

EVALUACIÓN DE PROPIEDADES PERMEABLES DE SUELOS ARTIFICIALES CON CONTENIDOS DE CAOLIN Y CARBONATO DE CALCIO EN CONDICION SATURADA Y PARCIALMENTE SATURADA

ASSESSMENT OF PERMEABLE PROPERTIES OF ARTIFICIAL SOILS WITH CONTENTS OF CAOLIN AND CALCIUM CARBONATE IN SATURATED AND UNSATURATED CONDITION

Oscar Andrés Anzola Pedraza,¹ CC 1.010.204.132 – Código 1120389
Steven Alexander Chaves Urrego¹, CC 1.026.568.185 – Código 910014
David Steven Anzola Pedraza¹, CC 1.010.204.946 – Código 1120418

¹Semillero de Investigación en Gestión de Infraestructura. Línea de investigación del grupo HD+i: Infraestructura y Nuevas Tecnologías. Universidad Piloto de Colombia. Directora Proyecto: Eliana Martínez Rojas Par Colaborativo: Juan Carlos Ruge C.

RESUMEN: *Dentro de la mecánica de suelos convencional el estudio, tanto de propiedades mecánicas, como hidráulicas es desarrollada normalmente en condiciones saturadas del suelo, ya que se considera que este escenario es el más desfavorable y brinda un velo de seguridad en el marco de diseños conservativos, pero con estructuras sobreestimadas en cuanto a sus dimensiones y consecuentemente poco económicas. No obstante, la realidad es otra, los materiales térreos solo en situaciones muy extremas se encuentran en la condición ya mencionada. Generalmente, al analizar el estado natural del suelo en las profundidades de trabajo de estructuras geotécnicas y/o hidráulicas que, su condición en cuanto a la humedad presente en la estructura es parcialmente saturada. Mediante la adición artificial de un mineral cementante que se puede localizar de manera natural en el suelo, como lo es el carbonato de calcio, se busca obtener los coeficientes de permeabilidad en las condiciones ya señaladas anteriormente. Son desarrollados ensayos para la obtención de la permeabilidad saturada con métodos modernos y tradicionales, en cuanto a la permeabilidad no saturada es evaluada usando un infiltrómetro adaptado para fines laboratoriales. La permeabilidad no saturada depende del nivel de succión impuesto en el infiltrómetro, la cual causa que el agua se movilece de manera más lenta según lo observado en los ensayos realizados.*

Palabras Clave: Conductividad hidráulica, Coeficiente de permeabilidad, Suelos no saturados, succión.

ABSTRACT. *Within conventional soil mechanics, the study of both mechanical and hydraulic properties is normally carried out under saturated soil conditions, since this scenario is considered*

the most unfavorable and provides a safety veil within the framework of conservative designs, but with structures that are overestimated in terms of their dimensions and consequently not very economical. However, the reality is different, the earth materials only in very extreme situations are in the condition already mentioned. Generally, when analyzing the natural state of the soil in the depths of work of geotechnical and / or hydraulic structures, its condition as regards the moisture present in the structure is partially saturated. By means of the artificial addition of a cementitious mineral that can be located naturally in the soil, such as calcium carbonate, it is sought to obtain the coefficients of permeability in the conditions already mentioned above. Tests are developed to obtain saturated permeability with modern and traditional methods, in terms of unsaturated permeability is evaluated using an infiltrometer adapted for laboratory purposes. The unsaturated permeability depends on the level of suction imposed in the infiltrometer, which causes the water to move more slowly as observed in the tests carried out.

Keywords: Hydraulic Conductivity, Permeability Coefficient, Unsaturated soils, suction.

1 INTRODUCCIÓN

Tradicionalmente la permeabilidad se conoce como la capacidad que posee un cuerpo poroso, de permitir atravesar su estructura por un fluido, normalmente en este contexto aire y/o agua. Este parámetro puede medirse, tanto *in situ*, como en el laboratorio, optando por esta últimas, puesto que son más sencillas

de realizar y se pueden controlar y analizar la dependencia de cualquier otro parámetro que influya en el cálculo del coeficiente de permeabilidad, como por ejemplo la relación de vacíos. No obstante, la conductividad hidráulica también depende de la microestructura (arreglo de las partículas o cementación) y macroestructura del suelo (estratificación). En este caso la toma de muestras puede modificar sensiblemente estas características, por lo que se considera necesario determinar la permeabilidad en campo del material (Lambe, 1991).

Justamente, considerando la dependencia de la microestructura sobre la permeabilidad de un material, esta investigación trata sobre la influencia en suelos arenosos de la adición de carbonato de calcio en la estimación de la permeabilidad saturada y no saturada. Es conocido que el carbonato de calcio puede localizarse de manera natural en el suelo como un mineral cementante, por lo tanto, será incluido en las muestras granulares que serán preparadas a una relación de vacíos mínima, precisamente para analizar la movilización del agua cuando existe en la microestructura presencia de cementación.

Pocos estudios han desarrollado avances sobre la permeabilidad en este tipo de materiales compuestos, considerando una condición saturada y parcialmente saturada. Generalmente el parámetro usado para diseño está basado en el coeficiente de permeabilidad saturado (K_{sat}), siguiendo las tendencias convencionales de la ingeniería geotécnica, donde se considera que la condición saturada del suelo normalmente es la más desfavorable en cuanto al comportamiento mecánico del mismo, no obstante, esto depende de la aplicación geotécnica o estructura geotécnica a diseñar, en cuanto a la permeabilidad.

El carbonato de calcio será añadido por vía seca a la arena del Guamo, en diferentes proporciones de 0, 5, 10, 20 y 40%. Para la estimación de la permeabilidad saturada (K_{sat}) será utilizado un permeámetro convencional bajo el método de cabeza constante y variable (Valencia & Triana, 2013; Moreno & Martínez, 2014) (Ver Figuras 1 y 2) y uno moderno que calcula de manera semiautomatizada el mismo parámetro. Para la permeabilidad no saturada (K_{unsat}), será usado un infiltrómetro de campo adaptado para el laboratorio, donde se puede imponer succiones de 0,5 hasta 7 cm- H_2O .

El permeámetro moderno de alta confiabilidad ya ha sido utilizado anteriormente en este tipo de investigaciones donde fueron medidos coeficientes de permeabilidad en materiales compuestos, como por ejemplo suelos arenosos con componentes de óxido de hierro y diatomeas (Villarraga *et al*, 2017; Latorre *et al*, 2018).

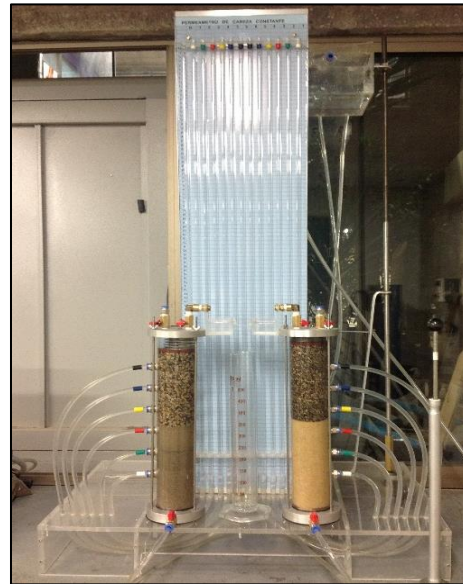


Figura 1. Permeámetro de cabeza constante (Valencia & Triana, 2013).

La investigación arrojó que la permeabilidad no saturada disminuye la movilidad del agua a través de la estructura, en comparación con la condición saturada. Los detalles serán discutidos a lo largo del documento.



Figura 2. Permeámetro de cabeza variable (Moreno & Martínez, 2014).

2 ANTECEDENTES

El flujo a través de medios porosos, preferiblemente en fluidos como el agua, está controlado por la ecuación de Darcy (1856), donde se propone que la velocidad del flujo a través de una estructura porosa es proporcional al gradiente de la cabeza de presión total. El flujo en cualquier dirección de esos medios poros sería:

$$v = k \frac{dH}{dx} [1]$$

Donde v es la velocidad del flujo, k la conductividad hidráulica o coeficiente de permeabilidad y dH es el cambio de la cabeza total en una distancia dx ...

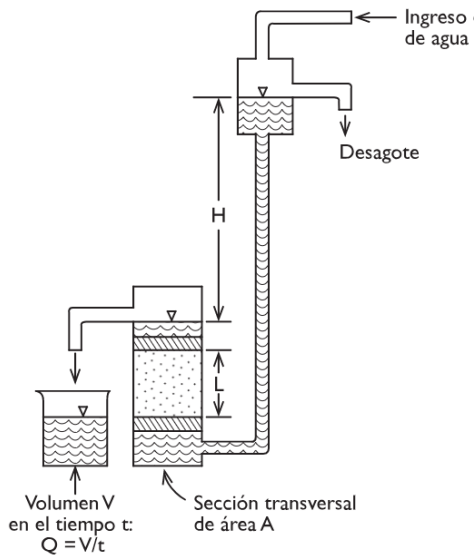


Figura 3. Permeámetro de cabeza constante (Freeze & Cherry, 1979).

k depende de la permeabilidad relativa del suelo en relación con el fluido, y de la viscosidad dinámica.

$$k = \gamma_w K / \eta [2]$$

Donde γ_w es el peso específico del agua, η la viscosidad dinámica y K es un coeficiente que representa las características del medio poroso.

La conductividad hidráulica puede ser hallada laboratorialmente usando ensayos de permeabilidad bajo cargas hidráulicas constantes y variables, mediante la norma INV E130/13 (INVIAS, 2014) o ASTM D 2434-68/1994 (ASTM, 1994). En la Figura 2 se puede apreciar el esquema típico de un permeámetro de cabeza constante.

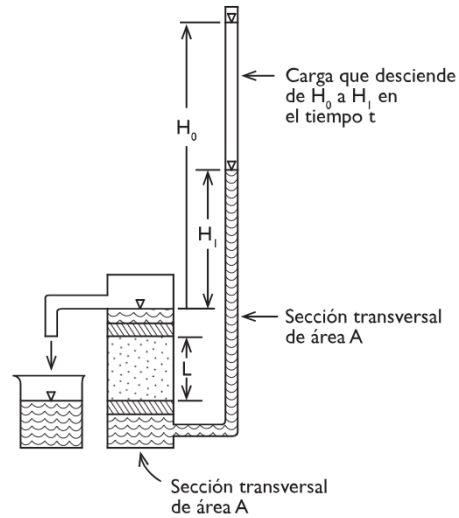


Figura 4. Permeámetro de cabeza variable (Freeze & Cherry, 1979).

Para este estudio en particular se usará un permeámetro K_{sat} de última generación como se puede ver en la Figura 5. El cambio de un suelo permeable a uno impermeable se considera en un valor cercano a 10^{-6} m/s, suelo con un valor $<10^{-9}$ m/s se define como casi impermeables.

La conductividad hidráulica para acuíferos no consolidados como el agua puede clasificarse como se ilustra en la siguiente tabla.

Tabla 1. 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

Sin embargo, algunos típicos valores para diferentes tipos de suelo pueden verse con más detalle en la Tabla 2. Esos valores pueden usarse como guía, no obstante, es necesario analizar las condiciones específicas de cada problema geotécnico para una selección adecuada de los parámetros requeridos para el diseño.

Tabla 2. Coeficientes de permeabilidad para suelos específicos (Geotechdata, 2013; ASRTE 1999, Carter & Bentley, 1991; Leonards, 1962; Dysli & Steiner, 2011; West, 1995)

Descripción	Rango (m/s)	Valor esp. (m/s)
Grava bien gradada, grava arenosa con pocos o sin finos (GW)	5×10^{-4} – 5×10^{-2}	
Grava mal gradada, grava arenosa con pocos o sin finos (GP)	5×10^{-4} – 5×10^{-2}	
Grava limosa o arenolimosa (GM)	5×10^{-6} – 5×10^{-6}	
Arena y grava de origen aluvial (GM)	4×10^{-4} – 4×10^{-3}	
Grava arcillosa o arenarcillosa (GC)	5×10^{-9} – 5×10^{-6}	
Arena bien gradada, arena con grava con pocos o sin finos (SW)	1×10^{-8} – 1×10^{-6}	

Arena muy fina bien gradada (SW)		8,4x10 ⁻⁵
Arena media bien gradada (SW)		2,2x10 ⁻³
Arena gruesa bien gradada (SW)		3,7x10 ⁻¹
Arena mal gradada, arenas con grava con pocos o sin finos (SP)	2,6x10 ⁻⁵ – 5,4x10 ⁻⁴	
Arenas limpias (SP)	1x10 ⁻⁵ – 1x10 ⁻²	
Arenas y Gravas uniformes (SP-GP)	4x10 ⁻³ – 4x10 ⁻¹	
Arena bien gradada y gravas sin finos (GW-SW)	4x10 ⁻⁵ – 4x10 ⁻³	
Arena limosa (SM)	1x10 ⁻⁸ – 5x10 ⁻⁶	
Arena arcillosa (SC)	5,5x10 ⁻⁹ – 5,5x10 ⁻⁹	
Limos inorgánicos, arenas finas arcillosas o limosas con poca plasticidad (ML)	5x10 ⁻⁹ – 1x10 ⁻⁶	
Arcillas inorgánicas, arenas finas arcillosas o limosas de baja plasticidad (CL)	5x10 ⁻¹⁰ – 5x10 ⁻⁸	
Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad (OL)	5x10 ⁻⁹ – 1x10 ⁻⁷	
Limos inorgánicos de alta plasticidad (MH)	1x10 ⁻¹⁰ – 5x10 ⁻⁸	
Arcillas inorgánicas de alta plasticidad (CH)	1x10 ⁻¹⁰ – 1x10 ⁻⁷	
Limo compactado (ML-MH)	7x10 ⁻¹⁰ – 7x10 ⁻⁸	
Arcilla compactada (CL-CH)		1x10 ⁻⁹
Arcillas orgánicas de alta plasticidad (OH)	5x10 ⁻¹⁰ – 1x10 ⁻⁷	

También mediante metodologías empíricas es posible obtener el coeficiente de permeabilidad para arenas especialmente (Hazen, 1892):

$$k = 10^{-2} D_{10}^2 \quad [3]$$

Donde D_{10} es el tamaño efectivo de partículas en mm.

De acuerdo con otras clasificaciones la permeabilidad del agua cuando atraviesa diferentes tipos de suelo, esto puede observarse en la Tabla 3.

Tabla 3. Permeabilidad del agua de acuerdo con la norma DIN 18130 (1998).

Permeabilidad	Valor
Muy alta	> 10 ⁻² m/s
Alta	10 ⁻¹ a 10 ⁻⁴ m/s
Moderada	10 ⁻⁴ a 10 ⁻⁶ m/s
Baja	10 ⁻⁶ a 10 ⁻⁸ m/s
Muy baja	< 10 ⁻⁸ m/s

Otros autores como Budhu (2010) también describen la conductividad hidráulica de acuerdo al tipo de suelo. No obstante, hay bastante colinealidad en cuanto a rangos ya mostrados, como se puede ver en la Tabla 4.

Tabla 4. Conductividad hidráulica para varios materiales (Budhu, 2010).

Tipo de material	k (cm/s)	Descripción	Drenaje
GW, GP	> 1	Alta	Muy bueno
SW, SP	1 - 10 ⁻³	Media	Bueno
SM, SC	10 ⁻³ - 10 ⁻⁵	Baja	Bajo
MH, ML	10 ⁻⁵ - 10 ⁻⁷	Muy baja	Bajo
CL, CH	< 10 ⁻⁷	Casi impermeable	Muy bajo

De acuerdo con el manual del equipo (UMS, 2016), la conductividad hidráulica k_{sat} es determinada por dos métodos alternativos:

- Mediante dos mediciones individuales
- A partir del ajuste de una función exponencial ajustada

Para ambos métodos son usadas las siguientes variables, L (longitud de la muestra), A_{Sample} (Área de la sección transversal de la muestra), A_{Bur} (área de la sección transversal de la bureta) y la diferencia de cabeza de presión (relativa al nivel de la corona).

Para el cálculo de K_s usando dos mediciones individuales $H(t)$.

$$K_s = \frac{A_{Bur}}{A_{Sample}} \cdot \frac{L}{\Delta t_{i \rightarrow i+1}} \cdot \ln \left(\frac{H_{t_i}}{H_{t_{i+1}}} \right) \quad [4]$$

Donde $\Delta t_{i \rightarrow i+1}$ es la diferencia de tiempo entre dos lecturas,

Integrando desde el estado inicial $H=H_o$ al tiempo $t=0$ a tiempo t queda:

$$\ln H(t) - \ln H_o = K_s \frac{A_{Bur}}{A_{Sample}} \cdot \frac{1}{L} \cdot t \quad [5]$$

Después,

$$H(t) = H_o \cdot e^{-K_s \cdot \frac{A_{Bur}}{A_{Sample}} \cdot \frac{1}{L} \cdot t} = a \cdot e^{(-b \cdot t)} \quad [6]$$

Si se ajusta una función exponencial a la serie de tiempo observada se determinad el coeficiente b . La conductividad hidráulica saturada es estimada por medio de:

$$K_s = \frac{A_{bur}}{A_{Sample}} \cdot L \cdot b \quad [7]$$

Si se quiere calcular K_s a partir del ajuste de una función exponencial, entonces la rata de flujo real normalizada por área, a través de la muestra de suelo es resultado de los cambios en el nivel del agua en la bureta.

$$q = \frac{Q}{A_{Sample}} = \frac{A_{Bur}}{A_{Sample}} \cdot \frac{dH}{dt} \quad [8]$$

Concordando con la ley de Darcy la rata es igual a:

$$q = -K_s \cdot H/L \quad [9]$$

Combinando las ecuaciones y separando las variables.

$$\frac{1}{H} dH = -K_s \cdot \frac{A_{Bur}}{A_{Sample}} \cdot \frac{1}{L} \cdot dt \quad [10]$$



Figura 5. Permeámetro Ksat (UMS,2016)

3 OBJETIVO DE LA INVESTIGACIÓN

Este proyecto es el epílogo de una investigación de un mayor alcance, relacionada con la permeabilidad en materiales compuestos, donde se evaluó como material base la arena del guamo con diferentes contenidos de materiales que eventualmente podrían presentar un aporte en cuanto a sus propiedades hidráulicas.

La investigación actual intenta estimar mediante métodos vanguardistas y tradicionales la permeabilidad en suelo granular arenoso con proporciones de carbonato de calcio.

Como punto interesante en este estudio particular, se presta énfasis en la comparación del coeficiente de permeabilidad calculado en condiciones saturadas, con la misma propiedad, pero parcialmente saturada, usando un infiltrómetro adaptado para la investigación.

4 MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

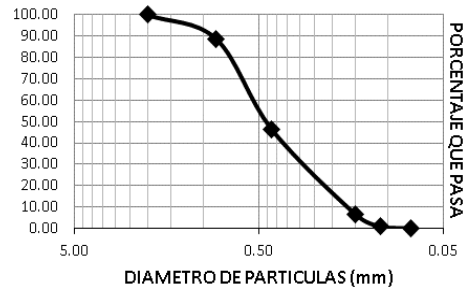
Siguiendo la metodología del macroproyecto, la cual fue exitosa en cuanto a las proporciones usadas de material que se incluyó artificialmente en el material base (arena del Guamo), se agregó carbonato de calcio en cantidades de 5, 10, 20 y 40%, permitiendo tener como muestra patrón de arranque la arena sin adiciones.

Durante esta investigación de igual manera, se evidenció que preparar las muestras de arena sin controlar la densidad, ocasionaba que el espécimen presentara una expansión en la etapa

de saturación. Por lo cual se decidió por una densidad compacta, cercana a $1,34 \text{ g/cm}^3$.

En la Figura 6 se puede observar la distribución del tamaño de partículas realizada mediante granulometría por tamizado, mostrando un suelo uniforme mal gradado, que corresponde a una arena de tamaño de grano medio

Figura 6. Distribución del tamaño de partículas de la arena del Guamo



4.2 PREPARACIÓN DE MUESTRAS

Los especímenes fueron preparados usando una relación de vacíos mínima, lograda mediante un método que ha sido específicos para esta investigación, donde se compactó el material en tres capas de 25 golpes cada una, mediante un pisón como se puede ver en la Figura 6d.

Fue utilizada una vía seca para mezclar los componentes, puesto que de esta manera se detectó que la mezcla era más homogénea (Figura 6b).



Figura 6. Proceso de preparación de las muestras

Luego de las muestras ser compactadas y garantizada su planicidad (Figura 6e), condición que debe cumplirse para obtener resultados confiables según el manual del KSAT, se procede a saturar la muestra mediante un método que no altere la fábrica artificial inducida en la preparación. La saturación se hace mediante capilaridad en una piscina, bajo una pequeña lámina de agua como se puede ver en la Figura 8 y respetando los tiempos de llenado y saturación de la Tabla 5.

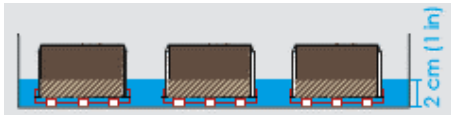


Figura 8. Proceso de saturación de las muestras

Tabla 5. Tiempos de llenado y saturación de las muestras

Material	Tiempo de llenado (aprox.)	Tiempo de saturación (aprox.)
Arena gruesa	9 min	10 min
Arena fina	45 min	1 hora
Limo	6 horas	24 horas
Arcilla	N/A	2 semanas

El procedimiento de ensamble del recipiente que aloja la muestra con el equipo debe realizarse de acuerdo al manual. Deben instalarse dos piedras porosas en los extremos del recipiente que permiten un mejor drenaje de la muestra en el momento del ensayo (Figura 9).



Figura 9. Muestra ensamblada en el recipiente

En cuanto a la permeabilidad en condición parcialmente saturada, esta fue reproducida usando un infiltrómetro mini-disk que permite inducir en la muestra pequeñas succiones, desde 0,5 cm hasta 7 cm de columna de agua (Figura 10). Como el material se considera que posee una permeabilidad alta, se recomienda utilizar succiones altas, en este caso se fijó la succión en 6 cm. La cual equivale a 0,6 kPa. En este caso las muestras fueron preparadas de la misma manera que en ensayo de permeabilidad saturada.



Figura 10. Infiltrómetro en el momento del ensayo

En la Tabla 6 se muestran un resumen de la cantidad de muestras, combinaciones y ensayos realizados en la etapa metodológica de a investigación.

Tabla 4. Programa de ensayos y muestras

Muestra/ Método	Saturada (KSAT)		No Sat.	Sat.*
	CC	CV	Succión 6 cm	CC
arena del Guamo 100% (1)	3	3	1	3
arena del Guamo 95% - CaCO ₃ 5% (2)	3	3	1	3
arena del Guamo 90% - CaCO ₃ 10% (3)	3	3	1	3
arena del Guamo 80% - CaCO ₃ 20% (4)	3	3	1	3
arena del Guamo 60% - CaCO ₃ 40% (5)	3	3	1	3

*Permeámetro convencional

Aunque se usa un método moderno, éste considera la ley de Darcy dentro de sus cálculos, por lo cual la norma INV E – 130/13 denominada: “Permeabilidad de suelos granulares (cabeza constante)”, rige perfectamente el procedimiento de este ensayo. Originalmente el equipo fue construido y diseñado para las normas DIN 19683-9/1998 y DIN 18130-1/1998, análogos a la norma del contexto colombiano.

5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla 5 muestra los resultados obtenidos para el programa de ensayos planteado. Para cada muestra ya montada en el equipo fueron realizados tres ensayos para cada una de las combinaciones planteadas, por lo tanto, se tienen 90 ensayos de permeabilidad.

Tabla 5. Coeficientes de permeabilidad obtenidos

Muestra	Método cabeza constante (m/s)			Método cabeza variable (m/s)		
1 (x10 ⁻³)	1,32	1,28	1,59	1,82	1,01	1,59
	1,73	1,62	1,43	2,76	2,77	3,07
	1,34	1,41	1,34	2,77	2,77	2,77
2 (x10 ⁻³)	1,21	1,23	1,28	1,68	1,45	1,09
	1,23	1,16	1,34	1,14	1,42	1,37
	1,15	1,13	1,14	9,09	6,71	2,48
3 (x10 ⁻⁴)	5,50	5,95	6,92	6,29	6,27	6,63
	6,03	5,44	7,26	7,28	5,69	2,72
	5,77	6,64	6,37	6,23	6,35	8,77
4 (x10 ⁻⁵)	2,29	1,34	4,80	5,79	6,21	4,24 ⁻⁵
	1,69	1,23	5,29	5,00	3,28 ⁻⁵	4,16 ⁻⁵
	1,44	1,22	6,13	4,85	3,88 ⁻⁵	3,97 ⁻⁵
5 (x10 ⁻⁶)	8,55	6,66 ⁻⁶	1,22	6,71	6,74	6,02
	9,25	4,44 ⁻⁶	1,25	6,82	6,17	6,00
	2,95 ⁻⁶	9,76 ⁻⁶	1,23	7,05	6,12	6,09

Teniendo en cuenta que normalmente la estimación de la permeabilidad se hace con métodos convencionales, para tener otra medida de control, fueron realizados ensayos de permeabilizada bajo cabeza constante, usando un permeámetro tradicional, como el mostrado en la Figura 1. La Tabla 6 muestra estos resultados. Se corrobora así, que ambos métodos muestran valores coincidentes en cuando a la conductividad hidráulica.

Tabla 6. Coeficientes de permeabilidad obtenidos

Muestra	Coefficiente de permeabilidad (m/s)
arena del Guamo 100%	4,10 x 10 ⁻³
arena del Guamo 95% - CaCO ₃ 5%	2,01 x 10 ⁻³
arena del Guamo 90% - CaCO ₃ 10%	1,68 x 10 ⁻³
arena del Guamo 80% - CaCO ₃ 20%	8,00 x 10 ⁻⁴
arena del Guamo 60% - CaCO ₃ 40%	7,60 x 10 ⁻⁴

Como se puede observar en la Tabla 5 y 6, se revela un decrecimiento de manera general en la permeabilidad, cuando se incrementa el CaCO₃ en los especímenes.

Para las muestras con solo arena del Guamo, los coeficientes de permeabilidad se encuentran en un rango entre 1,01x10⁻³ y 3,07x10⁻³ m/s. Según los estudios de Geotechdata (2013), ASRTE (1999), Carter & Bentley (1991), Leonards (1962), Dysli & Steiner (2011), West (1995) y el manual de usuario, estos valores concuerdan con lo que se esperaba del material analizado, clasificándolos según su valor de constante de permeabilidad en arena de grano medio, grava arenosa con pocos o sin finos, arena de origen aluvial, arena media bien gradada, arenas limpias, arena uniforme, arena bien gradada.

La muestra tipo 2 (con 5% de CaCO₃), ya comienza a mostrar un leve descenso con valores de permeabilidad de un orden de magnitud menor, con rangos entre 1,13x10⁻³ y 9,09x10⁻³m/s. Según el rango puede tener una tendencia a comportarse hidráulicamente

como una arena fina, lo cual es entendible desde el punto de vista físico, ya que el CaCO₃ podría ocupar algunos poros entre los granos de arena.

En cuanto a la muestra tipo 3 (10% de CaCO₃), el orden de magnitud aumenta a 10⁻⁴, entre 5,50x10⁻⁴ y 8,77x10⁻⁴ m/s). Las muestras con contenidos de 20% de CaCO₃ presentan contenidos fluctuantes entre magnitudes de 10⁻⁴, hasta valores menores de 3,28x10⁻⁵.

Finalmente, las muestras con contenidos del 40% de CaCO₃, descienden los coeficientes de permeabilidad hasta valores de 10⁻⁶. Esto correspondería a una arena limosa.

De otra parte, los resultados de la permeabilidad en condiciones no saturadas pueden consultarse en la Tabla 7. Las muestras parten de una humedad mínima y se impone una succión de 6 cm. Es claro que la succión impuesta sobre las muestras disminuye la permeabilidad en el suelo, generando un efecto de vacío donde las partículas tienden a estar unas más cerca de otras. Este vacío tiende a disminuir los espacios de movilización del agua en el esqueleto poroso, reduciendo de igual forma la permeabilidad.

Tabla 7. Coeficientes de permeabilidad en condición no saturada

Muestra	Coefficiente de permeabilidad (m/s)
arena del Guamo 100%	1,79 x 10 ⁻⁴
arena del Guamo 95% - CaCO ₃ 5%	9,62 x 10 ⁻⁶
arena del Guamo 90% - CaCO ₃ 10%	1,22 x 10 ⁻⁵
arena del Guamo 80% - CaCO ₃ 20%	1,63 x 10 ⁻⁶
arena del Guamo 60% - CaCO ₃ 40%	7,83 x 10 ⁻⁷

6 CONCLUSIONES

Fueron medidos efectivamente los coeficientes de permeabilidad usando un permeámetro KSAT de última generación, para el material granular con contenidos de carbonato de calcio. Se usó el método de cabeza constante y cabeza variable. Asimismo, fue estimada la conductividad hidráulica en condiciones parcialmente saturadas de manera efectiva fijando un valor de succión determinado.

El aumento de carbonato de calcio en las muestras revela una disminución en la conductividad hidráulica. Físicamente las partículas del carbonato de calcio se localizaron en los intersticios del esqueleto poroso, disminuyendo la garganta poral y la movilidad del agua.

Referente a la condición parcialmente saturada, aunque se requieren aun muchos análisis variando sistemáticamente la succión y la humedad presente en la muestra, es claro que el efecto tensionante que produce la succión en el suelo, causa una disminución de la permeabilidad. Lo anterior puede ser útil en estructuras geotécnicas que requieran estratos impermeables, para cualquier uso.

7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Lambe, T.W. & Whitman R.V. (1991). *Mecánica de suelos*. Edición, 2, reimpressa. Editor, Limusa, 1991. ISBN, 9681818946, 9789681818944.
- INVIAS (2014). Norma INV-E130-13. Permeabilidad de suelos granulares (cabeza constante) Especificaciones Generales de Construcción y Normas de Ensayo para Materiales de Carreteras
- ASTM (1994). Standard D2434-2014. Test Method for Permeability of Granular Soils (Constant Head)
- Head, K.H. (1982) *Manual of soil laboratory testing*, Vol 2, Pentech Press, ISBN 0-7273-1305-3.
- Valencia, C. & Triana J. (2013). Diseño, construcción y puesta en funcionamiento de un permeámetro de carga constante para suelos granulares. Trabajo de grado. Programa de Ingeniería Civil. Universidad Piloto de Colombia.
- Chegg.com, 2013. See a falling-head permeameter below. <http://www.chegg.com/homework-help/questions-and-answers/see-falling-head-permeameter--apparatus-water-flows-button-column-top-column-water-level-d-q6625799>. Ultimo acceso mayo/2018.
- Dashko, R & Shidlovskaya, A. (2016). Impact of microbial activity on soil properties. *Canadian Geotechnical Journal*, 2016, 53(9): 1386-1397, <https://doi.org/10.1139/cgj-2015-0649>.
- UMS, 2016. Operation Manual Ksat. UMS AG, Munich Germany. www.ums-muc.de
- DIN 18130 (1998). DIN 18130-1:1998-05 Baugrund – Untersuchung von Bodenproben; Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts – Teil 1: Laborversuche. Beuth Verlag GmbH.
- DIN 19683-9 (1998). Physikalische Laboruntersuchungen, Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit in wassergesättigten Stechzylinderproben. Beuth Verlag GmbH.
- Romaña, J.F. (2014). *Los Límites de la Ley de Darcy*. Disertación de Maestría. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Escuela de Ingeniería Civil, Medellín, Colombia
- McKenzie, N.J., Green, T.W. & Jacquier, D.W. (2002). Laboratory measurement of hydraulic conductivity. In: McKenzie et al.: *Soil Physical Measurement and Interpretation for Land Evaluation*. CSIRO Publ., Collingwood, Australia.
- Umar, M., Kassim, K.A. & Ping, K.T. (2016). Biological process of soil improvement in civil engineering: A review. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 8 (2016) 767-774
- Mitchell, J. & Santamarina, J.C. (2005). Biological Considerations in Geotechnical Engineering. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. Volume 131 Issue 10 - October 2005. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2005\)131:10\(1222\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:10(1222)).
- Urbuz, A., Sari, Y.D. & Yuksekdog, Z.N. (2015). Bacteria Induced Cementation in Sandy Soils. *Geomicrobiology Journal*, DOI: 10.1080/01490451.2015.1016246.
- Hazen A. 1892 Some physical properties of sand and gravel, with special reference to their use in filtration. Massachusetts State Board of Health, 24th Annual Report, Boston
- Association of Swiss Road and Traffic Engineers (ASRTE). (1999) Swiss Standard SN 670 010b. Characteristic Coefficients of soils.
- Carter, M. & Bentley, S. (1991). *Correlations of soil properties*. Penetech Press Publishers, London.
- Leonards G.A. (1962) *Foundation Engineering*. McGraw Hill Book Company
- Dysli M. & Steiner W., 2011, *Correlations in soil mechanics*, PPUR
- West, T.R., 1995. *Geology applied to engineering*. Prentice Hall, 560 pp.