

Estudio preliminar de mezclas de suelo-cemento para la elaboración de Bloques de Tierra Comprimida (BTC) en la localidad de Andacollo (Neuquén)

Preliminary study of soil-cement mixtures production of compressed earth blocks (CEB) on Andacollo (Neuquén)

Matías Andrés Mogni & Mauro Codevilla & Carolina P. Taboada

Universidad de Buenos Aires, Av. Gral. Las Heras 2214, Buenos Aires, Argentina., mmogni@fi.uba.ar

Sandra Orlandi

Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco Comodoro Rivadavia, Chubut

RESUMEN: Los Bloques de Tierra Comprimida (BTC) son mampuestos elaborados mediante la compactación estática de suelos para los que frecuentemente es necesario el agregado de un estabilizante volumétrico, como la cal o el cemento. Estos elementos constituyen un nuevo paradigma en la construcción de viviendas sostenibles e incorporan numerosos beneficios, tales como su rápida ejecución, bajo costo y menor impacto ambiental. Se trabajó con una mezcla inicial compuesta por dos suelos pertenecientes a la localidad de Andacollo (Neuquén) y sobre la misma se efectuaron tres grupos de nuevas mezclas con incorporación de cemento al 2.5, 5.0 y 7.5 %. La selección de la mezcla inicial fue determinada en base a los resultados de una caracterización física (granulometría, límites de Atterberg, Proctor estándar, entre otros). Para los grupos de nuevas mezclas se evaluó su desempeño preliminar con ensayos de compresión no confinada. Se presentan los cambios de comportamiento en los grupos de mezclas en función de la cantidad de cemento incorporado, el tiempo de curado y el valor de succión mátrica con el propósito de obtener en forma preliminar una mezcla óptima para la construcción de BTC.

ABSTRACT: Compressed Earth Blocks (CEB) are masonry units made through the static compaction of soils, often requiring the addition of a volumetric stabilizer such as lime or cement. These elements represent a new paradigm in sustainable housing construction and offer numerous benefits, including fast execution, low cost, and reduced environmental impact. The study involved working with an initial mixture composed of two local soils from Andacollo (Neuquén), and three groups of new mixtures were fabricated with cement addition at 2.5, 5.0 and 7.5 %. The selection of the initial mixture was based on the results of physical characterization tests (particle size analysis, Atterberg limits, standard Proctor test, among others). The preliminary performance of the new mixture groups was evaluated using unconfined compression tests. The paper presents the changes in the behavior of the mixture groups based on the amount of incorporated cement, curing time and matric suction value, aiming to obtain a preliminary optimal mixture for CEB construction.

PALABRAS CLAVE: BTC – sostenible – suelo-cemento – succión mátrica – compresión no confinada

KEYWORDS: CEB – sustainability – soil-cement – matric suction – unconfined compression strength

1 INTRODUCCIÓN

La construcción de viviendas y estructuras de fortificación utilizando tierra como material es una práctica ancestral, realizada por diferentes civilizaciones y en casi todas las latitudes. Prefabricar elementos de dimensiones y formas determinadas para luego colocarlas apiladas una sobre otra de forma que queden trabadas, fue una mejora tecnológica que se dio también en varios puntos del planeta, surgiendo así las soluciones de mampuestos. Entre los elementos que conforman el suelo, lo suelos finos con predominio de minerales de arcilla cumplen el rol de aglutinante, confiriendo a las piezas su forma, resistencia y rigidez, la cual se puede ver fuertemente reducida frente al incremento de humedad del elemento. La cocción de estos mampuestos, obteniendo materiales cerámicos, dio solución al problema expuesto anteriormente.

Existen condiciones climáticas y de borde para las cuales el cocer la pieza representaría una instancia innecesaria o evitable. Surge entonces el Bloque de Tierra Comprimida (BTC) que es un mampuesto de suelo sin cocer, que se obtiene de la compresión de suelo húmedo en un molde y posterior secado al aire. En la Figura 1 se presenta una imagen del material descripto. En lo que respecta a construcciones masivas, un muro realizado con estos bloques debe encontrarse protegido de humedad por la acción directa de la lluvia, el salpicado y la ascensión capilar.



Figura 1. Bloque de tierra comprimida (BTC).

Es posible utilizar el suelo natural del sitio donde se realizará la obra, previamente dosificado en peso o volumen. Sin embargo, es frecuente que las características y cantidades de los suelos presentes no sean suficientes para obtener bloques que cumplan con los requerimientos de un muro. En estos casos es posible la incorporación de estabilizantes hidráulicos, cal o cemento portland, que aumentan la resistencia a la compresión y abrasión de los bloques y controlan el cuadro de fisuración de su estructura. En estos casos, es importante que las cantidades de estabilizante sean las menores posibles, debido a las emisiones

relacionadas con su producción y que inhabilitan la posibilidad de reutilización del material.

Por otra parte, la constitución de la matriz microporosa de la tierra da como resultado condiciones higrotérmicas confortables en los interiores de las construcciones. Junto con un adecuado diseño bioclimático, logra mantener temperaturas y niveles de humedad relativa confortables y estables.

Las ventajas generales del BTC, se podrían resumir en: i) utilización de materiales locales de bajo costo de transporte y fácil acceso, ii) menor impacto ambiental por su conformación, sin necesidad de cocción, iii) producción escalable a nivel industrial, iv) condiciones higrotérmicas confortables en interiores.

2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 Materiales utilizados

2.1.1 Suelos naturales

Los dos materiales naturales utilizados fueron extraídos en cercanías de la localidad de Andacollo, departamento Minas, provincia de Neuquén (Figura 2). En la Tabla 1 se resumen alguna de las propiedades físicas utilizadas para el trabajo y las normas ASTM utilizada para cada uno de los ensayos. En términos generales, el suelo “A” es una arena limosa de plasticidad nula y el suelo “B” es un limo de baja plasticidad (ML) según el Sistema Unificado de Clasificación (USCS).

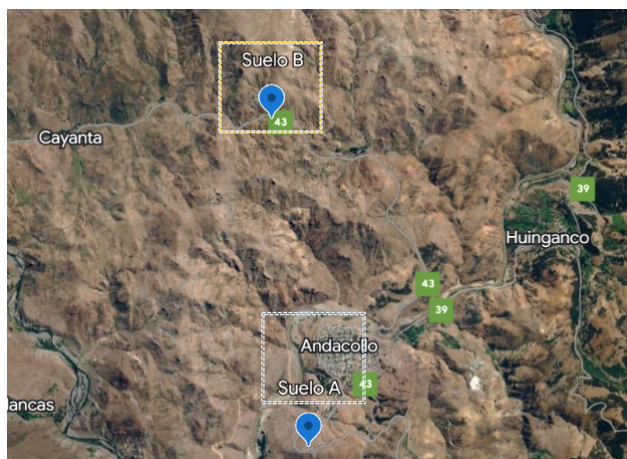


Figura 2. Sitios de extracción (Neuquén, Argentina).

Tabla 1. Materiales utilizados. Propiedades físicas.

Parámetro / Material	A	B	ASTM
USCS	SM	ML	D 2487
#200 (%)	35	55	D 1140
LL – LP (%)	S/D	32 - 24	D 4318
S_u (m ² /gr)	32	60	-
G_s (-)	25,5	26	D 854
γ_{opt} (kN/m ³)	15,9	15,5	D 698
ω_{opt} (%)	20	21,6	D 698

2.1.2 Aditivo incorporado

El aditivo incorporado en las mezclas fue cemento Portland normal (CPN40) de resistencia característica $\sigma'_{bk} = 40 \text{ MPa}$.

2.2 Métodos

2.2.1 Mezcla de suelos naturales adoptada

La distribución de tamaño de partículas que proponen las normas para la fabricación de los BTC presenta un rango muy amplio en la cual pueden variar mucho las mezclas. Esto afecta directamente en el comportamiento de los mampuestos, ya que varía la densidad y compacidad de los mismos, dando como resultado BTC más heterogéneos y de menor resistencia. La manera en la que se suele corregir esto es aumentando la incorporación del aditivo o estabilizante, generando un mayor impacto y costo.

Una manera sencilla de reducir al mínimo la incorporación de aditivo es mediante la ejecución de un control granulométrico, el cual consiste en generar la curva granulométrica “óptima” que permita minimizar los vacíos intergranulares a través de la combinación de las partículas de diferentes tamaños. Con este procedimiento se demuestra un notable mejoramiento en el comportamiento del suelo natural como bloque comprimido (Guillén et al 2021).

Por otro lado, como aspecto negativo de realizar un ajuste granulométrico exacto, es el de generar un residuo con la porción del agregado que no se utilizaría, generando mayores costos al tener que extraer más cantidad de suelo. De esta manera, se buscó una mezcla que minimice los vacíos intergranulares utilizando el total de ambas muestras, combinando sus respectivas curvas granulométricas.

Esto se logró mezclando en etapas el suelo B (que posee las partículas más pequeñas) a un volumen fijo de la muestra de suelo A (que posee las partículas más grandes). En cada etapa se pesó dicho volumen de suelo, el cual se fue aumentando hasta llegar a un máximo de densidad y mínimo de vacíos intergranulares. De esta manera, el valor máximo se obtuvo en una proporción de 65 % del suelo A y un 35 % del suelo B.

2.2.2 Selección de cantidad de aditivo incorporado

En las normas internacionales de BTC no se especifica una cantidad de aditivo que se deba utilizar para la fabricación, ni tampoco se exige su utilización, pero si debe cumplir con los requisitos mínimos de resistencia a compresión simple.

Argentina no cuenta con reglamentos o normas técnicas específicos para la construcción con mampuestos de tierra cruda, sin embargo en el reglamento de la construcción CIRSOC 201 se establece que, “podrán ejecutarse muros con materiales distintos a los especificados en el Capítulo II (ladrillos cerámicos macizos o huecos y bloques de hormigón) siempre y cuando estos nuevos materiales cumplan como mínimo con los requisitos establecidos para los materiales o componentes especificados por dichos reglamentos”. De esta manera, se tomaron como valores de referencia la resistencia a compresión que exige la norma IRAM para ladrillo de cerramiento (1,5 MPa) y para ladrillo portante (4 MPa) (Cabrera 2020).

Con el objetivo de conseguir el mínimo porcentaje de aditivo que cumpliera dicha norma, los porcentajes de adición de CPN40 utilizados fueron 2,5 – 5,0 – 7,5% en peso. También se confeccionaron mezclas sin incorporación de aditivo (0 %) a los efectos de utilizarla como “blanco” o patrón de referencia para cuantificar los cambios de comportamiento esperados.

2.2.3 Armado de muestras

Para el armado de muestras se utilizó un molde bipartido de 100 mm de alto por 50 mm de diámetro, con utilización de material previamente secado a horno y fraccionado por el tamiz #4. Se fijó como densidad objetivo el 100 % de la densidad seca máxima obtenida del ensayo Proctor estándar y su correspondiente valor de humedad óptima.

Conocido el volumen de la probeta, se obtuvo el peso seco exacto a incorporar y posteriormente se determinó en forma gravimétrica las cantidades de CPN40 a incorporar en base a los porcentajes de adición previamente establecidos. La mezcla del suelo natural y el CPN40 se efectuó en forma manual y en seco hasta lograr un aspecto uniforme. Posteriormente se hidrató la mezcla mediante empleo de agua destilada previamente calculado para condición de humedad óptima hasta lograr homogeneidad. Se efectuó la confección de la probeta mediante compactación manual en marco de reacción en 5 capas homogéneas. En forma inmediata, se procedió al desmolde y protección con abundante papel film para evitar pérdidas de humedad. En la Figura 3 se muestra una probeta recién desmoldada.



Figura 3. Muestra terminada. Compactación estática por capas.

Se establecieron como parte del análisis 2 tiempos de curado en cámara húmeda de 7 y 14 días (7d y 14d) y 4 estados de humedad previo a la rotura: i) saturación total (SAT, inmersión a 24 hs), ii) sin secado al aire posterior a curado (S 0h), iii) secado al aire a 24 hs posterior a curado (S 24h), iv) secado al aire a 96 hs posterior a curado (S 96h). Considerando estas variantes de armado en condición de duplicado, el total de muestras fabricadas y ensayadas alcanzó un total de 64. En la Tabla 2 se presenta el resumen de todas las muestras fabricadas con la nomenclatura adoptada.

Tabla 2. Grupo de muestras armadas en función de % CPN40 (0% a 7.5 %), tiempo de curado y condición de secado posterior.

Grupo	Descripción	Cantidad
7d - SAT	curado 7 días, saturada	4x2=8
7d - S 0h	curado 7 días, sin secado	4x2=8
7d - S 24h	curado 7 días, secado 24h	4x2=8
7d - S 96h	curado 7 días, secado 96h	4x2=8
14d - SAT	curado 14 días, saturada	4x2=8
14d - S 0h	curado 14 días, sin secado	4x2=8
14d - S 24h	curado 14 días, secado 24h	4x2=8
14d - S 96h	curado 14 días, secado 96h	4x2=8
TOTAL		32x2=64

2.3 Ensayos en compresión no confinada

Una vez finalizado el curado de las muestras, se efectuó la condición de secado correspondiente a cada grupo de muestras. La Figura 4 corresponde al grupo de muestras en saturación total (7d - SAT y 14d - SAT) y la Figura 5 corresponde al grupo de muestras con 24 hs de secado posterior a curado (7d - S24h y 14d - S24h).

Previo al ensayo se tomaron las dimensiones y peso de cada probeta y luego se efectuó el ensayo de compresión simple a deformación controlada (1,0 mm/min) obteniendo datos de la deformación externa y carga axial en tiempo real hasta alcanzar la rotura. En la Figura 6 se muestra el patrón de rotura de tres probetas ensayadas con 7 días de curado y 24 hs de secado previo al aire.



Figura 4. Probetas sumergidas 24 hs en agua (7d-SAT y 14d-SAT).



Figura 5. Probetas con 24 hs secado al aire (7d - S 24h y 14d - S 24h).



Figura 6. Patrones de rotura en probetas con 7 días de curado y 24 hs de secado post curado (7d - S 24h).

2.4 Ensayo de succión matrica (mezcla c= 0%)

Teniendo en cuenta los diferentes tiempos de secado posterior al curado, se determinó la curva de retención característica de la mezcla sin incorporación del cemento (0 %) mediante técnica de papel de filtro (ASTM D 5298) a los efectos de evaluar cambios del comportamiento del material en función del valor de succión mátrica.

Para el armado de muestras se fabricaron pastillas de 20 mm de altura y 101 mm de diámetro con utilización de material previamente secado a horno y fraccionado por el tamiz #4. Se fijó como densidad y humedad objetivo los mismos valores que las muestras de compresión simple.

Se colocó el papel filtro calibrado (Whatman N°42) entre las pastillas, para obtener el valor de succión mátrica y el superior

para obtener la succión total. Luego de una semana en cámara con control higrotérmico, se determinó la humedad de los papeles filtro calibrados mediante empleo de balanza de resolución 0.0001 gr. En la Figura 7 se muestra el armado final de una muestra.



Figura 7. Confección de muestras para la medición de succión matricia.

3 RESULTADOS

3.1 Síntesis de resultados de pruebas UCS

En la Tabla 2 se presentan todos los resultados obtenidos, en donde ω_f es la humedad final previa al ensayo, ϵ_{1f} es la deformación axial en falla, UCS es la resistencia a la compresión simple (promedio de ensayos por duplicado) y E_{10} es el módulo secante correspondiente al 10% del valor de carga máxima.

Tabla 2. Ensayos UCS. Síntesis de resultados.

Condición muestra	Cemento	wf %	ϵ_{1f} %	UCS MPa	E10 MPa
curado 7d	Saturadas 24 hs (SAT)	0,0%	N/D	N/D	N/D
		2,5%	20,5%	0,12	N/D
		5,0%	18,5%	1,75	1549
		7,5%	18,6%	2,84	1525
	Sin secado (S-0h)	0,0%	19,2%	0,14	201
		2,5%	19,8%	0,20	121
		5,0%	20,0%	1,58	250
		7,5%	18,4%	3,26	711
	Secado 24 hs (S-24h)	0,0%	8,4%	1,02	2007
		2,5%	6,5%	1,18	1994
		5,0%	8,3%	2,99	1136
		7,5%	9,3%	4,76	1191
	Secado 96 hs (S-96h)	0,0%	3,0%	1,93	479
		2,5%	4,6%	1,56	348
		5,0%	4,7%	2,50	436
		7,5%	5,8%	5,42	757
curado 14d	Saturadas 24 hs (SAT)	0,0%	N/D	N/D	N/D
		2,5%	20,4%	0,14	225
		5,0%	19,8%	1,55	236
		7,5%	19,7%	3,15	493
	Sin secado (S-0h)	0,0%	19,2%	0,20	75
		2,5%	19,8%	0,37	237
		5,0%	20,0%	2,16	378
		7,5%	18,4%	4,52	602
	Secado 24 hs (S-24h)	0,0%	9,6%	0,95	333
		2,5%	10,2%	0,86	251
		5,0%	11,7%	2,67	389
		7,5%	10,3%	4,59	810
	Secado 96 hs (S-96h)	0,0%	3,0%	1,99	545
		2,5%	4,6%	2,01	999
		5,0%	4,7%	3,19	590
		7,5%	5,8%	5,14	792

3.2 Edad de curado 7 días

En la Figura 8 se muestra los resultados de los ensayos de resistencia a la compresión de las probetas que tuvieron 7 días de curado, en este se grafica la resistencia a la compresión en función del porcentaje de cemento y la variación del tiempo de secado post curado. En la Figura 9 se observa como la variación de resistencia en un mismo porcentaje de cemento por la variación del tiempo de secado post curado. En la Figura 10 se observa la variación de resistencia en función del porcentaje de cemento para un mismo tiempo de secado post curado.

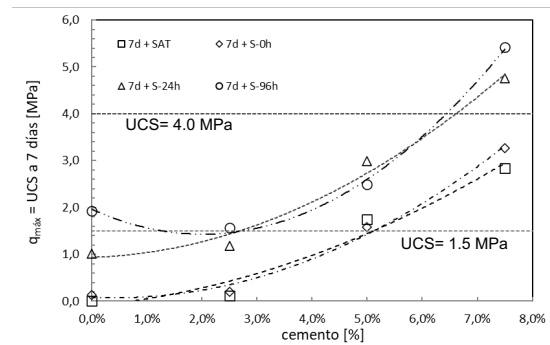


Figura 8. Resultados con 7 días de curado.

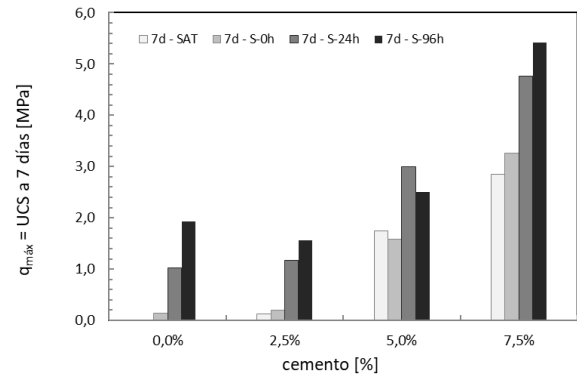


Figura 9. UCS 7d en función del % cemento.

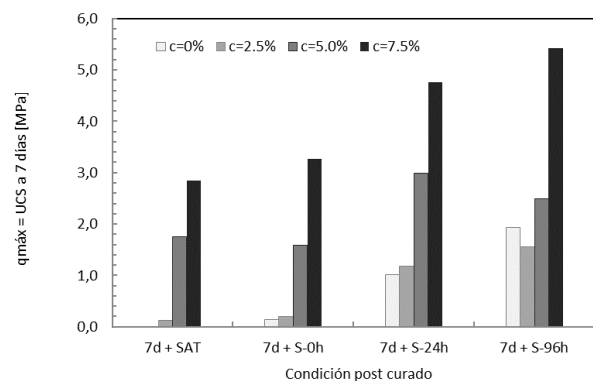


Figura 10. UCS 7d en función del incremento de secado post curado.

3.3 Edad de curado 14 días

En la Figura 11 se presentan los resultados de la resistencia a compresión de las probetas que tuvieron 14 días de curado en cámara húmeda. En la Figura 12 se observa como varia la resistencia en un mismo porcentaje de cemento a mayor tiempo de secado post curado. En la Figura 13 se observa como varia la resistencia para un mismo tiempo de post curado a mayor contenido de cemento.

3.4 Curva de retención característica (mezcla 0% c)

En la Figura 14 se presentan los resultados de la curva de retención característica para la mezcla sin adición de cemento. Se obtuvieron valores de succión de entrada de aire $S_{ae} \sim 5 \text{ kPa}$, el parámetro de distribución poral $\lambda \sim 0.50$ y el grado de saturación residual $S_{res} \sim 37 \%$ en correspondencia el ajuste experimental propuesto en el modelo de van Genuchten (van Genuchten 1980) y adaptado los parámetros de entrada del modelo de Brooks & Corey (Brooks & Corey 1966).

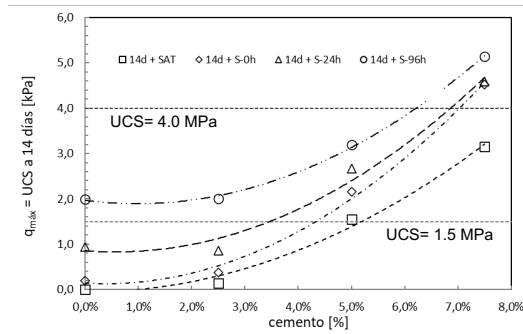


Figura 11. Resultados con 14 días de curado.

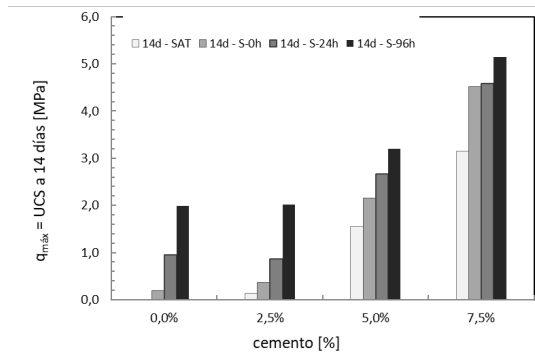


Figura 12. UCS 14d en función del % cemento.

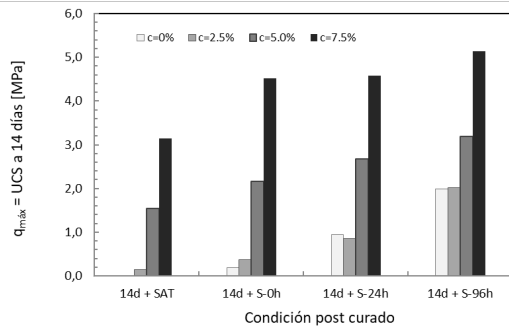


Figura 13. UCS 14d en función del incremento de secado post curado.

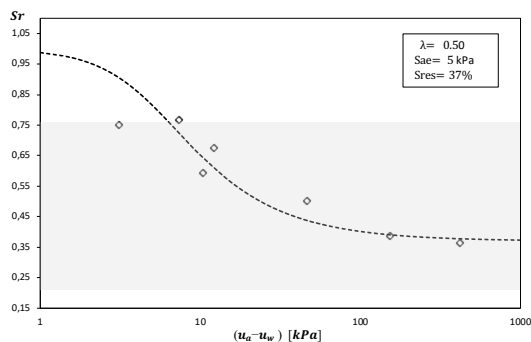


Figura 14. Curva de retención característica para mezcla de suelos A y B sin aporte de cemento (0 %).

4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Incidencia del contenido de cemento en la variación de resistencia

En las Figuras 9 y 12 se puede ver con mayor claridad la variación de la resistencia por la diferencia en contenido de cemento. Observando los resultados del grupo S-0h, en el cual el secado post curado es nulo (mínimo aporte de resistencia por succión mátrica), la resistencia de $c=7,5\%$ es el doble con

respecto a $c=5\%$, 16 veces con respecto a $c=2,5\%$ y 23 veces con respecto a $c=0\%$. Estas diferencias se dan tanto para los 7 días de curado como para los 14. De esta manera, el incremento de resistencia a mayor contenido de cemento en la mezcla de suelo natural se fundamenta en la mayor cantidad de reacciones químicas que se producen entre ambos tipos de material, en lo que respecta a la formación del gel producto de la hidratación del cemento y posterior endurecimiento producto de la modificación del espesor de doble capa difusa (DDL), las reacciones puzzolánicas y la cementación artificial.

4.2 Incidencia del tiempo de curado en la variación de resistencia

Comparando las Figuras 8 y 11 el incremento de la resistencia para las condiciones SAT y S-0h es entre el 20 y 40%, se evalúa en estas condiciones para nuevamente no tener influencia del secado post curado. Estos valores de mayor resistencia por mayor tiempo de curado se fundamentan por las mismas razones indicadas en el apartado 4.1, para las cuales el paso del tiempo favorece el desarrollo de mayores reacciones químicas en el suelo-cemento.

En primera instancia se puede indicar que los ratios de incremento por adición de cemento han sido mayores en comparación con la duplicación del tiempo de curado (7d a 14d). No obstante, un mayor tiempo de curado podría modificar los valores de incremento obtenidos.

4.3 Incidencia de la succión mátrica en la variación de resistencia

En las Figuras 10 y 13, se ve para cada uno de los porcentajes de cemento, la incidencia de la succión mátrica por mayor secado post curado. En el grupo del $c=0\%$ el único aporte de resistencia del material se debe a la succión mátrica. A medida que se incrementa el tiempo de secado, el contenido de humedad y grado de saturación de la muestra disminuyen y por consiguiente se incrementa el valor de succión mátrica tal como se observa en la Figura 14, llegando a alcanzar valores relevantes de succión (de hasta 500 kPa) para la condición de 96hs de secado (S 96h). Por otro lado, al someter a las muestras a un proceso de saturación a 24hs en las muestras sin adición de cemento (SAT $c=0\%$), se incrementa el contenido de humedad y grado de saturación a valores tales que la succión cae fuertemente a valores por debajo de los 5 kPa (succión de entrada de aire) y por consiguiente la muestra pierde toda su resistencia y hasta inclusive su autosostenimiento, tal como se indica en la Figura 15, en la cual se indica en sombreado gris el rango de valores succión mátrica-grado de saturación por donde se ubican las muestras ensayadas a diferentes tiempo de secado post curado. Vale destacar que este análisis se pudo efectuar únicamente en la muestras sin adición de cemento por contar estas mismas con su curva de retención correspondiente. No obstante, se presume que la tendencia de comportamiento de succión en muestras con adición de cemento será idéntico ($\uparrow$ tiempo secado post curado, $\uparrow$ resistencia por incremento de succión mátrica).

Figura 15. Probetas $c=0\%$ después de ser sumergidas 24 hs en agua.

Por último, en la Figura 12 se observa que pasados los 14 días de curado la ganancia de resistencia por incremento de succión mátrica deja de ser representativa con respecto a la ganancia por agregado de cemento, lo cual se fundamenta en el mayor desarrollo y evolución de las reacciones químicas de la interacción suelo-cemento indicado anteriormente.

5 CONCLUSIONES

Se efectuó un primer análisis de muestras de suelos naturales con incorporación de cemento para el desarrollo de BTC considerando exclusivamente el diseño por resistencia. No obstante, ha quedado fuera del presente trabajo el desempeño de las mezclas en lo referente a comportamiento abrasivo, capilaridad, conductividad térmica, etc. Dichos parámetros son determinantes en la performance de un ladrillo para su uso como material de construcción, por consiguiente deben ser evaluados en una etapa posterior de la investigación.

6 COMENTARIOS FINALES

En determinadas circunstancias la fabricación de BTC al pie de la obra con suelo de permite el reemplazo de los ladrillos cerámicos tradicionales, colaborando con el medio ambiente en lo que respecta a la reducción de las emisiones relacionadas con el transporte de la materia prima, la cocción y el posterior transporte de los ladrillos al sitio.

En casos en los que el transporte de materiales al sitio resulta un factor limitante, es posible utilizar los BTC como una solución a la construcción de refugios o viviendas. Basta con disponer de un simple equipamiento compuesto por una prensa de accionamiento manual, moldes y una cantidad de cemento necesaria, garantizando un sobrecimiento que no permita el ascenso capilar (por ejemplo de piedra), y una cubierta con suficiente alero, que no permita el paso de la lluvia, como es la enramada, siendo estas últimas técnicas de utilización frecuente en la zona de Andacollo en donde se busca promover el desarrollo de construcción sustentable.

6 REFERENCIAS

- Cabrera S., González A. y Rotondaro R. (2020). *Resistencia a compresión en Bloques de Tierra Comprimida. Comparación entre diferentes métodos de ensayo. Informes de la Construcción*, 72(560): e360. <https://doi.org/10.3989/ic.70462>.
- Gallipoli D., Bruno A.W., Perlot C., Mendes J. (2017). *A geotechnical perspective of raw earth building. Acta Geotechnica*, 12(3): 463–478 <http://dx.doi.org/10.1007/s11440-016-0521-1>
- Guillén C., Vélez A., Guerrero A. y Ferrara F. (2021). *Optimización del proceso de elaboración de Bloques de Tierra Comprimida (BTC) mediante el control granulométrico de las partículas del Suelo* doi.org/10.21640/ns.v13i27.2891
- Morel J.C., Pkla A., Walker P. (2007). *Compressive strength testing of compressed earth blocks*, *Constr. Build. Mater.* 21 (2) 303–309, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.08.021>.
- Normativa internacional respecto al diseño y construcción de BTC.
- Serie de normas ASTM D698, D854, D1140, D2487, D4318 y D5298 <https://www.astm.org>.
- Sitton J.D., Zeinali Y., Heidarian W.H. (2018). *Study, Effect of mix design on compressed earth block strength*, *Constr. Build. Mater.* 158 124–131. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.005>
- van Genuchten M.T. (1980). *A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils*. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44 892–898.