

XXVII CONGRESO NACIONAL DE INGENIERÍA CIVIL  
LIMA, PERÚ, 23 al 27 DE ABRIL DEL 2018

## COMPARACIÓN DE MÉTODOS DE ANÁLISIS DE FLUJO EN PRESAS DE TIERRA CON DREN AL PIE DEL TALUD

*Thays Car Feliciano de Oliveira<sup>1</sup>, Renata Rauber Dahmer<sup>2</sup>, Isabela de Oliveira Antonio<sup>3</sup>, Bianca Gabriel dos Santos Dezen<sup>4</sup>, Julio César Bizarreta Ortega<sup>5</sup>*

*Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Brasil, <sup>1</sup>thays.oliveira@aluno.unila.edu.br, <sup>2</sup>renata.dahmer@aluno.unila.edu.br, <sup>3</sup>isabela.antonio@aluno.unila.edu.br, <sup>4</sup>bianca.dezen@aluno.unila.edu.br, <sup>5</sup>julio.ortega@unila.edu.br*

### RESUMEN:

El análisis de la percolación de agua en los suelos es extremadamente importante, puesto que es prácticamente imposible detener el flujo de agua a través de obras de tierra como las presas, lo que puede generar elevadas fuerzas internas y causar el colapso de esas estructuras. Para analizar este problema actualmente diversos modelos pueden ser adoptados, como el analítico-gráfico, modelos físicos reducidos en laboratorio, y los métodos computacionales. Así, el presente trabajo propone un comparativo de estos tres métodos para análisis percolación de agua en presas de tierra con dren al pie. Las redes de flujo de agua, carga totales y presiones de poro en diferentes puntos a lo largo de la presa fueron determinaos experimentalmente. Los resultados obtenidos por los tres métodos fueron satisfactorios e indican conformidad entre sí.

### ABSTRACT:

Seepage analysis in soils is extremely important, since it is practically impossible to stop the water flow through earthworks as dams, which could generate elevated seepage forces and cause the collapse of these structures. In order to analysis this problem, several models can be adopted, as the analytical-graphical, physical (laboratory) or computational. Thereby, the present work aims to present a comparison of these three methods through the study of seepage in earth dams with toe drains. The flow net, total head and pore-pressure along the dam were determined experimentally. Results of the three methods were satisfactory and corroborate each other.

**PALABRAS CLAVES:** presas de tierra; modelo experimental reducido; dren al pie del talud; trazado de redes de flujo experimental; método de elementos finitos.

## INTRODUCCIÓN

El aumento de los registros de fallas en presas, por el efecto de la percolación de agua a través de sus cimentaciones hizo con que estos tipos de estructuras pasaran a ser estudiados con más detalles a partir de década de 1930. El fenómeno de erosión interna (“piping”) es el principal responsable por las fallas en las estructuras de presas de tierra y enrocamiento o de concreto. Actualmente el estudio de la percolación de hace utilizando la ley de Darcy y con una combinación de métodos experimentales, numéricos y analíticos. De acuerdo con Sandroni (2011), es prácticamente imposible impedir el flujo de agua en presas, por lo que su acción y comportamiento deben de ser estudiados con mucha atención. Una de las soluciones para controlar el aumento excesivo de las fuerzas de percolación generadas por el flujo de agua en las zonas de salida del talud o la cimentación, es la construcción de los drenes al pie. En teoría este sistema sería eficiente si el suelo compactado fuera totalmente isotrópico, lo que en la realidad es muy difícil de presentarse (Massad, 2010).

El problema de flujo en presas es considerado bidimensional y, por lo tanto, su solución es dada con base en la ecuación de Laplace [1]. Su solución puede ser revisada en Casagrande (1937), donde son aplicadas la ley de Darcy y una simplificación de la ecuación de Bernoulli [2]. En la que  $h$  es la carga hidráulica total,  $he$  es la carga de elevación y  $hp$  la carga de presión.

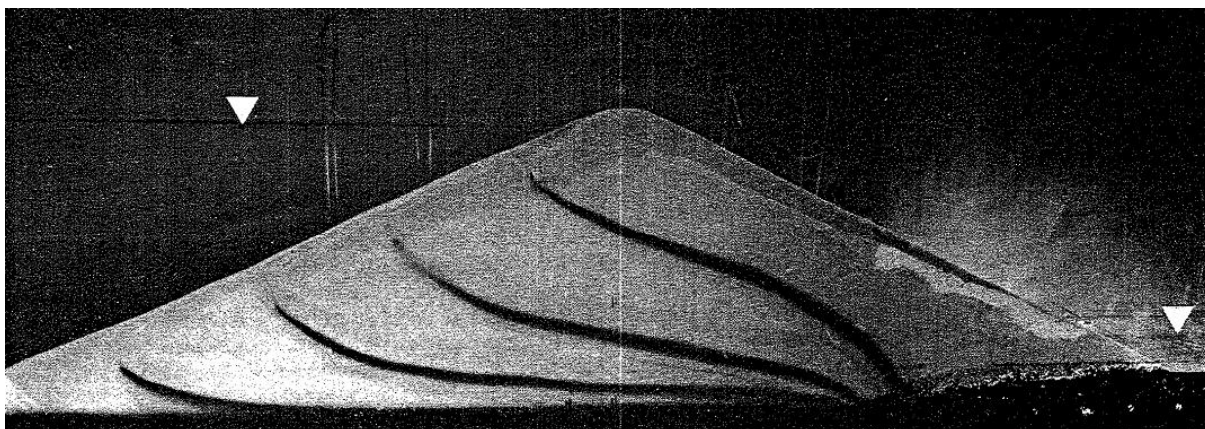
$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad [1]$$

$$h = he + hp \quad [2]$$

Hay, aún, diferentes métodos para resolver tal problema, como por ejemplo el método analítico-gráfico, que consiste en utilizar una formulación gráfica para determinar la línea freática y, posteriormente, el trazado manual de las redes de flujo. La ecuación de Kozeny (Kozeny, 1931 *apud* Casagrande, 1937) es una de las soluciones que más se aproxima. Según Lambe (1963), la ecuación considera que la línea freática presenta un comportamiento parabólico y el dren de pie es horizontal. Otro método es la utilización de modelos físicos en escala reducida y el estudio de percolación del agua en el propio modelo. Por medio de instrumentación se puede medir el caudal y las presiones de poro, siendo que las redes de flujo se visualizan por medio de trazadores colorante. Estos modelos, en general, son desarrollados en canales transparentes. Algunos de esos modelos percolación de agua en presas fueron desarrollados por Casagrande (1937) y Lambe (1969). Casagrande (1937) utilizó la arena normalizada de Otawa para entender el contacto entre el flujo y el dren, en la Figura 1 se muestra el detalle. Lambe (1969) realizó un modelo de presa de tierra utilizando arena y un sistema de drenaje horizontal en la base, tal como se observa en la Figura 2. El modelo físico estaba formado por placas paralelas de lucita, separadas 10 cm, con una altura de 38cm y taludes de 2 en horizontal y 1 en vertical, utilizando tubos piezómetros instalados en el cuerpo de la presa.



Figura 1.- Modelo físico de las líneas de flujo de agua a la llegada a un dren (Casagrande, 1937).



**Figura 2.-** Trazado de líneas de flujo en una presa de tierra con drenaje interno horizontal (Lambe, 1969).

Otra forma de solucionar la ecuación de Laplace involucra modelos numéricos, como el método de elementos finitos. En ese sentido la práctica actual de la ingeniería utiliza programas comerciales, siendo el SEEP/W uno de los más conocidos. Ese programa computacional resuelve la ecuación en cuestión por el método de Galerkin de pesos residuales (Geoslope, 2012).

La presente investigación propone presentar comparaciones de presiones de poros y redes de flujo de una presa de tierra con dren al pie por tres diferentes métodos: (a) un modelo físico construido en tanque de permeabilidad del Laboratorio Didáctico de Ingeniería de la UNILA, (b) un método computacional que consiste en el modelo numérico SEEP/W (método de elementos finitos), y (c) un método analítico-gráfico que consiste en la utilización del método analítico de Kozeny y el trazado manual de las redes de flujo.

## METODOLOGÍA

Para el desarrollo de la investigación, en la parte del modelo físico se hizo uso de un tanque de permeabilidad Nova Didacta®, que es un canal con vidrio en las laterales y filtros de telas removibles de acero inoxidable ubicados en cada extremidad del tanque. Las dimensiones del tanque son de 2450 mm de largo, 700 mm de altura y 150 mm de espesor. En tal aparato es posible poner, en cada una de sus extremidades, una carga hidráulica total diferente, lo que permite la realización de diferentes simulaciones físicas de presas y otras obras de tierra como muros de contención. Para el cuerpo de la presa se utilizó arena media constituida principalmente de cuarzo y, para el drenaje de pie, grava fina envuelta en tela de algodón. La tela de algodón es importante para impedir la migración de partículas finas al dren. En el montaje del modelo se hizo la compactación de la arena manualmente, lo que no representa el verdadero proceso aplicado en las construcciones de presas. Las líneas de flujo fueron observadas por medio de colorantes, insertados aguas arriba de la presa. El caudal fue determinado con ayuda de una probeta graduada y cronómetro y permaneció constante durante el desarrollo de toda la práctica. Para medidas de carga total, el aparato posee un conjunto de piezómetros con puntos de medición en el fondo del tanque, igualmente distribuidos, lo que permite visualizar la variación de carga total a lo largo de la presa, en el eje “aguas arriba-aguas abajo”. En comparación con el modelo de Lambe (1969) que poseía solo 10 cm de espesor, el modelo desarrollado posee un mayor espesor, lo que facilita los procesos de montaje y compactación. En la Figura 3 se puede visualizar un esquema del modelo físico desarrollado.

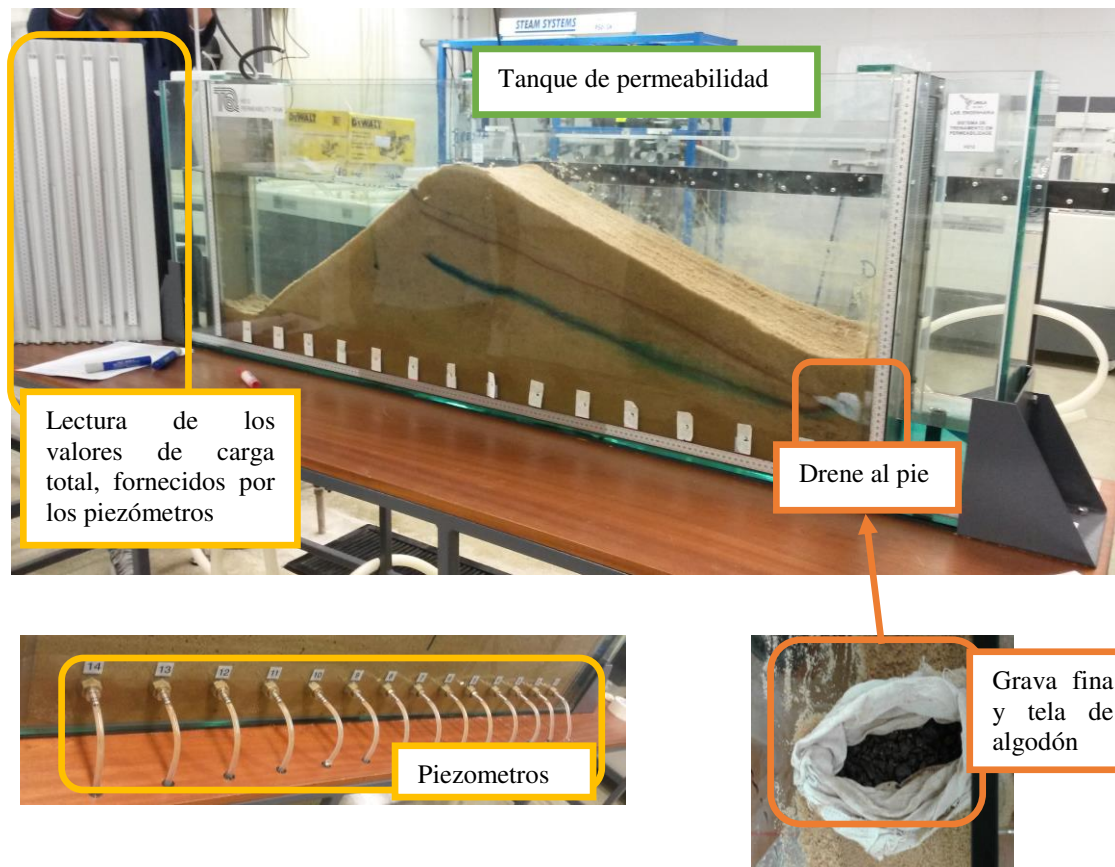


Figura 3.- Esquema del modelo físico descrito.

Con los datos de dimensiones del modelo físico de la presa también se aplicó el método analítico-gráfico de la parábola de Kozeny (Kozeny,1931 *apud* Casagrande, 1937) para la determinación de la línea freática, de acuerdo con la ecuación [3].

$$x = x_0 - \frac{y^2}{4x_0} \quad [3]$$

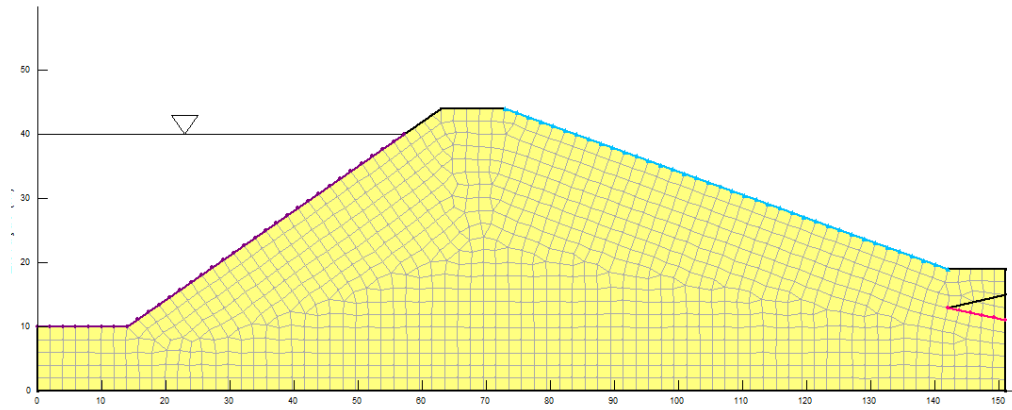
En la que  $x$  y  $y$  son las coordenadas de la línea freática y  $x_0$  es el punto inicial de la línea freática. Además, se siguieron las recomendaciones de Casagrande (1937) para el trazado manual de las redes de flujo.

La simulación numérica de la percolación de agua fue realizado utilizando el programa computacional SEEP/W, versión GeoStudio 2007. En la Figura 4 se muestra la geometría adoptada en el modelo numérico, observase que está basada en el modelo físico construido en el tanque de permeabilidad. La malla de elementos finitos consta de cuadrados y triángulos principalmente. Con los niveles de agua del modelo físico fue montada las condiciones de contorno, por ejemplo para aguas arriba la carga hidráulica total fue de 40cm y para aguas abajo fue 13 cm.

El dato de permeabilidad ( $k$ ) del material de la presa fue obtenido por retroanálisis, con los datos de caudal, redes de flujo y variación de las cargas hidráulicas totales, de acuerdo con [4].

$$k = \frac{Q \cdot N_q}{\Delta H \cdot e \cdot N_c} \quad [4]$$

En la que  $e$  es el espesor de la presa,  $N_q$  el número de pérdidas de carga,  $N_c$  el número de canales de flujo y  $\Delta H$  la diferencia de cargas totales.



**Figura 4.-** Geometría y malla de elementos finitos del modelo numérico.

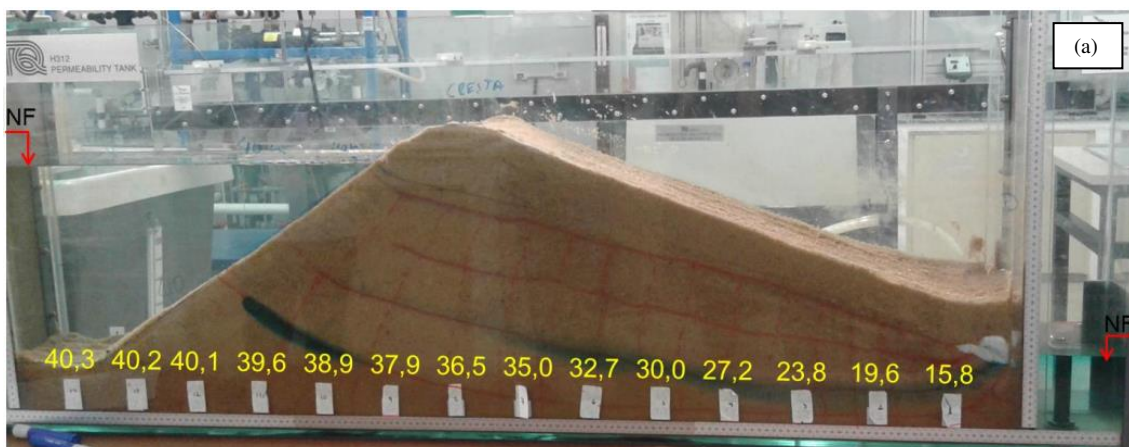
## RESULTADOS Y ANÁLISIS

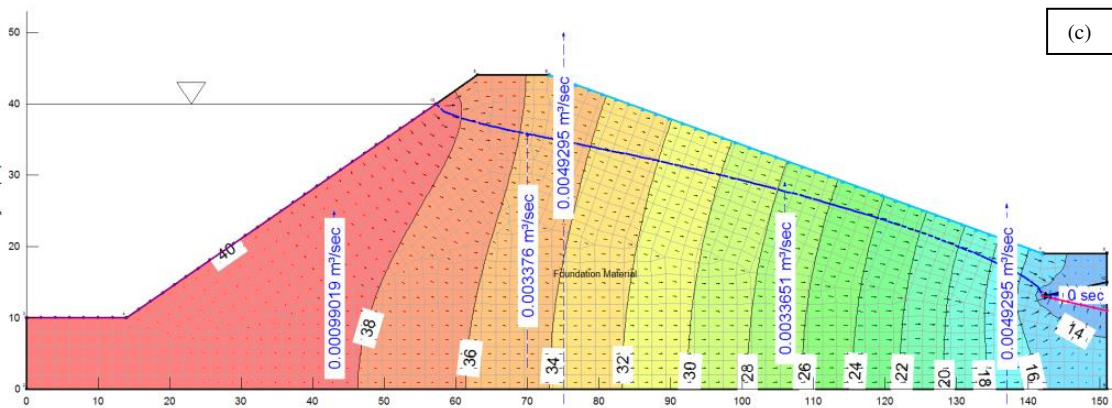
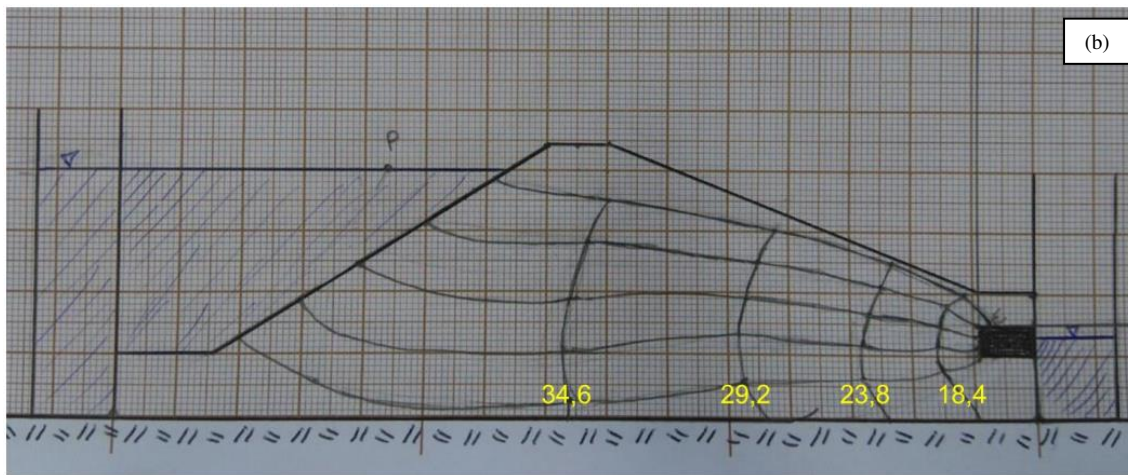
En la Tabla 1 se muestran los resultados de las mediciones experimentales de caudal y pérdida de carga total. Con esos datos y el trazado en el modelo físico de las redes de flujo, fue obtenida la permeabilidad. También utilizando datos geométricos el dren y nivel de agua en la presa fue obtenida la parábola de Kozeny para estimar el nivel freático en el interior de la presa.

**Tabla 1.-** Resultados iniciales obtenidos en laboratorio y parábola de Kozeny.

Caudal [m <sup>3</sup> /s]	Pérdida de carga total [m]	k <sub>sat</sub> [m/s]	Parábola de Kozeny [m/s]
23,3 × 10 <sup>-6</sup>	0,27	0,6 × 10 <sup>-3</sup>	$x = 1,585 - \frac{y^2}{6,34}$

Inicialmente se hizo una comparación entre las redes de flujo de cada uno de los tres modelos. En la Figura 5, se puede observar que el trazado de las líneas de flujo por las tres diferentes metodologías: experimental, numérica y manual-analítica, estos modelos de redes de flujo mostraron conformidad entre sí. Otro aspecto importante observado es que las líneas de flujo dejadas por el trazador no tienen espesor constante, su espesor es variable, en algunos casos es grueso indicando procesos dispersivos, y en otros casos es delgado. Este efecto observado muestra la heterogeneidad de las velocidades de flujo de agua, o sea el material no es isotrópico, mismo así es asumido como tal para efectos de simplificación del problema.





**Figura 5.-** Comparativo de las líneas de flujo y equipotenciales de los modelos (a) físico, (b) gráfico-analítico y (c) computacional.

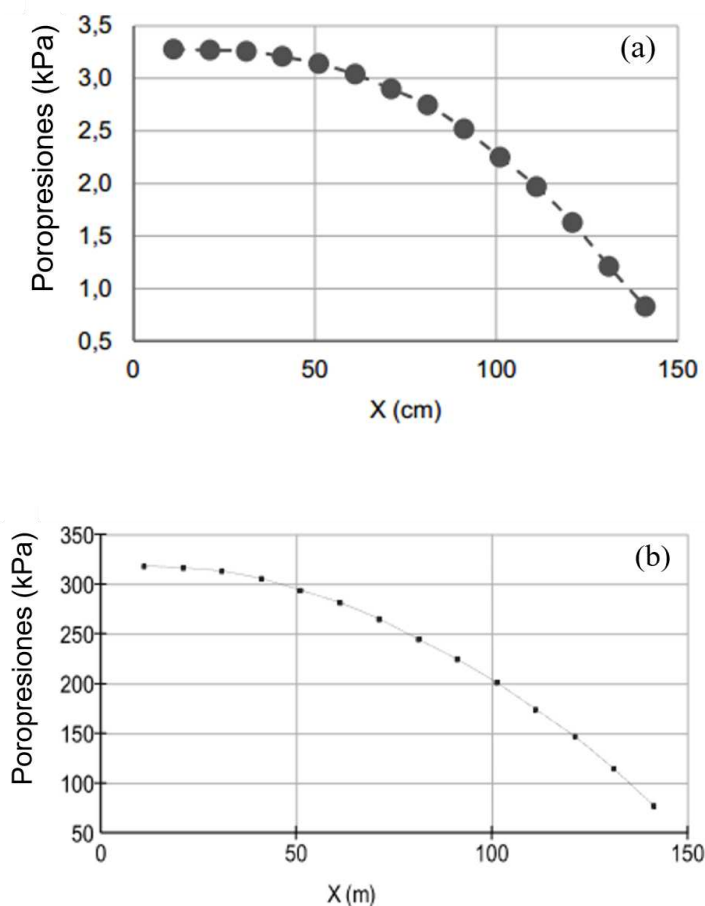
Además, en la Tabla 2 se muestran algunos datos de carga total a lo largo de la presa, para los tres modelos y la variación más grande calculada entre los tres.

**Tabla 2.-** Datos de carga total a lo largo de la presa en los tres modelos.

Modelo	x=7,0	x=10,0	x=12,0	x=14,0
	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]
Físico	36,6	30,0	23,8	15,8
Gráfico (Kozeny)	34,6	29,2	23,8	18,4
Computacional	34,7	28,0	22,8	17,6
	[%]	[%]	[%]	[%]
Variación	5,5	6,7	4,2	14,0

De los valores presentados en la tabla, se puede decir que fueron obtenidos resultados muy próximos de carga total, indicando la aplicabilidad del modelo físico para estudio de los problemas de flujo, aunque en la coordenada x=14,0 cm se observó una variación más grande (14%) del modelo físico con el gráfico. Eso probablemente se debe a una mala compactación en el proceso de montaje del modelo físico.

Otro análisis que se llevo a cabo fue una comparación de las presiones de poro (u) a lo largo de la presa (X) entre los modelos físico y computacional (Figura 6).



**Figura 6-** Gráfica de  $u$  versus  $X$  de los modelos (a) físico y (b) computacional. La diferencia de escala en el eje “ $x$ ” de las gráficas (“ $cm$ ” en el modelo físico y “ $m$ ” en el modelo computacional) se debe al mejor manejo del software cuando las medidas son insertadas en “ $m$ ”.

Se puede visualizar en las gráficas que su trazado es semejante y los valores de presiones de poro a lo largo del eje “ $x$ ” corroboran entre sí, reforzando la aplicabilidad de los modelos físicos de laboratorio para estudio de los problemas de flujo.

## CONCLUSIONES

En este trabajo se llevo a cabo un estudio del comportamiento de las líneas de flujo y pérdidas de carga en presa homogénea de arena con drenaje de pie de grava, siendo mantenido un caudal constante. Tres métodos de análisis fueron aplicados, el físico (modelo en laboratorio), analítico-gráfico y numérico (método de elementos finitos). Los resultados muestran una correspondencia entre los datos de los tres análisis, indicando el potencial de aplicabilidad de los tres modelos para problemas de flujo.

Además, también se observó que las redes de flujo permiten determinar la permeabilidad en el cuerpo de la presa, siendo una técnica también aplicable para estudiar las pérdidas de carga y presiones de poro más fácilmente en los modelos.

La solución del problema de percolación de agua en presas de tierra de forma experimental, numérica y analíticamente, representa una herramienta didáctica de gran potencial para los estudiantes de ingeniería. El contacto directo de una previsión (numérica o analítica) con la realidad física, mismo sea en una escala reducida contribuye en el entrenamiento de futuros ingenieros especialistas en presas de tierra.

## REFERENCIAS

- Casagrande, A.** (1937). "Seepage through dams". *Journal of the New England Water Works Association*, Vol. 51, No. 2, June 1937, pp. 131-172.
- GEOSLOPE** (2012). *Seepage Modeling with SEEP/W - An Engineering Methodology*. GEO-SLOPE International Ltd., Canada.
- Lambe W.; Whitman R.** (1969). *Soil Mechanics*. John Wiley & Sons.
- Massad, F.** (2010). *Obras de terra: curso básico de geotecnia*. Oficina de Textos, São Paulo.
- Sandroni, S.** (2011). *Percolação em aterros*. Notas de aula da Pós-Graduação. PUC-Rio.