

MÉTODOS DE EVALUACIÓN DEL NIVEL DE RESISTENCIA A LA EROSIÓN HÚMEDA EN BLOQUES DE TIERRA

Ariel González¹, Santiago Cabrera², Pablo Costamagna³, Juan Pablo Sosa⁴

Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Santa Fe, Argentina

¹aagonzal@frsf.utn.edu.ar; ²spcabrera@outlook.com; ⁴juan_sosa_05@hotmail.com;

³Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Venado Tuerto, Argentina, pablocostamagna@gmail.com

Palabras clave: BTC, tierra estabilizada, erosión acelerada, pérdida de masa

Resumen

En el presente trabajo se estudian los diferentes métodos propuestos por la normativa internacional para evaluar la resistencia al intemperismo y, particularmente, a la erosión húmeda de los bloques de tierra comprimida (BTC), haciendo énfasis en los ensayos de erosión húmeda por pulverizado de agua a presión y erosión acelerada por caída de agua; proponiendo además nuevas alternativas para evaluar dicha resistencia, como la determinación de la pérdida de masa experimentada por los bloques y la comparación directa con patrones estandarizados; analizando finalmente la viabilidad de cada uno de estos métodos. Se concluye 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 por 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.

1. introducción

El bloque de tierra comprimida (BTC) es un mampuesto fabricado mediante la compresión o prensado de tierra, la cual se encuentra contenida en un molde, empleando una prensa mecánica o hidráulica, manual para bajas demandas de producción o automática para sistemas industrializados (Fontaine; Anger, 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 maquinarias especializadas. Si bien el material de base para estos bloques lo constituye la tierra, la misma admite la incorporación de estabilizantes minerales (generalmente cal o cemento) que permitan mejorar las características físicas del mismo, aumentando su resistencia a la compresión, al intemperismo y reduciendo las fisuras provocadas por la retracción de la arcilla (Roux, 2010).

Las ventajas generales del BTC, en comparación con otros mampuestos de fábrica, como el tradicional ladrillo cerámico o el bloque de hormigón, podrían resumirse en su regularidad de forma (presentando caras lisas y aristas vivas), su resistencia - tanto a la erosión como a la compresión - y la posibilidad de reciclarlos prácticamente en su totalidad (Roux; Espuna 2012).

En cuanto a la producción del bloque en sí, posee características que lo hacen más económicas y ambientalmente amigables si se la compara con la fabricación de otros materiales semejantes. Para empezar la energía utilizada en la producción de estos bloques es generalmente menor que en otros mampuestos similares; además, si bien se le adicionan algunos aditivos estabilizantes como la cal o el cemento, estos representan un porcentaje muy bajo (Bestraten; Hormías; Altemir, 2011). Otra ventaja es que no se precisa de mano de obra altamente calificada para su elaboración, y su costo de fabricación es menor al de sus pares “tradicionales” (como el ladrillo cerámico común o hueco y el bloque de hormigón) teniendo en cuenta la poca energía utilizada para su producción, y que su fabricación se hace aprovechando los recursos del sitio (Vázquez, 2001).

Una de las propiedades de mayor relevancia empleadas para evaluar la durabilidad de los BTC es su resistencia al intemperismo, particularmente a la erosión producida por la lluvia. Es por esto, que el objetivo general de este trabajo es el de analizar los diferentes métodos empleados por la normativa internacional para evaluar el nivel de resistencia a la erosión húmeda, y contrastarlos con un método de evaluación propio, desarrollado en el Laboratorio de Geotecnia de la Facultad Regional Santa Fe (FRSF) de la Universidad Tecnológica Nacional (UTN).

2. Métodos de eVALUACIÓN DEL NIVEL DE RESISTENCIA A LA ABRASIÓN Y EROSIÓN HÚMEDA

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 variada intensidad.

La norma mexicana NMX-C-508-ONNCCE (2016), la norma española UNE 41410 (2008) y la neozelandesa NZS 4298 (1998) realizan un ensayo de erosión húmeda mediante el cual se somete al BTC a una corriente continua de agua, desde una altura y durante un lapso de tiempo estipulado, midiendo luego la profundidad del orificio generado sobre la cara expuesta del bloque. Tanto la norma española como mexicana establecen la realización del ensayo de erosión acelerada denominado "SAET: Swinburne accelerated erosion test:" (Falceto, 2012), citado en la UNE 41410 (2008, p. 17) desarrollado por la Universidad de Swinburne (Australia), 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 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, para la cual, 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 de erosión 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 conocer la resistencia a la erosión húmeda de los BTC consiste en emplear un equipo de chorro de agua normalizado, el cual pulveriza agua a presión sobre los mismos por un lapso de tiempo predeterminado, evaluando luego la profundidad del patrón de erosión generado sobre la cara expuesta del bloque. Esta técnica de ensayo es adoptado por las normas neozelandesa NZS 4298 (1998) y india IS 1725 (1982) 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 BTC cuyo uso se destine a paramentos exteriores sin revestir sometidos a exposición severa (Falceto, 2012).

Además de los métodos de ensayo mencionados – los cuales evalúan la resistencia al intemperismo de los BTC a través de ensayos de resistencia a la erosión húmeda -, las normativas francesa, XP P 13-901 (2017), colombiana, NTC 5324 (2004) y brasileña, NBR 13554 (2012), determinan la resistencia a la abrasión de los bloques de tierra comprimida cepillándolos de manera reiterada con un cepillo metálico estandarizado, determinando luego la pérdida de masa experimentada por los mismo; con la salvedad que, tanto la norma francesa como la colombiana establecen la realización del ensayo manteniendo al BTC perfectamente seco, mientras que la brasilera estipula realizarlo con el bloque en condiciones húmedas.

Para evaluar el grado de resistencia al intemperismo, en el Laboratorio de Geotecnia se realizan dos tipos de ensayos: el ensayo de erosión acelerada por caída de agua (basado en la norma española UNE 41410 (2008) y el ensayo de erosión por pulverización de agua a presión (siguiendo los criterios establecidos por la norma india IS 1725 (1982), determinándose en ambos casos el nivel de resistencia a la erosión húmeda mediante la medición de la máxima profundidad de erosión producida sobre la cara expuesta del BTC.

Finalmente, se considera relevante destacar el hecho de que la normativa internacional consultada emplea como parámetro de medición del nivel de resistencia a la erosión húmeda de los BTC – sea cual sea el método de ensayo empleado – la máxima profundidad de la erosión ocasionada en el bloque; mientras que en los ensayos de abrasión por cepillado, el parámetro empleado para evaluar la resistencia de los mismos resulta ser la pérdida de masa experimentada por el BTC tras la realización del ensayo.

3. hipótesis y objetivos

3.1 Hipótesis

- 1) El nivel de resistencia a la erosión húmeda de un BTC, en lugar de ser determinado a través de la medición de la profundidad del patrón de erosión generado sobre la cara expuesta del mismo, puede determinarse mediante la determinación de la pérdida de masa absoluta experimentada tras la realización del ensayo.
- 2) El nivel de resistencia a la erosión húmeda de un BTC, en lugar de ser determinado a través de la medición de la profundidad del patrón de erosión generado sobre la cara expuesta del mismo, puede determinarse por comparación directa de la erosión ocurrida sobre el mismo con un patrón gráfico.

3.2 Objetivos

- Correlacionar la pérdida de masa experimentada por los BTC luego de evaluar su resistencia a la erosión húmeda por los ensayos de caída de agua (SAET) y pulverizado de agua a presión con la máxima profundidad de erosión generada sobre ellos.
- Evaluar si los 5 niveles de resistencia a la erosión húmeda establecidos por la normativa neozelandesa (basados en la medición de la profundidad de la máxima profundidad de la erosión ocurrida en el bloque tras ser ensayado) son aplicables en los BTC producidos, replicándolos con 5 patrones gráficos de comparación.
- Evaluar la factibilidad de emplear los métodos de comparación directa con patrones y determinación de la pérdida de masa para valorar el nivel de resistencia a la erosión húmeda en BTC.

4. Metodología

Para evaluar las hipótesis planteadas fueron confeccionadas diversas series de BTC empleando tierra local estabilizada con diferentes aditivos diferentes: cal hidráulica, cemento portland y una combinación de ambos; sometiendo luego a cada bloque a un ensayo de erosión acelerada por caída de agua según el protocolo de la norma española UNE 41410 (2008), y un ensayo de erosión por pulverización de agua a presión establecido por la norma india IS 1725 (1982).

4.1 Preparación de las probetas

Para la realización de los ensayos se confeccionaron 38 BTC empleando una prensa manual CINVA RAM y una tierra limo arcilloso de baja plasticidad (CL-ML según el sistema de clasificación de suelos SUCS), la cual contiene un bajo contenido de arena fina (un 25%). Esta tierra es proveniente de la comuna de Monte Vera, lindante con la ciudad de Santa Fe (Argentina). El carácter regional de los materiales empleados en la elaboración de los BTC,

particularmente el de la tierra, deber ser tenido en cuenta a la hora de intentar extrapolar o generalizar los resultados obtenidos.

Con intenciones de evaluar el patrón de erosión generado en BTC que presenten niveles de resistencia a la erosión húmeda diversos, se elaboraron series de BTC empleando distintos estabilizantes: cal hidráulica, cemento Portland y una combinación de ambos; todos ellos en diversas proporciones; realizándose también una serie de bloques sin estabilizante alguno. Para maximizar el número de ensayos posibles a partir de los BTC elaborados, cada uno de ellos fue cortado en tres partes iguales, generándose así tres probetas por cada bloque. Finalmente, en la tabla 1 pueden observarse las características de cada una de las series de probetas elaboradas.

Tabla1: Dosificación y cantidad de probetas elaboradas para cada serie

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%	7
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%	

4.2 Procedimientos de ensayo

a) Erosión por caída de agua SAET

Para comenzar con el ensayo, se abre la llave de agua de 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 por el orificio de rebalse). Alcanzada esta condición, se coloca la probeta sobre la base de apoyo, la cual presenta un ángulo de inclinación de 27°, de lo contrario debe ajustarse el equipo hasta cumplimentar con este requisito. La probeta debe colocarse 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, el cual culmina luego de 120 minutos. Finalmente, en la figura 1 puede apreciarse la realización de este ensayo sobre una probeta.

b) Erosión por pulverizado de agua a presión (IS 1725, 1982)

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 hasta 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 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 presurizado de agua y comienza 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 2 puede apreciarse la

realización de un ensayo de erosión por pulverizado de agua a presión, empleando para dicho ensayo un equipo desarrollado íntegramente por el Laboratorio de Geotecnia.



Figura 1: Ensayo de erosión acelerada por caída de agua (UNNE 4141, 2008)



c) Figura 2: Ensayo de erosión por pulverizado de agua a presión (IS 1725, 1982)

4.3 Tratamiento de las probetas

Cada BTC elaborado fue cortado en 3 partes iguales, obteniéndose así 3 probetas diferentes por cada bloque. Una vez identificada cada una de las probetas, se las coloca sobre una base metálica, se registra la masa húmeda del conjunto (P_h = probeta húmeda + base) y se las lleva a estufa a 105°C hasta evidenciar que la masa se mantiene constante tras dos pesadas sucesivas, registrando dicha masa ($P_{S\text{inicial}}$). Luego, se coloca la probeta (con su base metálica) dentro del equipo de ensayo correspondiente, dándose inicio al mismo. Una vez finalizada la prueba, se lleva la probeta saturada con su respectiva base nuevamente a estufa hasta obtener masa constante ($P_{S\text{final}}$).

Finalmente, luego de cada ensayo puede calcularse la cantidad de agua absorbida por cada probeta del ambiente (W) y la pérdida de masa que experimentan luego de ser ensayadas (Δm).

5. Evaluación del nivel de erosión

La evaluación del nivel de erosión experimentado por cada probeta tras la realización de los ensayos pertinentes, se realizó empleando 3 métodos:

5.1 Pérdida de masa

Para evaluar la pérdida de masa absoluta experimentada por cada probeta, debe emplearse la fórmula (1), además, empleando la fórmula (2), puede determinarse la cantidad de agua que absorbió cada probeta por higroscopicidad.

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

$$W = P_{\text{húmedo inicial}} - P_{S\text{final}} \quad (2)$$

Donde:

- Δm = Masa perdida tras la realización del ensayo, en g;
- $P_{S\text{inicial}}$ = Peso seco de la probeta y su base inmediatamente antes de realizar el ensayo, en g;
- $P_{S\text{final}}$ = Peso seco de la probeta y su base tras la realización del ensayo, en g;
- $P_{\text{húmedo inicial}}$ = Peso natural de la probeta antes llevarse a estufa para ser ensayada, en g;
- W = Humedad del ambiente por las probetas, en g.

5.2 Profundidad de la erosión

Siguiendo los métodos de evaluación del nivel de resistencia a la erosión estipulados por la normativa internacional, empleando un calibre con apreciación de 0,5 mm se determina la máxima profundidad alcanzada por el patrón de erosión generado en cada probeta tras la realización del ensayo correspondiente.

5.3 Comparación visual

Una vez ensayadas y realizadas las mediciones correspondientes sobre cada probeta se registra el patrón de erosión generado sobre cada una de ellas de manera fotográfica. Con intenciones de poder compara entre sí los patrones de erosión producidos en cada probeta, las mismas deben ser fotografiadas siguiendo el siguiente protocolo: Se coloca la probeta sobre una base blanca, inclinada 15° respecto a la horizontal. Luego, con la ayuda de un soporte especial, se posiciona la cámara sobre la probeta (a 15 cm de la misma) y se verifica la correcta alineación de la cámara respecto a la probeta. Finalmente se toma la fotografía activando el flash. La cámara empleada en este trabajo es una SONY Exmor R, con resolución de 18,2 mega pixeles. En la figura 3 pueden apreciarse los registros fotográficos de cuatro probetas.



Figura 3: Registros fotográficos de probetas ensayadas a erosión húmeda por caída de agua SEAT y pulverizado de agua a presión

6. RESULTADOS

En las tablas 2 y 3 se exponen la profundidad de erosión y la pérdida de masa medias ocurrida sobre cada serie de probetas - con la desviación estándar correspondiente - junto con la cantidad de agua absorbida por higroscopicidad por cada una de ellas, tanto para el ensayos de erosión húmeda por pulverizado de agua a presión como para el ensayo de erosión acelerada por caída de agua. En ambas tablas los resultados se ordenan de menor a mayor según la profundidad media de erosión, independientemente de la cantidad o el tipo de estabilizantes empleados.

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

Serie	Estabilizante	Probetas ensayadas	Prof. de erosión (mm)		Pérdida de masa (g)		Humedad absorbida	
			Prom.	Desv.	Prom.	Desv.	(g)	(%)
IX	Cal 10%	4	1,8	0,4	1,8	0,8	70	3,99
XI	Cto. 2,5% Cal 7,5%	6	2,0	0,6	0,7	2,4	61	3,41
VIII	Cal 7,5%	5	2,4	0,5	2,3	4,4	60	3,14
X	Cto. 5% Cal 5%	5	2,4	1,0	1,6	2,3	58	3,12
XII	Cto. 7,5% Cal 2,5%	4	2,5	0,5	2,3	1,2	94	4,94
V	Cto. 10%	4	4,5	1,7	9,9	5,3	78	3,96
IV	Cto. 7,5%	5	8,6	1,2	9,9	4,5	90	4,70
VII	Cal 5%	3	22,0	3,0	42,0	35,9	56	3,23
III	Cto. 5%	4	24,0	4,7	63,7	14,4	84	4,61
VI	Cal 2,5%	5	60,0	15,0	164,0	47,0	58	3,24
II	Cto. 2,5%	5	68,0	18,0	310,0	78,0	54	2,98
I	sin estabilizante	2	-	-	-	-	79	3,6

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

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

Cto. – cemento; Prom. – promedio; Desv. – desviación estándar

Por último, los patrones de erosión generados sobre cada serie de probetas ensayadas se resumen en la tabla 4, en la cual los resultados se ordenan de menor a mayor según las profundidades medias de erosión generadas por el ensayo de erosión húmeda por pulverizado de agua a presión.

Tabla 4: Patrones de erosión generados por cada ensayo

Procedimiento de ensayo	IX	XI	VIII	X	XII	V	IV	VII	III	VI	II	I
	Cal 10%	Cto. 2,5% Cal 7,5%	Cal 7,5%	Cto. 5% Cal 5%	Cto. 7,5% Cal 2,5%	Cto. 10%	Cto. 7,5%	Cal 5%	Cto. 5%	Cal 2,5%	Cto. 2,5%	-
Pulverizado de agua a presión (IS 1725, 1982)												
Caída de agua (UNNE 41410, 2008)												

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. Así mismo, 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, 140 mm.

7. Discusión

Se realizan algunos comentarios respecto a los diferentes métodos empleados para evaluar el nivel de resistencia a la erosión húmeda en las probetas ensayadas.

7.1 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 por cada una resulta ser sumamente engorrosa por diversos motivos, a saber:

- Es el único método que requiere secar las probetas antes y después del ensayo, lo cual requiere de tiempo y equipamiento adecuado.

- Se requieren de al menos 40 horas para determinar el nivel de resistencia a la erosión por este método: entre 10 h y 15 h de secado pre ensayo; 2 h de ensayo y al menos 24 h para el secado post ensayo.
- La gran higroscopicidad del material en estudio ocasiona diversos inconvenientes a la hora de determinar con precisión 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 humedad del ambiente, y absorben durante el ensayo más de 250 g de agua. Esto genera que cualquier mínimo inconveniente durante el secado oculte la verdadera pérdida de masa experimentada por la probeta.
- Como puede advertirse en las tablas 2 y 3, la desviación estándar de los resultados no es menor, lo cual se condice con las imprecisiones mencionadas en el inciso anterior.

7.2 Medición de la profundidad

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 el patrón de erosión generado por el mismo (una pequeña perforación de diámetro constante y profundidad variable). Además, como puede apreciarse en la tabla 3, la desviación estándar de los resultados es mínima, lo cual resalta la precisión de este método.

Respecto a las probetas ensayadas a erosión húmeda por 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 queda sumamente deteriorada, lo cual dificulta encontrar un plano horizontal desde el cual medir con precisión 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 (las de menor resistencia).

7.3 Comparación visual

Como puede observarse en la tabla 4, la identificación del nivel de resistencia a la erosión húmeda de las probetas ensayadas, particularmente para aquellas sometidas al ensayo de pulverizado de agua a presión (ya que para las ensayadas por el método de caída de agua, como fue explicado en el inciso anterior, lo más conveniente para evaluar dicha resistencia es la medición de la profundidad) resulta ser sumamente sencilla por comparación directa de la erosión generada sobre la cara expuesta con una serie de patrones; para lo cual, en base a los registros fotográficos de los 52 ensayos realizados (por este método) y una adecuada correlación de cada uno de ellos con la profundidad de erosión generada, pudieron confeccionarse los patrones de comparación expuestos en la tabla 5.

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

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

8. 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 la erosión húmeda por caída de agua; y evaluar dicha resistencia mediante los 3 métodos descritos en el inciso 4.4, puede arribarse a las siguientes conclusiones:

- La evaluación del nivel de resistencia a la 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 es el de la medición de la profundidad de la erosión acometida sobre la probeta mediante el empleo de un calibre.
- Para evaluar el nivel de resistencia a la erosión húmeda en probetas ensayadas por el método de pulverizado de agua a presión se recomienda hacer uso de la tabla 5, en la cual podrá determinarse el grado de resistencia a la erosión húmeda por comparación directa con los patrones establecidos.

Proyecciones a futuro

A pesar de los resultados alentadores, no se han realizado aun ensayos de durabilidad sobre muros de BTC expuestos a la intemperie por períodos de tiempo significativo, los cuales permitirían correlacionar los niveles de resistencia a la erosión de los bloques con la durabilidad a largo plazo de los muros. Las investigaciones futuras llevadas a cabo por el equipo de trabajo seguirán esa línea de acción, intentando predecir la durabilidad de los muros de BTC a través de los ensayos de erosión por caída y pulverizado de agua a presión sobre los bloques; para lo cual se propone seguir la metodología empleada por Roux y Espuna (2012), sometiendo muros testigos de BTC a condiciones de intemperismo reales en campo por períodos largos de exposición (superiores a 12 meses), e intentar cotejar dichos resultados con los de los ensayos de laboratorio estudiados.

Referencias BIBLIOGRÁFICAS

- 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.
- Falceto, J. C. (2012). Durabilidad de los bloques de tierra comprimida. Evaluación y recomendaciones para la normalización de los ensayos de erosión y absorción. Tesis doctoral. España: Universidad Politécnica de Madrid.
- Fontaine L.; Anger R. (2009). Batir en terre. Du grain de sable à l'architecture. París: Belin.
- IS 1725 (1982). Specification for based blocks used in general building construction. India: Indian Standards Institution
- NBR 13554 (2012). Solo-cimento. Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem. Método de ensaio. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- NMX-C-508-ONNCCE (2016). Industria de la construcción - Bloques de tierra comprimida estabilizados con cal. Especificaciones y métodos de ensayo. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación.
- NTC 5324 (2004). Bloques de suelo cemento para muros y divisiones. Definiciones, especificaciones, métodos de ensayo, condiciones de entrega (traducción de la norma francesa XP P 13-901 del año 2001). Colombia: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.
- NZS 4298 (1998). Materials and workmanship for earth buildings [Building Code Compliance Document E2 (AS2)]. Nueva Zelanda: Standards New Zealand.
- PR XP P13-901 (2017). Blocs de terre comprimée pour murs et cloisons. Définitions, spécifications, méthodes d'essai. conditions de réception.

Roux, R. (2010). Los bloques de tierra comprimida (BTC) en zonas húmedas. México: Plaza y Valdés S.A.

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

Salas Serrano, Julián (1995). Presentación. En: Pereira G., H. (coord.) Habiterra: exposición Iberoamericana de construcción de tierra. Programa Iberoamericano de Tecnología para el Desarrollo, Red Temática XIV A. Bogotá: Escala. p. 13-29

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

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

AUTORES

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; y de la Red Argentina PROTIERRA.

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.

Pablo Costamaga, Ingeniero Civil, Docente investigador de la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Venado Tuerto. Desarrolla sus actividades laborales en el Laboratorio de Geotecnia de la UTN FRVT.

Juan Pablo Sosa, Estudiante de Ingeniería Civil en la UTN FRSF. Becario en el Laboratorio de Geotecnia del Depto. De Ing. Civil de dicha institución.