

IMPLEMENTACIÓN DE BARRERAS PERIMETRALES PARA EVITAR EL INGRESO DE AGUA BAJO FUNDACIONES SUPERFICIALES EN SUELOS COLAPSABLES

Capdevila, Julio A.; Zanni, Enrique S.; Ríos Contreras, Rodrigo; Goio, M. Gabriela
Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Facultad de Arquitectura, Urb. y Diseño.
jcapdevila@efn.uncor.edu

RESUMEN

En la ciudad de Córdoba predominan los suelos colapsables. Aquellas estructuras que están apoyadas superficialmente son susceptibles de sufrir algún tipo de lesión si se produce el ingreso de agua al suelo de fundación en la zona afectada por el bulbo de presiones. Entre las medidas para prevenir el efecto de este fenómeno de humedecimiento del suelo se encuentran los canales sanitarios, los desagües pluviales, el aumento en la profundidad de implantación y las veredas perimetrales. En la actualidad, respecto del diseño tecnológico de las veredas perimetrales, no existe en la literatura alguna referencia al comportamiento de este tipo de estructuras, como tampoco hay detalles de aquellos materiales que sean aptos para su construcción ni de las dimensiones apropiadas para su ejecución.

Este trabajo propone analizar y evaluar la implementación de distintas alternativas de barreras perimetrales con el fin de evitar el ingreso de agua de lluvia al suelo de fundación. En este sentido, resulta necesario analizar su eficiencia, para evitar modificaciones en el comportamiento de los suelos colapsables de apoyo, asociadas a un aumento en su contenido de humedad. Para ello, se realiza una caracterización de los materiales que constituyen las barreras propuestas y del suelo de fundación, a los fines de su modelación numérica en un software de elementos finitos.

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

ABSTRACT

In Córdoba collapsible soils are predominant. 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 storm drains, deeper foundations and perimetral sidewalks. At present, there is no literature about the design or hydraulic behavior of perimetral sidewalks, suitable materials and appropriate dimensions for there construction.

In this paper different types of barriers are going to be implemented in a numerical model. The purpose is to analyze and evaluate the barriers performance to avoid supporting soil wetting and settlement of foundations due to soil collapse. The characterization of the materials that constitute the proposed barriers and foundation soil are carried out to model numerically in a finite element software.

Results obtained allow making some recommendations for the proper design of impermeable perimetral barriers.

INTRODUCCIÓN

Todas las construcciones manifiestan, en mayor o menor medida, algún grado de fisuración. En algunos casos se presentan de manera evidente y producen inseguridad e inquietud y en otras no son visibles a simple vista. Las fracturas en general (sean fisuras o grietas) muestran diferentes configuraciones: verticales, inclinadas u horizontales. También, y 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 apoyo¹. 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, sean estos de cierre ó estructurales, como por ejemplo asentamientos diferenciales, de donde surgen las lesiones indirectas¹.

EL SUELO 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 débiles. 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

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 por el nombre de *barrera perimetral impermeable*, ya que no necesariamente se ubicará sobre la superficie del terreno natural, sino que puede ir ligeramente enterrada evitando que se aprecie a simple vista, comprometiendo la estética de la edificación que intenta proteger.

Se propone modelar numéricamente una serie de barreras perimetrales impermeables adosadas a un muro a los fines de evaluar su eficiencia y proponer condiciones de diseño. A continuación se describen brevemente cada una de las alternativas propuestas, junto con una caracterización del suelo de apoyo.

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.

En el diseño de una vereda perimetral de hormigón la resistencia a la compresión no resulta relevante, sin embargo se deben hacer algunas consideraciones respecto de la permeabilidad de la misma.

La permeabilidad se refiere a la cantidad de agua que puede atravesar el hormigón cuando el agua se encuentra a presión, o a la capacidad del hormigón de resistir la penetración de agua u otras sustancias (líquido, gas, iones, etc.). La permeabilidad total del hormigón al agua es una función de la permeabilidad de la pasta, de la permeabilidad y granulometría del agregado, y de la proporción relativa de la pasta con respecto al agregado. La permeabilidad de la pasta depende de la relación agua/cemento y del agregado de hidratación del cemento o duración del curado. Un hormigón de baja permeabilidad requiere de una relación agua/cemento baja y un período de curado adecuado. El coeficiente de permeabilidad de un hormigón está comprendido entre 10^{-8} y 10^{-12} m/seg. Los valores citados en la bibliografía hacen referencia a la conductividad hidráulica del hormigón cuando el agua se encuentra a presión (según Norma UNE-EN 12390-8), en este trabajo resulta conservador adoptar las características presentadas en la Tabla 1 para el hormigón.

Tabla 1 - Parámetros de la vereda perimetral de hormigón simple

Material	Peso Unitario [kN/m ³]	Conductividad Hidráulica [m/seg]
Hormigón	22.00	10⁻¹²

Barrera perimetral de suelo-bentonita compactado

Entre las diversas tecnologías que intervienen en el diseño de una barrera impermeable para relleno sanitario, la ejecución de barreras de suelo compactado ocupa un lugar destacado. En este sentido y teniendo en cuenta que el parámetro de diseño por excelencia de este tipo de elementos resulta la conductividad hidráulica, la normativa que regula estos elementos establece valores mínimos de permeabilidad a cumplir por las barreras, $k < 10^{-9}$ m/s^{11,12}. En caso de que estas barreras se ejecuten para contener residuos radioactivos la normativa es aún más exigente, requiriendo valores de permeabilidad del orden 10^{-11} y 10^{-12} m/seg¹³. En la modelación de una barrera de suelo compactada se propone la utilización de suelos loésicos locales del centro de la República Argentina, frecuentemente utilizado como material de construcción en barreras. Estos suelos, una vez compactados alcanzan valores de conductividad hidráulica del orden de 10^{-8} m/seg y resulta insuficiente para ser usado en rellenos sanitarios, siendo indispensable la incorporación de bentonita o algún otro mineral arcilloso capaz de reducir el valor de permeabilidad de la mezcla debido a su característica expansividad y baja conductividad hidráulica^{14,11}.

Para la caracterización de este material a los fines de la modelación numérica, se toma el valor de la conductividad hidráulica correspondiente a muestras compactadas mediante la energía del ensayo de compactación Proctor Standard y preparadas sobre la rama húmeda, dado que el valor de permeabilidad resultó menor, ensayándolas en un permeámetro de pared flexible. En cuanto al contenido de bentonita, se adopta un 3% en peso, dado que con este valor se obtuvieron buenos resultados, no habiéndose variaciones respecto del grado de confinamiento¹².

A partir de los análisis realizados se proponen las características presentadas en la Tabla 2 para la modelación de la barrera de limo-bentonita compactada.

Tabla 2 - Parámetros de la barrera de suelo-bentonita compactada

Material	Peso Unitario [kN/m ³]	Conductividad Hidráulica [m/seg]
Limo-Bentonita Compactado	15.40	4x10⁻¹⁰

Barrera perimetral de geosintético con alma de arcilla

La alternativa de utilización de barreras conformadas por una mezcla heterogénea de materiales, propone la conformación de una barrera de reducido espesor que

permita alcanzar valores aceptables para los parámetros de comportamiento requeridos.

En este sentido, la utilización de materiales sintéticos de importante desarrollo tecnológico, tiene la ventaja de facilitar la ejecución de las barreras logrando, a priori, eficiencias similares. El material que se utiliza consiste en una lámina de arcilla, generalmente bentonita, encerrada entre dos mallas de geosintéticos. La unión entre ambas mallas de geosintéticos se efectúa mediante punzonado, cosido o adhesivos¹⁵.

En la determinación del valor de la conductividad hidráulica de este tipo de materiales se utiliza un gradiente hidráulico máximo de 75. Este gradiente es mayor que el gradiente de campo, sin embargo, el geosintético con alma de arcilla (GCL del inglés Geosynthetic Clay Liners) es relativamente insensible a la variación del gradiente hidráulico, por lo tanto, el efecto del aumento de gradiente se considera despreciable. El ensayo de determinación de conductividad hidráulica se realiza siguiendo los lineamientos de la norma ASTM D-5084.

Para su correcta modelación en la Tabla 3 se detallan los parámetros relevantes para su caracterización

Tabla 3 – Parámetros de la barrera de geosintético con alma de arcilla

Material	Peso Unitario [kN/m ³]	Conductividad Hidráulica [m/seg]
Geosintético con alma de arcilla	9.47	10⁻¹¹

Barrera perimetral de polietileno de alta densidad

La última barrera propuesta se modelará mediante 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 función¹⁶. 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. Con el fin determinar la conductividad hidráulica, los fabricantes siguen la normativa propuesta por ASTM bajo el número E-96¹⁷. En este sentido se resume la información en la Tabla 4.

Tabla 4.- Parámetros de la geomembrana de polietileno de alta densidad

Material	Peso Unitario [kN/m ³]	Conductividad Hidráulica [m/seg]
Geomembrana de polietileno de alta densidad	9.40	10⁻¹⁵

El suelo de apoyo

El suelo que se emplea para la modelación numérica como material de apoyo de la fundación superficial es de tipo loésico característico del subsuelo de la ciudad de Córdoba. Para la concreción de este trabajo se relevaron una importante cantidad de ensayos de laboratorio y de campo que permiten determinar los parámetros más relevantes a considerar en la modelación de las situaciones propuestas¹⁸. El loess presenta algún grado de cementación ligera originada en la presencia de sales solubles, sílice amorfa, carbonato de calcio, yeso y óxido de hierro. En la Tabla 5 se presentan los parámetros del suelo ensayado.

Tabla 5 - Parámetros del loess de apoyo de la fundación superficial

Material	Profundidad	Peso Unitario [kN/m ³]	Conductividad Hidráulica [m/seg]
Loess	1 m	12.50	10 ⁻⁷

MODELACIÓN NUMÉRICA

La modelación numérica de las barreras perimetrales propuestas se llevó adelante a partir de su implementación en el software de elementos finitos SEEP/W. Para poder llevar adelante este procedimiento el programa permite trabajar con un modelo simétrico de una fundación incorporando el suelo de apoyo. En la Figura 1 se presenta el modelo incluido en SEEP/W en donde se designan los elementos incluidos como así también las dimensiones adoptadas por cada uno de ellos.

El modelo presentado en este trabajo incluye principalmente el comportamiento hidráulico de los distintos elementos incorporados. En este sentido para el limo loésico se adoptó un modelo de suelo no saturado para el cual fue necesario contar con las curvas de variación del contenido de humedad y la permeabilidad con la variación de la succión. En igual modo se incorporaron cada una de las alternativas de barrera perimetral, salvo la correspondiente a la geomembrana que se incluyó como elemento de interface. En la Figura 2 se muestran los esquemas propuestos para modelar las distintas barreras perimetrales propuestas.

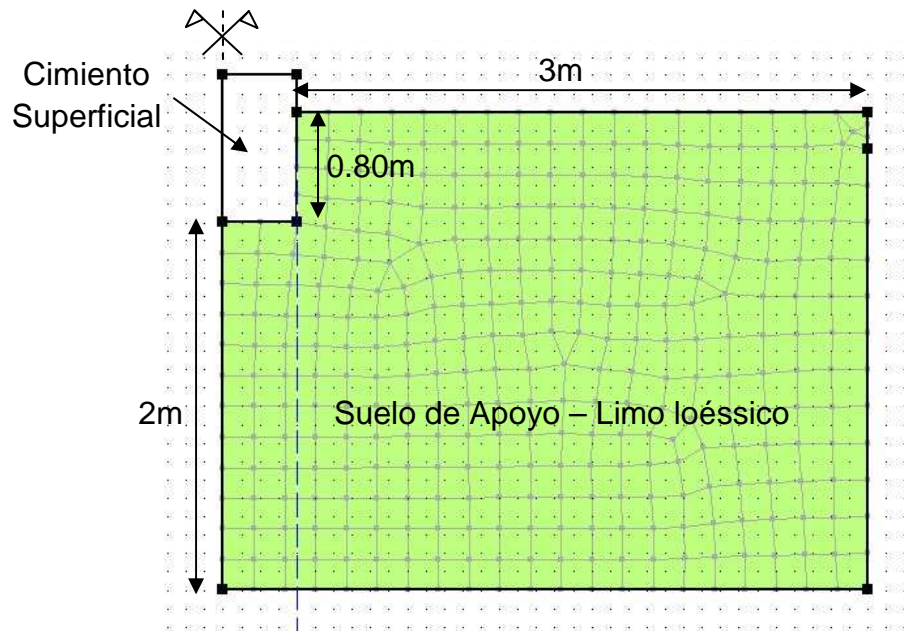


Figura 1. Esquema del modelo incluido en el software SEEP/W, en donde se observa la malla de elementos finitos.

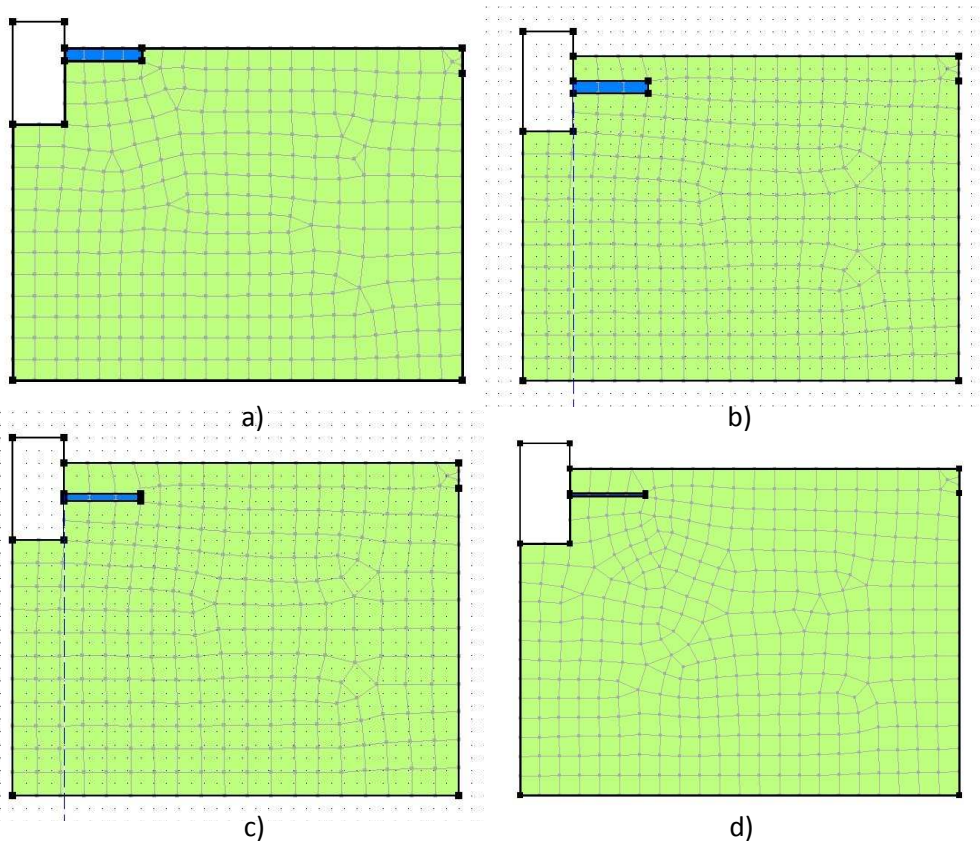


Figura 1. Esquema del modelo incluido en el software SEEP/W. a) Modelo con la vereda de hormigón simple. b) Modelo con barrera de suelo-bentonita compactada. c) Modelo con barrera de geosintético con alma de arcilla. d) Modelo con geomembrana HDPE.

De igual manera que en la modelación del suelo de apoyo, se incluyeron las curvas suelo-agua y valores de permeabilidad para cada alternativa de barrera perimetral, en el caso de la geomembrana de polietileno de alta densidad se incluyó mediante un elemento de interface con el valor de permeabilidad. En la Figura 2 se observa, además, que la vereda de hormigón simple (a) se colocó sobre la superficie, mientras que en las otras tres alternativas (b, c y d) la barrera fue colocada a una profundidad de 20 cm de manera de poder disimular su existencia a los fines de no afectar la estética de la edificación. La vereda de hormigón simple se modeló con 10cm de espesor al igual que la barrera de suelo-bentonita compactada, mientras que para la barrera de geosintético con alma de arcilla se adoptó un espesor de 2cm. Se aclara que todas las barreras se modelaron con un ancho de 0.50m.

Una vez concluida la modelación se incorporaron las condiciones de contorno, tal como se muestra en la Figura 3. En el borde inferior se aplicó un valor de succión inicial de 80kPa correspondiente al contenido de humedad natural típico de los loess de la ciudad de Córdoba ($w = 10\%$) a la profundidad de 2m y en el borde superior, adyacente al cimiento, se aplicó una lluvia durante una hora de 2.2×10^{-8} m/s que equivalen a 700 mm/año, correspondiente al registro promedio anual pluviométrico para la ciudad de Córdoba.

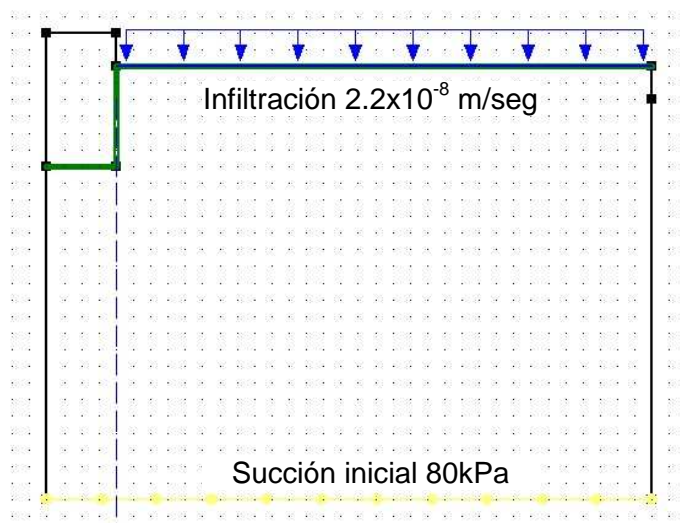


Figura 3. Esquema del modelo incluido en el software SEEP/W, en donde se observa la malla de elementos finitos.

RESULTADOS OBTENIDOS

A continuación se presentan los resultados obtenidos luego de efectuar la modelación en el software SEEP/W incluyendo las distintas alternativas de barreras perimetrales propuestas de manera de analizar la eficiencia de cada una de ellas y efectuar comparaciones que permitan concluir sobre su conveniencia o no en la utilización. En todos los casos los resultados presentan el frente de humedecimiento bajo la fundación superficial una vez ocurrida la infiltración modelada. La Figura 4 muestra los resultados obtenidos en el modelo sin incluir ninguna de las barreras propuestas, en donde se observan en recuadro blanco los valores de succión

resultantes, en kPa. De la Figura 4 se deduce que el agua infiltra sin ningún impedimento llegando a incrementar notablemente la humedad bajo el cimiento en unos 50cm, que en esta situación presentaría importantes problemas de asentamiento por colapso por humedecimiento bajo carga.

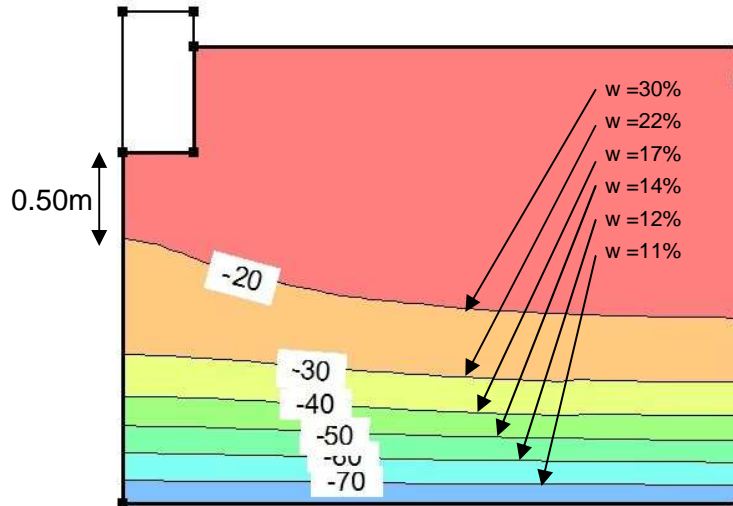


Figura 4 – Frente de humedecimiento obtenido sin incluir ninguna barrera perimetral

Una vez incorporada la vereda de hormigón en el modelo, el frente de humedecimiento se modifica según se puede observar en la Figura 5. Se destaca la disminución del contenido de humedad debajo de la fundación superficial, lo que ocasiona una mejora en el comportamiento del suelo de apoyo, debido al mayor recorrido que efectúa el agua en el proceso de infiltración. No obstante, en algunos sectores bajo el cimiento se observan valores de humedad que condicionan el comportamiento del suelo.

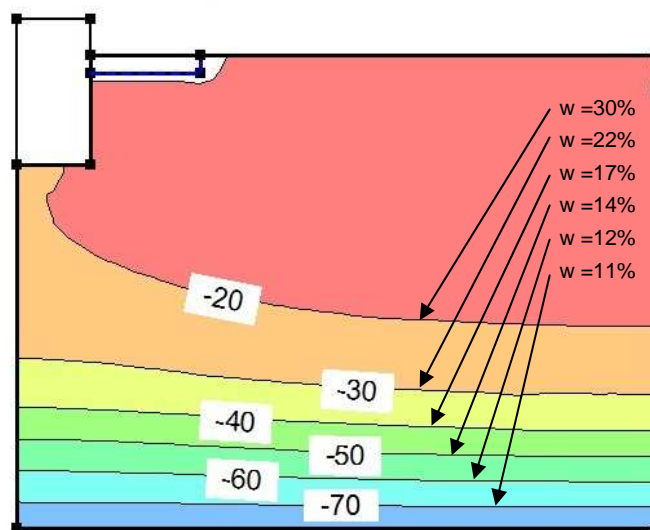


Figura 5 – Frente de humedecimiento obtenido con la vereda de hormigón

En la Figura 6 se presenta el frente de humedecimiento obtenido luego de la incorporación de la barrera perimetral materializada con suelo-bentonita compactado de 10cm de espesor y ubicada 20cm bajo la superficie del terreno. De la observación de la Figura 6 se concluye el buen funcionamiento de la barrera implantada, logrando disminuir notablemente el agua infiltrada bajo el cimiento mejorando el comportamiento del suelo. La ubicación subsuperficial de la barrera genera en el flujo de agua un incremento en el recorrido que provoca mayor pérdida de energía haciendo eficiente su implementación.

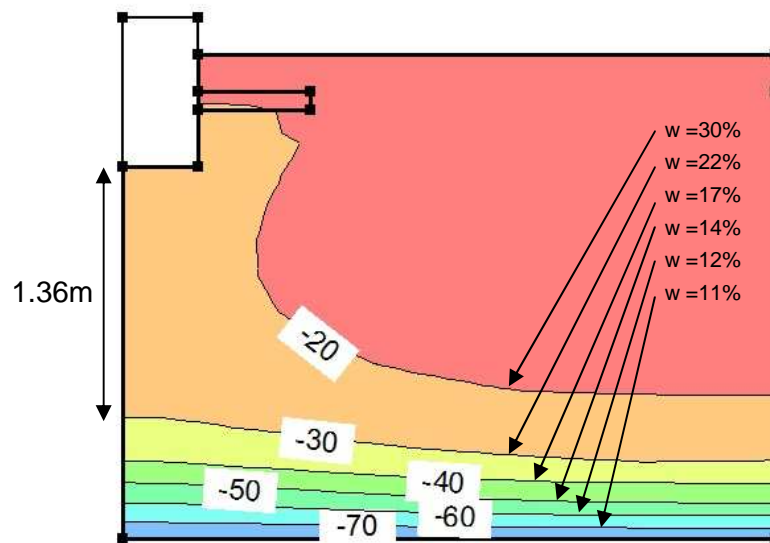


Figura 6 – Frente de humedecimiento obtenido con la barrera de suelo-bentonita compactado

El frente de humedecimiento resultante luego de la inclusión de la tercera alternativa de barrera perimetral en el modelo numérico se muestra en la Figura 7. El geosintético con alma de arcilla se ubica también subsuperficialmente. De la observación de la Figura 7 se destaca un comportamiento hidráulico similar, respecto de la barrera de suelo-bentonita, en relación a la eficiencia de la barrera.

La última de las barreras propuestas es la geomembrana de polietileno de alta densidad, que al igual que las dos anteriores se dispuso en el modelo a 20cm de profundidad respecto del terreno natural. En la Figura 8 se presenta la variación del grado de saturación del suelo de apoyo con la presencia de esta barrera, destacándose un comportamiento similar a las dos anteriores, poniendo de manifiesto la eficiencia de esta barrera.

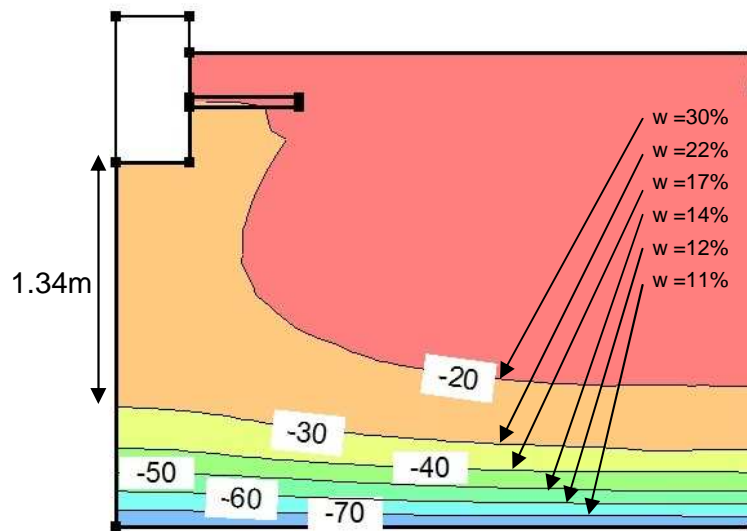


Figura 7 – Frente de humedecimiento obtenido con la barrera de geosintético con alma de arcilla

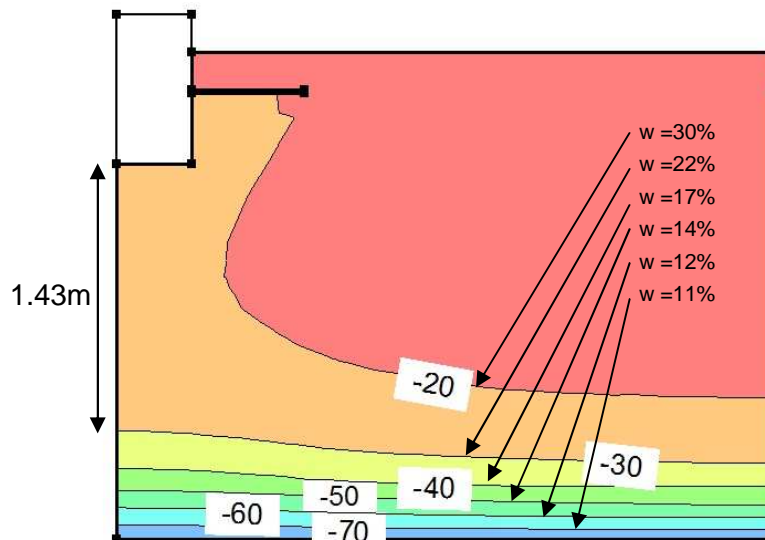


Figura 8 – Frente de humedecimiento obtenido con la barrera de geomembrana de polietileno de alta densidad

Del análisis de las Figuras 6, 7 y 8 se desprende que el espesor de las barreras perimetrales no resulta un parámetro relevante al momento de analizar la eficiencia, ya que independientemente de éste el comportamiento resulta similar, siendo la conductividad hidráulica el parámetro que gobierna el comportamiento. Un aspecto importante es la ubicación de la barrera respecto del terreno natural, ya que la posición subsuperficial genera un incremento en el recorrido del flujo del agua infiltrada, disminuyendo el grado de saturación.

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 barreras perimetrales dispuestas subsuperficialmente generan un aumento del recorrido del flujo de agua infiltrada por lluvias, aumentando la eficiencia de las mismas.
3. El espesor de las barreras no constituye un parámetro de diseño relevante a los fines de mejorar el comportamiento, siendo la conductividad hidráulica el parámetro que gobierna el comportamiento.
4. La ubicación de las barreras perimetrales enterradas, además de mejorar el comportamiento del sistema, permite disimular su existencia a los fines de no afectar la estética de la edificación.
5. La utilización de software de la especialidad para la modelación numérica de la problemática planteada constituye una herramienta económica y fundamental para estudiar las alternativas de solución más eficientes, que puedan luego ser cotejadas con modelos físicos que permitan validar los resultados obtenidos.

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.

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) Evangelista M.C. y Clariá J.J. "Mejoramiento de limos loésicos mediante la adición de bentonita para su uso en barreras". Memorias del XIX Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica. (2008). La Plata. Argentina
- (13) Komine H. "Predicting hydraulic conductivity of sand-bentonite mixture backfill before and after swelling deformation for underground disposal of radioactive wastes". Engineering Geology. (114). (2010). pp 123-134
- (14) 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)
- (15) Benson C.H. y Meer S.R. "Relative abundance of monovalent and divalent cations and the impact of desiccation on geosynthetic clay liners". Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. Vol. 135. Nº 3. (2009).
- (16) 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).
- (17) <http://www.iyg.com.ec/IYG/geomem.swf>
- (18) Capdevila J.A. "Comportamiento tensión-deformación del loess del centro de Argentina en campo y laboratorio: Influencia de los parámetros estructurales". Tesis doctoral. Universidad Nacional de Córdoba. Córdoba. Argentina. (2008).