

*Manifestaciones patológicas en la Construcción*

## **Evaluación de la eficiencia de barreras perimetrales implementadas en un modelo a escala natural**

*Evaluation of the performance of perimeter barriers implemented in a natural scale model*

Enrique S. Zanni (1); Julio A. Capdevila (2); José J. Nasser (2); Jorge E. Salomón (2); Ana M. Odebrecht (2) y Fernando Sabaini (2)

(1) *Profesor del Departamento Tecnología, Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Diseño, U.N.C.,*

(2) *Profesor del Departamento Construcciones Civiles, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, U.N.C.,*

*jcapedvila@efn.uncor.edu. Av. Vélez Sarfield 1611. Córdoba. Argentina*

### **Resumen**

Los suelos loésicos colapsables cubren gran parte de la ciudad de Córdoba, Argentina, y se caracterizan por estar formados por partículas de limo unidas por puentes de arcilla, generando macroporos susceptibles de sufrir procesos de colapso por humedecimiento bajo carga. Este fenómeno puede ocasionar que las estructuras apoyadas superficialmente sufran lesiones si se produce el ingreso de agua al suelo de fundación afectado por el bulbo de presiones. Entre las medidas para prevenir el efecto de este fenómeno se encuentran canales sanitarios, desagües pluviales, aumento en la profundidad de implantación y veredas perimetrales, alejando el agua de lluvia de las zonas próximas a la fundación del edificio. En la actualidad, respecto del diseño tecnológico de las veredas perimetrales, no existe en la literatura referencia al comportamiento de este tipo de estructuras.

El objetivo de este trabajo consiste en evaluar la implementación de distintas alternativas de barreras perimetrales en un modelo a escala natural, de manera de analizar la eficiencia de las mismas en relación a la modificación del frente de humedecimiento bajo la fundación superficial propuesta. Se ejecutó un prototipo de cimiento común en donde se materializaron distintas barreras perimetrales impermeables, solicitadas con lluvias de diseño. Simultáneamente se modeló el sistema propuesto en un programa de elementos finitos, para validar los resultados del modelo numérico con el modelo físico.

Los resultados obtenidos permiten efectuar recomendaciones para el correcto diseño de una barrera perimetral impermeable.

*Palabras-Clave: Barreras perimetrales – Suelos colapsables*

### **Abstract**

Collapsible soils cover a great part of Córdoba city in Argentina. Loessian soil is formed by silt and sand particles with clay bridges, generating macropores susceptible to collapse upon wetting under load. Those structures that are superficially supported on this type of soils are susceptible of suffering damage because of soil wetting. Some actions can be taken to prevent the effect of this phenomenon, such as trays for pipes, storm drains, deeper foundations and perimetral sidewalks. At present, there is no literature about the design or hydraulic behavior of perimetral sidewalks. This paper proposes the evaluation of different perimetral barriers implemented in a natural scale model and the analysis of their efficiency avoiding the wetting of the foundation soil.

In this sense, a shallow foundation prototype was constructed and different perimetral barriers were materialized. A design rainfall were applied over the model. Simultaneously, this prototype was implemented in a finite element software to validate numerical results with physical ones.

Obtained results allow to give some recommendations for the correct design of a impermeable perimetral barrier.

*Keywords: Perimetral barriers – Collapsible soils*

## 1 Introducción

Todas las construcciones manifiestan, en mayor o menor medida, algún grado de fisuración, que en algunos casos se presentan de manera evidente y producen inseguridad e inquietud y en otras no son visibles a simple vista. Las fracturas según su nivel de actividad, pueden ser estáticas, es decir que no se modifican con el tiempo, o bien dinámicas, cambiando sus características permanentemente.

En general, y especialmente en construcciones livianas, el 90% de las grietas y fisuras están provocadas por movimientos de los estratos de apoyo [1]. Estos movimientos producen lesiones patológicas que pueden ser directas, cuando tienen su origen en los elementos soportes de las construcciones (no son observables porque están bajo tierra), o bien indirectas si los síntomas se manifiestan en las paredes o elementos estructurales del edificio y son provocadas por los movimientos del sistema suelo-fundación.

Es poco probable que ocurran lesiones directas sobre la estructura de fundación, ya que generalmente los diseños y dimensionados de las fundaciones se realizan con un criterio conservador. En cambio, es altamente probable que el suelo sufra movimientos o procesos aleatorios que impliquen cierta inestabilidad en su estructura interna, provocando que el sistema suelo-fundación-estructura genere lesiones y fallas en los distintos elementos del edificio [1].

### El suelo de la ciudad de Córdoba

Los suelos loésicos ocupan gran parte de la provincia de Córdoba, y en particular una importante superficie de la ciudad de Córdoba. La característica fundamental del loess es su propensión a sufrir grandes cambios volumétricos cuando el mismo se encuentra en presencia de agua. Este proceso se denomina colapso y no hace falta alcanzar la saturación completa del suelo para que el mismo tenga lugar. Los procesos involucrados en el proceso de colapso del suelo han sido ampliamente estudiados en la literatura tanto para los loess argentinos [2][3][4][5], como para otros depósitos del mundo [6][7]. En general se considera que el efecto de la saturación del suelo provoca una disminución de las tensiones capilares de atracción (succión matricial) entre partículas de los puentes de arcillas, lo cual conlleva a un debilitamiento de la estructura y el cierre de los poros del suelo.

Las consecuencias que sufren las construcciones apoyadas sobre suelos colapsables están originadas, en la mayoría de los casos, por efecto de modificaciones en el comportamiento microestructural del suelo ante la aparición de una fuente de ingreso de agua. La interacción del suelo con el agua provoca el debilitamiento de la estructura original del suelo produciendo importantes asentamientos en construcciones, erosión superficial y tubificada.

En la literatura existen una serie de recomendaciones a tener en cuenta al momento de construir sobre suelos con propensión a sufrir procesos de colapso por humedecimiento bajo carga que deberán ser evaluadas mediante modelación numérica a partir de la utilización de software específico [8][9][10]. En la provincia de Córdoba, este fenómeno ocasiona lesiones indirectas y graves pérdidas económicas debido a daños en las construcciones, especialmente de grupos sociales más vulnerables. Es por ello que resulta relevante estudiar las alternativas de solución, desde un punto de vista ingenieril, para evitar la aparición de dichos daños en las fundaciones superficiales.

## Las barreras perimetrales impermeables

Una de las principales medidas preventivas para impedir el ingreso de agua de lluvia bajo una fundación superficial evitando el humedecimiento del suelo de apoyo y el consecuente colapso, en presencia de limos potencialmente colapsables, resulta la “vereda perimetral”. En este trabajo se reemplazará el término “vereda” por el nombre de barrera perimetral impermeable. A continuación se describen brevemente cada una de las alternativas de barreras perimetrales propuestas.

- *Vereda perimetral de hormigón*: Las barreras perimetrales impermeables más utilizadas con el fin de alejar el agua de lluvia de las fundaciones superficiales resultan las veredas perimetrales materializadas mediante la ejecución de un contrapiso de hormigón de 8cm de espesor y 40cm de ancho, quedando la misma incorporada visualmente al edificio.

- *Barrera compactada de suelo-bentonita*: Se trata de una barrera de suelo compactado a partir de la utilización de suelos loésicos locales del centro de la República Argentina, con la incorporación de bentonita, capaz de reducir el valor de permeabilidad de la mezcla debido a su característica de expansividad y baja conductividad hidráulica [11][12].

- *Barrera perimetral de polietileno de alta densidad (PEAD)*: La barrera propuesta consiste en una geomembrana de polietileno de alta densidad (HDPE, de sus siglas en inglés High-Density Polyethylene). La normativa internacional referente a la ejecución de barreras para enterramientos sanitarios limita el espesor mínimo que debe adoptar esta geomembrana para cumplir con su función [13]. En este trabajo se utilizará la misma a los fines de evitar el paso de agua de lluvia generando una superficie de escurrimiento ligeramente enterrada, con lo cual las solicitaciones a las que estará expuesta son leves adoptando un espesor de 1.5mm. Entre los inconvenientes que presentan las membranas de tipo HDPE se destaca el envejecimiento o degradación con el tiempo, siendo los modos de degradación más frecuentes la oxidación, la degradación por radiación ultravioleta (UV) y la degradación térmica.

- *Barrera perimetral de policloruro de vinilo (PVC)*: En esta barrera se propone la inclusión de una geomembrana de PVC de 1mm de espesor. Estas membranas se caracterizan principalmente por su alta flexibilidad biaxial que le permite acomodarse a la superficie de apoyo incluso en asentamientos diferenciales importantes, y por mantener sus propiedades constantes en un amplio rango de temperaturas. Además poseen una baja permeabilidad, relevante para su utilización en este trabajo.

## Modelación numérica de las barreras

Capdevila et al. [14] realizaron la modelación numérica de las barreras perimetrales propuestas en este trabajo a partir de su implementación en el software de elementos finitos SEEP/W. Para ello se modeló la vereda de hormigón a nivel superficial, mientras que las otras tres barreras se enterraron 0.20m respecto del nivel de terreno natural. Esta herramienta informática permitió concluir que las barreras perimetrales dispuestas subsuperficialmente (suelo-bentonita, geomembrana de HDPE y PVC) generan un aumento del recorrido del flujo de agua infiltrada por lluvias, aumentando la eficiencia de las mismas, respecto de la barrera dispuesta al ras del terreno

natural (vereda de H<sup>o</sup>). En este trabajo se validarán los resultados obtenidos en la modelación numérica, mediante la implementación de las distintas barreras en un modelo físico a escala natural.

## 2 El modelo físico y las barreras perimetrales

La implementación de las barreras perimetrales impermeables se realizó a partir de la ejecución de un modelo físico a escala natural de un cimiento de tipo “común”, compuesto por un macizo de hormigón en masa. Este sistema de sustentación es de tipo superficial y, generalmente, utilizado en viviendas económicas.

El cimiento se realizó con hormigón simple de baja resistencia, con un dosaje aproximado en volumen de 1:3:3 (cemento portland: arena gruesa: granza hasta 50mm) y con dimensiones de 0.40m de ancho y 0.40m de altura, con 5m de longitud y a una profundidad de desplante de 0.80m. A continuación se ejecutaron 3 hiladas de mampostería de bloques cerámicos asentados con un mortero a la cal, tal como se indica en el esquema de la Fig. 1.a y se puede observar en las fotografías de la Fig. 2.

El sistema cimiento-muro se dividió en cinco tramos de 1m de largo, sobre los cuales se dispusieron las distintas alternativas de barreras perimetrales, reservando el primer tramo sin ningún tipo de cobertura (ver Fig.1.b).

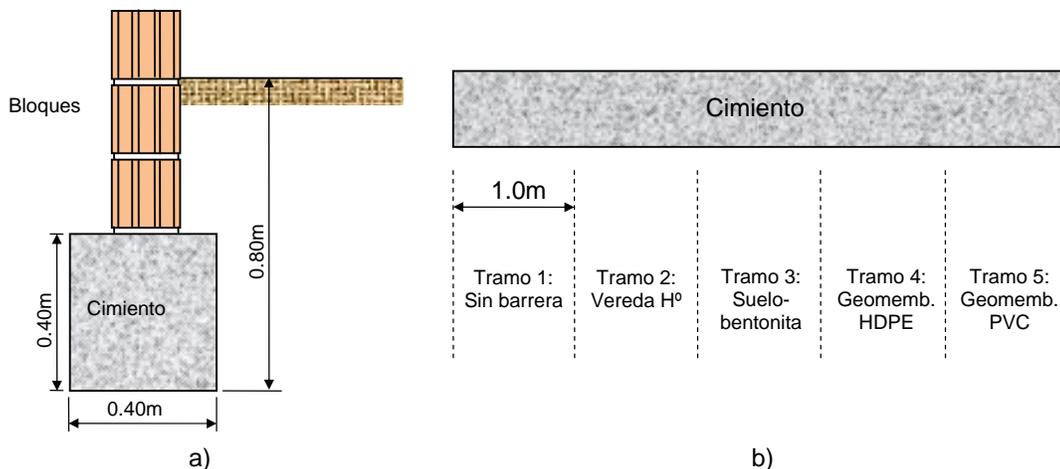


Fig. 1- Esquema del modelo físico realizado. a) Corte transversal. b) Planta.

Simultáneamente con la ejecución del muro de bloques cerámicos se fueron ejecutando, según los tramos de 1m de longitud (ver Fig. 1.b), las distintas barreras perimetrales impermeables propuestas. A continuación se detalla el procedimiento constructivo de cada una de éstas.



Fig. 2- Fotografías del modelo físico realizado. a) Ejecución del cemento “común”. b) Colocación de los mampuestos

La primera barrera ejecutada, en el Tramo 2, es la vereda perimetral de hormigón simple de 1m de largo, 0.40m de ancho y 0.10m de espesor a nivel del terreno natural con una dosificación de 1:3:3 (cemento portland: arena gruesa: granza hasta 50mm) en volumen. Para ello se excavó la zona, luego se compactó el terreno natural mediante un pisón manual, a continuación se vertió hormigón hasta cubrir 0.05m de espesor, se dispuso un film de polietileno de 200 $\mu$ m de espesor y 0.30m de ancho dentro de la masa de hormigón fresco, que se extendió hasta una de las juntas horizontales del muro de mampostería quedando aprisionado dentro del mismo, de manera de garantizar la estanqueidad de la junta vereda-muro (ver Fig. 3.a). Por último se completó el vertido de hormigón hasta completar el espesor de diseño (ver Fig. 3.b).

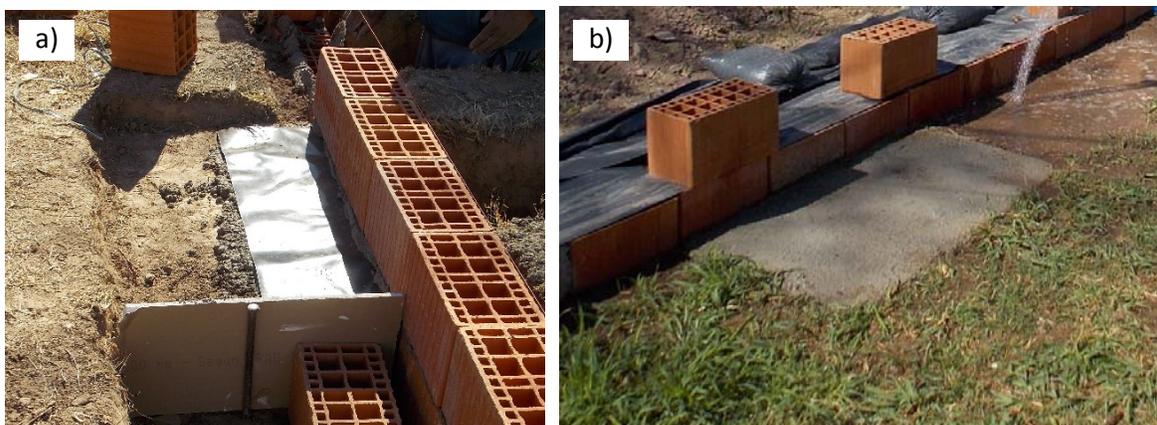


Fig. 3- a) Colocación film de polietileno para estanqueidad en junta vereda-muro. b) Vereda de hormigón ejecutada.

En el Tramo 3 se construyó la barrera de suelo-bentonita compactada con 0.40m de ancho, 0.10m de espesor y a una profundidad de 0.20m (ver Fig. 4). Para su ejecución se utilizó el limo loessico obtenido de la excavación del sistema de sustentación del modelo, que luego fue mezclado con un 3% de bentonita en peso [14], para su posterior compactación con un pisón manual. Previamente a su ejecución se compactó el suelo de apoyo para minimizar asentamientos.

En los Tramos 4 y 5 se ejecutaron las barreras perimetrales materializadas con geomembrana de HDPE y PVC respectivamente. La metodología de ejecución resultó similar, compactando el sustrato de apoyo de las mismas y disponiendo de las geomembranas insertas dentro de la mampostería para garantizar el correcto funcionamiento de la junta con el muro. El ancho de ambas barreras se adoptó en 0.40m y se dispusieron a 0.20m de profundidad, procediendo luego a rellenar con suelo el espacio hasta alcanzar el nivel de terreno natural. En la Fig. 5 y 6 se puede observar la ejecución de las barreras mencionadas.



Fig. 4- Emplazamiento de la barrera de suelo-bentonita en donde se observa la colocación del film de polietileno para garantizar la estanqueidad de la junta entre la barrera y el muro.

En la Fig. 7 se muestra el modelo a escala natural finalizado con los cuatro tipos de barreras materializados. Se observa a la izquierda del muro, la cobertura del terreno natural realizada con film de polietileno de 200 $\mu$ m de manera de evitar el ingreso de agua de lluvias al terreno de fundación de manera no controlada.



Fig. 5- Emplazamiento de la barrera ejecutada con geomembrana de polietileno de alta densidad (HDPE) inserta dentro del muro y a 0.20m de profundidad.



Fig. 6- Emplazamiento de la barrera ejecutada con geomembrana de policloruro de vinilo (PVC) inserta dentro del muro y a 0.20m de profundidad.



Fig. 7- Modelo físico a escala natural finalizado con la disposición de las barreras y la cobertura del terreno natural en la parte posterior del muro de bloques cerámicos.

### 3 Procedimiento de ensayo

El ensayo realizado sobre el modelo a escala natural consistió en humedecer la zona adyacente al modelo desde el muro de bloques hasta una distancia de 2m respecto del paramento del muro, en coincidencia con la modelación numérica de comparación [14], abarcando los 5m de largo que ocupaba el modelo, tal como se muestra en la Fig. 8. Para ello se procedió a definir la lluvia de diseño de manera de determinar el volumen de agua que se debía incorporar para llevar adelante el ensayo en condiciones similares a las que presentaría una fundación de este tipo en la ciudad de Córdoba. Según el registro pluviométrico entre los años 1981 y 1990 en la ciudad de Córdoba, el mes más lluvioso fue diciembre con 155mm precipitados [15]. El registro pluviométrico adoptado, junto con la superficie a humedecer, prevén un volumen mensual de agua precipitado de 1500 litros, que fue distribuido, para la realización del ensayo, en 6 etapas, aportando 250 litros al suelo cada una. La distribución del agua aportada en 6 sesiones de regado, obedece a que estadísticamente ése es el número de precipitaciones mensuales en el período considerado. Las mismas fueron, aplicadas mediante una regadera tradicional, aleatoriamente durante un período de 30 días (ver Fig. 9). Cabe aclarar que el ensayo se realizó durante el mes de agosto, en coincidencia con el período del año de menores precipitaciones, previendo el registro de las mismas, si ocurrían, para considerarlas en el cómputo total, destacando que no se registraron lluvias durante el tiempo de ensayo.

Luego de 72hs de finalizada la incorporación del agua de ensayo, de manera de permitir la distribución uniforme del contenido de humedad, se procedió a retirar las barreras impermeables materializadas y excavar un pozo a cielo abierto en cada tramo ensayado. Mediante la utilización de un higrómetro electrónico de marca Spectrum modelo Fieldscout se realizaron las mediciones de humedad a las profundidades de 0.20m, 0.40m, 0,60m y 0.80m, registrando los valores

encontrados. Este procedimiento se realizó en la zona próxima al cimiento, y también a 0.50m y a 1.00m en dirección perpendicular al paramento del muro.

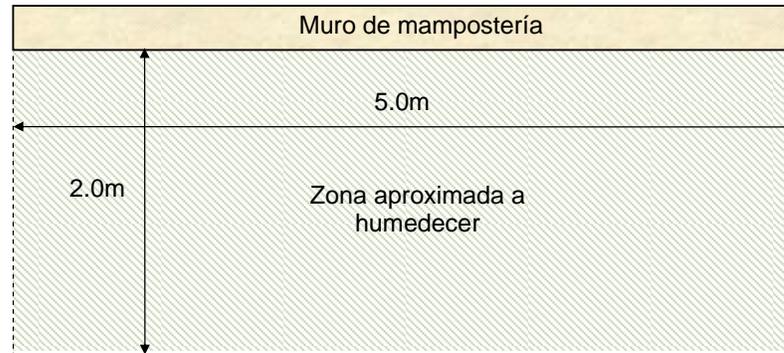


Fig. 8- Esquema de la zona a humedecer, adyacente al prototipo realizado.



Fig. 9- Fotografía tomada durante el proceso de incorporación del agua de ensayo mediante regadera en la zona de estudio.

#### 4 Resultados obtenidos

Las mediciones de contenido de humedad realizadas mediante el sensor de humedad en suelos permitieron establecer una curva del frente de humedecimiento en función de la profundidad tanto al lado del muro y del cimiento como en las zonas próximas. En la Fig. 10 se grafica el perfil de humedades adyacente al muro/cimiento para las profundidades relevadas (0.20m, 0.40m, 0.60m y 0.80m) y según el tipo de barrera impermeable aplicada. También se incluye la variación de humedad en el tramo en donde no se dispuso barrera alguna. A partir de la observación de la Fig. 10 se destaca la eficiencia de las distintas barreras para evitar el ingreso de flujo de agua en zonas próximas a la fundación del muro, respecto de la ausencia de las mismas. Se manifiesta un

efecto similar entre las barreras de suelo-bentonita, geomembrana de HDPE y geomembrana de PVC, mientras que la vereda de hormigón simple facilita ligeramente el ingreso de agua, verificando los resultados obtenidos en la modelación numérica [14] que se muestra en la Fig. 11. Este comportamiento se podría fundamentar en la ubicación relativa de las barreras impermeables, teniendo en cuenta que la vereda de hormigón se dispuso sobre la superficie y el resto de las barreras a 0.20m de profundidad. En este sentido el agua que infiltra en el suelo sobre las barreras enterradas tiene mayor recorrido y a menor velocidad que en la vereda de hormigón, hasta alcanzar las zonas próximas a la fundación, siempre que se garantice la estanqueidad de la junta entre las barreras y el muro. La disposición subsuperficial de las barreras permite disimular su existencia para no afectar la estética de la edificación.

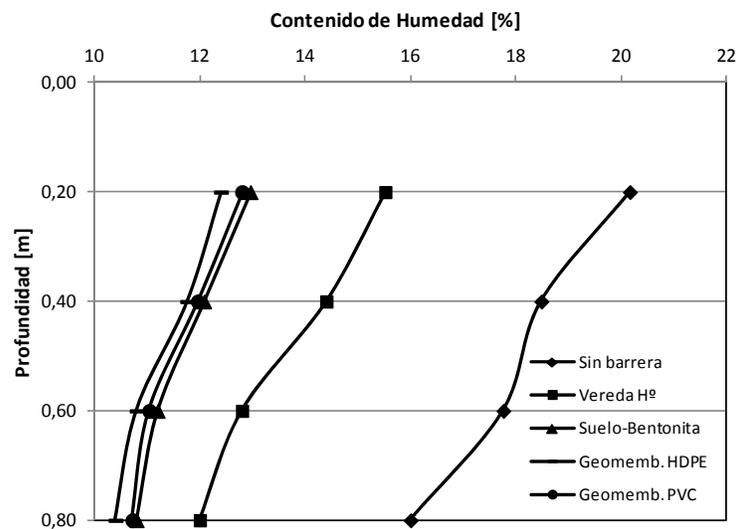


Fig. 10- Perfiles de humedad obtenidos bajo las distintas barreras en la zona adyacente al muro y al cimiento ejecutado.

Con estos resultados la conductividad hidráulica del material utilizado en la barrera perimetral impermeable no tiene relevancia para valores menores a  $10^{-10}$  m/seg, pudiendo utilizarse aquel material que resulte más económico tanto en el costo de adquisición como de ejecución, destacando la importancia de la correcta ejecución de la junta entre la barrera y el muro. Para la barrera de suelo-bentonita compactada resulta necesario incorporar un film de polietileno que inserto dentro de la barrera se vincule al muro por las juntas. En el caso de las barreras con geomembranas se pliega e inserta en la junta del muro el extremo de la misma barrera.

Además, en la Fig. 10 se muestra que los valores de humedad a la profundidad de desplante bajo las barreras, son ligeramente superiores al contenido de humedad natural (inferiores a 12%). Esta situación no alcanza a modificar la estructura del suelo garantizando su estabilidad.

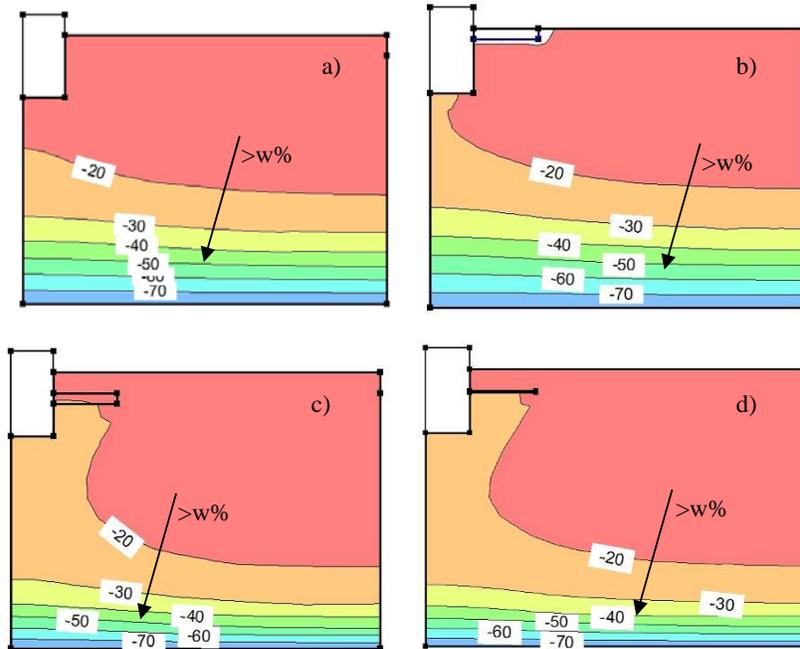


Fig. 11- Perfiles de avance de humedad obtenidos mediante modelación numérica en el programa computacional SEEP/W. a) Sin barrera perimetral impermeable. b) Vereda de hormigón simple. c) Suelo-bentonita compactado. d) Geomembrana de HDPE. Los valores indicados corresponden a succión mátrica en kPa [14]

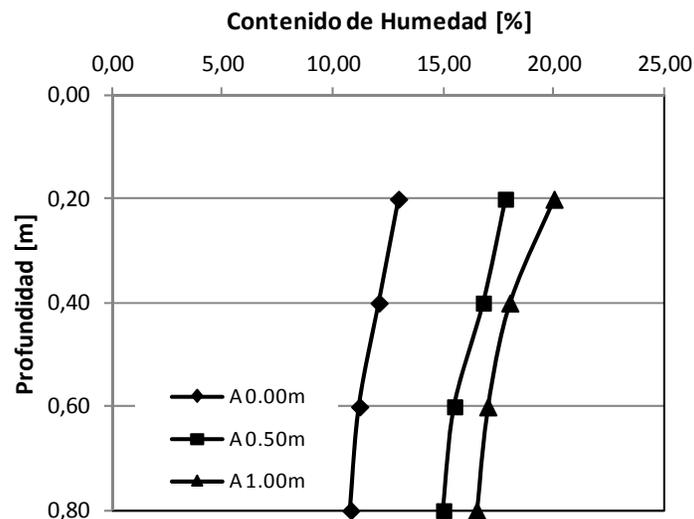


Fig. 12- Perfiles de humedad obtenidos bajo la barrera de suelo bentonita a 0.00m, 0.50m y 1.00m del paramento del prototipo.

En la Fig. 12 se presenta, para la barrera de suelo-bentonita, la variación en el contenido de humedad con la profundidad según la medición de la misma se efectúe en la zona del prototipo

(0.00m), a 0.50m y a 1.00m de distancia del paramento del muro. Destacando que en las demás barreras la tendencia es la misma. El comportamiento encontrado resulta dentro de lo esperable para este ensayo.

## 5 Conclusiones

Los resultados presentados en este trabajo permiten obtener las siguientes conclusiones:

1. En presencia de un cimientado superficial y limos potencialmente colapsables por humedecimiento, resulta necesaria la incorporación de una barrera perimetral impermeable que disminuya la presencia de agua pluvial bajo el cimientado.
2. Las humedades registradas a nivel de desplante de la fundación del prototipo ejecutado, en las zonas bajo las barreras perimetrales impermeables implementadas, no afectan la estabilidad de los suelos loésicos colapsables, garantizando el buen funcionamiento del cimientado.
3. Se verifican los resultados de la modelación numérica de las barreras impermeables propuestas previamente realizada, con los obtenidos en el modelo a escala natural realizado en este trabajo.
4. La ejecución de la vinculación, entre las barreras propuestas y el muro del prototipo, resultó adecuada para garantizar la estanqueidad de la junta.
5. Las barreras materializadas con suelo-bentonita compactado, geomembrana de HDPE y PVC manifiestan eficiencias similares, resultando la vereda de hormigón simple ligeramente menos eficiente.

## 6 Agradecimientos

Los autores quieren agradecer 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.

## 7 Referencias

- [1] Bernal J. "Zapatas. Hormigón armado". Edición 2005. Editorial Nobuko. Idioma español. (2008).
- [2] Reginatto A.R. y Ferrero J.C. "Collapse potential of soils and soil-water chemistry". Proceedings of Eighth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Moscow. (1973)
- [3] Redolfi E.R. "Determinación rápida de la presión de fluencia en suelos loésicos". Boletín de Información de Laboratorio de Carreteras y Geotecnia. Madrid. Nº 51. (1982) pp. 3-8.
- [4] Rocca R.J., Redolfi E.R. y Reginatto A.R. "Determination of collapse potential of soils". 7th International Conference on Expansive Soils. Dallas. Texas. (1992). pp. 73-77.

- [5] Rinaldi V.A., Rocca R.J. y Zeballos M.E. "Geotechnical characterization and behaviour of argentinean collapsible loess". Characterization and Engineering Properties of Natural Soils. Tan, Phoon, Hight & Leroueil (eds). Taylor & Francis Group, London. (2007).
- [6] Dudley J.H. "Review of collapsing soils". Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 6. Nº 3. (1970). pp. 925-947.
- [7] Barden L., Mc Gown A. y Collins K. "The collapse mechanism in partially saturated soils". Engineering Geology (7). (1973). pp. 49-60.
- [8] Aitchinson G.D. "Structurally unstable soils. State of the arts". Proceedings of the 8º International Conference on Soils Mechanics and Foundation Engineering. Moscú, URSS. Vol 3. (1973). pp. 161 - 190.
- [9] Evstatiev D. "Loess improvement methods". Engineering Geology. Nº 25. (1988). pp. 341 - 366.
- [10] Redolfi E.R. "Suelos Colapsables". Informe del Área de Geotecnia de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba. (2007).
- [11] Francisca F.M. y Glatstein D.A. "Long term hydraulic conductivity of compacted soils permeated with landfill leachate". Applied Clay Science. (49). (2010). pp. 187-193
- [12] Malusis M.A., Barben E.J. y Evans J.C. "Hydraulic conductivity and compressibility of soil-bentonite backfill amended with activated carbon". Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. Vol. 135. Nº5. (2009)
- [13] Rowe R.K., Islam M.Z. y Hsuan Y.G. "Effects of thickness on the aging of HDPE geomembranes". Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. Vol. 136. Nº2. (2010).
- [14] Capdevila J.A., Zanni E.S., Ríos Contreras R. y Goio M.G. "Implementación de barreras perimetrales para evitar el ingreso de agua bajo fundaciones superficiales en suelos colapsables". Memorias 1º Congreso ALCONPAT Argentina 2013. Mendoza, Argentina. (2013).
- [15] Servicio Meteorológico Nacional (1998). Estadísticas Climatológicas 1981-1990, Serie B Nº 37 de la Estación Sinóptica Aeropuerto Córdoba Nº OMM 87344. Publicación B1 Nº 3 del Servicio Meteorológico Nacional (SMN).