

MODELACIÓN NUMÉRICA DE TENSIONES PARA EROSIÓN INTERNA

NUMERICAL MODELLING OF STRESS IN INTERNAL EROSION

Ricardo Moffat C.
Universidad de Chile

Abelardo Julio A.
Universidad de Chile

RESUMEN

Los estudios de configuraciones filtro-base y de erosión interna muestran la existencia de un gradiente hidráulico crítico, definido como aquél que inicia la migración de partículas, que depende tanto del tipo de suelo como de las presiones de confinamiento. Mediante una modelación numérica se busca caracterizar las condiciones de borde y representar la influencia de capas de menor permeabilidad en el comportamiento de suelos potencialmente inestables. La modelación realizada permite definir un ángulo de fricción para la interacción entre permeámetro y suelo, que es utilizado posteriormente para concluir que capas de menor permeabilidad cambian notablemente la distribución de esfuerzos verticales a lo largo de la probeta influyendo en la evaluación de la condición hidromecánica del suelo al comienzo de la erosión interna. Por otra parte, se observa una variación radial de esfuerzos efectivos verticales producto de la fricción entre permeámetro y suelo la que debe ser considerada al determinar el esfuerzo efectivo en la zona de falla.

ABSTRACT

Filtration and internal erosion studies have exhibited a critical hydraulic gradient, defined as the one that triggers particle migration. This gradient depends on either soil type and confinement pressures. By means of a numerical modelling we seek to characterize boundary conditions and to observe the influence of small permeability layers on the behaviour of potentially unstable soils. The model allows to define a representative friction angle for the soil-permeameter interaction, which is later used to conclude that layers of small permeability remarkably change vertical stress distribution throughout the specimen length influencing the evaluation of hydro-mechanical condition at the onset of internal erosion. On the other hand, the model shows that the radial variation of vertical effective stress, observed due to friction between soil and permeameter, must be considered when determining the effective stress at the failure zone.

Keywords: permeameter, internal erosion, filtration.

INTRODUCCIÓN

La erosión interna es un problema que se manifiesta en la naturaleza y en obras de Ingeniería Civil como por ejemplo presas de tierra. Ésta se refiere a la habilidad que debe poseer la fracción gruesa de un suelo de prevenir que su fracción más fina se desplace al interior de los poros del esqueleto de suelo debido a las fuerzas de filtración de agua. El primer análisis que se debe realizar es determinar si el suelo es potencialmente inestable o no. Para esto existen métodos semi-empíricos que permiten determinar si un suelo es potencialmente inestable a través de un análisis de la curva granulométrica del suelo considerado (de Mello, 1975, Kezdi, 1979, Kenney & Lau, 1985, Honjo et al., 1996).

Una vez que se determina que el suelo es potencialmente inestable se debe analizar si las condiciones hidromecánicas a las que se verá sometido activarán el movimiento o migración de partículas (erosión interna). Se ha definido el concepto de gradiente hidráulico crítico como aquél que inicia el movimiento de partículas más finas a través del esqueleto del suelo o hacia un material filtro. Se ha observado que este gradiente hidráulico crítico varía por diversos factores. Uno de los factores más influyentes es la diferencia entre tamaño de partículas entre la fracción fina y gruesa (Skempton and Brogan, 1994) ó entre material base y filtro en filtración. Entre otros factores se encuentran: efecto de tasa de aumento del gradiente hidráulico, espesor del filtro utilizado, di-

rección de flujo de agua, presión de confinamiento ó estado de esfuerzos, etc.

En un trabajo presentado por Tomlinson & Vaid (2000) se observó que un aumento en la presión de confinamiento (ver Figura 1), a la cual se somete una configuración filtro-base, disminuye el gradiente hidráulico necesario para producir erosión de partículas. Por otra parte Moffat (2005) encontró que en suelos internamente inestables un aumento del estado tensional genera un aumento en el gradiente hidráulico crítico necesario para iniciar erosión interna.

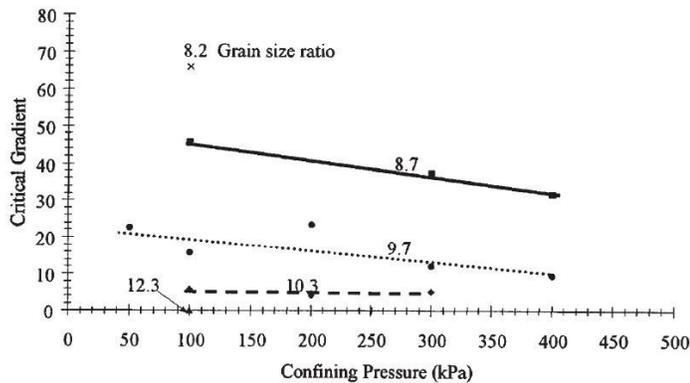


Figura 1. Efecto de la presión de confinamiento en la erosión (Tomlinson & Vaid, 2000)

Este trabajo analiza qué variables pueden influir en la determinación del estado tensional que corresponde al valor del gradiente hidráulico crítico en suelos. Esto es muy importante para establecer fronteras hidromecánicas de estabilidad en suelos potencialmente inestables.

Modelación numérica

Para efectuar la modelación numérica mostrada en este trabajo se utilizó un programa computacional de diferencias finitas que permite resolver problemas con interacción entre el flujo de agua y los esfuerzos existentes en la masa de suelo.

El suelo modelado corresponde a una probeta con una altura variable entre 28 y 45 cm. y 28 cm. de diámetro, caracterizado mediante el modelo constitutivo Mohr-Coulomb con parámetros de resistencia al corte dados por $\phi = 30^\circ$ y $c' = 0$ kPa. La modelación se realiza en forma axi-simétrica y utiliza una interfaz que permite modelar la interacción suelo-permeámetro para así considerar el efecto de borde que se genera en la distribución de tensiones en la probeta estudiada.

La primera parte de este trabajo compara valores de esfuerzos en la zona inferior de la probeta deducidos mediante modelación numérica y aquellos medidos en laboratorio luego de aplicar diferentes incremen-

tos de cargas en el borde superior de la muestra (detalles de la configuración de laboratorio se muestran en la Figura 2). Este procedimiento se utilizó para calibrar el ángulo de fricción entre las paredes del permeámetro y el suelo ensayado. Luego, la modelación contempla el estudio de los cambios generados en la distribución de esfuerzos en la probeta por efecto de capas de menor conductividad hidráulica en el suelo y la distribución radial de esfuerzos a diferentes alturas en la probeta.

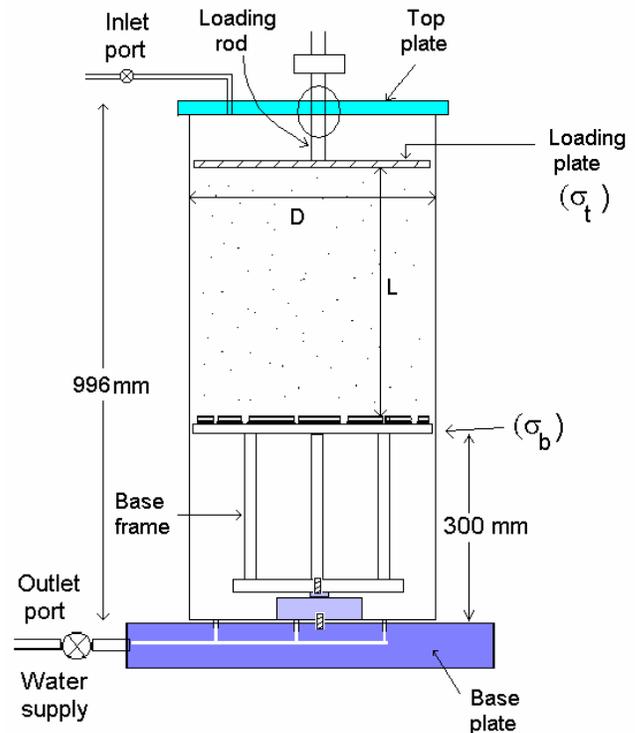


Figura 2. Esquema de aplicación de carga en laboratorio.

Análisis inicial de esfuerzos efectivos

La primera etapa consiste en comparar los esfuerzos medidos durante la etapa de consolidación para una serie de cargas sucesivas que se aplican en la parte superior del permeámetro. Después de la aplicación de cada carga se deducen numéricamente los esfuerzos efectivos en el límite inferior de la probeta y se comparan estos resultados con los esfuerzos medidos mediante una celda de carga ubicada en esta zona (Moffat & Fannin, 2006). En la Figura 3 se muestran los resultados obtenidos a través de este procedimiento.

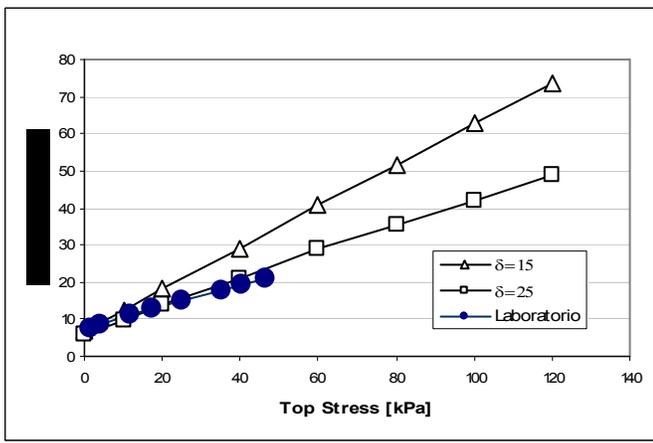


Figura 3. Comparación entre esfuerzos medidos y deducidos mediante modelación.

Los resultados obtenidos permiten inferir que la representación del elemento de interfaz utilizado es adecuada para reproducir el comportamiento del suelo en el laboratorio. Luego, el elemento de interfaz es modelado mediante un ángulo de fricción de 25° (correspondiente a aproximadamente 0.8ϕ) que representa adecuadamente los esfuerzos medidos en el laboratorio.

Distribución de esfuerzos con flujo de agua

La segunda etapa consistió en modelar el comportamiento del suelo bajo flujo de agua descendente en el permeámetro.

En la Figura 4 se muestra la modelación numérica para un ensayo con flujo de agua descendente a distintos gradientes hidráulicos, donde la predicción de esfuerzos en la zona inferior de la probeta coincide con los resultados obtenidos en el laboratorio. Por lo tanto, basados en los resultados (ver Figuras 3 y 4) se desprende que la modelación efectuada es apropiada para predecir el comportamiento del suelo bajo otras condiciones de carga y flujo. Esto permite modelar numéricamente situaciones observadas en el laboratorio tales como la presencia de capas de menor permeabilidad que pueden alterar la distribución de esfuerzos efectivos verticales en la probeta.

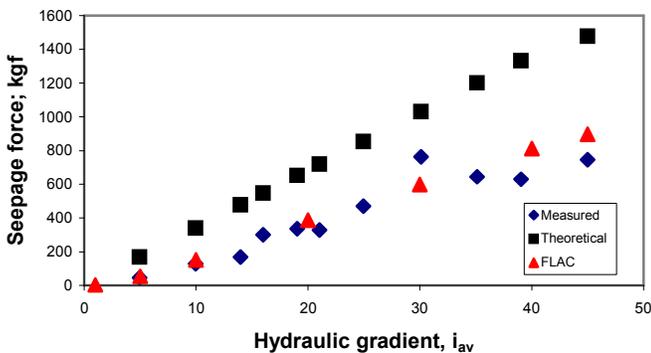


Figura 4. Fuerzas de filtración obtenidas durante flujo de agua

Efecto de borde en paredes del permeámetro

Una de las consideraciones que se tiene al realizar ensayos de filtración o erosión interna es el posible efecto de borde en las paredes del permeámetro. Luego, se investiga este efecto sobre la distribución radial de tensiones en probetas con distintas razones diámetro y altura (H/D). En la Figura 5 se muestra como varían las tensiones efectivas verticales en la probeta de altura $H = 45$ cm y diámetro $D = 28$ cm bajo un flujo de agua descendente con un gradiente hidráulico promedio aplicado igual a $i_{av} = 4.0$. La Figura 6 muestra un resumen del esfuerzo efectivo en la zona inferior de la probeta para dos combinaciones de H y D.

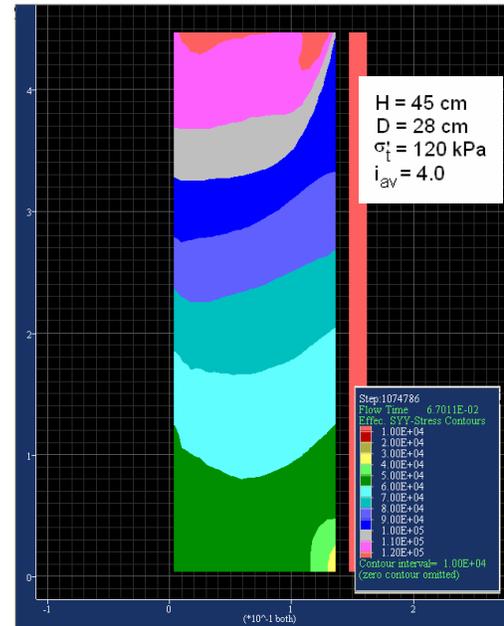


Figura 5. Ejemplo de distribución de esfuerzos efectivos en probeta.

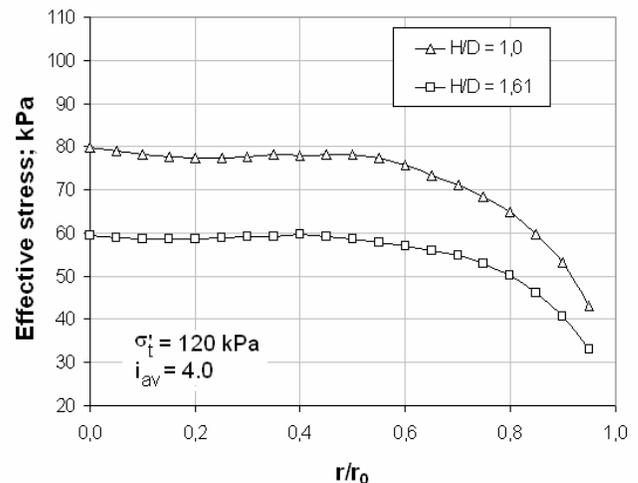


Figura 6. Distribución radial de esfuerzos efectivos en la zona inferior de la probeta.

Se aprecia que los esfuerzos efectivos verticales disminuyen en las proximidades del contacto suelo-permeámetro modelados a través del elemento interfaz. Además, es posible notar que el perfil radial de

esfuerzos en probetas de mayor longitud presenta valores menores a aquellas en que la razón H/D es menor.

De manera similar se grafican los resultados obtenidos en la altura media de la probeta para la distribución radial de esfuerzos efectivos (ver Figura 7) y para $\frac{3}{4}$ de altura medidos desde la base (ver Figura 8).

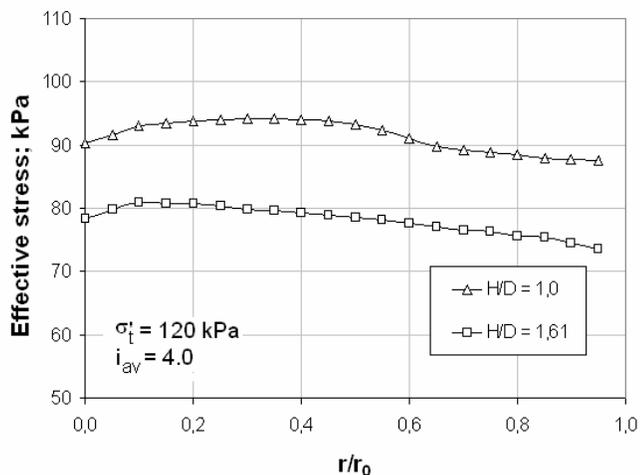


Figura 7. Distribución radial de esfuerzos efectivos en la zona media de la probeta.

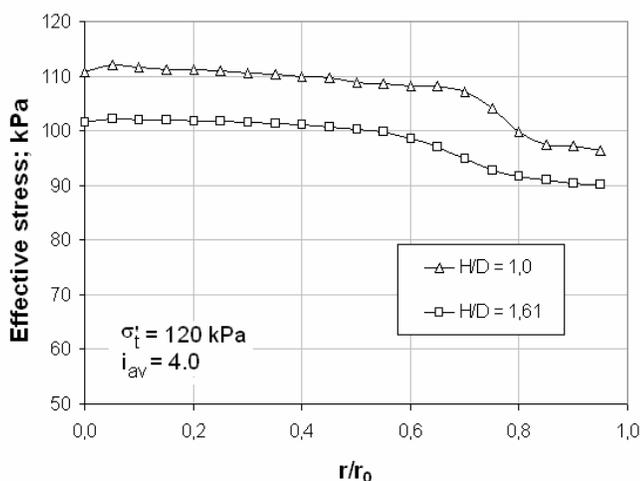


Figura 8. Distribución radial de esfuerzos efectivos a $\frac{3}{4}$ de altura de la probeta medidos desde la base.

Presencia de capa de menor permeabilidad

Existen diversas razones por las cuales es posible encontrar una capa de menor permeabilidad en la probeta ensayada. La utilización de agua de consumo doméstico puede arrastrar pequeñas partículas que se acumulan, tal como se muestra en la Figura 9, donde esferas de vidrio, realzan el cambio de color en la zona superior donde se acumulan partículas, disminuyendo la conductividad hidráulica y aumentando los gradientes hidráulicos de esta capa. Por otra parte, la aplicación de una carga mediante una placa ubicada en la zona superior de la probeta produce una disminución del índice de poros (e) que

también crea una disminución de permeabilidad preferente en la zona superior de la probeta. Otros factores tales como movilidad de partículas finas del suelo, heterogeneidad de la probeta debido a su preparación, etc., también producen zonas de menor permeabilidad en la probeta.

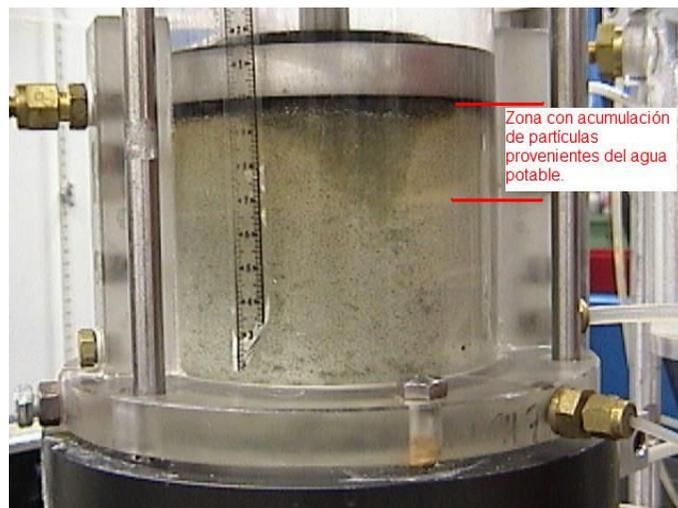


Figura 9. Foto de una muestra sometida a flujo descendente con agua potable.

Por lo tanto, se analiza el efecto de la presencia de capas de menor conductividad hidráulica: en un primer caso con la capa ubicada en la zona superior y en el segundo con la capa ubicada en la zona inferior. El espesor de esta capa se ha definido como $\frac{1}{6}$ de la altura de la probeta para distintas razones H/D y su permeabilidad difiere en un orden de magnitud al resto del suelo. El resto de las propiedades del suelo se mantienen iguales a las utilizadas en la probeta homogénea. Los resultados obtenidos de la modelación se comparan en las Figuras 10a a 10d, donde se muestran los esfuerzos efectivos deducidos para una probeta homogénea y los dos casos antes mencionados en la base y al medio de la probeta modelada para razones de $H/D = 1.61$ y $H/D = 1.00$.

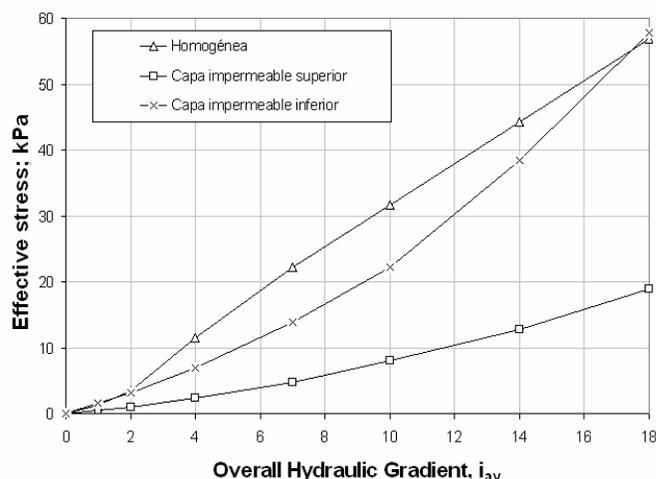


Figura 10a: Diferencia de esfuerzos efectivos verticales en la base de probeta, razón $H/D = 1.61$.

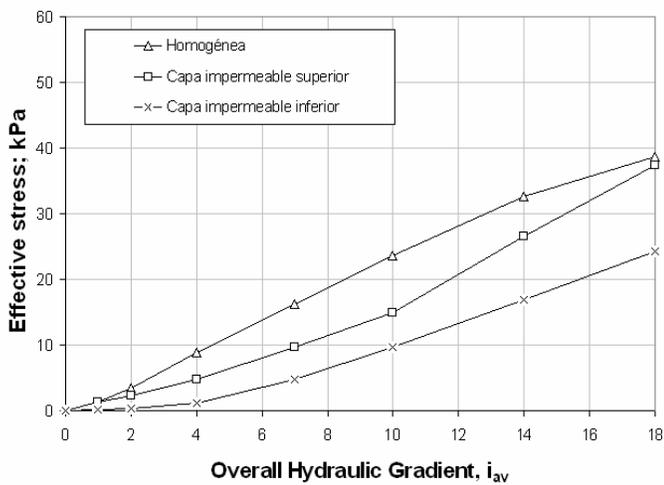


Figura 10b: Diferencia de esfuerzos efectivos verticales en el centro de probeta, razón H/D = 1.61.

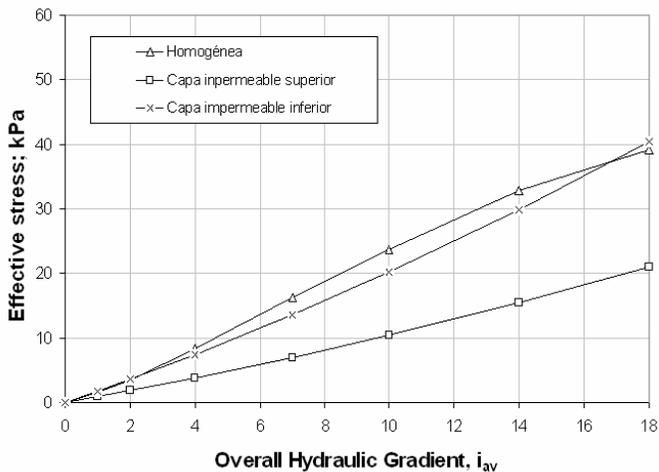


Figura 10c: Diferencia de esfuerzos efectivos verticales en la base de probeta, razón H/D = 1.00.

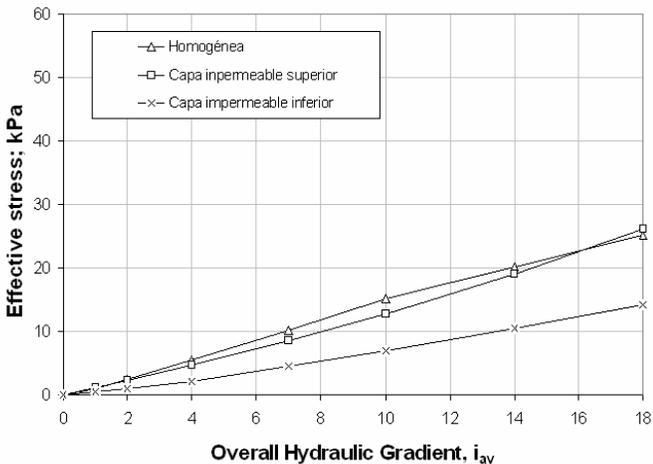


Figura 10d: Diferencia de esfuerzos efectivos verticales en el centro de probeta, razón H/D = 1.00.

La capa de menor permeabilidad ubicada en la parte superior provoca en la base una caída del esfuerzo vertical efectivo notable con respecto a la probeta homogénea (Figura 10a). No obstante, si se miden los esfuerzos en un perfil horizontal al centro de la probeta, la capa de menor conductividad hidráulica es la que presenta dicha caída (Figura 10b). Los análisis realizados para las probetas de razón H/D =

1.00 (Figuras 10c y 10d) presentan comportamientos similares a los antes descritos, con promedio de esfuerzos efectivos verticales levemente menores a los de probetas de longitud mayor.

Conclusiones

- La distribución de esfuerzos efectivos es de vital importancia para determinar las condiciones bajo las cuales se inicia la erosión interna en suelos potencialmente inestables.
- Mediante una modelación numérica, que utiliza elementos de interfaz entre las paredes del permeámetro y el suelo, se puede reproducir el comportamiento del suelo sometido a cargas estáticas y a fuerzas de filtración debido a flujo descendente de agua.
- La distribución radial de esfuerzos en la probeta bajo flujo de agua descendente muestra que debido al roce con las paredes del permeámetro se tienen menores esfuerzos efectivos en los bordes de la probeta sobre todo en la zona inferior de la misma.
- La diferencia radial de esfuerzos efectivos es más pronunciada en la zona inferior de la probeta por lo que de iniciarse la erosión interna en este sector debe considerarse este efecto para determinar un valor representativo de esfuerzos efectivos.
- La diferencia radial de esfuerzos efectivos verticales es similar, independiente de la proporción entre la altura y el diámetro de la probeta (H/D).
- La presencia de una capa de menor permeabilidad en la zona superior o inferior cambia el estado tensional en la probeta. La capa de menor permeabilidad en la zona superior es la que genera mayores cambios en el estado tensional en la base de la probeta.
- El efecto de una menor permeabilidad en una capa superior es más pronunciado para proporciones de H/D mayores.
- Condiciones locales de baja permeabilidad deben ser consideradas al determinar un valor representativo de esfuerzo efectivo en la falla.

Referencias

- De Mello, F. B. (1975). Some lessons learned from unsuspected, real and fictitious problems in earth dam engineering in Brazil. Proc. Of 6th Reg. Conf. for Africa on Soil Mechanics and Foundations Engineering. Durban. 285-304.
- Honjo, Y., Haque M.A. and Tsai, M.A. 1996. Self-filtration behavior of broadly and gap graded cohesionless soils. Proc. Of Geofilters 96. May 29-31 Montreal, Canada. BiTech publishers. 227-236.
- Kenney, T.C. and Lau, D. 1985. Internal stability of granular filters. Can. Geotech. J. 22:215-225.
- Kezdi A. 1979. Soil Physics. Amsterdam, Elsevier.

- Moffat, R.A. 2005. Experiments on the internal stability of widely graded cohesionless soils. Ph.D. Thesis. University of British Columbia. Vancouver, Canada. 279 p.
- Moffat, R.A. and Fannin, R.J. 2006. A large permeameter for study of internal stability of cohesionless soils. Geotechnical testing J. Vol 29, N°4. 273-279.
- Skempton, A.W. and Brogan, J.M. 1994. Experiments on piping in sandy gravels. Geotechnique 44(3):449-460.
- Tomlinson, S.S. and Vaid, Y.P. 2000. Seepage forces and confining pressure effects on piping erosion. Can. Geotech. J. 37:1-13