



Resistencia a Erosión Húmeda en Bloques de Tierra Comprimida. Evaluación de Diferentes Métodos para el Análisis de Resultados.

Wet erosion resistance in Compressed Earth Blocks. Evaluation of different methods for the analysis of results.

Presentación: 22/01/2021

Aprobación: 08/03/2021

Santiago Cabrera

Grupo de Investigación y Desarrollo en Técnicas de Construcción con Tierra – Facultad Regional Santa Fe, Universidad Tecnológica Nacional – Argentina
spcabrera@outlook.com

Ariel González

Grupo de Investigación y Desarrollo en Técnicas de Construcción con Tierra – Facultad Regional Santa Fe, Universidad Tecnológica Nacional – Argentina
aagonzal@frsf.utn.edu.ar

Resumen

En esta investigación se analizan los diferentes métodos de ensayo propuestos por la normativa internacional para evaluar la resistencia al intemperismo físico y, particularmente, a la erosión húmeda de los bloques de tierra comprimida (BTC), examinando las superficies erosionadas. Además, se proponen 2 alternativas diferentes a la propuesta por las normas para evaluar los resultados de estos ensayos: pérdida de masa y cotejo directo con patrones gráficos de comparación; analizando finalmente la viabilidad de cada método. Finalmente, se observó que el método de comparación directa con patrones sólo es efectivo para evaluar la resistencia a la erosión húmeda de las probetas sometidas al ensayo de pulverizado de agua a presión, mientras que el método de la determinación de la pérdida de masa no es adecuado para evaluar los resultados de este tipo ensayos.

Palabras claves: BTC, tierra, estabilización, erosión, durabilidad

Abstract

This research aims at analyzing different international standards test methods to assess weathering resistance, particularly wet erosion of compressed earth blocks (CEB). Emphasis is placed on wet erosion tests by spraying pressurized water and hastened erosion due to falling water. Furthermore, two alternatives are proposed to evaluate such resistance: mass loss and comparison with standardized patterns; ultimately analyzing the viability of each method. Lastly, it is concluded that comparison against standards is the only effectual method to evaluate wet erosion resistance of soil test-pieces subject to a pressurized-water spray test. On the contrary, calculating the loss of mass is not a suitable method for assessing the results of the tests.

Keywords: CEB, earth, stabilization, erosion, durability

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 en su fabricación y rendimiento, siendo un desafío la mejora de sus propiedades y vida útil. Desde esta perspectiva, los Bloques de Tierra Comprimida o BTC representan una evolución moderna sobre las técnicas tradicionales de construcción con tierra (Lima et al, 2012), contribuyendo a racionalizarla y asegurar la imagen de una técnica moderna, de buen rendimiento y económica (Dethier y Cohen, 2019).

El BTC es un mampuesto fabricado mediante la compresión de suelo estabilizado contenido en el interior de una prensa mecánica o hidráulica (Neves y Borges Farías, 2011). Estas prensas son manuales para bajas demandas de producción o automáticas para sistemas industrializados (González y Cabrera, 2017). La tecnología del BTC inició su desarrollo en Colombia a comienzos de los años '50 por el Centro Interamericano de Vivienda y Planeamiento -CINVA- como una alternativa económica de elementos constructivos que, actualmente se considera protagonista de una de las tecnologías latinoamericanas más difundidas en el mundo (Ángulo Jaramillo y Carreño, 2017).

La mampostería con BTC es una técnica de construcción económica que presenta mejores propiedades de resistencia y durabilidad que las construidas con adobe, y una gran potencialidad de industrialización de sus unidades (Herrera Villa, 2018). Además, estos bloques poseen varias ventajas que les permiten ser una respuesta a los problemas energéticos y climáticos actuales por ser elementos fabricados con materiales de baja energía incorporada (Bradley et al, 2018) en comparación con los ladrillos de arcilla cocida y arena-cemento, reduciendo la cantidad de energía requerida para la construcción y el transporte, en gran medida por el hecho que la tierra es un recurso natural abundante y reciclable (Hegyí et al, 2016; Mansour et al, 2017).

Al igual que las demás técnicas de construcción con tierra, estos bloques presentan algunas limitaciones de durabilidad, degradándose frente a fenómenos atmosféricos, en especial el agua (Laborel-Préneron et al, 2016). Esta restricción puede minimizarse e incluso eliminarse empleando pequeños porcentajes de estabilizantes químicos durante su

fabricación -generalmente cal o cemento-, los cuales mejoran sus propiedades físico-mecánicas, aumentando su resistencia y durabilidad (Guzmán e Iñiguez, 2016).

Una de las propiedades de mayor relevancia empleadas para evaluar la durabilidad de los BTC es su resistencia al intemperismo físico, particularmente a la erosión producida por la lluvia, siendo el objetivo principal de esta investigación, desarrollado en el Laboratorio de Geotecnia de Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe (UTN FRSF), analizar los diferentes métodos de ensayo empleados por la normativa internacional para evaluar el nivel de resistencia a la erosión húmeda de estos bloques y proponer diferentes métodos para evaluar los resultados de estos ensayos.

Métodos de evaluación de la resistencia a erosión húmeda y abrasión

Existen diversos métodos de ensayo que permiten conocer la resistencia al intemperismo de los BTC, resultando de particular interés los métodos de erosión húmeda, los cuales pretenden simular el deterioro que experimentarían los mismos ante lluvias de intensidad variada.

Las normas mexicana NMX-C-508 (2015) y española UNE 41410 (2008) establecen la realización del ensayo de erosión acelerada denominado “SAET: Swinburne accelerated erosion test” desarrollado por la Universidad de Swinburne (Cid Falceto, 2012), mediante el cual se deja caer una corriente continua de agua por una boquilla de 5 mm de diámetro a una altura de 1000 mm durante un lapso de tiempo de 10 minutos, manteniendo en todo momento un ángulo de aplicación de 27° respecto a la horizontal. Por el contrario, la norma neozelandesa NZS 4298 (1998) estipula la realización del ensayo denominado Geelong method, cuya principal diferencia respecto al método SAET radica en que éste es menos agresivo que el anterior, ya que la altura desde la cual se deja caer el agua es inferior (400 mm), al igual que la duración del ensayo: en lugar de establecer un período de tiempo determinado se estipula el volumen de agua que debe ser erogado sobre el bloque (100 ml). Al igual que con el método SAET, la cara expuesta del BTC debe formar un ángulo de 27° con la horizontal, garantizando así el correcto escurrimiento del agua. Es importante mencionar que, para ambos ensayos, el parámetro empleado para evaluar el nivel de resistencia a la erosión húmeda es la profundidad (en mm) de la erosión generada sobre la cara expuesta del BTC.

Otra forma de evaluar la resistencia a erosión húmeda de los BTC consiste en emplear un equipo normalizado que pulveriza agua a presión sobre los bloques por un lapso predefinido, evaluando luego la profundidad del patrón de erosión generado sobre la cara expuesta. Esta técnica de ensayo es adoptada por las normas neozelandesa NZS 4298 (1998) e india IS 1725 (2013) para evaluar el nivel de resistencia a la erosión húmeda de los BTC y, debido a la mayor “agresividad” de este método en comparación a los ya mencionados, se recomienda su utilización en bloques destinados a conformar paramentos exteriores sin revestimiento sometidos a un nivel de exposición severa (Cid Falceto, 2012). Debe destacarse además que, a pesar de emplearse el mismo equipo, los parámetros de ensayo (distancia, presión y tiempo) establecidos por la norma neozelandesa e india son diferentes, siendo más “agresivo” el protocolo de ensayo propuesto por la norma india. Otra diferencia radica en que la norma neozelandesa establece 5 niveles de resistencia a la erosión húmeda en función de la profundidad alcanzada por el patrón de erosión, mientras que la india solo estipula un valor límite para la profundidad de erosión, siendo los únicos resultados posibles APTO o NO APTO.

Además de los métodos de ensayo mencionados –los cuales evalúan la resistencia al intemperismo de los BTC a través de ensayos de resistencia a erosión húmeda-, las normas

francesa, XP P 13-901 (2017), colombiana NTC 5324 (2005) y brasileña NBR 8491 (2012) determinan la resistencia a la abrasión de los BTC cepillándolos de manera reiterada con una escobilla metálica estandarizada, determinando luego la pérdida de masa experimentada; con la salvedad que, tanto la norma francesa como la colombiana establecen la realización del ensayo manteniendo al bloque perfectamente seco, mientras que la brasilera estipula efectuarlo sobre el bloque saturado.

Un método alternativo para evaluar la erosión y el desgaste en diferentes materiales es el “3D scanning”, a partir del cual se genera un modelo en 3 dimensiones de la superficie erosionada, valiéndose para ello de un Scanner 3D; esto posibilita cuantificar el volumen erosionado y estudiar la morfología del patrón de erosión generado (Cao et al, 2021). Sin embargo, a pesar de las numerosas ventajas que presenta, este método no es de uso frecuente en Argentina para estudiar las superficies erosionadas en materiales de construcción; en gran parte por la complejidad y costo económico del equipamiento requerido.

Hipótesis y objetivos

La experiencia adquirida por los investigadores de la UTN FRSF en la realización de ensayos de erosión acelerada por caída de agua SAET (basado en la norma española UNE 41410 (2008) y erosión por pulverización de agua a presión (siguiendo los criterios establecidos por la norma india IS 1725 (1982)), además de medir la máxima profundidad de erosión producida sobre la cara expuesta del BTC ensayado, registran de manera fotográfica el patrón de erosión producido, permite plantear las siguientes hipótesis:

- 1° Hipótesis: Los resultados de los ensayos de resistencia a erosión húmeda por pulverizado de agua a presión y caída de agua SAET pueden evaluarse de manera idéntica a lo estipulado por las normas francesa, colombiana y brasilera durante el ensayo de cepillado, determinando la pérdida de masa experimentada por los BTC tras la realización de los ensayos.
- 2° Hipótesis: Los resultados de los ensayos de resistencia a erosión húmeda por pulverizado de agua a presión y caída de agua SAET, en lugar de evaluarse a través de la medición de la profundidad de erosión generado sobre la cara expuesta, puede determinarse por comparación directa con patrones gráficos de erosión predefinidos.

De este modo, partiendo de las hipótesis anteriores, se proponen los siguientes objetivos específicos:

- Determinar y correlacionar la pérdida de masa experimentada por los BTC luego de evaluar su resistencia a erosión húmeda mediante los ensayos de caída de agua (SAET) y pulverizado de agua a presión con la máxima profundidad de erosión generada sobre ellos.
- Generar patrones gráficos de comparación que representen cada uno de los niveles de resistencia a la erosión húmeda propuesto por la norma neozelandesa.
- Evaluar la factibilidad de emplear los métodos de comparación directa con patrones gráficos y determinación de la pérdida de masa para valorar el nivel de resistencia a la erosión húmeda mediante los ensayos de caída de agua (SAET) y pulverizado de agua a presión

Metodología

Preparación y tratamiento de las probetas

Se confeccionaron 36 BTC utilizando una prensa manual CINVA RAM (ver Figura 1) y

tierra limo arcilloso proveniente de la comuna de Monte Vera (Santa Fe) empleada usualmente en la construcción de terraplenes y obras viales, clasificada según el sistema SUCS (IRAM, 1982) como un limo arcilloso de baja plasticidad CL ML con bajo contenido de arena fina (un 25%).

Con intenciones de generar muestras con diferentes niveles de resistencia a la erosión húmeda y poder analizar así la validez de los métodos de evaluación de resultados propuestos, se fabricaron 12 series de BTC empleando en cada una de ellas un tipo y contenido de estabilizante variable: cal hidráulica, cemento Portland y una combinación de ambos. Se realizó además una serie de bloques sin adición de estabilizantes. Para maximizar el número de ensayos a realizar, cada BTC fue cortado en tres, generándose así tres probetas por cada bloque. En la Tabla 1 puede observarse la dosificación empleada en cada una de las series, considerando el peso seco de los materiales, y el número final de probetas.



Fig. 1: Prensa CINVA RAM empleada para la fabricación de las diferentes series de BTC

Serie	Dosificación (en peso)		N° de probetas
	Estabilizante	Proporción (en peso)	
I	-	-	9
II	cemento	2,5%	9
III	cemento	5%	9
IV	cemento	7,5%	9
V	cemento	10%	8
VI	cal	2,5%	8
VII	cal	5%	9
VIII	cal	7,5%	9
IX	cal	10%	8
X	cemento	5%	9
	cal	5%	
XI	cemento	2,5 %	9
	cal	7,5%	
XII	cemento	7,5 %	9
	cal	2,5%	

Tabla 1: Dosificación y cantidad de probetas elaboradas para cada serie

Una vez identificada cada probeta, se las colocó sobre una base metálica y se registró la masa del conjunto (P_h inicial = probeta húmeda + base metálica), el cual se llevó a estufa a 105°C hasta evidenciar que la masa se mantiene constante tras dos pesadas sucesivas, registrándose dicha masa (P_s inicial). Luego, se colocó cada probeta con su respectiva base dentro del equipo de ensayo correspondiente, dándose inicio al mismo. Una vez finalizada la prueba, se llevó cada probeta saturada con su base nuevamente a estufa hasta obtener masa constante (P_s final). Finalmente, luego de cada ensayo se determinó la cantidad de agua absorbida por cada probeta del ambiente (W) y la pérdida de masa experimentada tras la realización del ensayo (Δm).

Ensayo de erosión acelerada por caída de agua SAET – UNE EN 41410

Para comenzar con este ensayo se abre la llave de agua del equipo y se espera el tiempo necesario para alcanzar el régimen estacionario, a partir del cual la altura del pelo de agua se mantenga constante (lo cual se evidencia por el escurrimiento de agua en el orificio de rebalse). Alcanzada esta condición, se coloca la probeta sobre la base de apoyo con un ángulo de inclinación de 27°, de manera tal que el lado expuesto a la corriente de agua sea una de las caras laterales. A partir de este momento comienza a correr el tiempo de ensayo. Transcurridos 120 minutos, se interrumpe el suministro de agua y retira la probeta del equipo de ensayo. En la Figura 2 puede apreciarse la realización de este ensayo.

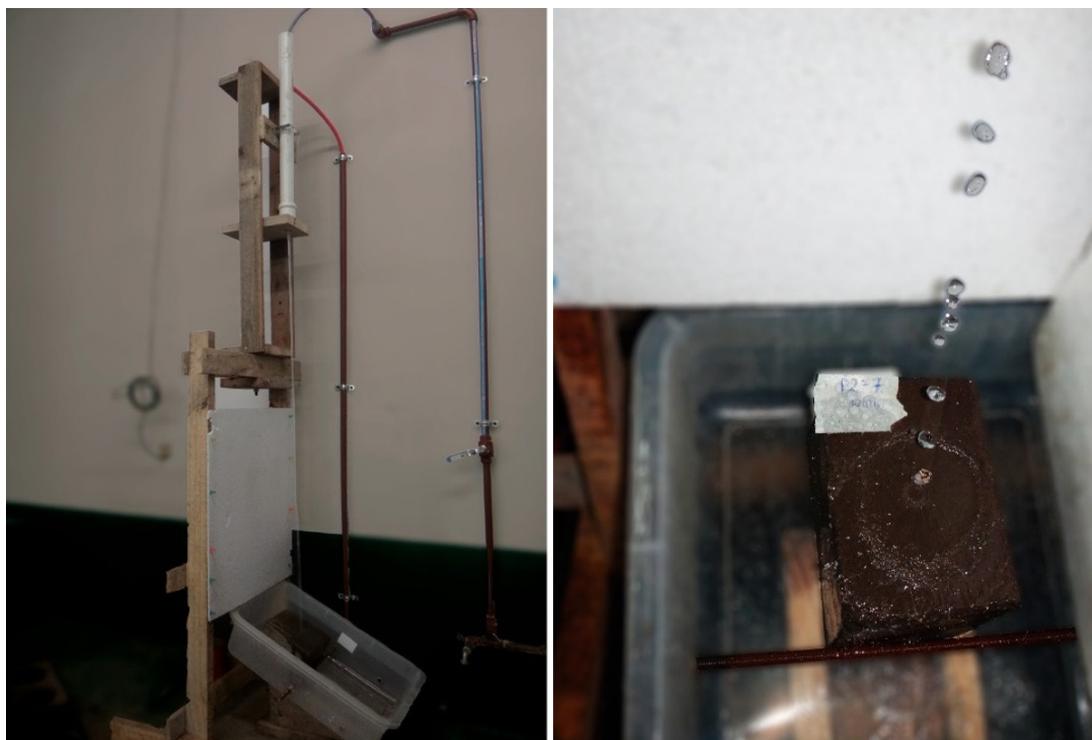


Fig. 2: Realización del ensayo de erosión acelerada por caída de agua

Ensayo de erosión por pulverizado de agua a presión - IS 1725

Antes de colocar la probeta dentro del equipo debe corroborarse que la presión de agua erogada por el mismo sea la adecuada (1 bar). Una vez corroborado esto, se introduce la

probeta dentro del equipo, ajustando la posición de la base de apoyo para que la distancia entre la cara expuesta del bloque y la fuente de agua presurizada sea de exactamente 20 cm. Al igual que en el ensayo de erosión acelerada por caída de agua, la probeta debe colocarse de manera tal que el lado expuesto al chorro de agua presurizado sea una de las caras laterales. Una vez colocada la probeta en posición, se acciona el dispositivo presurizador de agua y comienza a correr el tiempo de ensayo. El tiempo de exposición de cada probeta es de 120 minutos, interrumpiéndose el ensayo cada 30 minutos para observar el estado de la misma, percatándose de no mover a la probeta de su posición. En la Figura 3 puede apreciarse la realización de un ensayo de erosión por pulverizado de agua a presión, empleando para ello un equipo desarrollado íntegramente por el Grupo de Investigación y Desarrollo en Técnicas de Construcción con Tierra de la UTN FRSF.



Fig. 3: Ensayo de erosión por pulverizado de agua a presión

Métodos de evaluación del nivel de resistencia a erosión húmeda

El grado de erosión experimentado por cada probeta tras la realización de los ensayos mencionados se realizó empleando 3 métodos:

Pérdida de masa

Para evaluar la pérdida de masa experimentada por cada probeta según los procedimientos recomendados en los ensayos de cepillado (ABNT, 2012; AFNOR, 2017; ICONTEC, 2005) se utilizó la fórmula (1). Además, empleando la fórmula (2) se cuantificó de manera porcentual el vapor de agua que absorbió cada probeta del ambiente por higroscopicidad.

$$\Delta m = P_s \text{ inicial} - P_s \text{ final} \quad (1)$$

$$W = \frac{P_h \text{ inicial} - P_s \text{ inicial}}{P_s \text{ inicial}} * 100 \quad (2)$$

Siendo:

- Δm , la masa perdida tras la realización del ensayo, en g;
- P_s inicial, el peso seco de la probeta y su base, inmediatamente antes de realizar el ensayo, en g;
- P_s final, el peso seco de la probeta y su base tras la realización del ensayo, en g;
- P_h inicial, el peso natural de la probeta antes llevarse a estufa para ser ensayada, en g;
- W , la humedad ambiental absorbida por cada probeta, en %.

Profundidad de la erosión

Siguiendo los métodos de evaluación del nivel de resistencia a la erosión estipulados por la normativa correspondiente (AENOR, 2008; IS, 2002; NZS, 1998) se determinó la máxima profundidad alcanzada por el patrón de erosión de cada probeta luego de ser ensayada, empleando para esto un calibre normalizado con apreciación de 0,5 mm.

Comparación visual

Una vez ensayadas y realizadas las mediciones correspondientes sobre cada probeta se registró de manera fotográfica el patrón de erosión generado. Con intenciones de poder comparar entre sí los patrones de erosión producidos, el registro fotográfico se efectuó respetando el siguiente protocolo: con la ayuda de un soporte plástico se colocó cada probeta inclinada 15° respecto a la horizontal sobre un fondo de color blanco. Luego, con la ayuda de abrazadera, se posicionó la cámara fotográfica de manera horizontal sobre la cara erosionada de la probeta a 15 cm de distancia, se verificó la correcta alineación entre ambas y se tomó la fotografía activando el flash. La cámara empleada fue una SONY Exmor R, con resolución de 18,2 mega pixeles. En la Figura 4 pueden apreciarse los registros fotográficos de cuatro probetas.



Fig. 4: Registros fotográficos de probetas ensayadas por pulverizado de agua a presión (izquierda) y a erosión acelerada por caída de agua SEAT (derecha).

Resultados

En las Tablas 2 y 3 se exponen la profundidad de erosión y pérdida de masa medias ocurridas sobre cada serie de probetas -con la desviación estándar correspondiente- para el ensayo de erosión húmeda por pulverizado de agua a presión y el ensayo de erosión acelerada por caída de agua. Además, se expresa el vapor de agua absorbida por higroscopicidad por cada una de probetas. Finalmente, en la Tabla 4 se resumen los patrones de erosión generados sobre cada serie de probetas. En todas las tablas se ordenan los resultados de menor a mayor según la profundidad media de la erosión producida, independientemente de la cantidad o el tipo de estabilizantes empleados.

Resulta importante mencionar que, dada su mínima resistencia a la erosión húmeda, para ensayar las probetas de las series VI y II (2,5 % de cal y cemento respectivamente) fue necesario disminuir los tiempos de exposición de las mismas: 3 minutos para el ensayo de erosión por pulverizado de agua a presión y 12 minutos para el ensayo de erosión por caída de agua. Asimismo, los ensayos realizados sobre las probetas de la serie I (sin estabilizante alguno) debieron interrumpirse antes de alcanzarse el primer minuto, ya que, transcurrido ese tiempo, la profundidad de la erosión acometida sobre las mismas fue máxima, perforándose el espesor completo de las probetas, de 140 mm.

Serie	Probetas ensayadas	Profundidad de erosión (mm)		Pérdida de masa (g)		Humedad ambiental absorbida	
		Prom.	Desv.	Prom.	Desv.	(g)	(%)
IX	4	1,8	0,4	1,8	0,8	70	3,99
XI	6	2,0	0,6	0,7	2,4	61	3,41
VIII	5	2,4	0,5	2,3	4,4	60	3,14
X	5	2,4	1,0	1,6	2,3	58	3,12
XII	4	2,5	0,5	2,3	1,2	94	4,94
V	4	4,5	1,7	9,9	5,3	78	3,96
IV	5	8,6	1,2	9,9	4,5	90	4,70
VII	3	22,0	3,0	42,0	35,9	56	3,23
III	4	24,0	4,7	63,7	14,4	84	4,61
VI	5	60,0	15,0	164,0	47,0	58	3,24
II	5	68,0	18,0	310,0	78,0	54	2,98
I	2	-	-	-	-	79	3,6

Tabla 2: Resultados de los ensayos de erosión húmeda por pulverizado de agua a presión

Serie	N° de Probetas	Profundidad de erosión (mm)		Pérdida de masa (g)		Humedad ambiental absorbida	
		Prom.	Desv.	Prom.	Desv.	(g)	(%)
XI	3	0,00	0,00	3,74	2,04	56	3,86
IX	5	0,20	0,40	6,64	10,73	69	4,29
XII	5	0,60	0,80	11,82	24,12	67	3,98
VIII	3	1,00	0,82	37,24	48,27	66	3,11
X	4	1,25	0,83	3,08	0,68	59	4,62
V	4	2,50	0,87	1,00	4,00	90	3,96
IV	4	2,75	0,43	4,91	7,27	89	4,58
VII	3	15,00	8,16	26,16	10,30	57	3,65
III	4	20,00	4,64	57,85	74,30	83	4,61
VI	3	44,3	8,1	54,3	5,3	69	3,22
II	3	41,7	8,6	57,2	29,8	56	2,99
I	2	-	-	-	-	78	3,9

Tabla 3: Resultados de los ensayos de erosión acelerada por caída de agua

Procedimiento de ensayo	IX	XI	VIII	X	XII	V	IV	VII	III	VI	II	I
Pulverizado de agua a presión (IS 1725, 1982)												
caída de agua (UNNE 41410, 2008)												

Tabla 4: Patrones de erosión generados por cada ensayo

Discusión

Determinación de la pérdida de masa

La evaluación de la resistencia a la erosión húmeda de las probetas ensayadas mediante la determinación de la pérdida de masa experimentada tras la realización de los ensayos presenta diversas dificultades, a saber:

- Es el único método que requiere secar las probetas antes y después del ensayo, lo cual requiere de tiempo y el equipamiento adecuado (estufa y balanza de precisión).
- Para determinar el nivel de resistencia a la erosión por este método se precisan de al menos 40 horas: entre 10 h y 15 h de secado previo al ensayo; 2 h de ensayo y al menos 24 h para el secado post ensayo.

- La gran higroscopicidad de este tipo de bloques dificulta determinar de manera precisa la pérdida de masa de cada probeta, particularmente en aquellas de gran resistencia a la erosión húmeda, las cuales pierden por erosión menos de 10 g pero incorporan por higroscopicidad entre 50 g y 70 g de vapor de agua del ambiente y más de 250 g de agua durante la realización del ensayo. De este modo, si el secado final de la probeta no es correcto, el agua retenida por la probeta “oculta” la pérdida de masa experimentada por la probeta.
- Como puede advertirse en las tablas 2 y 3, la desviación estándar de los resultados es elevada, lo cual se condice con las dificultades mencionadas en el inciso anterior.

Medición de la profundidad de erosión

Este método resulta ser sumamente práctico y sencillo para evaluar el nivel de resistencia a la erosión húmeda de las probetas, particularmente en aquellas ensayadas por el método de caída de agua SAET, dado que el patrón de erosión generado es una pequeña perforación de diámetro prácticamente constante y profundidad variable (ver Figura 4). Además, como puede apreciarse en la Tabla 3, la desviación estándar de los resultados es mínima, lo cual enfatiza la precisión de este método y se condice con lo estipulado por las normas internacionales y las investigaciones de Cid Falceto (2012).

Respecto a las probetas sometidas al ensayo de pulverizado de agua a presión, este método resulta ser más efectivo en aquellas cuya resistencia a la erosión húmeda es elevada, ya que en las de menor resistencia (profundidades de erosión superiores a los 20 mm) la cara superior de la probeta se deteriora, dificultando emplearla como un plano horizontal de referencia para la determinación de la profundidad de erosión ocurrida; lo cual se condice con el singular incremento en la desviación estándar de los resultados de la tabla 2 para las series III, VI y II, de menor resistencia a la erosión húmeda.

Comparación visual

Como puede observarse en la Tabla 4, la identificación del nivel de resistencia a la erosión húmeda de las probetas sometidas al ensayo de pulverizado de agua a presión puede realizarse por comparación directa de la erosión generada sobre la cara expuesta con una serie de patrones. Para esto, en base a los registros fotográficos de los 52 ensayos realizados siguiendo este método, se confeccionaron los patrones de comparación expuestos en la Figura 5.

Nivel de resistencia	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4	Nivel 5
Patrón de comparación					
Profundidad de erosión (mm)	$0 < i < 3$	$3 < i < 8$	$8 < i < 20$	$20 < i < 40$	> 40

Fig. 5: Patrones de comparación para determinar el nivel de resistencia a la erosión húmeda en probetas ensayadas por pulverizado de agua a presión.

Para utilizar los patrones de comparación propuestos para la determinación del nivel de resistencia a erosión húmeda, se recomienda seguir el siguiente protocolo para fotografiar las probetas ensayadas: colocar la probeta perfectamente seca inclinada 15° respecto a la horizontal sobre un fondo de color blanco; posicionar la cámara de manera horizontal a 15 cm de distancia de la cara erosionada de la probeta y fotografiar con el flash activado. El registro fotográfico puede realizarse con un teléfono celular, siempre que la calidad su cámara supere los 5 megapíxeles.

No se generaron patrones de comparación para evaluar el nivel de resistencia a erosión húmeda por el método de caída de agua ya que, como fue explicado en el inciso anterior, la medición de la profundidad de erosión resulta ser el método de evaluación más efectivo.

Conclusiones

Luego de efectuar una evaluación minuciosa de los resultados obtenidos tras la realización de 52 ensayos de resistencia a la erosión húmeda por pulverizado de agua a presión y 42 ensayos de resistencia a erosión húmeda por caída de agua y evaluarla por los 3 métodos descritos, se concluye lo siguiente:

- La evaluación del nivel de resistencia a erosión húmeda mediante la determinación de la pérdida de masa ocurrida en la probeta tras la realización de los ensayos de erosión húmeda por pulverizado de agua a presión y caída de agua no se recomienda.
- El método más efectivo para determinar el nivel de resistencia a la erosión húmeda en probetas sometidas al ensayo de erosión acelerada por caída de agua SAET es la medición de la profundidad de erosión sobre cara expuesta de la probeta, tal como indican las normas de referencia (AENOR, 2011; IS, 2002; NZS, 1998).
- Para evaluar el nivel de resistencia a la erosión húmeda en probetas ensayadas por el método de pulverizado de agua a presión es factible emplear métodos de comparación visual de la erosión ocurrida con los patrones predefinidos, como los expuestos en la Fig. 5.

En líneas de investigación futuras se prevé realizar ensayos de durabilidad a largo plazo sobre muros testigo de BTC expuestos a la intemperie con diferentes orientaciones. Esto permitirá correlacionar los resultados de los ensayos de erosión húmeda por caída y pulverizado de agua con el deterioro real ocurrido sobre los muros sin revestir en la región central de la provincia de Santa Fe.

Referencias

- Aubert, J. E., Fabbri, A., Morel, J. C. y Maillard, P. (2013). *An earth block with a compressive strength higher than 45 MPa!* Construction and Building Materials, volumen (47), pp. 366–369. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.05.068
- Bradley, R. A., Gohnert, M. y Bulovic, I. (2018). *Construction considerations for low-cost earth brick shells.* Journal of Construction in Developing Countries, volumen (23), pp. 43–60.
- Cao, L., Wang, Y. y Liu, C. (2021). *Study of unpaved road surface erosion based on terrestrial laser scanning.* Catena, volumen (199). doi: 10.1016/j.catena.2020.105091
- Cid Falceto, 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/>
- Dethier, J. y Cohen, J. (2019). *Arquitectura de tierra: El arte de construir con tierra. Pasado, presente y porvenir.* Blume
- Ángulo Jaramillo, E. y Carreño, K. (2017). *El Bloque de Tierra Comprimido o BTC. Una alternativa de construcción para la arquitectura contemporánea.* NODO, volumen 12, pp. 31–37. <http://revistas.uan.edu.co/index.php/nodo/article/view/655>
- González, A. y Cabrera, S. (2017). *Prensa electromecánica para BTC.* Actas del XVII Seminario Iberoamericano de Arquitectura y Construcción con Tierra (SIACOT), pp. 91–100. <https://redproterra.org/es/17o-siacot/>
- Guzmán, S. e Iñiguez, M. (2016). *Election methodology of chemical stabilizers for earth blocks.* Estoa, volumen 5, pp. 151–159. doi:10.18537/est.v005.n009.12
- Hegyí, A., Dico, C. y Catalan, G. (2016). *Construction sustainability with adobe bricks type elements.* Constructii, volumen (7), pp. 147–156. <https://pdfs.semanticscholar.org/4296/f73ce17aad2539bda49d366ef7e2d08c93ed.pdf>
- Herrera Villa, J. (2018). *Modelamiento numérico del comportamiento sísmico de viviendas de mampostería con bloques de tierra comprimida* (Tesis de doctorado, Pontificia Universidad Católica del Perú). <http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/12059>
- Laborel-Préneron, A., Aubert, Jean-Emmanuel Magniont, C., Maillard, P. y Poirier, C. (2016). *Effect of plant aggregates on mechanical properties of earth bricks.* Journal of Materials in Civil Engineering, volumen (29).
- Lima, S. A., Varum, H., Sales, A., y Neto, V. F. (2012). *Analysis of the mechanical properties of compressed earth block masonry using the sugarcane bagasse ash.* Construction and Building Materials, volumen (35), pp. 829–837. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.04.127
- Mansour, B. M., Ogam, E., Jelidi, A., Cherif, A. S. y Ben Jabrallah, S. (2017). *Influence of compaction pressure on the mechanical and acoustic properties of compacted earth blocks: An inverse multi-parameter acoustic problem.* Applied Acoustics, volumen (125), pp. 128–135. doi:10.1016/j.apacoust.2017.04.017
- Neves, C. y Borges Farías, O. (2011). *Técnicas de Construcción con Tierra.* FEB-UNESP / PRO-TERRA.
- Norma IRAM 10509 (1982). *Mecánica de suelos. Clasificación de suelos, con propósitos ingeni-*

eriles. Instituto Argentino de Normalización y Certificación.

Norma IS 1725 (2013). *Stabilized Soil Blocks used in General Building Construction - Specification*. Bureau of Indian Standards

Norma NBR 8491 (2012). *Tijolo de solo-cemento - Requisitos*. Associação Brasileira de Normas Técnicas

Norma NMX-C-508 (2015). *Industria de la Construcción. Bloques de tierra comprimida estabilizados con cal. Especificaciones y métodos de ensayo*. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación

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

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

Norma UNE 41410 (2008). *Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo*. Asociación Española de Normalización

Norma UNE-EN 197-1 (2011). *Cementos. Composición, especificaciones y criterios de conformidad de cementos comunes*. Asociación Española de Normalización

Norma XP P13-901 (2017). *Blocs de terre comprimée pour murs et cloisons: définitions - Spécifications - Méthodes d'essais - Conditions de réception*. Association française de Normalisation