, con excepción de las muestras estabilizadas con cemento (serie III), la relación de resistencias entre las probetas secas y saturadas es inferior a 0.5; sin embargo, se resalta que, sin la utilización de estabilizantes minerales (serie de control) no fue posible determinar la resistencia a compresión de las probetas saturadas por su “desintegración” dentro del recipiente con agua.

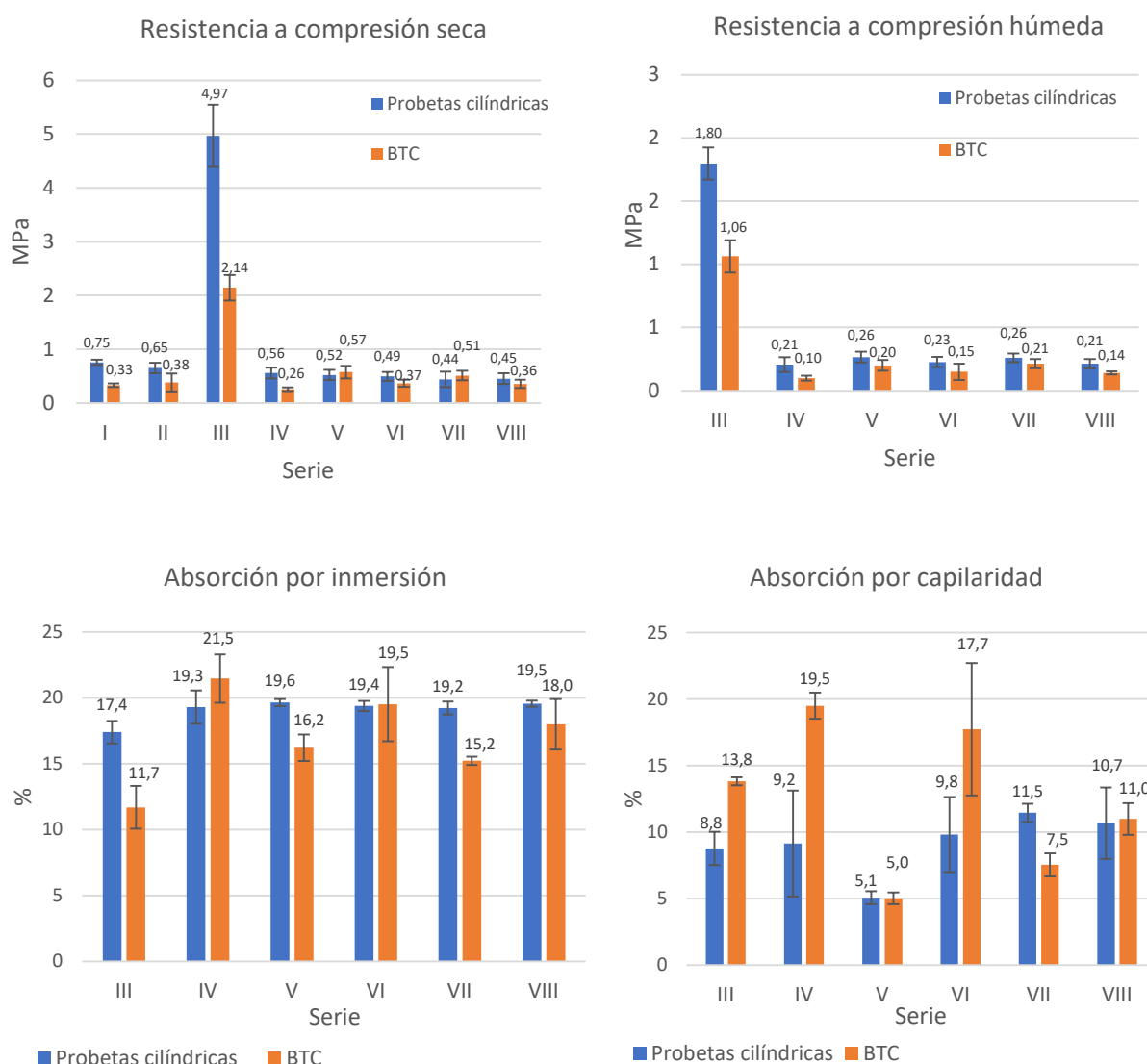


Figura 8: Densidad, resistencia a compresión -seca y saturada- y absorción de agua de las diferentes series de probetas ensayadas

En los resultados del ensayo de absorción de agua por capilaridad sobre las probetas cilíndricas no existe diferencia estadística entre los porcentajes medios de absorción de agua de las diferentes series ensayadas, siendo todos inferiores al 15 % (límite estipulado por la india IS 1725 (2013), la más estricta en este aspecto), lo cual no sucede con los resultados de los BTC producidos en fábrica, cuya variabilidad en la densidad genera una marcada variabilidad en los resultados de este ensayo. Sin embargo, en los resultados de absorción de agua por capilaridad, tanto de probetas cilíndricas como BTC producidos en fábrica, la absorción media de agua de la serie V, estabilizada con 3% de puzolanas, es estadísticamente menor a la del resto de las series.

Finalmente, los resultados obtenidos tras evaluar la resistencia a erosión húmeda por pulverizado de agua a presión de las diferentes series de probetas cilíndricas (figura 9) indican que las series estabilizadas únicamente con cal o cemento no experimentan un deterioro significativo por acción del agua, mientras que las series estabilizado con diferentes porcentajes de polvo de ladrillo y puzolana presentan niveles de erosión considerables.

Muestra	Serie III	Serie IV	Serie V	Serie VI	Serie VII	Serie VIII
						
Pérdida de masa (%)	0.87	0.05	1.31	18.37	7.41	7.16
Profundidad (mm)	1.20	1.6	9.9	20.6	23.5	16.4

Figura 9: Resultados del ensayo de resistencia a erosión húmeda por pulverizado de agua a presión.

5 CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos durante esta investigación permiten afirmar que tanto el polvo de ladrillo como la puzolana empleados en la investigación poseen propiedades puzolánicas y forman, en combinación con el hidróxido de calcio, fases amorfas de C-(A)-S-H. Sin embargo, la incorporación en pequeñas cantidades de ambas adiciones en combinación con cal aérea hidratada en la fabricación de BTC, en comparación con las muestras BTC estabilizados únicamente con cal aérea hidratada poseen un efecto negativo en las propiedades físicas y mecánicas de estos bloques. Este comportamiento se atribuye a la conjunción de los siguientes factores:

- La baja actividad puzolánica de las adiciones empleadas, las cuales luego de 16 de inmersión en una solución saturada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en condiciones ideales de solubilización del hidróxido de calcio (40° de temperatura), consumen menos del 60% del Ca^{+2} disponible.
- El bajo contenido de Ca^{+2} disponible para el desarrollo de las reacciones puzolánicas, motivado por el bajo grado de pureza de la cal empleada (inferior al 70%, declarado por su fabricante) y por el Ca^{+2} tomado por la tierra durante el intercambio catiónico.
- La escasa cantidad de agua empleada durante la fabricación de las muestras (13%) y el proceso de curado, durante el cual simplemente se mantiene constante la humedad de los bloques, no favorece al desarrollo de las reacciones puzolánicas entre las adiciones minerales y la cal aérea hidratada.

Es significativa además la diferencia que existe entre las resistencias a compresión (seca y saturada) de las probetas estabilizadas con cal y las estabilizadas con cemento, alcanzando estas últimas valores superiores a los 5 MPa, lo cual ratifica la utilización de BTC estabilizados con cemento en la construcción de muros de portantes. Se advierte además que la estabilización con cal generó una disminución en la resistencia a compresión de las

probetas en comparación con la resistencia de las probetas de control, sin estabilizantes. Sin embargo, la incorporación de cal como estabilizante mejoró significativamente la resistencia de las probetas ante los efectos perjudiciales del agua (erosión húmeda y absorción de agua por absorción y capilaridad), presentando incluso mejores resultados que el cemento portland. Esta situación permite pensar en la utilización de BTC estabilizados únicamente con cal para muros de cerramiento exteriores que, sin la necesidad de soportar cargas axiales, cuenten con una elevada resistencia a la erosión ocasionada por el intemperismo.

En líneas de investigación futuras se pretende estudiar la interacción química entre la tierra de la región (empleada en estas investigaciones) y el hidróxido de calcio, de manera tal de poder explicar con mayor claridad la disminución en la resistencia a compresión de la serie de probetas estabilizadas con cal respecto a la serie de control sin estabilizar. Además, se evaluarán posibles condiciones de curado de los bloques que favorezcan el desarrollo de las reacciones puzolánicas entre las adiciones minerales y la cal aérea hidratada, generando incrementos en la resistencia mecánica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aranda Jimenez, Y. G. (2009). Características del BTC ante diferentes concentraciones de mucílago de nopal y sábila agregadas al agua de mezclado. México: Universidad Autónoma de Tamaulipas.
- Aranda Jimenez, Y. G. (2010). Estabilizantes utilizados en la elaboración de BTC. In: Los bloques de tierra comprimida (BTC) en las zonas húmedas. México: Plaza y Valdez S.A. p. 27–42
- Aranda Jimenez, Y. G.; Suárez-Domínguez, E. J. (2014). Efecto de la impermeabilidad del mucílago de nopal en bloques de tierra comprimidos. *Nova Scientia*, 6(11).
- Arizzi, A; Cultrone, G. (2018). Comparing the pozzolanic activity of aerial lime mortars made with metakaolin and fluid catalytic cracking catalyst residue: a petrographic and physical-mechanical study. *Construction and Building Materials*, 184, 382–390
- Arteaga Paucar, J.; Loja Saula, L. (2018). Diseño de adobes estabilizados con emulsión asfáltica. Ecuador: Universidad de Cuenca.
- ASTM D 422-63 (1990). Standard test method for particle-size analysis of soils. USA: ASTM International
- Aubert, J. E.; Fabbri, A.; Morel, J. C.; Maillard, P. (2013). An earth block with a compressive strength higher than 45 MPa. *Construction and Building Materials*, 47, 366–369.
- Bediako, M. (2018). Pozzolanic potentials and hydration behavior of ground waste clay brick obtained from clamp-firing technology. *Case Studies in Construction Materials*, 8, 1–7.
- Cabrera, S.; González, A. (2019). Bloques de tierra comprimida estabilizados con cal. Evaluación de dosificaciones y resistencia a la compresión. In: Encuentro Latinoamericano y Europeo de Edificaciones y Comunidades Sostenibles, 3. Santa Fe; Paraná. Argentina. p. 210–219.
- De Windt, L.; Deneele, D.; Maubec, N. (2014). Kinetics of lime/bentonite pozzolanic reactions at 20 and 50 C: Batch tests and modeling. *Cement and Concrete Research*, 59, 34–42.
- Dethier, J.; Cohen, J. (2019). Arquitecturas de tierra: el arte de construir con tierra. Pasado, presente y porvenir. Blume.
- Doat, P.; Hays, H.; Houben, H.; Matuk, S.; Vitoux, F. (1985). Building whit earth. CRATerre éditions.
- Donatello, S.; Tyrer, M.; Cheeseman, C. R. (2010). Comparison of test methods to assess pozzolanic activity. *Cement and Concrete Composites*, 32(2), 121–127.
- Elert, K.; Pardo, E.; Rodríguez Navarro, C. (2015). Alkaline activation as an alternative method for the consolidation of earthen architecture. *Journal of Cultural Heritage*, 16(4), 461–469
- Falceto, J. J. (2012). Durabilidad de los bloques de tierra comprimida. Evaluación y recomendaciones para la normalización de los ensayos de erosión y absorción. Tesis de Doctorado, Universidad Politécnica de Madrid. <http://oa.upm.es/14647/>
- González López, J.; Juárez Alvarado, C.; Ayub Francis, B.; Mendoza Rangel, J. (2018). Compaction effect on the compressive strength and durability of stabilized earth blocks. *Construction and Building*

Materials, 163, 179–188.

Guilarducci, A. (2018). Generación de adiciones minerales para el cemento Portland a partir de residuos de centrales termoeléctricas de lecho fluidizado. Argentina: Universidad Nacional del Litoral.

IRAM 10501 (2007). Geotecnia. Método de determinación del límite líquido y del límite plástico de una muestra de suelo. Índice de fluidez e índice de plasticidad. Argentina: Instituto Argentino de Normalización y Certificación.

IRAM 10507 (1986). Mecánica de suelos. Método de determinación de la granulometría mediante tamizado por vía húmeda. Argentina: Instituto Argentino de Normalización y Certificación.

IRAM 10512 (1977). Mecánica de suelos. Método de análisis granulométrico. Argentina: Instituto Argentino de Normalización y Certificación.

IRAM 12586 (2004). Ladrillos y bloques cerámicos para la construcción de muros – Método de ensayo de la resistencia a la compresión. Argentina: Instituto Argentino de Normalización y Certificación

IRAM 50000 (2019). Cementos. Cementos para uso general. Composición y requisitos. Argentina: Instituto Argentino de Normalización y Certificación.

IS 1725 (2013). Specification for soil based blocks used in general building construction. India: Indian Standards Institution.

Jofé, C.; Kraemer, C. (2011). Manual de estabilización de suelos con cemento y cal. España: Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones.

Laguna, M. (2011). Ladrillo ecológico como material sostenible para las construcción. España: Universidad Pública De Navarra.

Lima, S. A.; Varum, H.; Sales, A.; Neto, V. F. (2012). Analysis of the mechanical properties of compressed earth block masonry using the sugarcane bagasse ash. Construction and Building Materials, 35, 829–837.

Maddalena, R.; Roberts, J. J.; Hamilton, A. (2018). Can Portland cement be replaced by low-carbon alternative materials? A study on the thermal properties and carbon emissions of innovative cements. Journal of Cleaner Production, 186, 933–942.

Malkanthi, S. N.; Balthazaar, N.; Perera, A. A. D. A. J. (2020). Lime stabilization for compressed stabilized earth blocks with reduced clay and silt. Case Studies in Construction Materials, 12.

Miller, S. A.; John, V. M.; Pacca, S. A.; Horvath, A. (2018). Carbon dioxide reduction potential in the global cement industry by 2050. Cement and Concrete Research, 114, 115–124.

National Lime Association (2004). Lime-treated soil construction manual: lime stabilization & lime modification. Bulletin 326. National Lime Association (Issue January).

NBR 8492 (2012). Tijolo de solo-cimento. Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água. Método de ensaio. Brasil: Associação Brasileira de Normas Técnicas

Neves, C.; Farías, O. B. (org) (2011). Técnicas de construcción con tierra. Brasil: FEB-UNESP / PROTERRA.

NTC 5324 (2005). Bloques de suelo cemento para muros y divisiones. Definiciones. Especificaciones. Metodos de ensayo. Condiciones de entrega. Colombia: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación

NZS 4298 (1998). Materials and workmanship for earth buildings. New Zealand: Standards New Zealand

Ouedraogo, K. A. J.; Aubert, J.-E.; Tribout, C.; Escadeilas, G. (2020). Is stabilization of earth bricks using low cement or lime contents relevant? Construction and Building Materials, 236.

Poraver (2021). Metapor® Metakaolin. Pozolanic additive as a replacement of cement based binders. <https://poraver.com/en/metapor/>

Rigassi, V. (1985). Compressed earth blocks: manual of production. In Network. GATE / BASIN.

UNE 41410 (2008). Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo. España: Associação Espanhola de Normalização e

Certificação.

Vissac, A.; Bourges, A.; Gandreau, D. (2017). Argiles & biopolymères. Les stabilisants naturels pour la construction en terre. CRATerre éditions.

AUTORES

Virginia Clausen, estudiante avanzada de ingeniería industrial, miembro y becaria de Grupo de Investigadores TIERRA FIRME de la Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Santa Fe (UTN- FRSF).

Santiago Cabrera, ingeniero civil, doctorando en ingeniería, mención ing. industrial. Becario CONICET. Docente investigador abocado a las técnicas constructivas en tierra, con énfasis en los Bloques de Tierra Comprimida. Actualmente desempeña sus actividades laborales en el Laboratorio de Geotecnia del departamento de Ingeniería Civil en UTN – FRSF.

Ariel González, ingeniero en construcciones, magister en metodología de la investigación. Docente investigador de la UTN-FRSF. Integrante de equipos interdisciplinarios en ONGs que abordan el tema hábitat urbano y rural y técnicas constructivas con tierra; capacitado en investigación, desarrollo y transferencias de tecnologías para viviendas de bajo costo. Miembro de la Red Iberoamericana PROTERRA.