

Modelos a escala reducida de flujo bidimensional para la enseñanza de la mecánica de suelos

Catalina Lozada, Sandra Campagnoli & Daniel Carvajal

Departamento de Ingeniería Civil, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá, Colombia. catalina.lozada@escuelaing.edu.co, sandra.campagnoli@escuelaing.edu.co, daniel.carvajal@mail.escuelaing.edu.co

Resumen—Este artículo presenta el proceso de construcción y la modelación de dos estructuras a escala reducida (tablestaca y presa de tierra) para simular el flujo de agua en el suelo. Los modelos fueron creados para la enseñanza de flujo bidimensional en el curso de mecánica de suelos básica de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Estos modelos permiten la visualización a través de trazadores con tinta de las líneas de flujo en el suelo. Con la implementación de esta herramienta de enseñanza los estudiantes pueden evidenciar físicamente los conceptos matemáticos de flujo de agua que se plantean mediante ecuaciones diferenciales y se enseñan habitualmente por un método de solución gráfica denominado red de flujo. La visualización de las líneas de flujo les permite a los estudiantes entender la teoría y comprender el fenómeno físico.

Palabras Clave—mecánica de suelos; laboratorios; flujo bidimensional.

Recibido: 14 de septiembre de 2018. Revisado: 30 de enero de 2019. Aceptado: 22 de febrero de 2019.

Physical models of two-dimensional flow for teaching in soil mechanics

Abstract— this paper presents the construction process and modeling of two structures in a reduced scale (sheet pilings and earth dam) to simulate the flow of water into the soil. These models were created to teach bi-dimensional flow in the course of soil mechanics in the Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Using these models students can visualize flowlines thought tracers applied to the soil. Implementing this teaching tool the students see physically the mathematical concepts of differential equations that are commonly taught by using a graphic solution method called the flow net. Visualizing flow lines allows the students to understand the theoretical framework and physical phenomenon.

Keywords—soil mechanics; laboratory; bi-dimensional flow.

1 Introducción

El flujo de agua en el suelo es un tema esencial que se imparte en la formación de los estudiantes de ingeniería civil en el área de la geotecnia. El análisis de la estabilidad de presas, de estructuras de contención, de taludes y fundaciones, entre otras estructuras, así como del suministro de agua subterránea, la cuantificación de la magnitud de la infiltración y de las presiones de agua de poros o presión intersticial y la identificación de condiciones críticas como licuación, tubificación o erosión, generadas por el flujo de agua a través del medio poroso, requieren el entendimiento de conceptos básicos, los cuales se tratan de transmitir a los estudiantes de los

programas de ingeniería civil que se inician en un curso de mecánica de suelos.

Dada la naturaleza compleja del suelo y de los procesos que se dan en él, cómo resulta ser la filtración de agua, resulta crítico encontrar maneras de enseñanza, diferentes a las convencionales, que sean eficientes y que hagan más atractiva para los estudiantes el área de geotecnia, facilitando la comprensión de las teorías y de los fenómenos involucrados.

Desde hace varias décadas se han implementado diversas estrategias de enseñanza de diferentes tópicos de la geotecnia, entre ellos del flujo de agua en el suelo, siendo la modelación física una de las herramientas que se ha encontrado como la más atractiva para los estudiantes de pregrado, debido a que les permite visualizar los procesos físicos, mejorar el entendimiento de los mecanismos y principios fundamentales que gobiernan el problema geotécnico específico y hacer comparaciones con los análisis teóricos, en síntesis; con experiencias prácticas como son los modelos físicos, se ayuda a completar el ciclo de aprendizaje de los estudiantes.

Para propósitos de la enseñanza de la geotecnia, la modelación física abarca desde modelos sencillos como el propuesto en la celda de Hell-Shaw en 1898, para dar solución a los problemas de filtración con base en la Ley de Darcy, hasta las modernas centrifugas en miniatura, altamente instrumentadas [1]. En el medio de este espectro se encuentran los tanques de arena construidos en el laboratorio, de manera relativamente sencilla, para el estudio de problemas específicos de infiltración de agua o del transporte de contaminantes, a partir de los cuales, además de validar los conceptos teóricos sobre flujo, también es posible demostrar fenómenos hidrogeológicos como la erosión, la tubificación y la licuefacción. Los modelos con tanques de arena no pretenden replicar una escala equivalente en campo y han sido desarrollados principalmente para entender modos genéricos de comportamiento [2].

En este artículo se muestra el desarrollo y los análisis asociados con dos modelos físicos – uno de flujo confinado (tablestaca) y otro de flujo no confinado (terraplén o presa de tierra), construidos en el laboratorio de Suelos y Pavimentos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, como

Como citar este artículo: Lozada, C., Campagnoli, S. and Carvajal, D., Modelos a escala reducida de flujo bidimensional para la enseñanza de la mecánica de suelos. *Educación en Ingeniería*, 14(27), pp. 122-127, Agosto 2018 - Febrero, 2019.

herramientas con las que se espera complementar la enseñanza de los conceptos principales, relacionados con el flujo de agua, que se imparten en el curso de mecánica de suelos básica. Una vez que los estudiantes tengan un mayor entendimiento de las leyes y principios que gobiernan el flujo de agua en el suelo, será más fácil abordar soluciones usando modelos numéricos y software especializado con los que es posible hacer análisis de problemas mucho más complejos.

2 Enseñanza de la mecánica de suelos

Los cursos de mecánica de suelos tradicionalmente tienen 3 núcleos principales de contenidos [3]: Clasificación del suelo, propiedades físicas y propiedades mecánicas. Dentro de las propiedades mecánicas se estudia el flujo de agua en el suelo, lo cual es de interés en este artículo.

Específicamente, el tema central a que se expone en este trabajo está relacionado con la enseñanza de las teorías de flujo bidimensional el cual se rige por la ecuación de Laplace:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

Esta ecuación por ser una ecuación diferencial parcial de segundo orden, tiene por solución dos familias de curvas - (i) la familia de líneas de flujo o líneas de corriente y (ii) la familia de líneas equipotenciales o líneas de igual cabeza total, cuya representación gráfica es conocida como la red de flujo. La solución de la ecuación de Laplace puede obtenerse mediante métodos numéricos como las diferencias finitas o los elementos finitos. En los cursos de pregrado usualmente se utiliza la solución de la red de flujo para explicar los conceptos básicos de flujo bi-dimensional. Los métodos numéricos usualmente se enseñan a nivel de posgrado. Un ejemplo de una de red de flujo se presenta en la Fig. 1.

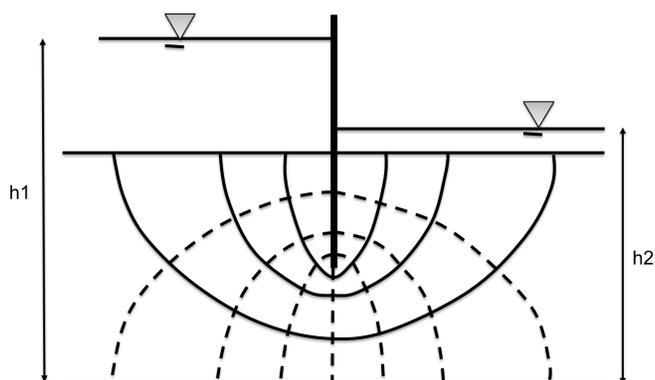


Figura 1: Componentes de la red de flujo.
Fuente: Los autores.

Las líneas continuas representan las líneas de flujo y las punteadas las líneas equipotenciales (igual cabeza total). Las dos familias de curvas se intersectan perpendicularmente entre sí. En la Fig. 1 la pérdida de cabeza total es $\Delta H = h_1 - h_2$, el número de canales de flujo N_d es 4, el número de pérdidas de cabeza total $N_f = 8$.

En este trabajo se propone que los laboratorios de mecánica de suelos se orienten a experimentos relacionados con fenómenos físicos como el flujo bi-dimensional en el suelo, adicional a los ensayos de laboratorio rutinarios implementados

(triaxiales, corte directo y consolidación unidimensional).

Autores como [4] han concluido en su experiencia en los cursos de mecánica de suelos que los laboratorios deben también estar relacionados con problemas prácticos en donde se capture la imaginación de los estudiantes y se revele algún fenómeno físico interesante. Este es el caso de los modelos a escala reducida para visualizar líneas de flujo los cuales no están implementados comúnmente en los laboratorios de mecánica de suelos.

3 Modelación de flujo de agua en el suelo

La modelación física en geotecnia permite representar un problema dado para un prototipo (escala real) en un modelo (escala reducida). Dentro de las técnicas de modelación utilizadas se encuentran principalmente tres: (i) modelación en escala reducida, (ii) modelación en escala real y (iii) modelación en centrífuga geotécnica. Las tres técnicas y sus correspondientes limitaciones se presentan a continuación:

- La modelación en escala reducida permite simular de manera general el comportamiento del suelo y estudiar diferentes fenómenos físicos. Sin embargo, una limitación importante es que las condiciones de esfuerzos y deformaciones en el prototipo y en el modelo no se mantienen iguales debido a la escala. Esta herramienta es adecuada para modelos donde se pueden visualizar superficies de falla, líneas de flujo, y comportamientos dinámicos del suelo, entre otros [5-7] (Fig. 2a). Esta técnica resulta eficiente para apoyar la enseñanza de la mecánica de suelos en el tema asociado con la infiltración de agua en el suelo, permitiendo a los estudiantes visualizar directamente las líneas de flujo que se evidencian con trazadores aplicados en el modelo. Esta experiencia es muy benéfica para los estudiantes al evidenciar, en la práctica, el fenómeno estudiado teóricamente.
- La modelación en escala real permite estudiar el comportamiento de diferentes estructuras bajo condiciones de esfuerzo-deformación reales. Esta técnica requiere grandes costos en la construcción y en la instrumentación [5] (Fig. 2b).
- La modelación física en centrífuga geotécnica permite simular correctamente los esfuerzos en el suelo al someter el modelo (construido en escala reducida) a un igual campo de esfuerzos por medio del aumento de la aceleración gravitacional [8] (Fig. 2c). Sin embargo, simulaciones complejas como el flujo de agua en el suelo presentan limitaciones en cuanto a las leyes de escala de flujo. Adicionalmente, el montaje requiere una alta complejidad (generación de gradiente de presiones dentro de la centrífuga).

Debido a las ventajas y a las limitaciones de las técnicas mencionadas en el estudio del flujo de agua en el suelo, actualmente la mejor herramienta para la enseñanza es la modelación a escala reducida (Fig. 2a).



Figura 2: Tipos de modelación en geotecnia. a) Modelo a escala reducida [9], b) Prueba de carga a escala real [5], c) Centrífuga geotécnica IFSTTAR, Francia.

Fuente: [9],[5].

4 Diseño de modelos de flujo y procedimiento experimental

Se construyeron dos cajas en acrílico de 50cm x 30cm x 10cm las cuales se perforaron para permitir la entrada y salida del agua. El flujo se permite a través de mangueras plásticas las cuales se roscan en racores pegados al acrílico. En estas cajas se construyeron dos modelos para estudiar el flujo de agua en el suelo: tablestaca y presa de tierra. El primer modelo consiste en una tablestaca de 10 cm de ancho y 16 cm de largo en acrílico de 0.5 cm de espesor (Fig. 3a). El segundo modelo consistió en una presa de tierra (Fig. 3b).

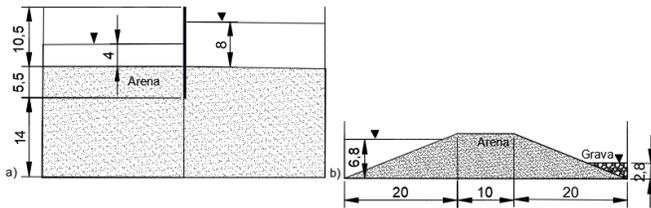


Figura 3: Diagrama de los modelos. a) Tablestaca b) Presa de tierra. Dimensiones en cm.

Fuente: Los autores.

5 Técnica de preparación de la arena en modelación física y selección de material

La técnica de preparación de suelos arenosos en la modelación física en geotecnia se conoce como Pluviación [10]. Esta técnica consiste en la preparación del suelo en capas las cuales se van depositando dejando caer la arena desde una altura constante para alcanzar una densidad específica (Ver Fig.4). Para determinar la altura necesaria para obtener la densidad requerida se construye una curva de calibración de la arena en el laboratorio.

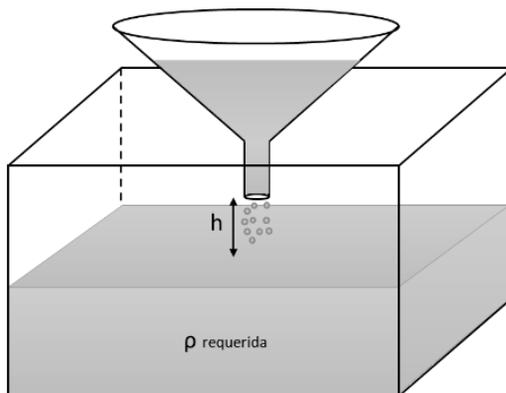


Figura 4: Método de pluviación de arena para la preparación de muestras. Fuente: Los autores.

La selección de la arena adecuada para la modelación fue un proceso que requirió la prueba de cuatro arenas diferentes. Los resultados obtenidos en las pruebas para un estado de densidad suelto se presentan a continuación:

Prueba No 1: Arena de peña

Inicialmente se realizó un ensayo de flujo de agua bajo una tablestaca con una muestra de arena de Peña en su estado

natural. Debido al alto contenido de finos, el flujo de agua en el suelo fue lento impidiendo el paso del agua. Adicionalmente, en este ensayo se evidenció que, en el momento de inyectar el colorante en la arena, las partículas finas se iban erodando, generando un hueco en el suelo. El colorante utilizado fue colorante de construcción.

Prueba No 2: Separación del tamaño del grano fino. Arena de Peña

Debido a las dificultades experimentales evidenciadas con el primer material, se tomó la decisión para el segundo ensayo de lavar la arena de peña y tomar solo la fracción que pasa el tamiz No. 4 (4.8 mm) y retiene en el tamiz No. 200 (0.075 mm) con el fin de retirar las partículas finas y comprobar si la arcilla era la causante de los problemas. Después de tamizar la arena y montar el experimento se observó que el flujo seguía siendo lento y que el colorante no fluía a través del suelo.

Prueba No 3: Separación de tamaño de grano de arena fina. Arena de peña

Dados los resultados obtenidos con la anterior arena, se optó por utilizar en el siguiente ensayo arena de peña más gruesa, tomando solo la fracción que pasa el tamiz No. 10 (2.0 mm) y retiene en el No. 40 (0.425 mm). Al permitir el flujo se formaron canales horizontales de gran tamaño los cuales atrapaban gran cantidad de aire y no permitían alcanzar una condición de flujo establecido. Adicionalmente, el colorante de agua utilizado no fluía con el agua sino que se quedaba estancado en la superficie del suelo.

Prueba No 4: Arena de río tamizada

En la cuarta prueba se tomó la decisión de reemplazar el colorante de construcción por un colorante químico azul que se disuelve en agua de la empresa Tuska y se reemplazó la arena de peña por arena de río. La arena de río se tamizó por los tamices pasa No. 20 (0.85 mm) retiene No. 50 (0.3 mm). Al permitir el flujo como se muestra en la Figura 5 se observa que el colorante se infiltra trazando las líneas de flujo como se evidencia en la teoría de flujo bidimensional.

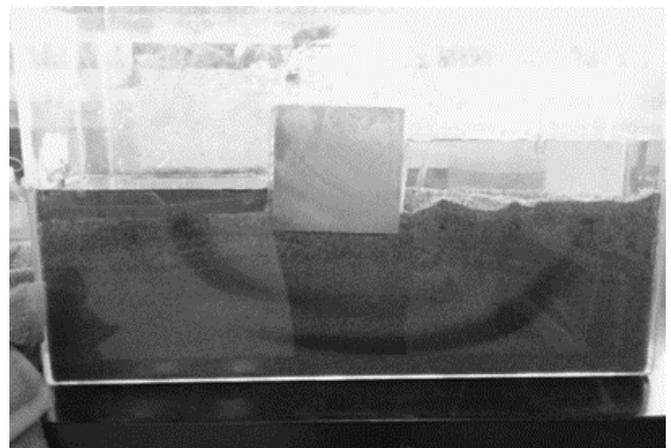


Figura 5: Líneas de flujo creadas en el suelo.

Fuente: Los autores.

La curva de calibración para la arena seleccionada (altura de caída de la arena vs. Peso unitario seco) se presenta en la Fig. 6.

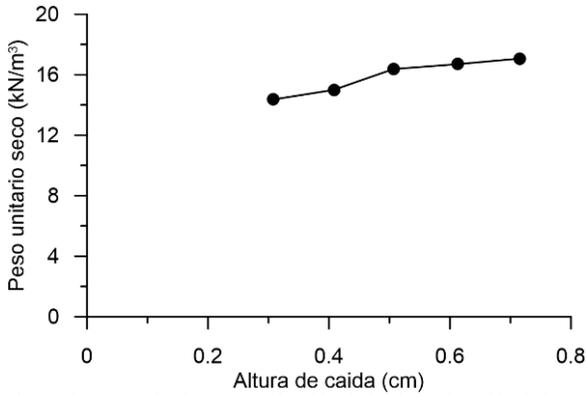


Figura 6: Peso unitario seco en función de la altura de caída de la arena. Fuente: Los autores.

6 Modelación de flujo bajo una tablestaca

En este ejercicio se pide a los estudiantes trazar una red de flujo en papel milimetrado transparente y compararla con las líneas de flujo formadas en el suelo con el colorante en los modelos experimentales. A partir de la curva de peso unitario en función de la altura de caída (Fig. 6), los estudiantes deben preparar el suelo y generar las líneas de flujo en el laboratorio. Las líneas de flujo en el modelo experimental se realizan con colorante puesto en la excavación de unos pequeños huecos con profundidad de 2cm desde la superficie. La distancia de separación de aplicación del colorante es de 5cm. Posteriormente se permite el flujo del agua libre durante unos minutos mientras la cabeza de agua se estabiliza. Una vez estabilizada la diferencia de cabezas ($h_1 - h_2$), se espera durante un tiempo que las líneas de flujo se formen por completo.

La red de flujo se construye considerando que las líneas equipotenciales intersectan perpendicularmente las líneas de flujo. Los resultados de la red de flujo experimental y la solución grafica se muestran en la Figs. 7a y 7b.

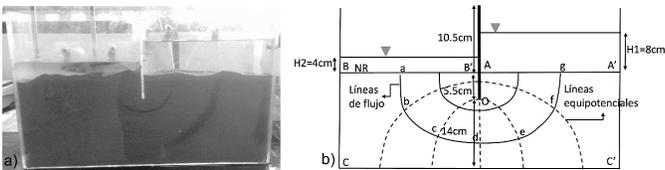


Figura 7: Líneas de flujo bajo una tablestaca. a) Resultado experimental b) Red de flujo.

Fuente Los autores.

La cabeza total, cabeza de presión y cabeza de posición se pueden determinar a partir de la red de flujo teniendo en cuenta las siguientes condiciones de frontera:

- La línea A-A' es una línea equipotencial con una cabeza total H1.
 - La línea B-B' es una línea equipotencial con una cabeza total H2.
 - La línea C-C' es una línea de flujo.
 - La línea B'OA es una línea de flujo.
- La red de flujo trazada tiene las siguientes características:

- Numero de caídas de potencial (Nd) = 6
 - Número de canales de flujo = 3
 - Pérdida de cabeza total $H = 8\text{cm} - 4\text{cm} = 4\text{cm}$
 - Pérdidas de potencial entre líneas equipotenciales $H/Nd = 0.66$
- Para un nivel de referencia localizado en la superficie del suelo los resultados en los puntos a al g mostrados en la Figura 7b se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Resultado de solución de red de flujo.

Punto	Cabeza de posición h_z (cm)	Cabeza de presión h_p (cm)	Cabeza total h_T (cm)	Presión de agua u_w (kPa)
a	0,00	4,00	4,00	0,39
b	-14,83	19,49	4,67	1,91
c	-25,66	31,00	5,33	3,04
d	-28,51	34,51	6,00	3,39
e	-25,66	32,33	6,67	3,17
f	-14,83	22,16	7,33	2,17
g	0,00	8,00	8,00	0,78

Fuente: Los autores.

7 Modelación de flujo en una presa de tierra

El segundo ejercicio a modelar es una presa de tierra (Fig. 3b). En este ejercicio se puede ver la línea ac la cual es una línea de flujo y representa una condición de frontera equivalente a una línea freática. Para graficar esta línea freática, [11] propone un método el cual consiste en graficar una parábola la cual coincide con la línea freática excepto en las caras de flujo aguas arriba y aguas abajo (línea a'c' en la Fig. 8). La parábola a'efb'c' se construye de la siguiente manera [12]:

La distancia cc' se iguala a p y con base en las propiedades de la parábola p se determina a partir de la siguiente ecuación:

$$\sqrt{x^2 + z^2} = 2p + x \tag{2}$$

De donde se obtiene:

$$p = \frac{1}{2}(\sqrt{d^2 + H^2} - d) \tag{3}$$

A partir de la ecuación 2 se obtiene:

$$x = \frac{z^2 - 4p^2}{4p} \tag{4}$$

Al conocer el valor de p se puede calcular x para varios valores de z. Utilizando los valores que se encuentran en la Tabla 2 se construyó la línea freática como se muestra la línea ac en la Fig. 8.

Tabla 2. Valores para la construcción de la línea freática

Parámetro	Valor (cm)
H	3.9
d	23.2
Δ	20
p	0.2
l	2.5

Fuente Los autores.

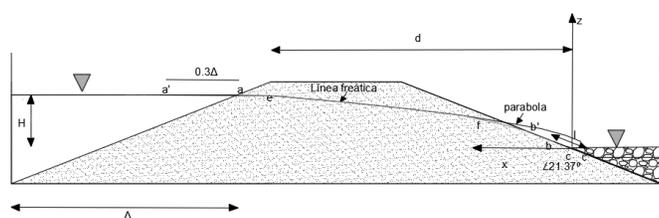


Figura 8: Dibujo de la línea freática [11].

Fuente: Los autores.

Una vez dibujada la línea freática, se traza la red de flujo de la presa de tierra como se muestra en la Fig. 9. La cabeza total, cabeza de presión y cabeza de posición se pueden determinar a partir de la red de flujo. Las consideraciones de solución de este problema son:

- La cabeza de presión en la línea freática es cero.
- La cabeza total en la línea freática es igual a la cabeza de posición.

Para un nivel de referencia localizado en la superficie del agua, aguas arriba, los resultados en los puntos a al l se presentan en la Tabla 3.

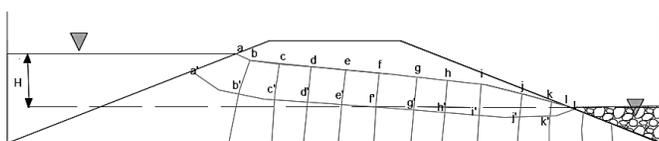


Figura 9: Red de flujo para la presa de tierra.

Fuente: Los autores.

Tabla 3. Resultado de solución en la línea freática.

Punto	Cabeza de posición	Cabeza total	Presión de agua
	h_z (cm)	h_T (cm)	u_w (kPa)
a	-	0	0
b	- 0,23	- 0,23	0
c	- 0,24	- 0,24	0
d	- 0,44	- 0,44	0
e	- 0,68	- 0,68	0
f	- 1,04	- 1,04	0
g	- 1,24	- 1,24	0
h	- 1,51	- 1,51	0
i	- 2,09	- 2,09	0
j	- 2,88	- 2,88	0
k	- 3,81	- 3,81	0
l	- 4,63	- 4,63	0

Fuente: Los autores.

Tabla 4. Resultado de solución en la línea de flujo inferior. Fuente: Los autores.

Punto	Cabeza de posición	Cabeza de presión	Cabeza total	Presión de agua
	h_z (cm)	h_p (cm)	h_T (cm)	u_w (kPa)
a'	- 1,33	1,33	0	0,13
b'	- 3,38	3,15	- 0,23	0,31
c'	- 3,71	3,47	- 0,24	0,34
d'	- 3,87	3,43	- 0,44	0,34
e'	- 4,03	3,35	- 0,68	0,33
f'	- 4,23	3,19	- 1,04	0,31
g'	- 4,59	3,35	- 1,24	0,33
h'	- 4,78	3,27	- 1,51	0,32
i'	- 5,15	3,06	- 2,09	0,30

j'	- 5,22	2,34	- 2,88	0,23
k'	- 5,14	1,33	- 3,81	0,13
l'	- 4,23	- 0,40	- 4,63	- 0,04

Fuente: Los autores.

Las líneas de flujo determinadas con el procedimiento experimental en la presa de tierra se presentan en la Figura 10. La línea superior corresponde a una línea de flujo y no a la línea freática debido a que el colorante utilizado se puso 2cm por debajo de la superficie del agua para evitar que esta lo disuelva.

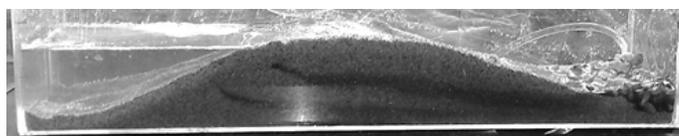


Figura 10: Resultado experimental de líneas flujo en una presa de tierra.

Fuente: Los autores.

8. Perspectivas sobre implementación de las técnicas de modelación en la enseñanza de la geotecnia

Cada vez más los tiempos reducidos que se asignan a la enseñanza de las áreas profesionales en la ingeniería, invitan a desarrollar estrategias de enseñanza más eficientes que inciten en los estudiantes actitudes de indagación y los motiven y hagan más partícipes de su proceso de aprendizaje.

El tránsito a una adecuada modelación numérica de los problemas geotécnicos – bien sea desde la formulación de la misma o con la aplicación de software especializado como el mostrado en [13], donde son innegables los beneficios de aprendizaje por las posibilidades de llevar a cabo múltiples análisis para situaciones más complejas, acomodando una gran variedad de condiciones de contorno, se hace posible con el entendimiento de los conceptos y de las leyes físicas que gobiernan los fenómenos que se dan en el suelo. Los modelos físicos, tanto los sencillos, como son los que se describen en esta experiencia, como los más sofisticados, que se pueden implementar en centrifuga geotécnica, pueden servir para este propósito.

9. Conclusiones

La experimentación con modelos físicos relativamente sencillos, como los descritos en este artículo, permite a los estudiantes que se inician en un curso de mecánica de suelos desarrollar mejor intuición y sentido físico de los mecanismos fundamentales que gobiernan el flujo de agua en el suelo.

Los modelos implementados se pueden instrumentar para que además de que el estudiante identifique las cabezas totales, las pérdidas de cabeza total, observe las líneas de flujo y obtenga las líneas equipotenciales, pueda hacer análisis del efecto que otros factores como la temperatura del fluido y la densidad del suelo tienen sobre la permeabilidad.

Se reconoce que para ganar mayor entendimiento de la condición de flujo no confinado que se da en la presa de tierra, es necesario realizar ajustes en el modelo que permitan determinar de manera más acertada la posición de la línea freática, definiendo la transición de las presiones de agua de poros positivas a negativas.

Referencias

- [1] Wood, D.M., Geotechnical modelling. CRC press, 2014.
- [2] White, D.J., Contributions to geotechnique 1948-2008: physical modelling. Géotechnique, 58(5), pp. 413-421, 2008.
- [3] Gong, J., Wen, B. and Liu, T., Analysis on teaching method of soil mechanics course. International Conference on Humanities and Social Science Research. Atlantis Press, 2015.
- [4] Burland, J.B., The teaching of soil mechanics—a personal view. The Nash lecture. In: Proceedings of the 9th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Dublin, Ireland 3, 1987, pp. 1427-1441.
- [5] Ismael N.F., Axial load tests on bored piles and pile groups in cemented sands. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 127(9), pp.766-73, 2001
- [6] Song, W.K., Cui, Y.J., Tang, A.M., Ding, W.Q. and Tran, T.D., Experimental study on water evaporation from sand using environmental chamber. Canadian Geotechnical Journal, 51(2), pp.115-128, 2014. DOI: 10.1139/cgj-2013-0155
- [7] Oh, W.T. and Vanapalli, S.K., Modelling the stress versus settlement behavior of model footings in saturated and unsaturated sandy soils. In: Proceedings of the 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics, Goa, India, 2008, pp. 1-6.
- [8] Taylor, R., Geotechnical Centrifuge Technology. CRC Press, 2014.
- [9] Abu-Farsakh, M.Y. and Chen, Q., Evaluation of geogrid base reinforcement in flexible pavement using cyclic plate load testing. International Journal of Pavement Engineering, 12(03), pp. 275-88, 2011.
- [10] Garnier, J., Modèles physiques en géotechnique: Etat des connaissances et évolutions récentes. 1ère Biennale Coulomb, 2001.
- [11] Casagrande, A., Seepage through dams, 1937.
- [12] Das, B.M., Advanced Soil Mechanics, Third ed, 2008.
- [13] GEO-SLOPE. International, Seepage Modeling with SEEP / W - An Engineering Methodology, July, 2012.

C. Lozada, recibió el título de Ing. Civil en 2010, el título de MSc. en Ingeniería Civil en 2012 y el título de Dra. en Ingeniería en 2016, todos ellos de la Universidad de los Andes, Colombia, y el doctorado en doble titulación con el École Centrale de Nantes, Francia. Tiene experiencia en enseñanza de la modelación física de estructuras geotécnicas a través de máquina centrífuga geotecnia. Sus intereses investigativos incluyen: modelación física en geotecnia, suelos parcialmente saturados y estudio de interacción clima-suelo. Se vinculó a la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito en el año 2016 en donde es profesora Asistente.

ORCID: 0000-0002-7630-1710

S.X. Campagnoli, es Ing. Civil de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Colombia. Esp. en Geotecnia de la Universidad Politécnica de Madrid y Nacional de Colombia. En su ejercicio profesional se ha dedicado a la docencia universitaria en los cursos teóricos y de laboratorio de mecánica de suelos, pavimentos y materiales para carreteras, al desarrollo de investigación aplicada y a la consultoría principalmente en Ingeniería de Pavimentos para Colciencias, PNUD, CAF, INVIAS, ECOPEPETROL-ICP y otras. Promotora de la red de programas de Ingeniería Civil - REPIC y par académico del CNA. Fue Decana del programa de Ingeniería Civil. Coautora del libro *Pavimentos Asfálticos de carreteras. Guía práctica para los estudios y diseños* y autora de numerosos artículos relacionados con materiales para carreteras. Está vinculada a la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito desde 1983.

ORCID: 0000-0002-5793-8046

D. Carvajal, es estudiante de decimo semestre de Ing. Civil de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Colombia.

ORCID: 0000-0002-9250-5529