

DESARROLLO Y ADAPTACIÓN DE ENSAYO DE LABORATORIO PARA MEJORAR LA PRODUCCIÓN DE BLOQUES DE TIERRA COMPRIMIDA

Pablo Costamagna¹, Oscar Braun², Santiago Cabrera³

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Venado Tuerto, Argentina
¹pablocostamagna@gmail.com, ²ingoscarbraun@gmail.com

³ Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Argentina, spcabrera@outlook.com

Palabras clave: humedad óptima, densidad, suelo cemento

Resumen

El bloque de tierra comprimida (BTC) es un mampuesto resultante de la mezcla de tierra, agua y eventualmente cemento en proporciones adecuadas, que se somete a compresión en una máquina bloquera con el fin de obtener altas densidades. El objetivo de este trabajo es conocer la humedad óptima de la mezcla de suelo-cemento para ser prensada en la bloquera, adaptando el ensayo de compactación Proctor normal, de uso vial. La adaptación propuesta consta en modificar el llenado del molde y la aplicación de la carga para el compactado del mismo, de manera de simular el procedimiento y la acción de la bloquera de BTC. Para ello, sobre una misma muestra de tierra se efectuaron sendo ensayos (Proctor normalizado y Proctor adaptado) de manera de comprobar la existencia de una correlación entre ambos. Mediante una serie de ensayos pudo constatarse que la variante de Proctor propuesta es válida para determinar la humedad óptima de moldeo de BTC en una bloquera, y que ésta es un 18% superior a la obtenida mediante el ensayo de compactación Proctor normal.

1 INTRODUCCIÓN

En la Argentina, el ladrillo cocido es uno de los insumos más utilizados en la construcción, sobre todo en las grandes ciudades, donde es prácticamente el único material empleado para los muros. Sin embargo, desde hace tiempo se viene implementando en el país la construcción con tierra incorporando la técnica del bloque de tierra comprimida (BTC) como una opción para la construcción de mampostería. El BTC se ha constituido en la actualidad en una importante y viable alternativa constructiva (Ángulo Jaramillo; Carreño Carry, 2017). El rigor científico y técnico aplicado en las investigaciones realizadas a nivel internacional permiten hoy garantizar la calidad de esta técnica constructiva.

El BTC es un mampuesto resultante de la mezcla de tierra, agua y eventualmente cemento en proporciones adecuadas, que se somete a compresión en una máquina con el fin de obtener altas densidades, y que luego, en caso de utilizarse cemento en su fabricación, es sometido a un proceso de curado para que se produzca su endurecimiento efectivo. La compresión se realiza con una máquina llamada prensa o bloquera, siendo una de las más utilizada la CINVA-RAM. La prensa puede ser accionada de forma manual o mecánica. Las dimensiones y forma del bloque dependerán de las medidas de la caja de la máquina y de las placas que permitirán formar bloques huecos (Cabrera et al., 2024).

Una de las ventajas de esta técnica constructiva es la posibilidad de utilizar el suelo existente en el lugar como materia prima, disminuyendo los costos y el impacto en el medio ambiente. Para ello es imprescindible conocer las características de la tierra disponible para determinar si es necesario estabilizarla y definir las dosificaciones más adecuadas a utilizar (Turco et al., 2021).

Para garantizar la calidad de los BTC es de fundamental importancia que la humedad de la mezcla sea la adecuada, ya que esto garantiza la óptima compresión del bloque y previene fallas como la aparición de fisuras, el faltante de material que se adhiere al molde de la prensa por exceso de humedad y variaciones dimensionales, entre otras. Dadas las características

higroscópicas de los materiales constitutivos de los BTC (principalmente tierra y arena) y las condiciones de acopio de estos, su contenido de humedad varía día a día, lo cual imposibilita incorporar una cantidad fija de agua para una misma dosificación. De esta manera, para alcanzar la humedad óptima de prensado, la cantidad de agua a incorporar es variable en función de las condiciones ambientales y la humedad retenida por la materia prima.

En sintonía con lo explicado anteriormente, se propone como objetivo de este trabajo realizar una propuesta del ensayo de compactación Proctor de uso vial (VN, 1966), adaptado a las necesidades específicas que se presentan en la fabricación de BTC, replicando de manera fidedigna la forma en la cual los BTC son producidos. De esta manera, el ensayo propuesto se convertiría en una potente herramienta para determinar la humedad óptima de moldeo de este tipo de bloques.

2 METODOLOGIA

2.1 Materiales

El suelo utilizado para realizar las muestras provino de una única cantera para limitar la variabilidad en el comportamiento de este. Se procedió a realizar una clasificación del suelo empleando para ello el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (ASTM, 2010). Dicha clasificación arrojó como resultado un suelo del tipo limo de baja plasticidad “ML”.

El cemento empleado es de carácter comercial, en este caso se utilizó cemento de albañilería marca “Avellaneda”.

Se preparó la mezcla mediante una dosificación volumétrica que consta de nueve partes de tierra y una parte de cemento. En el caso del agua, su contenido varía en función de lo estipulado por el ensayo. En la figura 1 pueden apreciarse los materiales empleados en la confección de las probetas, antes de ser hidratados y mezclados.



Figura 1. Dosificación volumétrica de la mezcla: 9 partes de tierra y 1 de cemento

2.2 Ensayos

Se realizaron dos tipos de ensayo, uno tal cual lo expresa la norma de ensayo VN-E19-66 (1966) y otro adaptando dicho procedimiento acorde al proceso de fabricación de los BTC. Ambos ensayos fueron realizados utilizando el molde de compactación cilíndrico de acero presentado en la figura 2.a, con el fin de poder replicarse en cualquier laboratorio, ya que este molde es frecuente en los mismos.

Como diferencia entre los ensayos se pueden mencionar: forma de llenado del molde, aplicación de la carga y tipos de carga. En el ensayo original el llenado del molde se realiza en 3 capas a las cuales, compactando cada una de ellas con 25 golpes de un pisón estandarizado de acero (figura 2.b). Esta forma de compactación genera una carga de carácter dinámico, simulando el trabajo de la máquina pata de cabra utilizada en obras viales. En nuestra adaptación esto se modifica, aplicándose la carga mediante una prensa hidráulica

(figura 2.c) generando una carga vertical cuasi estática, ya que se quiere simular el trabajo de la bloqueara (figura 3). Los cambios entre ambos ensayos se resumen en la tabla 1.

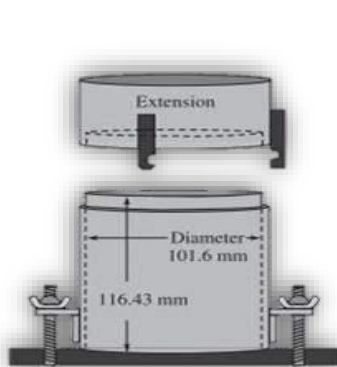


Figura 2.a. Molde de compactación de acero

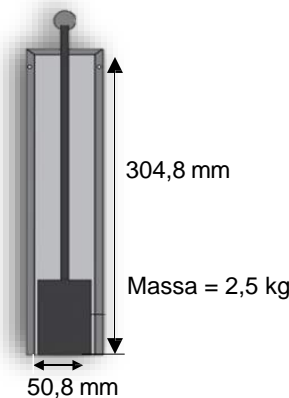


Figura 2.b. Pisón de compactación de acero



Figura 2.c. Prensa hidráulica de compresión

Figura 2. Herramientas de laboratorio

Tabla 1. Diferencias entre el ensayo adaptado para BTC y el Proctor normal

	Proctor normal standard	Adaptación del Proctor normal standard para BTC
Molde de ensayo	Molde de compactación cilíndrico de acero (figura 2)	
Llenado de molde	Tres capas	Una capa con extensión
Aplicación de carga	Pisón de compactación de acero (figura 3)	Prensa hidráulica de compresión (figura 4)
Forma de carga	Dinámica	Carga vertical

La mezcla fue compactada en una prensa hasta alcanzar una presión nominal acorde con la bloqueara a utilizar; aplicándose en nuestro caso una fuerza de 1800 kgf. Los 1800 kgf surgieron del análisis de la prensa disponible en el laboratorio de Geotecnia de la UTN FRVT, que puede apreciarse en la figura 3.

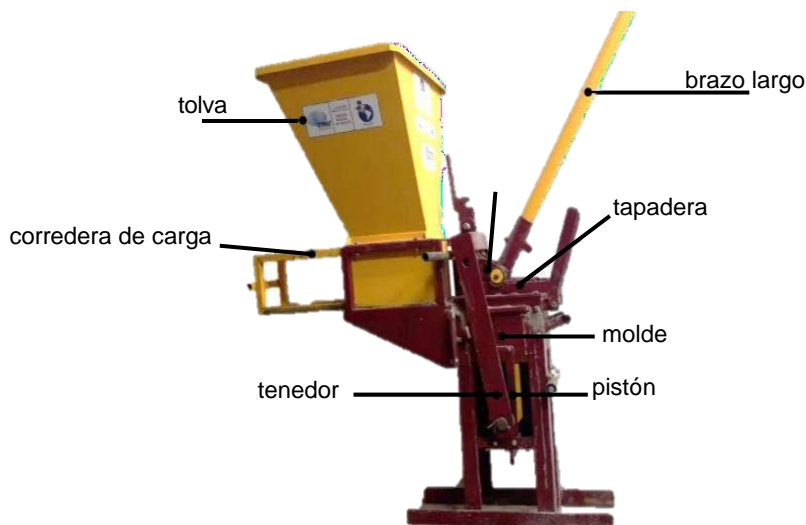


Figura 3. Componentes de la máquina para la fabricación de BTC

Para el cálculo de la presión a aplicar por la prensa, se tuvo en cuenta el recorrido del brazo de palanca largo y del pistón o tenero o fondo del molde (figura 4). La variable de fuerza se fijó en 60 kg aproximadamente para que el esfuerzo no sea grande y cualquier operario lo pueda realizar.

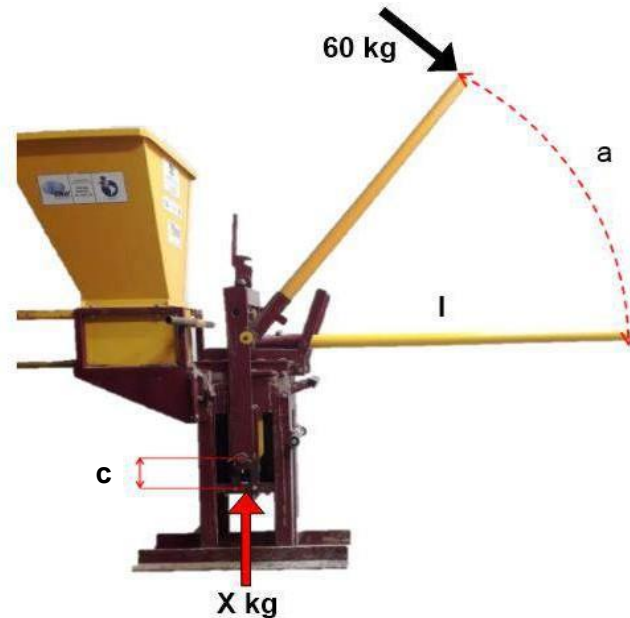


Figura 4. Esquema de cálculo de la carga a aplicar por la prensa

Teniendo en cuenta la figura 4 se realizó el siguiente cálculo, empleando el concepto físico de la conservación de la energía mecánica.

$$T_1 = F_1 \times d_1 = T_2$$

$$60 \text{ kg} \times a = X \times c \longrightarrow \frac{60[\text{kgf}] \times a[\text{m}]}{c[\text{m}]} = X [\text{kg}]$$

$$\frac{60 \times 1,2}{0,04} = 1800 \text{ kg}$$

Siendo

T= trabajo;

c= el recorrido del pistón`

F= fuerza;

a= la longitud del arco: $\phi \times l = 60^\circ \times 1,16 \text{ m} = 1,2 \text{ m}$

d= distancia;

El procedimiento del ensayo está basado en la norma antes mencionada por lo que se utiliza el molde del Proctor estándar (figura 2.1).

A continuación, se mencionan los pasos realizados en la adaptación del ensayo Proctor estándar:

- Se colocó la dosificación mencionada anteriormente;
- Se mezcló todo el material de la muestra a ensayar para lograr su homogeneización. Se determinó la humedad que aún retiene, expresándola en porcentaje del peso del suelo seco (H'%) (figura 5a);
- Se agregó el agua necesaria para que, con la existente en el suelo, se alcance una humedad que sea del 4 al 6 % inferior a la prevista como valor de la humedad óptima. Se mezcló bien hasta lograr la uniformidad (figura 5b);
- Se verificaron las constantes del molde de compactación a emplear en el ensayo: Peso del

molde (Pm) con la extensión y base y su volumen interior (V);

e) Se armó el molde y se lo apoyó sobre una base firme. Con una cuchara se llenó el molde al ras (molde + extensión) (figura 5c);



Figura 5. Procedimiento del ensayo Proctor estándar adaptado

- f) Se le colocó un plato de acero de 15 mm de espesor y un diámetro igual al interior del molde del Proctor estándar, para lograr uniformidad de carga en toda el área del molde (figura 5d);
- g) Se compactó el material con la ayuda de una prensa hidráulica de compresión y una celda de carga (figura 5e);
- h) Se cargó hasta alcanzar los 1800 kgf (figura 5e);
- i) Se retiró el plato de acero y se midió el asentamiento de la mezcla (figura 5f);
- j) Con la ayuda de una cuchilla se retiró la mezcla y se extrajo una muestra del tercio medio del molde. Se la colocó en una bandeja, se pesó y secó en estufa a 105°-110°C, hasta peso constante para determinar la humedad (h) (figura 5g);
- k) Se agregó agua, en la proporción del 1 al 2 % a la mezcla restante sin compactar.

NOTA: Se considera que el material está convenientemente desmenuzado, cuando se aprecie a simple vista, que pasa por el tamiz 4,8 mm (N° 4).

Se repitieron las operaciones indicadas desde el apartado e) a la k) 5 veces.

3 RESULTADOS

Se realizaron 10 ensayos de cada uno, con la misma dosificación, arrojando los siguientes resultados presentados en la tabla 2.

Tabla 2. Resultados del ensayo Proctor normal y Proctor adaptado

Muestra	Proctor normal		Proctor adaptado	
	densidad máxima (kg/dm ³)	humedad óptima (%)	densidad máxima (kg/dm ³)	humedad óptima (%)
1	1,65	18,0	1,71	21,2
2	1,61	19,1	1,69	23,1
3	1,63	18,6	1,67	22,3
4	1,59	17,9	1,73	21,1
5	1,60	18,7	1,71	22,0
6	1,66	17,3	1,77	21,1
7	1,59	19,2	1,68	22,7
8	1,57	18,4	1,62	20,5
9	1,62	18,0	1,7	20,2
10	1,67	19,1	1,72	21,3

Como ejemplo se muestra, en la figura 6, dos de las curvas obtenidas en los ensayos de compactación.

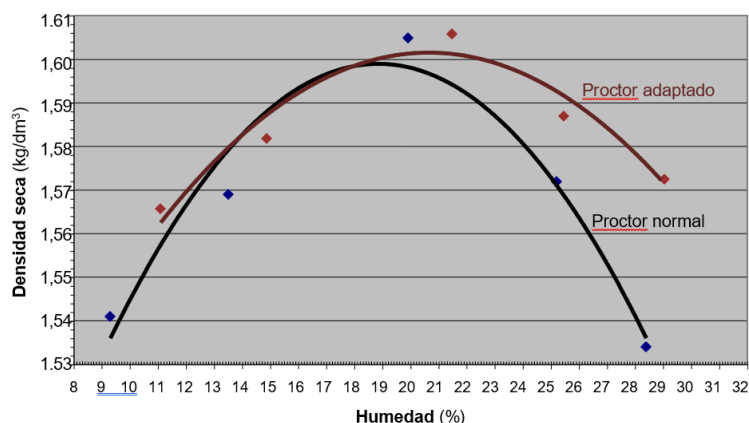


Figura 6. Curva de compactación ensayo Proctor normal y Proctor adaptado

4 DISCUSIÓN

El objetivo de este trabajo es encontrar la existencia de una relación entre la humedad óptima obtenida mediante el ensayo de compactación Proctor normal y la obtenida de una adaptación del mismo ensayo simulando la acción de la prensa. Los resultados demuestran que la humedad óptima en el ensayo adaptado es superior a la obtenida en el ensayo normal en un 18% (tabla 2). Se puede observar también que las densidades obtenidas presentan resultados superiores, aunque en menor medida que la humedad (5%). Por otra parte, se destaca que, en el ensayo adaptado, las densidades logradas en cada paso difieren en menor medida entre sí, algo que no ocurre en el ensayo normal. Por otra parte, uno de los inconvenientes presentados en la realización del ensayo adaptado es que, en los puntos con humedad superior, el agua escapa del molde al ser presionada, no descontando su peso ni midiendo el volumen derramado.

5. CONCLUSIONES

La humedad óptima promedio para la fabricación de los BTC, obtenida mediante la adaptación del ensayo de compactación es un 18% mayor que la obtenida con el ensayo de compactación Proctor normal, utilizando un suelo limoso de baja plasticidad (ML) y una bloquera manual con una fuerza en el brazo largo de 60 kgf en promedio. Al mismo tiempo, la densidad obtenida mediante la adaptación del ensayo de compactación es un 5% mayor que la obtenida con el ensayo de compactación Proctor normal. Si bien el objetivo de este trabajo no es evaluar la capacidad portante de los bloques, cabe mencionar que las humedades óptimas obtenidas mediante ambos ensayos son superiores a las obtenidas en los artículos de Cabrera et al. (2024) donde la humedad de los bloques fue de 9% y en el artículo de Guillén Guillén et al. (2021) donde la humedad más exitosa fue del 12% para el moldeo de bloques. Esta divergencia podría deberse a los diferentes suelos utilizados en los trabajos citados. Esta información es crucial para todo fabricante de bloques, ya que permite conocer la humedad óptima de una mezcla dada, mediante un ensayo que utiliza elementos presentes en cualquier laboratorio de suelos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ángulo Jaramillo, D. E.; Carreño Carry, A. (2017). El bloque de tierra comprimido o BTC. Una alternativa de construcción para la arquitectura contemporánea. *NODO*, 12(23), 31–37. <https://doi.org/10.54104/nodo.v12n23.140>.
- ASTM D 2487 (2010). *Práctica estándar para la clasificación de suelos para propósitos de ingeniería (Sistema de Clasificación Unificada de Suelos)*. USA: ASTM International
- Cabrera, S.; Darras, G.; Losa, N. (2024). Evaluación del proceso de prensado en la fabricación de bloques de tierra comprimida. *Informes de la construcción*, Vol. 76, 574, 6524, ISSN-L: 0020- 0883 <https://doi.org/10.3989/ic.6524>.
- Guillén Guillén, C.; Muciño Vélez, A.; Guerrero Baca, L.; Cruz Farrera, F. (2021). Optimización del proceso de elaboración de bloques de tierra comprimida (BTC) mediante el control granulométrico de las partículas del suelo. *Nova Scientia*, N° 27, Vol. 13 (3), 2021. ISSN 2007 – 0705, p.: 1 – 28
- Turco, C.; Paula Junior, A.; Teixeira, E.; Mateus, R. (2021). Optimisation of compressed earth blocks (CEBs) using natural origin materials: A systematic literature review. *Construction and Building Materials*, 309, 125140. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125140>
- VN - E19-66 (1966). *Compactación de mezclas de suelo-cemento y suelo-cal*. Norma de ensayo. Buenos Aires: Dirección Nacional de Vialidad

AUTORES

Pablo Costamagna: ingeniero civil, docente investigador en la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Venado Tuerto "UTN FRVT" (Argentina), miembro de la comisión materiales de la Red Protierra Argentina, concejero departamental del departamento ingeniería civil de UTN FRVT.

Oscar Braun: ingeniero civil, docente titular de geotecnia en UTN FRVT, docente investigador en UTN FRVT.

Santiago Cabrera: ingeniero civil y doctor en ingeniería por la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe "UTN FRSF" (Argentina). Actualmente es codirector del Grupo de Investigación y Desarrollo en Técnicas de Construcción con Tierra de la UTN FRSF; codirige la Red Argentina de Construcción con Tierra PROTIERRA e integra la Red Iberoamericana PROTERRA.