

Medición de la conductividad hidráulica bajo trayectorias horizontales en suelos granulares

Measurement of hydraulic conductivity under horizontal paths in granular soils

M.F. García¹, C.A. Aldana¹, A.F. Lopez¹

¹Semillero de Investigación en Gestión de Infraestructura. Línea de investigación del grupo HD+i: Infraestructura y Nuevas Tecnologías. Universidad Piloto de Colombia.

Resumen. En las estructuras geotécnicas generalmente el análisis de estabilidad dependiente de la permeabilidad, es evaluado bajo trayectorias verticales, debido a que la mayoría de permeámetros están configurados para que el agua atraviese de esta manera el medio poroso. No obstante, es claro desde el punto de vista físico que el agua puede fluir siguiendo diferentes caminos, entre ellos recorridos preferenciales que pueden incluir trayectorias horizontales paralelas a la depositación del estrato. Lo anterior implica que se debe estimar para un estrato, tanto la componente vertical, como horizontal de la conductividad hidráulica o coeficiente de permeabilidad. En la investigación actual se pretende explorar posibilidades de medición del coeficiente de permeabilidad en trayectorias horizontales, en suelos granulares, bajo una condición constante de densidad relativa. Para ello se diseñó y construyó una cámara especial adosada a un permeámetro de cabeza constante, que permite medir la permeabilidad en condiciones de flujo horizontal paralelo a los estratos. La cámara propuesta admite también, la estimación del coeficiente de permeabilidad combinando estratificaciones de diferentes suelos granulares, donde las trayectorias no son perfectamente horizontales, sino presentan recorridos diagonales. Los resultados son comparados con datos obtenidos mediante permeámetros convencionales de flujo vertical, con el fin de comprobar la diferencia en las mediciones considerando ambas situaciones en las muestras. Como conclusión generar es importante reportar que evidentemente existe una diferencia en los coeficientes de permeabilidad medidos bajo diferentes trayectorias.

Palabras Clave: Permeabilidad, conductividad hidráulica, Permeámetro de cabeza constante, flujo horizontal.

Abstract. In geotechnical structures, the permeability-dependent stability analysis is generally evaluated under vertical trajectories, because most permeameters are configured so that the water passes through the porous medium in this way. However, it is clear from the physical point of view that water can flow along different paths, including preferential ways that can include horizontal trajectories, parallel to the deposit of the stratum. The foregoing implies that both the vertical and horizontal component of the hydraulic conductivity or permeability coefficient must be estimated for a given stratum. The current research aims to explore possibilities for measuring the coefficient of permeability in horizontal trajectories, on granular soils, under a constant condition of relative density. For this purpose, a special chamber attached to a constant head permeameter was designed and constructed, which allows to measure the permeability in conditions of horizontal flow parallel to the soil layers. The proposed camera also admits the estimation of the permeability coefficient by combining stratifications of different granular soils, where the trajectories are not perfectly horizontal, but have diagonal paths. The results are compared with data obtained by conventional vertical flow permeameters, in order to check the difference in the measurements considering both situations in the samples. As a conclusion, it is important to report that there is evidently a difference in the permeability coefficients measured under different trajectories

Keywords: Permeability, hydraulic conductivity, Constant head permeameter, Horizontal flow.

INTRODUCCIÓN

Aunque el fenómeno de permeabilidad se encuentra ampliamente estudiado dentro de un marco conceptual, como se observa en el estado del arte actual, debido a que las mediciones de la conductividad hidráulica se encuentran plenamente establecidas para la mayoría de materiales porosos. Existen ciertos vacíos de conocimiento que deben ser cubiertos. Entre ellos la estimación del coeficiente de permeabilidad para diferentes trayectorias o caminos preferenciales que el fluido (agua), lo cual ha sido evidenciado teóricamente, pero aun escasean estudios empíricos que demuestren estas distinciones. Por tal razón hoy día las investigaciones basadas en estimar la permeabilidad de un suelo, están encaminadas a la aplicación de teorías modernas, para resolver estocásticamente o numéricamente como permea al agua a través de una estructura porosa o en la investigación de nuevos materiales. Esta investigación busca mediante el diseño y la construcción de una cámara especial, la medición del coeficiente de permeabilidad de suelos granulares considerando trayectorias diferentes a la vertical, la cual ha sido durante el tiempo el parámetro estándar medido en la mayoría de los estudios. La cámara será adaptada a un permeámetro ya existente que usa el método de cabeza constante para inducir la infiltración del agua en el suelo [1]. Las muestras fueron preparadas para una relación de vacíos constante, cercana la mínima, con el fin de calibrar apropiadamente la cámara y poder comparar adecuadamente con ensayos realizados convencionalmente con permeabilidad en trayectorias verticales.

Las trayectorias por las que fluye el agua a través de un estrato de suelo pueden estar favorecidas por factores como la gravedad, estratificación del suelo, gradiente hidráulico, relación de vacíos, entre otros. Estos aspectos anteriores pueden influenciar que el agua permee a través del medio poroso por diferentes caminos y esta no solo prefiera trayectorias verticales, que han sido las más usadas en los permeámetros construidos a la fecha para estimar el coeficiente de permeabilidad basado en la ley de Darcy.

En el proceso de formación y depositación de los suelos la sedimentación genera anisotropía en los estratos de suelo en varias direcciones. Normalmente la permeabilidad es calculada considerando el flujo en un estrato uniforme de suelo y sin tener en cuenta la dirección del flujo perpendicular o paralelo a esta depositación.

Ahora bien, el elemento periférico (cámara) debe cumplir el mismo principio físico de Darcy en el cual están sentadas las bases del cálculo de la permeabilidad, incluso en equipos de última generación como el Ksat por ejemplo. Por lo cual este debe ser capaz de medir un caudal que atraviesa una sección transversal de un suelo seleccionado. La ecuación que simula este comportamiento posee una constante de proporcionalidad que es considerado el coeficiente de permeabilidad y el cual es representado en términos de velocidad (cm/s o m/s).

Calcular con alta confiabilidad un parámetro que simule físicamente el comportamiento de un material, es un reto que siempre se ha afrontado en la ingeniería de los materiales, la ingeniería geotécnica no escapa a este desafío. Los permeámetros de hoy día presentan deficiencias para calcular la permeabilidad en trayectorias diferentes a la vertical. La importancia de calcular estas trayectorias se debe a que *in situ* el agua drena en el suelo en diferentes direcciones, por lo cual solo considerar la permeabilidad vertical dentro del cálculo de un flujo en una estructura geotécnica es incorrecto.

Como ya se mencionó anteriormente, la construcción de un accesorio a un permeámetro ya existente permitirá a la comunidad académica e investigativa entender el flujo del agua en medios porosos bajo diversas trayectorias. Esta práctica puede ser incluida dentro del contenido de la asignatura de mecánica de suelos, obedeciendo a la actualización continua dentro de las tendencias actuales de autoevaluación y acreditación nacional e internacional.

Los resultados evidenciaron la diferencia que existe entre valores obtenidos en permeámetros convencionales, con los valores estimados en la cámara propuesta para la medición de trayectorias no verticales (preferiblemente horizontales).

ESTADO DEL ARTE

Para entender el comportamiento de los problemas geotécnicos, es imperativo derivar las implicaciones del flujo de agua a través de los suelos saturados. El establecimiento de funciones constitutivas que puedan relacionar el contenido de agua y la presión poro-agua se lleva a cabo por medio de mediciones indirectas de la permeabilidad [1]. La determinación del concepto de permeabilidad es un proceso lento y sustancialmente tedioso, en el que predominan dos parámetros representativos: la relación de vacíos e y el contenido de humedad w [2]. Sin embargo, su valor varía considerablemente de un suelo a otro por lo cual intenta correlacionar su comportamiento con parámetros que dependen de modelos constitutivos fáciles de determinar. Las primeras ecuaciones constitutivas que relacionaban la permeabilidad con otras propiedades medibles, se fundamentaban principalmente en la suposición de una granulometría esférica uniforme para desarrollar un medio ideal de desarrollo [3].

Existen diferentes modelos estocásticos que intentan determinar el comportamiento de las conexiones entre poros [4], [5], para relacionar su estructura con sus medios de comunicación. Por lo tanto, dos medios que posean la misma relación de vacíos pueden exhibir permeabilidades diferentes dependiendo del tamaño de poros y la cantidad de estos. Cuantos más poros pequeños existan, la permeabilidad saturada será más baja que un medio compuesto por menos poros grandes. Cada tejido de suelo comprende un sistema de poros geoméricamente abstracto que requiere más que una caracterización particular de su tamaño por medio de una distribución [6].

Como se especifica en la ecuación de Darcy, el coeficiente de permeabilidad (K_s) cuantifica la función de velocidad del flujo de agua con base en un gradiente hidráulico determinado. Diversos modelos y ecuaciones empíricas tienen como objetivo estructurar la constante de permeabilidad a través de parámetros o datos fácilmente accesibles [7], [8], [9], con el fin de establecer una relación entre concepto de conductividad hidráulica saturada y el intercambio entre suelos y atmósfera. En la literatura, los modelos constitutivos clásicos para estimar el K_s normalmente incluyen extrapolaciones analíticas que usan el valor medio de conductividad hidráulica saturada y la curva humedad-cabeza capilar [10], [11].

La permeabilidad saturada es una propiedad mecánico-hidráulica del suelo simple pero crítica que, a diferencia de la no saturada, no requiere escalar la conductividad hidráulica cuando se aplica a un modelo constitutivo de poro [12]. El concepto de permeabilidad está

concatenado a una serie de leyes básicas del flujo en medios porosos además de integrantes extrínsecos derivados de saturaciones adyacentes denominados factores de tortuosidad que aparecen en la mayoría de ecuaciones constitutivas y se describen a partir de las propiedades físicas del entorno. Para comprender la dependencia real de la permeabilidad a las propiedades topológicas y geométricas del tejido poroso se han desarrollado funciones fenomenológicas [13], en estos modelos, el coeficiente de transferencia de masa y las áreas de superficie específicas se cuantifican de forma independiente.

Los suelos cohesivos son medios trifásicos debido a que la variación de tamaños y formas en su microestructura es significativa y evoluciona con cambios de succión. Existe un tipo fórmula empírica para el coeficiente de permeabilidad de la arcilla saturada que se basa en la dimensión fractal [14]. Este modelo constitutivo se fundamenta principalmente en el concepto de percolación para la caracterización de medios porosos heterogéneos [15]. El proceso de medición de la permeabilidad comprende un proceso dominado en particular por preceptos ya instaurados de drenaje vertical. Sin embargo, la comprensión de este tipo de fenómeno se lleva a cabo normalmente por la modelación de elementos finitos [16], que conduce directamente al cálculo de deformación sin la necesidad de realizar un hincapié en el análisis de drenaje [17].

Para explicar el parámetro de permeabilidad de forma más realística, algunos ensayos se realizan con base en la percolación horizontal, tales dispositivos pueden suplir y usarse en una pluralidad de situaciones en las que la cámara vertical se ve comprometida originando incertidumbres durante la aplicación de una carga [18]. Convencionalmente, se habla de anisotropía como la relación entre la permeabilidad horizontal y vertical, en donde la calibración de parámetros se hace en función del uso prospectivo del cuerpo de suelo. La permeabilidad de los medios porosos a menudo se expresa en función de la porosidad, y es directamente proporcional a la relación de vacíos.

La succión y el grado de saturación influyen en la rigidez, la resistencia al corte y la presión de preconsolidación. Por lo tanto, para el dominio de estos factores, la propiedad de retención de agua y la respuesta a las trayectorias tensión-deformación; se idealizan modelos constitutivos basados en la interpretación conceptual de los suelos saturados [19]. La modelación de K_s , puede mejorarse iterativamente en un modelo bifásico convencional o con modelos trifásicos acoplados a flujos bifásicos, donde se resuelven simultáneamente las ecuaciones con los equilibrios de presiones.

El modelo capilar, el modelo hidráulico y los modelos probabilísticos tienen en cuenta la distribución del tamaño de poros sobre la permeabilidad [20]. No obstante, debido a que la masa estructural es microscópicamente un medio poroso compuesto por partículas de suelo de diferentes tamaños, estos modelos no representan el comportamiento real, y varían en significancia con las trayectorias de esfuerzo-deformación. Cada componente de una única distribución de poros es representativo a una curva específica de succión [21], esta teoría tiene incidencia en la prefiguración de un arquetipo constitutivo que relacione, tanto la permeabilidad, como la succión relativa. El concepto general de la teoría de percolación, fue propuesta por [22], para comprender el campo estocástico de los medios aleatorios vinculados a los modelos de red que simbolizan el tejido poroso del volumen geotécnico, y que son complementarios a la teoría de la filtración.

Algunas de las fórmulas teóricas y empíricas más importantes para determinar la permeabilidad [23], [24], [25], son transfiguraciones sucesivas de observaciones y de la premisa de coeficiente de uniformidad para variaciones de viscosidad, superficie específica y porosidad a través de tubos capilares.

A medida que la mecánica de suelos se fue desarrollando como ciencia, cada uno de los parámetros intrínsecos en ella fueron adecuados a situaciones prácticas cuantitativas entre los índices de permeabilidad y distribución del tamaño de grano. El principal objetivo de las metodologías actuales, ha sido determinar la conductividad hidráulica por medio de la distribución del tamaño de grano basándose en un único parámetro: el diámetro efectivo [26]. Con respecto a los suelos cohesivos, la patología comúnmente encontrada luego de los flujos de infiltración es denominada erosión interna, en donde el gradiente crítico se expresa como función del esfuerzo cortante hidráulico [27]. Soluciones analíticas [28] presentan un nuevo enfoque a esta problemática tratando de estimar, por medio de simulaciones, la probabilidad de eventos aleatorios a través de la permeabilidad unidimensional.

Generalmente, K_s se cuantifica por medio del ensayo de cabeza constante para suelos de alta permeabilidad, y cabeza variable para los suelos cohesivos. Estos ensayos se encuentran fundamentados en la ley de Darcy, la cual es representada por medio de una ecuación deducida de manera empírica a través de observaciones relativas de percolación a través de suelos granulares, la cual sostiene que la velocidad de descarga es proporcional al gradiente hidráulico y a un coeficiente de permeabilidad [29].

Las simulaciones virtuales de ensayos de laboratorio, han tomado importancia en la última década con respecto a los ensayos tradicionales para estimar el K_s , en donde las medidas necesariamente presentan valores de permeabilidad neta vertical. Pruebas in situ para determinar la difusividad vertical y la transmisibilidad horizontal [30], en las cuales se pueden analizar las propiedades efectivas en ambos sentidos. Para basar esta premisa en actos prácticos, la suposición de isotropía en el plano horizontal es muy común en los cálculos de permeabilidad para pozos verticales, solamente que el componente vertical en las modelaciones no es del todo isotrópico [31].

La distribución espacial de los suelos cohesivos con respecto a la permeabilidad sigue criterios de modelación de contorno variables para un flujo bidimensional estacionario en los softwares constitutivos de elementos finitos como [32], el cual está diseñado para análisis de tensión no lineales y lineales.

La mutua interacción de las fases de un suelo se debe principalmente a la interacción mecánica e hidráulica de sus diversos estados, este tipo de acoplamiento influye tanto en la capacidad de filtración como en la respuesta a los esfuerzos en los suelos arcillosos. Las trayectorias de esfuerzos debidos a las variaciones de la permeabilidad pueden ser calculados por medio de la teoría de la consolidación unidimensional de Terzaghi [33]. Los coeficientes de permeabilidad de las arcillas son controlados por variables que pueden clasificarse como mecánica y fisicoquímica, cuando K_s presenta un comportamiento anormal, este comportamiento se atribuye principalmente a ambientes de alta viscosidad. Existen diversos tipos de suposiciones que pueden relacionar el gradiente de permeabilidad con el caudal en

una dependencia de linealidad, la cual es válida generalmente cuando las arcillas saturadas poseen K_s grandes [34].

Las patologías de los suelos saturados inducidas por la filtración pueden proyectarse en permeámetros de pared rígida [35], que estudian la relación entre la tensión efectiva y el gradiente hidráulico en el inicio de falla. Sin embargo, no sólo mecanismos especializados en los procesos de percolación pueden cuantificar la calibración de parámetros constitutivos; las pruebas de permeabilidad con ensayos triaxiales ensayan suelos saturados en condiciones in-situ bajo tensiones efectivas y presiones equivalentes [36].

Al aplicar la teoría de correlación entre la permeabilidad y los demás parámetros intrínsecos debe ser congruente en las propiedades físicas. Por lo tanto, los dispositivos que controlan los K_s en fluidos no polares deben ser de tipo mecánico. Diversos aparatos mecánicos que se fundamentan en propósitos diferentes al cálculo de permeabilidad, son arquetipos para la modelación de los datos de K_s , la celda de Rowe, efectúa pruebas de consolidación en suelos de baja permeabilidad, excluyendo los inconvenientes que presentan los consolidómetros convencionales [37]. Debido a las características del equipo, es posible llevar a cabo ensayos de permeabilidad bajo condiciones específicas de esfuerzo efectivo, que pueden ser variables o constantes.

MATERIALES Y MÉTODOS

Debido a que la esencia del proyecto consiste en el diseño, construcción y adecuada puesta en marcha de una cámara dual, para el cálculo del coeficiente de permeabilidad en suelos granulares bajo trayectorias horizontales y verticales, es crucial asegurar la calidad de ensayos de calibración de los materiales utilizados, así como de los ensayos de calibración de la cámara.

Caracterización de materiales

A título ilustrativo, la cámara aloja dos tipos de materiales los cuales son separados horizontalmente por medio de una rejilla con un tamiz 200, para evitar el flujo de material entre los dos materiales. Los suelos granulares seleccionados son la arena del Guamo y arena de Ottawa. Dos materiales comúnmente usados en trabajos de investigación de esta naturaleza. Como consecuencia de lo anterior, se muestran los ensayos básicos de caracterización para las dos arenas.

En la Tabla 1, se pueden analizar las dos situaciones en cuanto a condiciones de compactación que se pueden instalar las arenas en la cámara, en este caso se usó la condición suelta, la cual fue lograda mediante la colocación cuidadosa del material dentro de la cámara con un utensilio especial para evitar su caída libre. Este tipo de ensayos no tiene una normatividad en el contexto local. Sin embargo, se describe el procedimiento que debe dar el mismo utilizados en los materiales conformados dentro de la cámara bajo condiciones similares, debido a que la calibración del equipo debe realizarse de la manera más apropiada posible, para evitar disparidad de criterios en cuanto al análisis de datos y resultados.

Tabla 1. Condición suelta y compacta para las dos arenas en cuestión

ARENA DEL GUAMO								
CONDICIÓN SUELTA				Promedio	CONDICIÓN COMPACTADA			Promedio
DENSIDAD (g/cm ³)	1,309	1,301	1,300	1,303	1,392	1,398	1,378	1,390
ARENA DE OTTAWA								
CONDICIÓN SUELTA				Promedio	CONDICIÓN COMPACTADA			Promedio
DENSIDAD (g/cm ³)	1,324	1,330	1,314	1,323	1,402	1,404	1,400	1,402

En cuanto a la gravedad específica fue desarrollada mediante la norma INV E-128 “Determinación de la gravedad específica de las partículas sólidas de los suelos y del llenante mineral, empleando un picnómetro con agua” (INVIAS, 2013). En la Tabla 2 se encuentran los resultados de las gravedades específicas para ambos materiales granulares.

Tabla 2. Gravedad específica de los materiales usados en la cámara de permeabilidad

ARENA DE OTTAWA				Promedio	ARENA DEL GUAMO			Promedio
GRAVEDAD ESPECIFICA	2,68	2,67	2,66	2,67	2,73	2,70	2,73	2,72

En cuanto a la distribución del tamaño de partículas, esta fue realizada siguiendo el estándar INV E-123 “Determinación de los tamaños de las partículas de los suelos”. Naturalmente, como se trata de suelos con contenidos casi 100% granulares, solo fue utilizada la parte de la norma relacionada con el tamizado (Figura 1). Como se observa, prácticamente se trata de materiales muy similares en cuanto a este aspecto, con leves diferencias en sus tamaños menores.

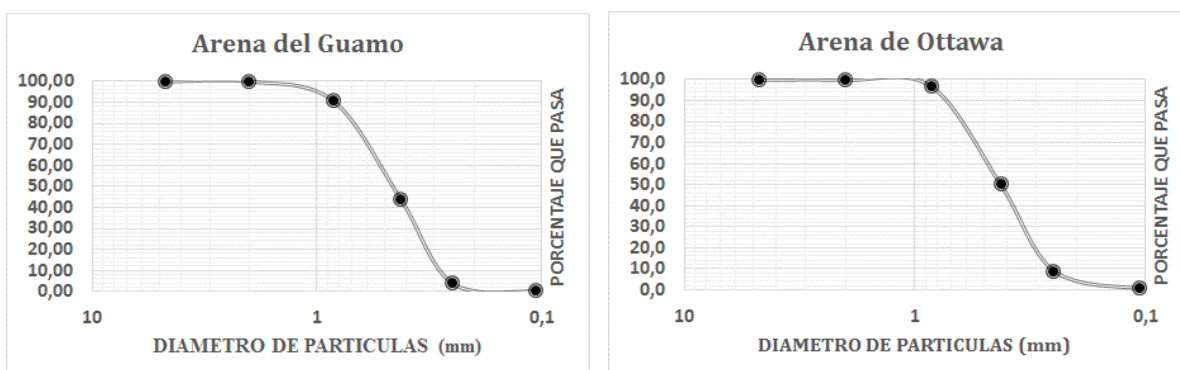


Figura 1. Distribución de tamaño de partículas de las arenas

Construcción y ensamble de la cámara

La cámara de permeabilidad consta de cuatro paredes en acrílico, las cuales son adosadas entre sí, usando tornillería y asegurando que no existan fugas de agua entre las uniones. La entrada y salida del flujo en ambas direcciones se garantizan mediante válvulas y racores colocados en los acrílicos. Dentro de los racores se inserta una pequeña malla 200 para evitar la colmatación y contaminación de las mangueras con el arrastre de partículas. De igual

manera, la conexión para los piezómetros se hace del mismo modo descrito en las paredes de la cámara con el fin de garantizar las alturas piezométricas en el panel del equipo (Figura 2). En la parte superior de la muestra deben ser colocados un parte de resortes que fijan los tamices No. 200 a la muestra, para garantizar el correcto flujo del agua y evitar cualquier expansión del material durante la saturación (Figura 3).

La cámara funciona como equipo periférico a un permeámetro de cabeza constante existente, aunque con algunas variaciones puede funcionar como equipo independiente.

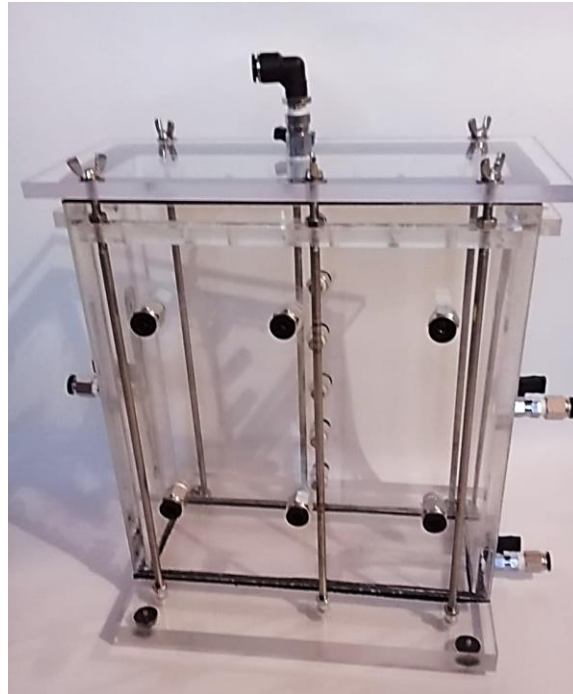


Figura 2. Cámara dual de permeabilidad ensamblada

El proceso de instalación de los materiales dentro de la cámara conlleva un proceso de compactación mínima de la muestra propendiendo por fijar una densidad mínima, según los valores obtenidos en la caracterización de materiales. Las dos arenas están separadas por una malla 200, con el fin de prevenir el arrastre de partículas y contaminación de las muestras colocadas en la cámara (Ver Figura 5).

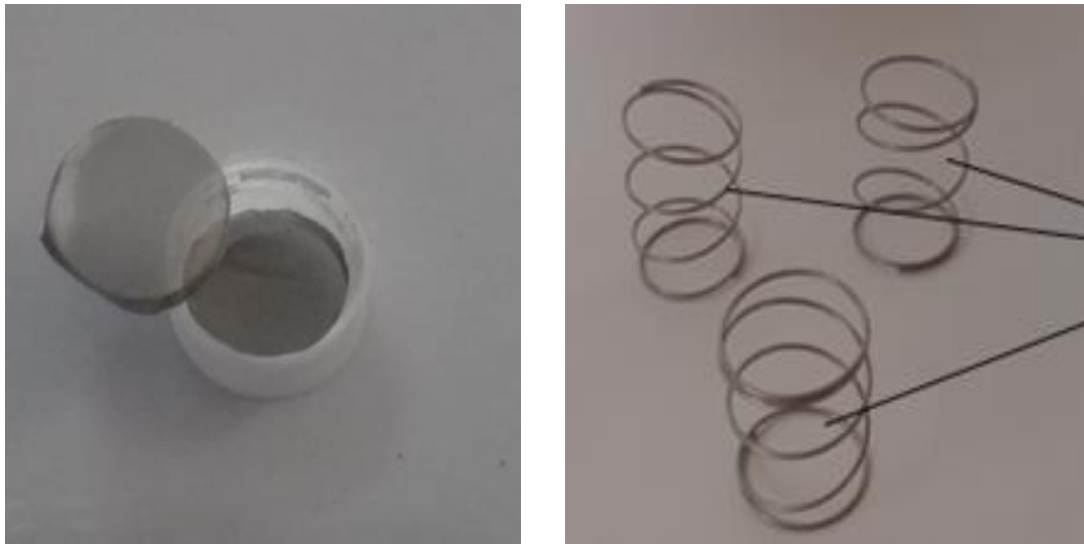


Figura 4. Malla 200 en los racores y resortes de la parte superior de la cámara



Figura 5. Colocación de la malla 200 entre las arenas

RESULTADOS

Como lo indica lo expresado anteriormente, fueron realizados unos ensayos de laboratorio sobre el conjunto de los materiales, obteniendo los coeficientes de permeabilidad de manera paralela (horizontal) y perpendicular (vertical) a la estratificación, de acuerdo a la configuración de estratos mostrada en la Figura 6. Aunque las pruebas tienen algunas

variaciones en cuanto a la tradicionalidad de los ensayos de permeabilidad, se consideró como base la norma INV E-130 “Permeabilidad de suelos granulares (cabeza constante)”.

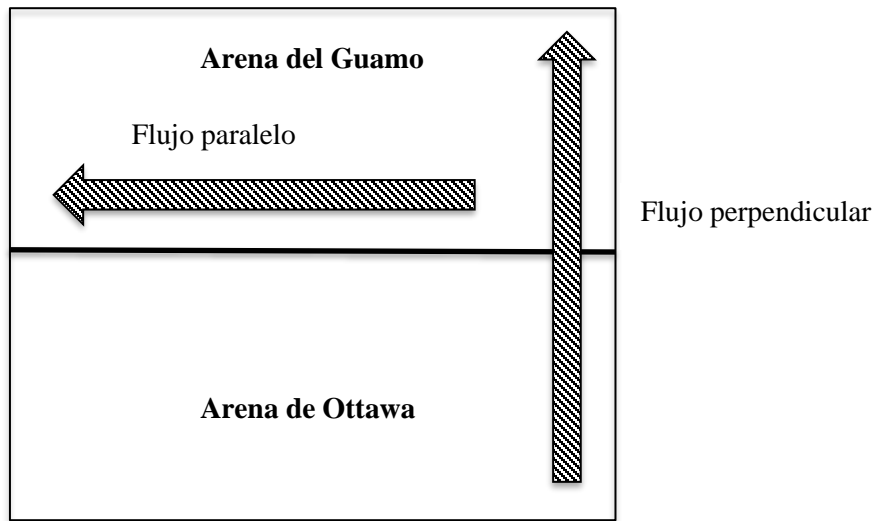


Figura 6. Configuración de estratos y flujo del agua

El estándar naturalmente esta fundamentado en la ley de Darcy para la estimación de la conductividad hidráulica o coeficiente de permeabilidad, para la cual se usó la siguiente ecuación.

$$k = \frac{Q L}{A t h}$$

Donde k es la conductividad hidráulica (coeficiente de permeabilidad), Q es el caudal, L la distancia entre manómetros, A el área de la sección transversal de la muestra, t el tiempo total de desagüe y h la cabeza entre los manómetros.

Las pruebas fueron realizadas para ambas trayectorias, con el fin de calibrar la cámara construida. Esta calibración tuvo en cuenta la comparación con el estado del arte, en cuanto a los valores obtenidos. Es decir, que la estimación arrojará datos razonables, referentes a los rangos de material ensayado.

En la Tabla 3, se pueden observar los cálculos de coeficiente de permeabilidad en condición perpendicular a la estratificación planteada en la cámara.

Tabla 3. Coeficientes de permeabilidad en trayectorias perpendiculares a la estratificación

Ensayo	Volumen de agua	Tiempo	Temperatura del agua	Manómetros		Coeficiente de Permeabilidad
				h1	h2	
Nº	(cm ³)	s	(°C)			(k)
1	840	30	19,30	102	34,0	0,007625272
2	860	30	18,90	102	31,0	0,007476961
3	860	30	19,00	102	29,7	0,007342520

4	880	30	19,80	102	28,0	0,007340674
5	900	30	19,20	102	22,0	0,006944444

Como se observa en los resultados, los valores obtenidos del coeficiente de permeabilidad presentan valores similares a los reportados en la norma DIN (Tabla 4), para una arena de grano medio, la cual podría compatibilizarse con un coeficiente de permeabilidad promedio cuando el agua permea a través de los dos estratos de arena. De esta manera, se puede corroborar que los datos arrojados se consideran razonables, dentro del estado del arte.

Tabla 4. Conductividad hidráulica en suelos (DIN 18130, 1998).

Grava	10^{-1} a 10^{-2} m/s
Arena gruesa	Aprox. 10^{-3} m/s
Arena de grano medio	10^{-3} a 10^{-4} m/s
Arena de grano fino	10^{-4} a 10^{-5} m/s
Arena limosa	10^{-5} a 10^{-7} m/s
Arcilla limosa	10^{-6} a 10^{-9} m/s
Arcilla	$< 10^{-9}$ m/s

En relación a las trayectorias paralelas a la estratificación los datos obtenidos por medio de la cámara, se encuentran consignados en la Tabla 5.

Tabla 5. Coeficientes de permeabilidad en trayectorias paralelas a la estratificación

Ensayo	Volumen de agua	Tiempo	Temperatura del agua	Manómetro		Coeficiente de Permeabilidad
N°	(cm ³)	s	(°C)	h1	h2	(k)
1	555	60	19,8	102	56	0,007447665
2	549	60	20,1	102	56	0,007367150
3	575	60	20,3	102	52	0,007098765
4	570	60	19,2	102	52	0,007037037
5	565	60	19,5	102	53	0,007117662

Aunque a priori, se consideraba que los coeficientes de permeabilidad de las trayectorias horizontales podían ser mayores, debido a que el flujo de agua no necesariamente atraviesa dos estratos, en los datos obtenidos se observa una paridad de resultados al comparar con trayectorias verticales.

CONCLUSIONES

Efectivamente se comprobó que la cámara dual es adecuada para estimar la conductividad hidráulica de materiales granulares, incluso cuando se configura dentro de la cámara una estratificación, en este caso de dos materiales. Es posible instalar en la cámara mas capas de material para calcular un coeficiente de permeabilidad equivalente del conjunto.

Los cálculos del coeficiente de permeabilidad obtenidos de la cámara se consideran dentro de los rangos aceptados para este tipo de materiales. De este modo, se considera que la cámara presenta una construcción y calibración correcta.

La cámara dual de permeabilidad permite el cálculo de la conductividad hidráulica bajo ambas trayectorias propuestas. Esto es extremadamente útil para entender el comportamiento de estructuras geotécnico-hidráulicas donde el flujo bajo diferentes trayectorias puede controlar la respuesta mecánica del material.

Los materiales evaluados en la cámara mostraron valores equivalentes a los de arenas de tamaño medio, lo cual es coherente con la distribución de tamaños mostrado en la caracterización de materiales.

REFERENCIAS

- [1] Valencia, C. & Triana, J. (2013). Diseño y construcción de un permeámetro para suelos granulares Trabajo de grado de pregrado. Universidad Piloto de Colombia
- [2] Leong, E. C., & Rahardjo, H. (1997). Permeability functions for unsaturated soils. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 123(12), 1118-1126.
- [3] Fredlund, D. G., & Rahardjo, H. (1993). *Soil mechanics for unsaturated soils*. John Wiley & Sons.
- [4] Weeks, L. V., & Richards, S. J. (1967). Soil-Water Properties Computed from Transient Flow Data 1. *Soil Science Society of America Journal*, 31(6), 721-725.
- [5] Juang, C. H., & Holtz, R. D. (1986). A probabilistic permeability model and the pore size density function. *International Journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, 10(5), 543-553.
- [6] Garcia-Bengochea, I., Altschaeffl, A. G., & Lovell, C. W. (1979). Pore distribution and permeability of silty clays. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 105(7), 839-856.
- [7] Romero, E., Gens, A., & Lloret, A. (1999). Water permeability, water retention and microstructure of unsaturated compacted Boom clay. *Engineering Geology*, 54(1-2), 117-127.
- [8] Hyman, J. D., Smolarkiewicz, P. K., & Larrabee Winter, C. (2013). Pedotransfer functions for permeability: a computational study at pore scales. *Water Resources Research*, 49(4), 2080-2092.
- [9] Chapuis, R. P., & Aubertin, M. (2003). On the use of the Kozeny Carman equation to predict the hydraulic conductivity of soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 40(3), 616-628.
- [10] Bear, J. (1972). *Dynamics of fluids in porous media*. Elsevier, New York.
- [11] Mualem, Y. (1976). A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water resources research*, 12(3), 513-522.
- [12] Brutsaert, W. (1967). Some methods of calculating unsaturated permeability. *Transactions of the ASAE*, 10(3), 400-0404.
- [13] Burdine, N. (1953). Relative permeability calculations from pore size distribution data. *Journal of Petroleum Technology*, 5(3), 71-78.

- [14] Hyman, J. D., Smolarkiewicz, P. K., & Larrabee Winter, C. (2013). Pedotransfer functions for permeability: a computational study at pore scales. *Water Resources Research*, 49(4), 2080-2092.
- [15] Zhang, X., Li, M. B., Sun, Y. Z., Zhu, Y. T., Yang, Z. H., & Tian, D. H. (2019, March). Study on permeability coefficient of saturated cohesive soil based on fractal theory. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 242, No. 6, p. 062055). IOP Publishing.
- [16] Perrier, E., Bird, N., & Rieu, M. (1999). Generalizing the fractal model of soil structure: The pore–solid fractal approach. *Geoderma*, 88(3-4), 137-164.
- [17] Hird, C. C., Pyrah, I. C., & Russel, D. (1992). Finite element modelling of vertical drains beneath embankments on soft ground. *Geotechnique*, 42(3), 499-511.
- [18] Britto, A. M., & Gunn, M. J. (1987). Critical state soil mechanics via finite elements.
- [19] Roth, M. J., & Caslake, L. F. (2019). U.S. Patent Application No. 16/175,346.
- [20] Vecchia, G. D., & Romero, E. (2013). A fully coupled elastic–plastic hydromechanical model for compacted soils accounting for clay activity. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 37(5), 503-535.
- [21] Lapierre, C., Leroueil, S., & Locat, J. (1990). Mercury intrusion and permeability of Louiseville clay. *Canadian Geotechnical Journal*, 27(6), 761-773.
- [22] Simms, P. H., & Yanful, E. K. (2002). Predicting soil–water characteristic curves of compacted plastic soils from measured pore-size distributions. *Géotechnique*, 52(4), 269-278.
- [23] Berkowitz, B., & Ewing, R. P. (1998). Percolation theory and network modeling applications in soil physics. *Surveys in Geophysics*, 19(1), 23-72.
- [24] Hazen, A., 1892. Some physical properties of sands and gravels with special reference to their use in filtration. 24th Annual Report, Massachusetts State Board of Health.
- [25] Slichter, C. S., 1899. Theoretical investigation of the motion of ground waters. 19th Annual Report, U.S. Geological Survey. 2 : 305.
- [26] Terzaghi, K., 1925. *Erdbaumechanik*, p. 120. Deuticke, Vienna.
- [27] Alyamani, M. S., & Şen, Z. (1993). Determination of hydraulic conductivity from complete grain-size distribution curves. *Groundwater*, 31(4), 551-555.
- [28] Hurtado Osorio, C. (2018). Influencia del porcentaje de finos en la permeabilidad de materiales areno-arcillosos (Master's thesis, Universidad del Norte).
- [29] Lu, Z., & Zhang, D. (2003). On importance sampling Monte Carlo approach to uncertainty analysis for flow and transport in porous media. *Advances in Water Resources*, 26(11), 1177–1188.
- [30] Jabro, J. D. (1992). Estimation of saturated hydraulic conductivity of soils from particle size distribution and bulk density data. *Transactions of the ASAE*, 35(2), 557-560.
- [31] Burns Jr, W. A. (1969). New single-well test for determining vertical permeability. *Journal of petroleum technology*, 21(06), 743-752.
- [32] Mukherjee, H., & Economides, M. J. (1991). A parametric comparison of horizontal and vertical well performance. *SPE Formation Evaluation*, 6(02), 209-216.
- [33] Börgesson, L. (1996). Abaqus. In *Developments in geotechnical engineering* (Vol. 79, pp. 565-570). Elsevier.

- [34] Mesri, G., & Olson, R. E. (1971). Mechanisms controlling the permeability of clays. *Clays and Clay minerals*, 19(3), 151-158.
- [35] Olsen, H. W. (1960). Hydraulic flow through saturated clays. *Clays and Clay Minerals*, 9(1), 131-161.
- [36] Moffat, R. A., & Fannin, R. J. (2006). A large permeameter for study of internal stability in cohesionless soils. *Geotechnical Testing Journal*, 29(4), 273-279.
- [37] Tavenas, F., Leblond, P., Jean, P., & Leroueil, S. (1983). The permeability of natural soft clays. Part I: Methods of laboratory measurement. *Canadian Geotechnical Journal*, 20(4), 629-644.
- [38] Hidalgo Mejia, J. (2007). Consolidación De Suelos Visco – Plásticos: generacion de presion de poro y deformaciones diferidas. Tesis de maestria En Ingeniería (Geotecnia). Universidad nacional autonoma de mexico.