

EL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DEL MURO TAPIAL CONSTRUIDO CON SUELOS DE CÓRDOBA

Julio A. Capdevila¹, Dolores Aramburu¹, Gabriel Harada¹

¹Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional de Córdoba. Av. Vélez Sarsfield 1611. Córdoba.
www.fcefyn.unc.edu.ar. Cel. 351-2172466 e-mail: jcapdevila@unc.edu.ar

Recibido 05/2025; Aceptado 06/2025

RESUMEN.- La construcción en tierra fue durante siglos la principal forma constructiva en varias regiones del mundo, inclusive en la Argentina, en donde se desarrolló durante todo el periodo colonial. La tecnología de la “tierra cruda”, es considerada como óptima desde el punto de vista del equilibrio y protección del medio ambiente, además de ser cada vez más valorada como material de construcción. El material constitutivo propuesto para la construcción del muro tapial es el limo loésico. Este tipo de suelo ocupa gran parte de la provincia de Córdoba, y en particular una importante superficie del gran Córdoba. A los fines de poder caracterizar el comportamiento mecánico del muro tapial, resulta necesario evaluar las propiedades físicas del limo loésico a utilizar, como así también sus propiedades mecánicas. En este artículo se presentan los principales resultados obtenidos de una serie de ensayos de laboratorio realizados sobre probetas y sobre un módulo prototipo a escala 1:1, propios del sistema constructivo muro tapial, realizados sobre limos de Córdoba y que permiten concluir en la aptitud de este tipo de suelo como material de construcción de un cerramiento lateral con tierra cruda compactada, como delimitante del espacio.

Palabras clave: muro tapial, comportamiento mecánico, ensayos mecánicos, limo loésico, tecnologías sustentables.

MECHANICAL BEHAVIOUR OF RAMMED EARTH WALL BUILT WITH SOILS FROM CORDOBA

ABSTRACT.- Earth construction was the main constructive technique in various regions of the world during centuries, including Argentina, where it was developed throughout the colonial period, both in the north of the country and in the humid Pampas. The "raw earth" technology is considered optimal from the point of view of balance and protection of the environment, as well as being increasingly valued as a construction material. The constitute material proposed for the construction of the rammed earth wall is loessic silt. This type of soil covers a large part of the province of Córdoba, and in particular an important area of the greater Córdoba. In order to characterize the mechanical behavior of the rammed earth wall, it is necessary to evaluate the physical properties of the loessic silt to be used, as well as its mechanical properties. This article presents the main results obtained from a series of laboratory test son samples and a prototype module, typical of the rammed earth wall construction system, carried out on silt from Córdoba, and which allow us to conclude on the competence of this type of soil as a construction material for a lateral enclosure with compacted raw earth, as a delimiter of space.

Keywords: rammed earth wall, mechanical behavior, mechanical tests, loessic silt, sustainable technologies.

1. INTRODUCCIÓN

La construcción en tierra fue durante siglos la principal forma constructiva en varias regiones del mundo inclusive en la Argentina. En Asia, Egipto y Medio Oriente existen ejemplos con más de 5000 años de antigüedad (Patrone et al, 2005; Bui et al, 2009; Montoya Robles, 2017). La tecnología de la “tierra cruda”, es considerada como óptima desde el punto de vista del equilibrio y protección del medio ambiente,

por ser poco agresiva, constitutiva de soluciones útiles para resolver las necesidades habitacionales en medios rurales (Cuitiño et al, 2012).

La tierra es cada vez más valorada como material de construcción. En este sentido, dado el creciente interés por este antiguo material, y ante la falta de un marco legal, muchos países intentan normalizar su uso para resolver los problemas actuales derivados de la ausencia de una normativa que permita el uso de las técnicas de construcción con tierra cruda.



Esta obra está bajo Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional.
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Una mayor profundización en los estudios específicos de este material resulta relevante, toda vez que la normativa argentina no contempla la edificación con sistemas constructivos regionales con tierra cruda debido al riesgo de colapso bajo carga dinámica (Minke, 2006). No obstante, el Programa Ciencia y Tecnología para Iberoamérica (CYTED) y la actual Red Argentina Protierra han producido avances en la normalización de protocolos de ensayo para bloques de adobes y de tierra comprimida (BTC), muro de adobe y muro tapial, con y sin refuerzos (Rotondaro y Patrone, 2009). Muchos países intentan normalizar su uso para resolver los problemas actuales derivados de la ausencia de una normativa que permita el uso de las técnicas de construcción con tierra cruda.

Dentro de la variedad de técnicas constructivas con tierra seca, el tapial es un muro formado con tierra arcillosa, que se compacta a través de un encofrado, formado por tabloncillos de madera o planchas metálicas dispuestas en paralelo. El muro tapial se destaca por recurrir a un material barato y fácilmente accesible, ligado al contexto inmediato del ser humano, la tierra, apropiada por su simplicidad, rapidez constructiva, características bioambientales (ecológicas) y facilidad de transferencia a mano de obra no especializada (Patrone y Evans, 2006). El material a emplear en la construcción del tapial debe ser validado, en su aptitud de uso, mediante el procedimiento indicado por la norma peruana E.080 (2017).

A los fines de caracterizar el comportamiento mecánico del muro tapial es necesario definir los ensayos que permitan obtener parámetros mecánicos relevantes. Los ensayos correspondientes a la caracterización del comportamiento mecánico del muro tapial varían según la disponibilidad de tecnologías y recursos disponibles. La Red Argentina Protierra desarrolló un listado con los ensayos de laboratorio, previstos en las distintas normas internacionales (Norma neozelandesa NZS 4298-1998; Norma de Zimbabwe SAZS 724; Norma de Nuevo Méjico NMAC 14.7.4.14 2016; Norma bra-

silera NBR 16814-2020 y Norma colombiana NTC5324), Norma IRAM 11595) y en la Dirección Nacional de Vialidad (Pahaut et al., 2020). Los mismos permiten identificar y caracterizar el comportamiento investigado a partir de muestras de distintos tamaños y configuraciones materializadas a tales efectos, destacándose entre ellos el ensayo de compresión, ensayo de erosión húmeda (método de pulverización), ensayo de abrasión, ensayo de caída de ladrillo completo, ensayo de contracción lineal y ensayo de impacto.

El presente trabajo tiene como objetivo la evaluación del comportamiento mecánico del muro tapial construido con suelos de C y su empleo como cerramiento lateral en viviendas, analizando la aptitud o no de resistir cargas verticales más allá de su propio peso (portantes). A tal fin, además de la preparación y ensayo de las muestras propuestas por cada tipo de prueba, se preparó un bloque de un panel de muro tapial a escala natural, para ser ensayado a compresión y determinar los valores de carga de rotura que permita determinar la capacidad del mismo. Los ensayos mecánicos sobre paneles permiten evaluar el comportamiento estructural bajo condiciones que representen su funcionamiento en servicio. Estos ensayos están tipificados en la Norma IRAM 11588, que resulta de aplicación para determinar la aptitud de cerramientos portantes. Por último, en relación con el tipo de material utilizado para la construcción del muro tapial, resulta necesario incluir parámetros geotécnicos que caractericen el tipo de suelo a emplear y sus propiedades.

2. MATERIAL Y ENSAYOS REALIZADOS

2.1. Características del suelo

El suelo estudiado en este trabajo fue extraído de un predio del sur de la ciudad de Córdoba. En la Tabla 1 y Figura 1 se presentan

Tabla 1: Parámetros geotécnicos del suelo de ensayo (para muro tapial)

Suelo ensayado	Densidad máxima [kN/m ³]	Humedad óptima [%]	Límite Líquido [%]	Límite Plástico [%]	Índice de Plasticidad [%]	Pasante Tamiz N°200 [%]	Clasificación según SUCS*
Limo	17,2	17,2	25,6	20,7	4,9	88,1	CL-ML

* Sistema Unificado de Clasificación de Suelos

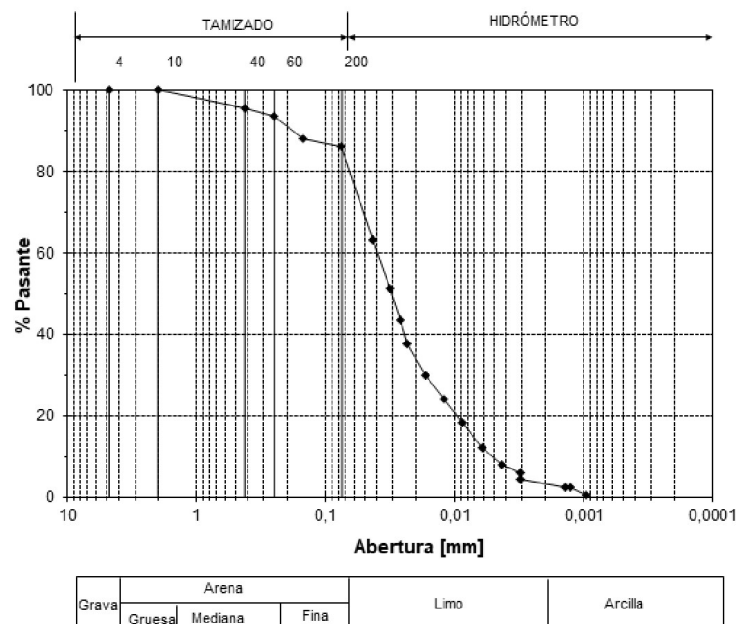


Fig. 1: Curva granulométrica del suelo empleado

los parámetros geotécnicos relevantes de la muestra empleada, para su utilización en muro tapial. El suelo ensayado corresponde a un limo loésico de baja plasticidad.

Los valores indicados en la Tabla 1 y Figura 1 fueron obtenidos a partir de los siguientes ensayos de laboratorio: ensayo granulométrico (ASTM D6913 y ASTM D7928), límites de Atterberg (ASTM D 4318), determinación de pasante tamiz N°200 (ASTM D1140-00) y ensayo de compactación Proctor estándar (ASTM D698).

2.2. Aptitud del suelo a emplear

A los fines de verificar la aptitud del suelo para materializar este tipo de tecnología constructiva, es necesario realizar, previamente, una serie de ensayos cualitativos (cinta de barro, resistencia seca y prueba de contenido de humedad) detallados en la norma peruana E.080 (2017) y que se describen brevemente a continuación.

2.2.1. Ensayo de cinta de barro

A partir de un cilindro de suelo húmedo de 12 mm de diámetro, se intentará formar una cinta de 4mm de ancho, aplanando la muestra con los dedos índice y pulgar. La cinta debe alcanzar una longitud de entre 10 y 20 cm de longitud para que el suelo tenga un contenido de arcilla óptimo para su uso.

2.2.2. Ensayo de resistencia seca

Se forman, con el suelo a utilizar y con la humedad mínima para su moldeado, 4 esferas pequeñas. Luego de dejarlas secar por 48 hs, se las presiona entre el dedo pulgar y el índice, en caso de que ninguna de ellas se rompa o agriete, el material es apto para su uso en muro tapial. Si al menos una se rompe o agrieta, se debe repetir el procedimiento con 4 esferas nuevas. En caso de obtener el mismo resultado se descarta el material.

2.2.3. Prueba de contenido de humedad

Mezclar el suelo a emplear con agua, luego formar una esfera del tamaño de un puño, comprimirlo con fuerza y soltarlo a un piso plano y rígido desde 1,10 m de altura. Si la esfera se desintegra al caer, el contenido de humedad es bajo. Si la esfera se rompe en 5 o más pedazos, el contenido de humedad es correcto. En caso de que la esfera se aplaste sin romperse, el contenido de humedad es muy elevado.

2.3. Características mecánicas

A continuación, se describen los ensayos de laboratorio que permiten identificar el comportamiento investigado, entre ellos el ensayo de compresión, de erosión húmeda, de abrasión, de caída de ladrillo completo, de contracción lineal y ensayo de impacto. Además, se describe el ensayo de compresión realizado sobre el módulo prototipo realizado a escala 1:1. Todos los ensayos fueron realizados en el Laboratorio de Geotecnia y de Estructuras de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba.

2.3.1. Ensayo de compresión

Para la realización de este ensayo se ejecutaron cinco probetas cilíndricas (M1 a M5), según los lineamientos de la norma de Viabilidad Nacional VN-E19-66. El ensayo consiste en la aplicación de carga, de manera gradual, sobre las caras planas de la muestra hasta alcanzar la rotura, registrando el valor de la carga máxima

alcanzada (ABNT NBR 16814-2020 y NZS 4298-1998). Se determina la resistencia unitaria a la compresión y, con los resultados de las mediciones para cada probeta, se obtiene la resistencia característica a compresión de la muestra ensayada mediante (1):

$$\sigma_k = \left(1 - 1,5 \frac{s}{\sigma_{prom}}\right) \cdot \sigma_{min} \quad (1)$$

Siendo σ_k la resistencia característica a compresión de la muestra, en MPa, σ_{min} la resistencia media a compresión y S la desviación estándar de la muestra, en MPa.

2.3.2. Ensayo de erosión húmeda

Este ensayo propone un elevado nivel de agresividad para determinar la resistencia del muro tapial sometido a erosión provocada por condiciones de exposición severa, tales como lluvias o temporal con vientos. Para ello, se prepararon tres probetas de 15 cm de lado por 12 cm de profundidad, compactadas en capas con la humedad óptima determinada mediante ensayo Proctor (M1 a M3).

La prueba sigue los lineamientos de la norma NZS 4298-1998 y consiste en proyectar una cara de la probeta con un spray de agua presurizada durante 1 hora o hasta que la muestra resulte completamente atravesada. Tras la realización del ensayo se mide la profundidad del hoyo más profundo, con una varilla de punta plana de 10 mm de diámetro, registrando el nivel de resistencia a erosión.

2.3.3. Ensayo de abrasión

Este ensayo permite determinar si el muro tapial posee resistencia a la abrasión suficiente para ser empleado en muros exteriores vistos sin revestir.

Se confeccionaron tres probetas de 15 cm de lado por 12 cm de profundidad, compactadas en capas con la densidad máxima y la humedad óptima determinada mediante ensayo Proctor (M1 a M3). Las mismas fueron pesadas, antes de comenzar, obteniendo la masa inicial (m_i).

La prueba consiste en cepillar con cepillo de cerda de alambre, según los lineamientos de la norma NTC 5324, una de las caras de la muestra, a razón de una ida y vuelta por segundo, durante un minuto sin aplicar fuerza vertical. Al finalizar, la probeta se limpia con pincel seco, eliminando los elementos que se desprendieron durante el cepillado y se vuelve a pesar (m_f), en gramos. Con las masas obtenidas y la superficie cepillada (S), en cm², se calcula el coeficiente de abrasión:

$$C_a = \frac{s}{(m_i - m_f)} \quad (2)$$

2.3.4. Ensayo de caída de ladrillo completo

Esta prueba permite determinar de manera simple la calidad de los bloques de tierra. Para ello, se deben preparar probetas prismáticas de 15x15x10 cm. Luego, se suspende la probeta desde una de sus esquinas y se deja caer sobre una superficie de impacto desde una altura de 90 cm a contar desde su punto más bajo. De esta manera, el impacto ocurre en una esquina de la probeta ensayada (NZS 4298-1998).

2.3.5. Ensayo de contracción lineal

Para la realización de este ensayo se prepararon 3 probetas, con la densidad máxima y el contenido de humedad óptima, determinados mediante ensayo Proctor (M1 a M3).

El suelo se compacta en un molde cuyas dimensiones internas son 600 mm de largo, 50 mm de ancho y 50 mm de alto (NZS 4298-1998). Una vez finalizado el proceso de curado y secado de las muestras, se procede a medir la retracción en cada extremo, que permite obtener la contracción lineal, según (3).

$$c_i = \left(\frac{x_1 + x_2}{600} \right) \cdot 100 \quad (3)$$

Siendo c_i la contracción lineal de cada muestra, en %, x_1 y x_2 la contracción del extremo izquierdo y derecho de la muestra respectivamente, en mm. Por último, se obtiene la contracción lineal promedio (c_{prom}) entre todas las muestras ensayadas (n), según (4).

$$c_{prom} = \frac{\sum c_i}{n} \quad (4)$$

2.3.6. Ensayo de impacto

Este ensayo permite evaluar la resistencia al impacto de un elemento rígido sobre el muro tapial, empleado en cerramientos interiores y exteriores. Para ello, se ensayaron probetas prismáticas de 15 cm de lado por 12 cm de profundidad, colocando las mismas sobre una superficie horizontal, plana y rígida, tal como propone la norma IRAM 11595. Luego, se posiciona el dispositivo que permite la caída de una bola de acero, de 50 mm de diámetro y 500 gr de peso, sobre el centro geométrico de la probeta. Se deja caer la bola de acero desde alturas progresivamente crecientes, partiendo de 250 mm e incrementando la altura en saltos de 250 mm hasta alcanzar los 2 m o hasta la rotura de la probeta. El ensayo establece que la bola de acero impacte sobre un mismo punto de la superficie de la muestra. Se mide el diámetro y la profundidad de la impronta en la superficie de la probeta. En caso que la probeta rompa antes de alcanzar el impacto de 2 m de altura, se debe registrar la altura de caída que provocó la rotura.

2.3.7. Ensayo de compresión de bloque de tapial

Para la realización de este ensayo se preparó un bloque de muro tapial de 0,50m de alto, 1,00m de largo y 0,40m de espesor/ancho, compactado de manera idéntica a la que será utilizada en obra y con el contenido humedad óptima, establecido mediante ensayo Proctor. El proceso de compactación se realizó con pisón, dentro del encofrado, en capas de 0,10m de espesor aproximado, escafrificando entre capas. Cada capa se compacta hasta que el pisón no marque huella sobre el suelo. Una vez completo el encofrado, se enrasó la cara superior. Para su preparación se utilizó un encofrado de madera compuesto por 4 tableros (2 tableros frontales o laterales mayores y 2 tableros laterales menores) descritos en detalle por Capdevila et al. (2021). El bloque de muro tapial fue preparado siguiendo los lineamientos que un usuario tendría que aplicar para autogestionar la construcción del mismo.

El ensayo propiamente dicho consiste en la aplicación de carga, de manera gradual, sobre las caras planas del bloque hasta alcanzar la rotura, registrando el valor de la carga máxima alcanzada, determinando la resistencia unitaria a la compresión del bloque ensayado. Esta carga se aplica sobre la muestra de manera uniforme mediante 2 cabezales rectangulares diseñados y contruidos para tal fin mediante paneles fenólicos y tubos estructurales (ver Figura 8.a).

3. PRINCIPALES RESULTADOS

El suelo descrito previamente fue compactado en los diferentes moldes, según el ensayo a realizar, alcanzando en cada probeta los valores de densidad máxima y humedad óptima determinados mediante el ensayo Proctor. Las muestras preparadas fueron en-

sayadas, según los lineamientos de cada ensayo y los resultados obtenidos se detallan y analizan a continuación.

De manera previa a la realización de los ensayos de caracterización del comportamiento mecánico es pertinente validar la aptitud del suelo para materializar el muro tapial. En este sentido, se llevaron a cabo las pruebas cualitativas ya descritas, respecto del contenido de arcilla y humedad del suelo propuesto. El agua utilizada para moldear el suelo se corresponde con la humedad óptima de compactación. El ensayo de cinta de barro permitió moldear una cinta de 11 cm de longitud (ver Figura 2.a). En igual sentido, el ensayo de resistencia seca confirmó lo indicado por el de cinta de barro (ver Figura 2.b). Los resultados obtenidos permiten concluir que el suelo es apto para la materialización de muro tapial.



Fig. 2: Ensayos de aptitud del suelo para materializar un muro tapial. a) Ensayo de cinta de barro. b) Ensayo de resistencia seca.

Ensayo de compresión

Las 5 probetas, preparadas para este ensayo, fueron encabezadas para garantizar el paralelismo de sus caras. A continuación, se ensayaron en una prensa manual hasta alcanzar la rotura (ver Figura 3). La Tabla 2 presenta los valores de carga (P_i) y tensión de compresión (σ_i) máximas alcanzadas en cada muestra. Asimismo, con estos valores resulta factible determinar la desviación estándar (S) y el valor de resistencia característica a la compresión (σ_k) para este suelo.

Tabla 2: Profundidad de las oquedades generadas por la penetración del agua proyectada a presión

Muestras	P _i [kN]	σ _i [MPa]	(σ _i - σ _{prom}) ²
M1	4,425	0,55	0,0013
M2	4,883	0,6	0,0002
M3	5,263	0,65	0,0041
M4	4,682	0,58	0,00001
M5	4,476	0,55	0,0013
Σ		2,93	0,00691

A partir de los resultados indicados en la Tabla 2 se determinan los valores de:

$$\sigma_{prom} = \frac{\sum \sigma_i}{n} = \frac{2,93}{5} = 0,586 \text{ MPa} \quad (5)$$

$$S = \frac{\sum (\sigma_i - \sigma_{prom})^2}{n-1} = \frac{0,00691}{4} = 0,00173 \quad (6)$$

Con (5) y (6) se calcula con (1) el valor de:

$$\sigma_k = 0,55 \text{ MPa} \quad (7)$$

La norma neozelandesa (NZS 4298-1998) establece un mínimo de resistencia característica a compresión de 0,5 MPa. En tanto que la reglamentación australiana (Standard Australia) sugiere valores mínimos de entre 0,4 y 0,6 MPa. Algunas de las normas restantes (SAZS 724 y NMAC 14.7.4.14 2016) presentan valores mínimos de resistencia a compresión más elevados (1,5MPa y 2MPa, respectivamente) pero no resulta claro si estos valores corresponden a resistencia promedio o característica. No obstante, el valor de resistencia característica a compresión, obtenido en este trabajo, resulta razonable y suficiente para el empleo de muro tapial como cerramiento (no portante), toda vez que las solicitaciones en las secciones de muro más comprometidas no superan 0,05 MPa.



Fig. 3: Muestra ensayada a compresión

Ensayo de erosión húmeda

En la Tabla 3 se muestran las profundidades de penetración obtenidas luego de realizado el ensayo de erosión húmeda. De los datos presentados se concluye que ninguna de las muestras ensayadas fue atravesada por el agua a presión (Figura 4). Más aún, la profundidad máxima alcanzada resulta menor a 50mm, lo que permite clasificar al suelo con un nivel 2 de resistencia a la ero-

sión húmeda, cualidad que lo hace apto para su uso en muro tapial exterior, según la norma NZS 4297-1998.

Tabla 3: Profundidad de las oquedades generadas por la penetración del agua proyectada a presión

Tiempo de ensayo [min]	Muestras		
	M1	M2	M3
15	15 mm	13 mm	21 mm
30	24 mm	19 mm	30 mm
45	30 mm	26 mm	38 mm
60	33 mm	29 mm	46 mm



Fig. 4: Erosión húmeda. a) ejecución del ensayo. b) muestra ensayada

Ensayo de abrasión

La norma NTC5324 (Colombia) propone 4 niveles de resistencia a la abrasión, según el valor del coeficiente de abrasión (C_a) obtenido del ensayo a partir de la expresión (2). Es así que, los elementos constructivos de tierra cruda, a ser empleados en muros exteriores vistos, deben alcanzar un nivel de resistencia a la abrasión de 1 ($C_a > 7$) o 2 ($7 > C_a > 5$) para poder emplearse sin revestimiento. En tanto, cuando el nivel de resistencia a la abrasión es de 3 ($5 > C_a > 2$) o 4 ($C_a \leq 2$) deberán ser revestidos. Los valores mostrados en la Tabla 4 permiten concluir que las muestras ensayadas alcanzan un nivel 4 de resistencia a la abrasión, y en consecuencia un muro tapial materializado con este suelo deberá ser revestido (ver Figura 5).

Tabla 4: Valores del coeficiente de abrasión en las muestras ensayadas

Muestra	Superficie [cm ²]	m _i [gr]	m _f [gr]	C _a [cm ² /gr]
M1	45	5260	5230	1,5
M2	36,75	5225	5180	0,82
M3	35,25	5175	5155	1,76



Fig. 5: Ensayo de abrasión

Ensayo de caída de ladrillo completo

Las probetas se consideran aptas si tras la realización del ensayo no se rompen. Por otro lado, se considera que un elemento está roto si se parte en trozos de, aproximadamente, el mismo tamaño o si le faltase un trozo de 100 mm o mayor en cualquiera de sus esquinas.

Para la realización de este ensayo (Figura 6) se emplearon 3 probetas. Una vez ejecutado el mismo ensayo, solo una de las probetas se partió en dos pedazos similares. En tanto que las otras 2 muestras, sólo perdieron trozos pequeños. Estos resultados permiten concluir que el suelo ensayado verifica para ser empleado.

Ensayo de contracción lineal

La Tabla 5 presenta los resultados obtenidos del ensayo de contracción lineal en cada una de las 3 probetas ensayadas (ver Figura 6). El valor de contracción lineal promedio (c_{prom}) resultó igual a 0,75%, siendo mayor al 0,2% recomendado por la norma NZS 4298-1998.



Fig. 6: Ensayo de caída de ladrillo completo

Tabla 5: Valores obtenidos en el ensayo de contracción lineal

Muestra	x_1	x_2	c_i	c_{prom}
M1	2,3 mm	2,3 mm	0,77%	0,75%
M2	2,7 mm	1,2 mm	0,65%	
M3	1,2 mm	3,8 mm	0,83%	



Fig. 7: Probetas del ensayo de contracción lineal

Ensayo de impacto

La Tabla 6 presenta los valores de diámetro y profundidad obtenidos de la impronta de la bola de acero sobre la superficie de las muestras ensayadas, para cada altura de caída. La norma IRAM 11595 indica que las probetas no deben fracturarse antes de alcanzar una altura de caída de la bola de acero de 2 m, para resultar aptas. A partir de los resultados detallados en la Tabla 6, 2 de las 3 muestras ensayadas no se fracturaron, por lo que se puede concluir que el suelo verifica al impacto.

Ensayo de Compresión de Bloque de Tapial

La Tabla 7 muestra el valor de la carga máxima de compresión alcanzada durante la ejecución del ensayo de compresión del bloque de tapial y la correspondiente tensión de rotura. También se incluye el valor del acortamiento de la muestra de bloque de muro tapial. Al momento de alcanzar la rotura, el bloque ensayado, presenta la típica forma cónicopiramidal. La misma permite

Tabla 6: Diámetro y profundidad de la impronta de la bola de acero, según la altura de caída

Altura de caída	Muestras					
	M1		M2		M3	
	Diam. [mm]	Prof. [mm]	Diam. [mm]	Prof. [mm]	Diam. [mm]	Prof. [mm]
25	15	1	23	2	10	1
50	24	2	24	3	17	3
75	30	3,2	27	4	22	3,8
100	33	3,5	29	4,5	25	5
125	35	4,2	33	5,3	27	5,6
150	37	4,8	37	7	32	6
175	39	5	Rotura	-	35	6,9
200	42	5,7	Rotura	-	42	8,7

Tabla 7: Valores obtenidos en el ensayo de compresión del bloque de muro tapial.

Muestra	Acortamiento [mm]	Deformación Unitaria	Carga máxima [kN]	Tensión de rotura [MPa]	Tensión máxima de servicio [MPa]	Factor de Seguridad
Bloque de muro tapial	19,35	3,90%	46	0,115	0,05	2,3

verificar que la preparación del bloque logró un material compactado uniforme y homogéneo. En la Figura 8 se pueden apreciar 2 fotografías del bloque ensayado, al momento de alcanzar la rotura conicopiramidal. En la Figura 8.a se pueden observar, además, los cabezales empleados para la aplicación uniforme de la carga de compresión.

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados presentados resultan relevantes para caracterizar el comportamiento mecánico del muro tapial. En primer lugar, el limo loésico de la ciudad de Córdoba resulta apto para poder materializar un cerramiento de muro tapial, cualidad principal y relevante para poder avanzar en la caracterización del comportamiento del mismo para su evaluación como tecnología constructiva para materializar cerramientos laterales, ya sea con aptitud de soportar cargas o bien como cerramiento solamente.

Los resultados de los ensayos de laboratorio presentados muestran un comportamiento mecánico compatible con la materialización del muro tapial solamente como cerramiento no portante. Esta conclusión se valida mediante los resultados de resistencia característica obtenida mediante los ensayos de compresión simple realizados en probetas saturadas, que alcanza valores compatibles con la función indicada. A su vez, el ensayo de erosión húmeda habilita al suelo estudiado para materializar un muro tapial como envolvente ya que es apto para uso al exterior. En relación con el ensayo de abrasión, se debe tener la previsión de revestir ambos paramentos del muro tapial a materializar. Entre los revestimientos más usuales y sustentables se encuentra el mortero a base de cal o yeso, con tierra y fibras vegetales (Castilla, 2011; Yepes Tapia, 2020). También se puede utilizar el silicato potásico como ligante del suelo para preparar un mortero con tierra de alta resistencia a los rayos UV y buena resistencia mecánica. Los productos naturales como caseína o linaza también se emplean como estabilizantes de morteros de tierra (Castilla, 2011; Barbeta Solá et al., 2014).

El resto de los ensayos típicos para muro tapial indican que el suelo empleado es apto para su uso en esta tecnología constructiva, salvo por el porcentaje de contracción lineal ligeramente superior al recomendado.

El ensayo realizado sobre el bloque de muro tapial a escala real permite caracterizar el comportamiento mecánico del mismo en forma más representativa que en una probeta de pequeña escala. Se destaca, la cantidad de suelo seco involucrado en la preparación del bloque alcanza los 350 kg a los que se le adicionaron 60 litros de agua, para alcanzar la humedad óptima de compactación. Luego, previo mezclado para homogeneizar el contenido de humedad, se procedió a compactar con pisón manual en capas de 0,10m de espesor, similar a la autogestión del muro en una vivienda real, con la complejidad operativa que esto implica. No obstante, la forma de rotura cónicopiramidal observada en la Figura 8 permite concluir que el procedimiento de preparación de la muestra fue adecuado, logrando un bloque homogéneo. El valor de tensión de rotura alcanzado duplica la mayor tensión de servicio que se alcanza en la parte inferior del muro. Esto permite concluir que el muro tapial construido con limos loésicos de la ciudad de Córdoba resulta apto para su utilización como cerramiento lateral, debiendo complementarse con una estructura independiente. En caso de adoptar como criterio de diseño, compatible con la tierra cruda como material principal, la sustentabilidad sería conveniente emplear estructura resistente de madera.



Fig. 8: Bloque de muro tapial ensayado en compresión simple con detalle de la rotura obtenida

5. CONCLUSIONES

A partir de lo presentado en este trabajo es factible expresar las siguientes conclusiones:

1. Los ensayos de laboratorio propuestos permiten caracterizar el comportamiento mecánico del muro tapial construido con suelos de Córdoba.
2. El suelo propuesto como material constitutivo del muro tapial resulta apto para la ejecución del mismo.
3. El muro tapial, ejecutado con suelo de Córdoba propuesto en este trabajo, tiene que ser revestido superficialmente mediante la aplicación de algún agente protector, para garantizar su integridad frente a acciones exteriores, tales como golpes y raspones.
4. Los resultados obtenidos en los distintos ensayos de laboratorio realizados muestran la aptitud de los suelos de Córdoba para materializar un muro tapial no portante como cerramiento lateral.
5. La metodología de preparación del bloque de muro tapial para la realización del ensayo de compresión permite obtener una probeta homogénea cuyo comportamiento resulta representativo de un muro a escala natural.
6. El factor de seguridad igual a 2,3, obtenido de la comparación de la tensión de rotura alcanzada en el ensayo de compresión, versus la tensión de trabajo en la zona más solicitada del muro resulta suficiente para el diseño de un muro tapial como cerramiento lateral no portante.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional de Córdoba por el apoyo económico que hizo factible la concreción del trabajo descrito en este artículo.

REFERENCIAS

- Barbeta Solá, G.; Janer Adrian, F. X. y Berthelsen Molist, B. E. (2014). Estabilización hidrofugante para revocos de tierra con extractos naturales. *Memorias del XI Congreso Internacional de Arquitectura de Tierra (CIATTI)*. Cuenca de Campos, España. pp. 277-286. ISBN: 978-84-606-9543-1.

- Bui Q. B.; Morel J. C.; Venkatarama Reddy B. V. y Ghayad W. (2009). Durability of rammed earth walls exposed for 20 years to natural weathering. *Building and Environment*, 44, 912–919.
- Capdevila J. A., Salomón J. E., Sabaini F. y Odebrecht A. M. (2021). Desarrollo del encofrado para la construcción sostenible de muro tapial con suelos de Córdoba. *Memorias del Encuentro Argentino y Latinoamericano de Ingeniería - 2021 (5° CADI, 3° CLADI y 11° CAEDI 2021)*. Tomo II. Editado por Luis Fernández Luco [et al.]. 1° Ed ampliada. Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Cristina Vázquez, 2021. 978-987-88-7245-2. 5 al 7 de octubre de 2021, 943-950.
- Castilla F. J. (2011). Revestimientos y acabados superficiales en construcciones con tierra contemporáneas. *Informes de la Construcción*. Vol. 63 (523). pp. 143-152. ISSN: 0020-0883.
- Cuitiño G.; Esteves A. y Hernández A. (2012). Proceso de evaluación de un sistema constructivo. Caso de la quincha. *Memorias de la XXXV Reunión de Trabajo de ASADES, Rosario, Argentina*.
- Minke, G. (2006). Building with Earth. *Design and Technology of a Sustainable Architecture*. Ed. Birkhäuser. Alemania. ISBN 10: 3-7643-7477-2.
- Montoya Robles J. M. (2017). *Construcción con tierra. Revisión y sustento de los ensayos de campo: Presencia de arcilla o resistencia seca y control de fisuración con arena gruesa*. Tesis de grado Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú.
- Pahaut B.; Brizuela Barros C.; Videla F.; Cuitiño G.; Bellman L.; Peisino L.; Canavesi L.; Matar Arturo M.; Aramburu M. D.; Castaño Llugard N.; Costamagna P. y Cabrera S. (2020). *Protocolo de ensayos sobre elementos constructivos para la construcción con tierra*. Comisión Materiales, Red Argentina Protierra. Recuperado de: <http://redprotierra.com.ar/2020/10/28/protocolos-de-ensayo-para-la-construccion-con-tierra/>
- Patrone J. C.; García A. B.; Nigro E. y Mazzeo J. P. (2005). *Sistema de muro monolítico con suelo estabilizado. Construcción con tierra*. Centro de Investigación Habitat y Energía, FADU UBA. 1ra edición: Buenos Aires. ISSN 1669-8932.
- Patrone, J. C. y Evans, J. M. (2006). Evaluación térmica de una vivienda de suelo cemento en Florencio Varela. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol. 10, ISSN 0329-5184.
- Rotondaro R. y Patrone J. C. (2009). La construcción con tierra, una tecnología posible para el hábitat. *Saber Cómo*, N° 76, INTI.
- Yepes Tapia, J. A. (2020). *Muros de mampostería colonial revestidos con mortero a base de cal reforzado con fibras como una alternativa de restauración y reforzamiento de edificaciones antiguas en la ciudad de Cartagena*. Trabajo Final de Grado. Facultad de Ingeniería. Universidad de Cartagena. Colombia.