

PERMEABILIDAD INTRÍNSECA DE SUELOS ARENOSOS CON PRESENCIA DE PARTÍCULAS DE LIMO Y ARCILLA.¹

Marcos A. Montoro² y Franco M. Francisca.³

Resumen: El flujo de fluidos dentro de los poros del suelo controla aspectos importantes relacionados con la mecánica de suelo. En particular, la permeabilidad intrínseca, junto con la pendiente del terreno es un parámetro de fundamental importancia en el análisis de vulnerabilidad a desastres naturales relacionados con los riesgos de inundación y los derrumbes. Este parámetro afecta considerablemente la relación infiltración-escurrimiento en el caso de grandes precipitaciones e influye en la interacción suelo-líquido pudiendo producir colapso o ablandamiento del terreno que con frecuencia se manifiesta en daños en la infraestructura apoyada o enterrada en el mismo. Debido a ello, resulta de interés estudiar los aspectos que controlan el flujo de fluidos dentro de medios granulares gruesos con distintos contenidos de finos de diverso tamaño y forma de partícula. En este trabajo se ensayan suelos arenosos que contienen distintos porcentajes de limo, zeolita y bentonita. Para diversas mezclas se determina la permeabilidad con fluidos orgánicos no miscibles con el agua, con agua destilada y con soluciones de cloruro de calcio con diferentes concentraciones. Los resultados obtenidos permiten identificar el efecto de la interacción fluido-partícula y la influencia de la granulometría en la permeabilidad intrínseca de los suelos arenosos.

Palabras clave: conductividad hidráulica, flujo, permeabilidad.

INTRINSIC PERMEABILITY OF SANDY SOILS WITH HIGH CONTENT OF SILT AND CLAY PARTICLES

Abstract: Shear resistance, bearing capacity and stress-strain behavior of soils are controlled by the presence and the physical and chemical properties of pore fluids. Intrinsic permeability and regional gradient control the amount and velocity of water infiltration to the subsurface. Those parameters are of key importance for risk analysis in problems that involves landslides and soil collapse. These phenomena frequently affect buildings and facilities producing important and costly damages. In this context, intrinsic permeability of soils is very important to quantify the expected liquid displacement in soils containing fine particles. This article presents intrinsic permeability results obtained from tests conducted on sandy soils with different contents of silt, zeolite and bentonite. The permeability was determined with different permeating liquids: distilled water, paraffin oil, kerosene, and calcium chloride solutions. The analysis of results allows us to quantify the impact of particle fluid interaction and grain size distributions characteristics on the intrinsic permeability of soils.

Keywords: flow, hydraulic conductivity, permeability.

INTRODUCCIÓN

La geotecnia clásica ha estudiado durante mucho tiempo la conductividad hidráulica y la permeabilidad intrínseca de suelos, reconociendo que la magnitud de la primera depende tanto de las características del suelo como de las propiedades físicas del fluido intersticial, mientras que la segunda usualmente se considera que sólo depende del medio

¹ Artículo recibido el 12 de Enero de 2010 y en forma revisada el 10 de Enero del 2011.

² Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Universidad Nacional de Córdoba (UNC), Departamento de Construcciones Civiles, Grupo de Investigación en Medios Porosos y Agua Subterránea, Av. Vélez Sarsfield 1611, 5016, Córdoba, Argentina. E-mail: mmontoro@efn.uncor.edu

³ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Universidad Nacional de Córdoba (UNC), Departamento de Construcciones Civiles, Grupo de Investigación en Medios Porosos y Agua Subterránea, Av. Vélez Sarsfield 1611, 5016, Córdoba, Argentina. E-mail: ffrancis@efn.uncor.edu

poroso. Debido a ello, ninguna de las ecuaciones disponibles para la determinación de la permeabilidad tiene en cuenta las características químicas del fluido (Vuković y Soro, 1992).

Cuando los suelos tienen un importante contenido de finos, los fenómenos de interacción con las moléculas de agua se tornan muy importantes (Mitchell y Soga, 2005). La modificación en la química de los fluidos dentro de los poros del suelo, puede acarrear un cambio de varios órdenes de magnitud en los valores de permeabilidad intrínseca. Es por esto que resulta de vital importancia la realización de ensayos con fluidos con propiedades químicas similares con los que estará en contacto el suelo y comprender el efecto de las distintas variables químicas en la permeabilidad determinada, ya sea “in-situ” o en laboratorio. Estos aspectos son fundamentales en la determinación de la vulnerabilidad ambiental a desastres naturales o accidentes en los cuales se vea involucrada la falla de obras destinadas a la contención y/o conducción de fluidos (Segnestam et al., 2000; United Nations Environment Programme, 2002)

Contar con resultados de conductividad hidráulica de un mismo suelo determinado con agua y con fluidos de diferentes características químicas, y la comprensión de la influencia de las distintas variables que determinan la misma, permite ahorrar tiempo de ensayo, ya que se podría estimar la conductividad hidráulica para distintos fluidos ensayando sólo uno de ellos (la conductividad hidráulica se calcula a partir de la permeabilidad la cual se asume como una propiedad constante para cada suelo).

En los últimos años se han realizado numerosos trabajos determinando la influencia de diferentes variables en los valores de conductividad hidráulica de medios porosos. Entre los trabajos más significativos, Ruhl y Daniel (1997) determinaron el efecto de la presencia de lixiviado de residuos sólidos en la permeabilidad de barreras de suelo compactado. Jo et al. (2001) determinaron cuál es el efecto de la concentración iónica, valencia, pH, tamaño del ión hidratado y prehidratación de los suelos con agua y con otras sustancias químicas en la conductividad hidráulica. Kolstad et al. (2004) realizaron ensayos para cuantificar las consecuencias de la presencia simultánea de varias especies iónicas en el fluido permeante. Se realizaron ensayos para determinar la influencia del tiempo de contacto fluido - partícula en la conductividad hidráulica (Jo et al., 2005).

En esta investigación se plantea analizar el efecto de la interacción fluido - partícula en la permeabilidad intrínseca de suelos cuando se utilizan fluidos orgánicos y soluciones iónicas en muestras con un amplio rango de tamaño de partículas. Las muestras ensayadas consisten en mezclas de arenas y diferentes porcentajes de suelos finos (limos, zeolita y bentonita). Los objetivos específicos incluyen: a) determinar el cambio de permeabilidad de los suelos ensayados utilizando agua y fluidos orgánicos como fluidos permeantes; b) evaluar la influencia de las distintas propiedades granulométricas en la permeabilidad de los suelos en contacto con fluidos de diferente naturaleza química; c) determinar si alguna de las ecuaciones disponibles para la predicción de permeabilidad de un suelo representa en forma adecuada los resultados experimentales.

PERMEABILIDAD INTRÍNSECA

En la mecánica de suelos clásica y en la ingeniería de reservorios se define una propiedad del medio poroso denominada permeabilidad intrínseca (K), la cual se considera que es sólo propiedad del medio poroso e independiente de las características del fluido (Corey, 1986; Jarsjö et al., 1997). La permeabilidad intrínseca (K) tiene dimensiones de m^2 y está relacionada con la conductividad hidráulica (k) de la siguiente manera:

$$k = \frac{K\rho g}{\mu} \quad (1)$$

En donde g es la magnitud del campo gravitatorio, ρ es la densidad del fluido y μ es la viscosidad dinámica del fluido. Se debe notar que por la definición de permeabilidad intrínseca, sólo se está independizando de las propiedades físicas del fluido y no de las posibles interacciones que el mismo puede tener con las partículas. Por simplicidad, en lo que sigue del trabajo, se hará referencia a permeabilidad en lugar de permeabilidad intrínseca y conductividad en lugar de conductividad hidráulica.

MODELOS DE PERMEABILIDAD INTRÍNSECA

La determinación precisa de la conductividad de los suelos es un aspecto fundamental de todos los trabajos geotécnicos y geoambientales, ya que este parámetro tiene un espectro de valores posibles de 10 órdenes de magnitud.

La conductividad de los suelos puede ser determinada por varios métodos, entre ellos hay ensayos de campo y de laboratorio. Su determinación en campo es compleja por la heterogeneidad inherente de los depósitos de suelos (presencia de fallas, canalículos debido a plantas y animales, etc.). Sin embargo, la determinación en laboratorio también es complicada, en principio por la representatividad de la muestra que se ensaya y luego por los errores experimentales en que se incurre con el uso de los diferentes equipos disponibles y por los tiempos de ensayos necesarios para suelos de baja permeabilidad (para un análisis detallado de estos aspectos véase Daniel et al., 1985).

Debido a la importancia de conocer la permeabilidad de los suelos en forma rápida y precisa, en el siglo pasado se han realizado muchos trabajos tratando de lograr formulaciones que permitan predecir esta propiedad a partir de diferentes características geotécnicas de los suelos que puedan ser determinadas en forma rápida y expeditiva, como por ejemplo a partir de tamaños de partículas, distribución granulométrica, límites de Atterberg, etc. (Nagaraj et al., 1993; Boadu, 2000; Schaap y Lebron, 2001; Sridharan y Nagaraj, 2005; Lee et al., 2005).

Para la determinación de las ecuaciones que permiten predecir la permeabilidad de un medio poroso se siguieron tres enfoques diferentes, uno conocido como fenomenológico (correlaciones con experimentos), otro basado en formulaciones capilares y un tercer enfoque denominado estadístico (Dullien, 1992).

Todas las expresiones conocidas para representar la permeabilidad tienen la siguiente forma

$$K = C\varphi(n)d_e^2 \quad (2)$$

En donde $\varphi(n)$ es la función de porosidad n del medio, d_e es el diámetro del tubo o poro modelado, que en la práctica se lo asume como algún diámetro de partícula representativo del medio, C es un coeficiente que depende de la estructura del medio, de la forma de los granos, de la composición mineralógica de los mismos, del coeficiente de uniformidad, del grado de compactación, etc. (Vuković y Soro, 1992).

La ecuación más conocida para la determinación de permeabilidad intrínseca de suelos es la de Kozeny - Carman, la cual puede ser derivada idealizando al medio poroso como un conjunto de tubos capilares. Para llegar a la ecuación de Kozeny - Carman, se plantea la expresión de Hagen - Poiseuille para determinar el flujo (q) a través de un tubo de radio r_p y utilizando diferentes relaciones entre la porosidad, la relación de vacíos y el radio hidráulico de los poros del suelo es posible demostrar que:

$$q = \frac{1}{C_s S_a^2 T^2} \frac{\rho g}{\mu} \frac{e^3}{1+e} i_h \quad (3)$$

Comparando la ecuación (3) con la ley de Darcy, se llega a la expresión de la permeabilidad intrínseca del medio poroso conocida como ecuación de Kozeny - Carman:

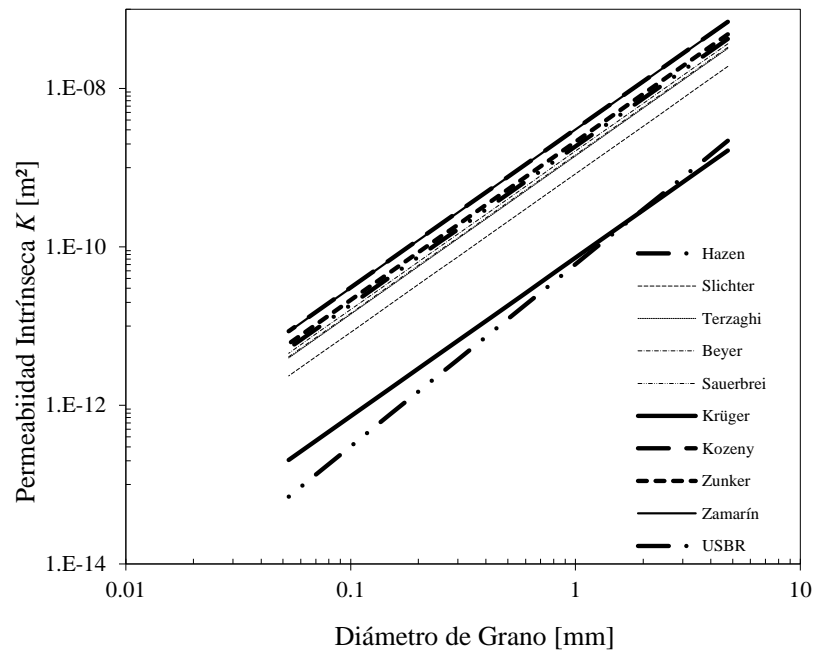
$$K = \frac{1}{C_s S_s^2 T^2} \frac{e^3}{1+e} \quad (4)$$

Tradicionalmente se asume que esta ecuación es aplicable solamente a suelos de granos gruesos (tamaños superiores a limos). Esta ecuación falla en el modelado de suelos del tipo de arcillas debido a que los mismos poseen estructuras de porosidad doble. Sin embargo hay experiencias publicadas en las que la ecuación en cuestión es empleada con éxito en la predicción de la permeabilidad de suelos del tipo de arcillas con la consideración de que la superficie específica debe ser determinada con mucha precisión (Schaap y Lebron, 2001; Chapuis y Aubertin, 2003).

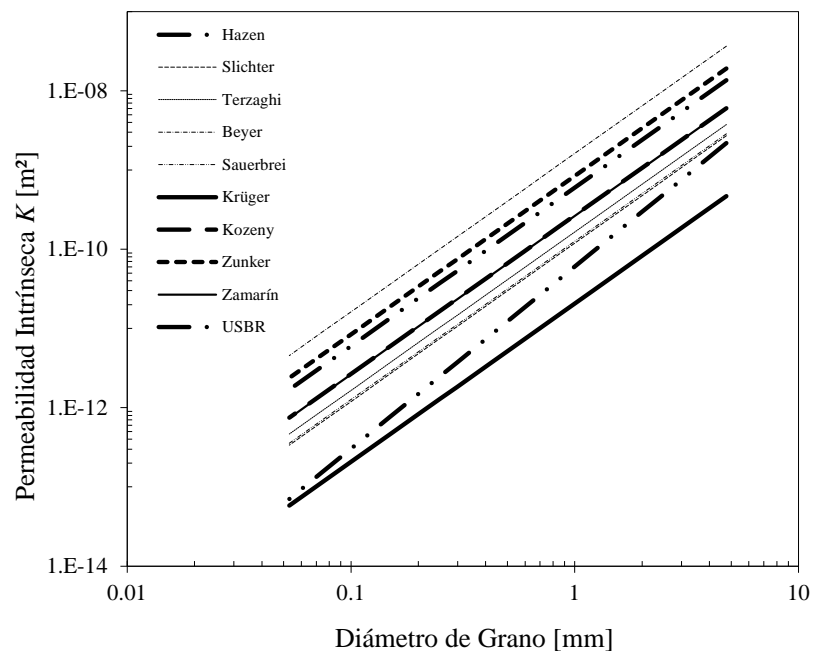
Vuković y Soro (1992) compilaron los modelos más utilizados tradicionalmente para la predicción de la permeabilidad de suelos. En la Figura 1 se muestra la representación de varios de estos modelos. Para los cálculos, se asumen dos estructuras granulares diferentes, una cúbica simple con porosidad $n = 0.47$ (Figura 1a) y una tetraédrica con porosidad $n = 0.26$ (Figura 1b). También se considera al medio compuesto por un solo tamaño de grano comprendido dentro del rango de las arenas.

En la Figura 1a se puede apreciar que el modelo que predice los valores de permeabilidad más elevados para cada tamaño de grano es el de Kozeny. Los menores valores se obtienen con el modelo de USBR (para diámetros de granos inferiores a 2 mm) y el de Krüger (para diámetros mayores a 2 mm). Al variar la porosidad del suelo, el modelo que

predice los mayores valores es el de Beyer. Para las bajas porosidades el modelo que predice los menores valores para suelos con tamaños de partículas en el rango de las arenas es el de Krüger.



(a)



(b)

Figura 1: Representación gráfica en escala doble logarítmica de los distintos modelos de permeabilidad intrínseca; a) suelo arenoso con estructura cúbica; b) suelo arenoso con estructura tetraédrica.

INTERACCIÓN FLUIDO - PARTÍCULA

Ninguno de los modelos de predicción de la permeabilidad intrínseca tiene en cuenta los efectos de interacción fluido - partícula. En los suelos granulares estas interacciones resultan despreciables; mientras que en los suelos arcillosos con alta superficie específica ocurre lo contrario ya que el efecto de las fuerzas eléctricas de superficie prevalecen respecto de las másicas.

Las caras de las partículas de arcilla contienen cargas negativas, las cuales se encuentran compensadas por cargas positivas de cationes adyacentes, de manera tal que el sistema resulte eléctricamente neutro. En ausencia de agua los cationes pueden encontrarse adsorbidos en la superficie de la partícula o bien como sales precipitadas. Cuando la arcilla entra en contacto con el agua, las sales precipitadas se disuelven y los cationes y aniones hidratados se ordenan en el espacio entre partículas resultando en mayores concentraciones de cationes cerca de la superficie sólida debido a la electronegatividad de la superficie de las mismas. Esta interacción eléctrica se opone al mecanismo de difusión de iones en distancias próximas a las partículas.

La superficie cargada y la distribución de cargas en la zona adyacente se denomina doble capa difusa (Mitchell y Soga, 2005). Si bien la doble capa se forma tanto en la superficie de las partículas gruesas como las finas, su espesor relativo es significativamente menor en el caso de las primeras.

El espesor de la doble capa (ϑ) puede obtenerse a partir de la siguiente expresión:

$$\vartheta = \sqrt{\frac{\varepsilon_0 R}{2F^2} \frac{\kappa' T}{c_0 z^2}} \quad (5)$$

En donde c_0 es la concentración de la solución en el campo lejano, $R = 8.314 \text{ J/(K mol)}$ es la constante universal de los gases, T es la temperatura absoluta $\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ es la permitividad del vacío, κ' es la permitividad real relativa del fluido, $F = 9.6485 \times 10^4 \text{ C/mol}$ es la constante de Faraday y z es la valencia de la especie iónica presente en los poros del suelo.

FACTORES QUE AFECTAN LA PERMEABILIDAD

Tanto la conductividad hidráulica como la permeabilidad de los suelos se encuentran afectadas por muchos factores. A estos factores se los puede agrupar en tres grandes grupos: factores relativos a las técnicas y equipos empleados en la medición, propiedades físico químicas del fluido permeante y propiedades del medio poroso.

Dentro del primer grupo se pueden identificar el tipo de permeámetro, el gradiente hidráulico, el tiempo de contacto previo de la muestra de suelo con el fluido utilizado como factores que afectan la conductividad hidráulica medida, en tanto que dentro del segundo grupo se puede mencionar la viscosidad y densidad del fluido, la concentración de electrolitos y el pH del permeante, por último en el tercer grupo se puede mencionar la porosidad de la muestra como el factor más importante.

En las Tablas 1 y 2 se muestra un resumen del análisis de la literatura disponible del efecto de los factores más importantes en el valor de la permeabilidad intrínseca y conductividad hidráulica de los suelos, respectivamente. Por conveniencia se han considerado por separado los factores que afectan la determinación de la conductividad hidráulica de los que afectan a la permeabilidad debido a que como hemos referido anteriormente en este trabajo esta última no depende de las características físicas del fluido permeante.

La viscosidad del fluido es un factor importante en la determinación de la conductividad hidráulica de los suelos ya que este parámetro es un indicador de la resistencia que posee el fluido a desplazarse dentro de los poros. Es de esperar que al aumentar la viscosidad disminuya la conductividad hidráulica, sin embargo hay tendencias contrarias reportadas en la literatura. Gnanapragasam et al. (1995) comparó conductividades hidráulicas de muestras de bentonita determinadas con agua y anilina, la viscosidad relativa entre anilina y agua es de 4313, con lo que se esperaba una disminución de al menos tres órdenes de magnitud en la conductividad con el fluido orgánico. Sin embargo, las mediciones arrojaron una conductividad cuatro órdenes de magnitud mayor respecto a la determinada con agua.

Por otro lado Jarsjö et al. (1997) realizó mediciones en diferentes tipos de suelos utilizando querosenes de diferentes viscosidades. Estos autores reportaron una disminución de la conductividad hidráulica con el aumento de viscosidad.

Los resultados contrapuestos se deben a que el cambio en la conductividad con la viscosidad depende tanto de la naturaleza química del fluido como de la presencia y cantidad de partículas finas en la muestra de suelo ensayada. Ya que en caso de comparar resultados obtenidos con fluidos orgánicos no polares más viscosos que el agua y agua destilada, los orgánicos no colaboran en la formación de dobles capas alrededor de las partículas finas, en consecuencia la conductividad hidráulica se incrementa.

Tabla 1: Factores que afectan la permeabilidad intrínseca del suelo.

Permeabilidad Intrínseca			
Factor	Cambio del factor	Cambio en K	Referencia
Concentración de iones	↑ < 3 órdenes de magnitud	↑ 2 < ΔK < 5 órdenes de magnitud	Gleason et al. (1997), Petrov y Rowe (1997), Stern y Shackelford (1998), Jo et al. (2001), Lee y Shackelford (2005)
Valencia	↑ < 1 orden de magnitud	↑ 1 < ΔK < 4 órdenes de magnitud	Jo et al. (2001)
Concentración de múltiples especies iónicas	↑ < 3 órdenes de magnitud	↑ 1 < ΔK < 4 órdenes de magnitud	Ruhl y Daniel (1997), Kolstad et al. (2004), Muhammad (2004)
Prehidratación	-	↑ 1 < ΔK < 4 órdenes de magnitud	Ruhl y Daniel (1997), Gleason et al. (1997), Schenning (2004), Muhammad (2004)
pH	↑ < 1 orden de magnitud	↑ < 6 órdenes de magnitud	Ruhl y Daniel (1997), Jo et al. (2001)

Tabla 2: Factores que afectan la conductividad hidráulica del suelo.

Conductividad Hidráulica			
Factor	Cambio del factor	Cambio en k	Referencia
Viscosidad relativa	↑ < 1 orden de magnitud	↓ < 1 orden de magnitud	Gnanapragasam (1995), Jarsjö et al. (1997)
Relación de vacíos	↑ ~ 1 orden de magnitud	↑ ~ 2 órdenes de magnitud	Schenning (2004), Muhammad (2004)
Gradiente hidráulico	↑ > 3 órdenes de magnitud	↑ < 1 orden de magnitud	Muhammad (2004)
Tipo de permeámetro	-	Como máximo un orden de magnitud	Daniel et al. (1985), Kodikara et al. (2002), Muhammad (2004)

Montoro y Francisca (2010) determinaron que el efecto de la naturaleza química del fluido en la determinación de la conductividad hidráulica es de gran importancia en medios granulares con contenidos de partículas arcillosas superiores al 5%.

Tanto la porosidad como la relación de vacíos de las muestras son de gran importancia debido a que representan cuál es el espacio de la misma disponible para el desplazamiento de fluidos. Muhammad (2004) y Schenning (2004) reportan incrementos en la conductividad hidráulica de muestras de bentonita con el aumento en la relación de vacíos. Sin embargo la conductividad hidráulica depende tanto de la relación de vacíos como de otras características del suelo. Esto implica que para una misma relación de vacíos los posibles valores de conductividad sean muy variados dependiendo de la naturaleza del suelo.

Las propiedades químicas de las soluciones inorgánicas tales como la concentración iónica, la valencia de la especie presente o la presencia de diferentes especies iónicas generan cambios en los espesores de las doble capas difusas que se forman alrededor de las partículas finas. Gleason et al. (1997), Petrov y Rowe (1997), Stern y Shackelford (1998), Jo et al. (2001), Lee y Shackelford (2005) reportan aumentos entre 2 y 5 órdenes de magnitud en la permeabilidad de muestras de bentonitas sódicas y arenas mezcladas con diferentes porcentajes de bentonita, cuando se cambia el fluido permeante por soluciones monoiónicas con concentraciones entre 0.25 M y 1 M.

Jo et al. (2001) encontró que la permeabilidad aumenta con la valencia iónica, reportando cambios más importantes cuando se cambia de valencia +1 a valencia +2 que cuando el cambio es de valencia +2 a +3, siendo más importante los cambios a medida que se aumenta la concentración de electrolitos. Además, cuando en la solución permeante existe presencia simultánea de más de una especie iónica se verifica un incremento en la permeabilidad con el aumento de la concentración iónica (Kolstad et al., 2004, Muhammad, 2004).

El efecto de la prehidratación de las muestras resulta importante, ya que la formación de la microestructura de los suelos finos depende de las características del fluido presente en los poros (concentración y pH) (Palomino y Santamarina, 2005). Las estructuras resultantes pueden ser floculadas o dispersas. Las primeras se caracterizan por ser más permeables que las segundas. Gleason et al. (1997), encontraron entre 1 y 4 órdenes de magnitud de diferencia entre los valores finales de permeabilidad de muestras prehidratadas con agua respecto de las prehidratadas con una solución polielectrolítica lo que resalta la importancia de la microestructura lograda.

Según los resultados reportados por Ruhl y Daniel (1997) y Jo et al. (2001), para valores de pH cercanos a dos se observan importantes cambios en la permeabilidad medida con agua destilada. Cuando se usan soluciones salinas el efecto puede observarse hasta valores de pH cercanos a seis. El notable aumento de la permeabilidad a muy bajos pH se condice con el efecto del mismo en la microestructura de suelo debido a la mayor presencia de cargas eléctricas positivas que pueden ser atraídas a la superficie de las partículas finas neutralizando sus cargas negativas y evitando la formación de doble capas de espesor importante y también por la posible disolución de minerales (Palomino y Santamarina, 2005).

MATERIALES Y MÉTODOS

Los materiales granulares utilizados en este trabajo son bentonita sódica y zeolita provistas por Minarmco S. A., limos de origen loésico, y arena. Las principales propiedades de los mismos se muestran en la Tabla 3. Como fluidos permeantes se utilizaron agua destilada, tres hidrocarburos saturados o parafinas (querosén y dos aceites de parafinas con distintas viscosidades, de marca comercial Vaseplus) y soluciones de cloruro de calcio con tres concentraciones diferentes. Las principales propiedades de estos fluidos se muestran en la Tabla 4.

Se fabricaron distintas muestras mezclando arena con diferentes porcentajes de los suelos finos. Esto se hizo para estudiar los efectos de distintas propiedades granulométricas de los medios porosos en la conductividad hidráulica (e.g. tamaño efectivo de grano, coeficientes de curvatura y uniformidad, superficie específica, etc.). En particular se realizaron ensayos sobre la muestra de arena y en arena mezclada con 2%, 5%, 12% y 25% de limo, zeolita y bentonita para el caso de los ensayos realizados con fluidos orgánicos, mientras que para los ensayos realizados con soluciones inorgánicas se utilizaron las mismas mezclas excepto que no se estudió el comportamiento de aquellas con un contenido del 2% de suelos finos.

Los ensayos de conductividad hidráulica se realizaron en permeámetros de pared rígida de 3.5 a 5cm de diámetro y alturas entre 5 y 7.5cm. Para todos los ensayos se utilizó la técnica de carga variable de acuerdo a los lineamientos generales de las normas ASTM D5856 (ASTM, 2007).

Tabla 3: Principales propiedades de los suelos empleados.

Propiedad	Arena	Limo	Zeolita	Bentonita	Estándar/Método
Gravedad específica	2.68	2.63	2.49	2.67	ASTM D854
Tamaño medio de partícula [mm]	1	0.05	0.011	NA	ASTM D422
Tamaño efectivo de partículas d_{10} [mm]	0.41	0.0008	0.0001	NA	ASTM D422
Partículas < 0,074 mm [%]	1.28	61.4	100	100	ASTM D422
Partículas < 0,002 mm [%]	0	20.88	32.76	84.77	ASTM D422
Coefficiente de uniformidad	2.93	87.50	200	NA	ASTM D422
Coefficiente de curvatura	0.94	1.45	1.62	NA	ASTM D422
Límite líquido [%]	NP	25.31	49.9	301	ASTM D4318
Índice plástico [%]	NP	7.97	7.82	231	ASTM D4318
Actividad	N/A	0.38	0.24	2.72	N/A
Contenido de sales [%]	N/A	0.8	2.65	< 0.1 %	DNV E-18
Superficie Específica [m ² /gr]	0.001 – 0.04 ^(a)	0.04 – 1.1 ^(a)	61.16	731	Método Europeo
Capacidad de Intercambio Catiónica [mEq/100gr]	1.27 x 10 ⁻⁴ – 0.005	0.005 – 0.14	7.82	93.4	Método Europeo
Clasificación Unificada	SP	CL-ML	MH	CH	ASTM D2487

Nota: NP = No Plástico, N/A = No aplica ^(a) Santamarina et al. (2002)

Tabla 4: Propiedades de los fluidos orgánicos empleados.

Propiedad	Querosén	Aceite de Parafina V90	Aceite de Parafina V180	Agua Destilada
Color	Rojo	Incoloro ^(a)	Incoloro ^(a)	Incoloro
Olor	Fuerte	Inodora ^(a)	Inodora ^(a)	Inodoro
Densidad [Kg/m ³]	830 ^(b)	846 ^(a)	867 ^(a)	1000
Viscosidad [Ns/m ²]	2.05 x 10 ⁻³ ^(b)	0.015	0.03	1.01 x 10 ⁻³
Solubilidad en Agua	Insoluble ^(b)	Insoluble ^(a)	Insoluble ^(a)	No Aplica
Permitividad Dieléctrica real a 200 MHz ^(c)	~2	~2	~2	78.5

Nota: ^{a)} Datos del proveedor, ^{b)} Mercer y Cohen (1990), ^{c)} Rinaldi y Francisca (2006).

Para la confección de las muestras se empleó suelo seco en estufa durante 24 horas a una temperatura de 105°C. Las diferentes fracciones de suelo seco fueron mezcladas en las proporciones correspondientes a la muestra que se quería obtener. Las mezclas fueron humedecidas antes de su colocación en el permeámetro para facilitar su acomodamiento en el mismo. A las mismas se les incorporó aproximadamente un 10% de humedad, salvo a las muestras con 12 y 25% de bentonita, en las que debido a la alta superficie específica de la misma, se debió incorporar una humedad aproximadamente 5% más alta que la correspondiente al límite líquido. El humedecimiento fue realizado con agua destilada salvo en el caso de las muestras ensayadas con los fluidos orgánicos, en las que se utilizó el mismo fluido utilizado en los ensayos de permeabilidad.

A las muestras humedecidas se las colocó en los permeámetros, llenando los mismos en tres capas compactadas con 25 golpes de una varilla con punta roma de 10.95 mm. de diámetro. Luego se cerró el permeámetro ajustando todas sus tuercas para garantizar completa estanqueidad durante el ensayo.

Una vez cerrado el permeámetro y previo a la determinación de la conductividad hidráulica se hizo circular por las muestras entre cuatro y seis volúmenes porales del fluido de compactación. En todos los ensayos de permeabilidad se hicieron circular al menos tres volúmenes porales de fluido por la muestra y se realizaron al menos tres determinaciones de conductividad hidráulica, con el objeto de minimizar los errores de lectura. Para el caso de la serie de ensayos realizados con las soluciones inorgánicas de diferentes concentraciones se recolectó el fluido permeante a la salida de la muestra. A este fluido se le realizó una medición de conductividad eléctrica para monitorear el arrastre o retención de iones para cada volumen poral de permeado.

Para la finalización de los ensayos realizados con las soluciones inorgánicas se verificó que la conductividad eléctrica del fluido recuperado se mantuviera constante para distintas fracciones de volúmenes porales, o hayan circulado más de 3 volúmenes porales por la muestra.

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En la Figura 2 se muestra la influencia de la relación de vacíos en el cambio de la permeabilidad intrínseca. Para el caso de los fluidos orgánicos, (Figura 2a; 2b y 2c) las permeabilidades se ajustan a una línea recta, por lo que se puede emplear un modelo como el de Kozeny - Carman para su representación, realizando previamente algún ajuste de las constantes para el caso particular (ecuación 4).

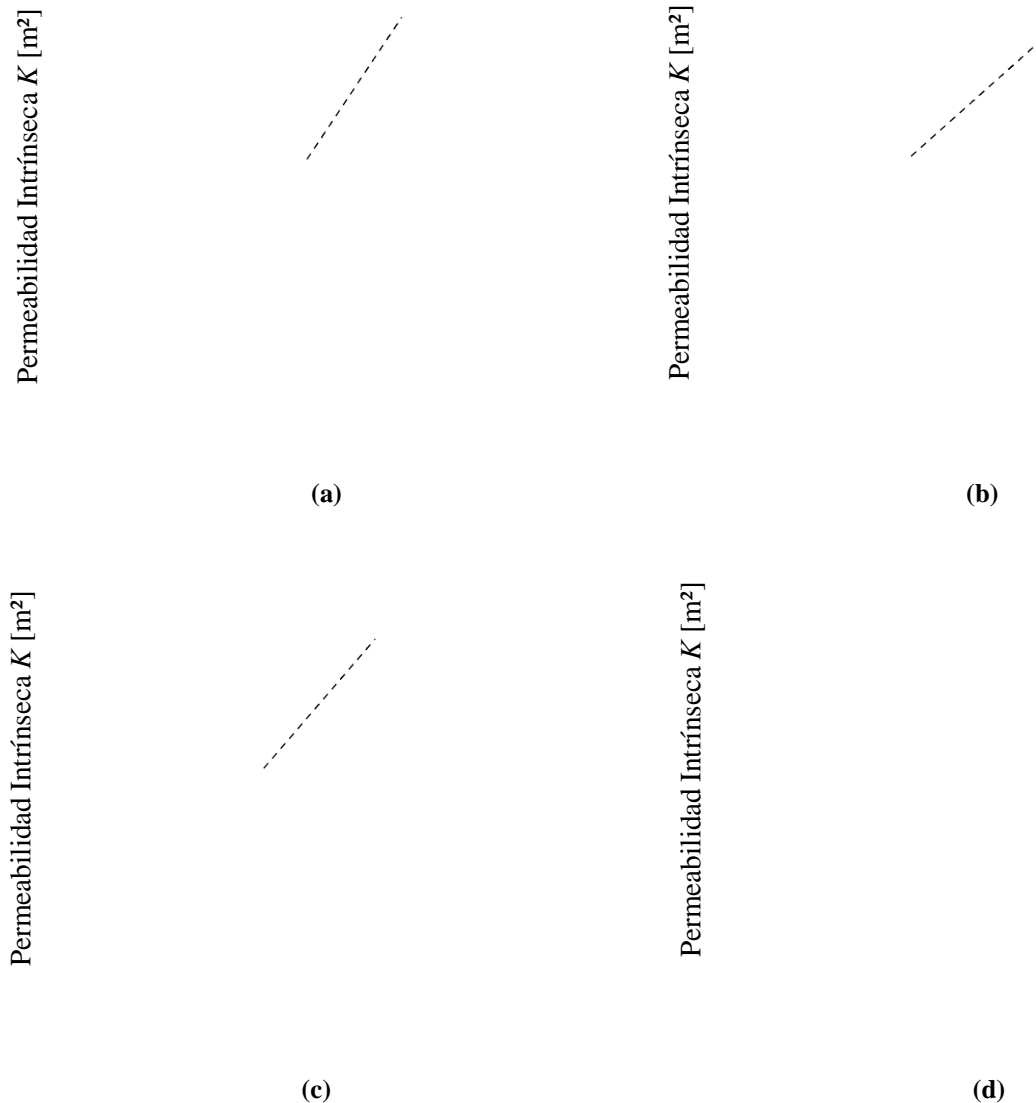


Figura 2: Cambio en la permeabilidad intrínseca con el cambio en una función de la relación de vacíos para las muestras ensayadas con: a) querosén; b) aceite de parafina V90; c) aceite de parafina V180; d) agua.

Para el caso de las permeabilidades determinadas con agua (Figura 2d), no se encuentra relación como en el caso de los fluidos orgánicos, sino que los datos se representan en forma muy dispersa en el gráfico. Esto se debe a dos motivos principales: en primer lugar al efecto de interacción fluido-partícula debido a la formación de dobles capas que en general se traduce en menor espacio poral para el flujo; en segundo lugar a la microestructura del suelo cuando el contenido de finos es importante, ya que dependiendo de la humedad presente al momento de armar la muestra, la forma

y energía de compactación pueden determinar microestructuras diferentes con iguales densidades y relaciones de vacíos, pero con comportamientos hidráulicos muy diferentes.

El coeficiente de uniformidad y el coeficiente de curvatura son propiedades del suelo a los cuales se les atribuye una importante influencia en la magnitud de la permeabilidad. Esto se debe a que al aumentar el valor de estos coeficientes, las curvas granulométricas presentan formas más tendidas, lo que indica la presencia de muchos tamaños de partículas diferentes en la muestra. Cuando la muestra de suelo es bien graduada, se asume que las partículas de menor tamaño ocupan el espacio que dejan las de mayor tamaño, con lo cual se tienen poros de tamaños pequeños y en consecuencia disminuye el valor de la permeabilidad.

Otro factor sobre el que impacta la presencia de diferentes tamaños de granos es la tortuosidad del medio, ya que al haber poros de diferentes tamaños aumenta la complejidad de las interconexiones y con ello la longitud de las líneas de flujo seguida por las moléculas de fluido.

En la Figura 3 y 4 se muestran los resultados de permeabilidad obtenidos con los diferentes fluidos en función de los coeficientes de uniformidad (C_u) y curvatura (C_c) de cada una de las muestras ensayadas. En general se puede apreciar una cierta tendencia a la disminución de la permeabilidad con el aumento tanto de C_u como de C_c .

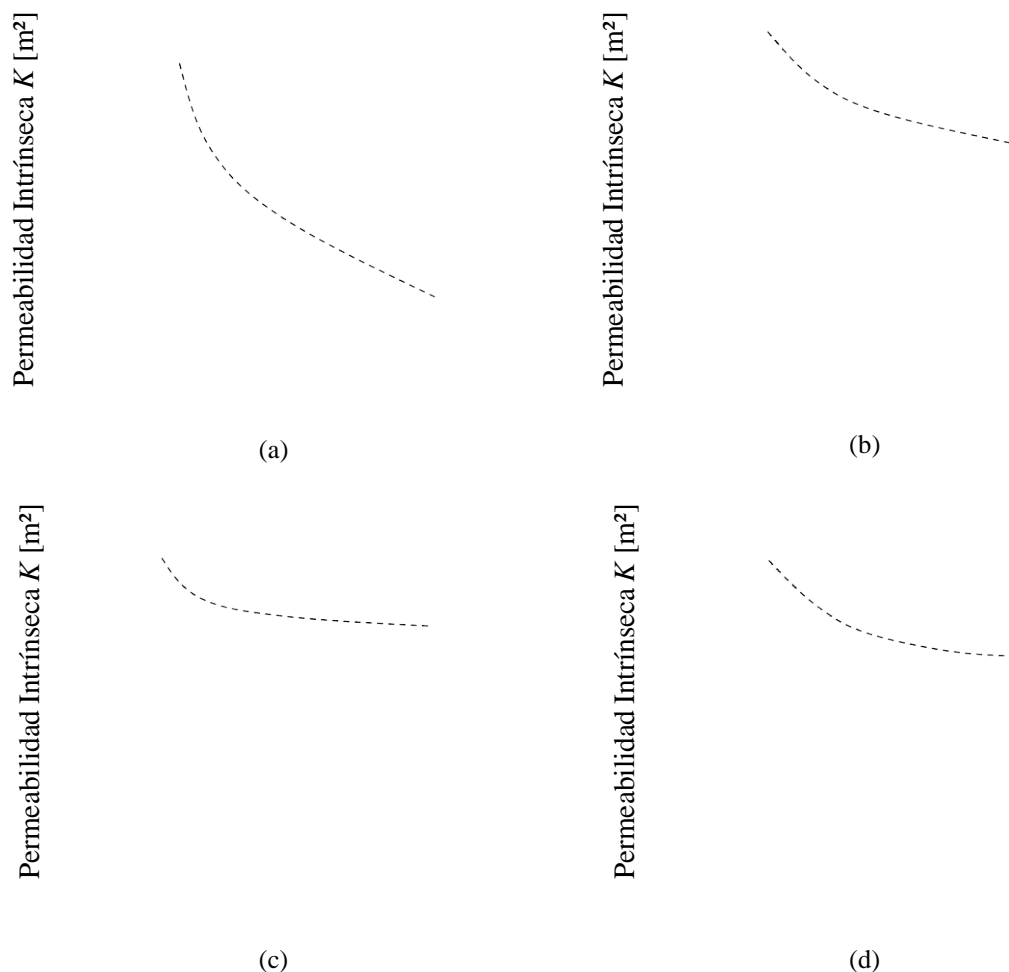


Figura 3: Permeabilidad intrínseca en función del coeficiente de uniformidad determinada con: a) agua; b) querosén; c) aceite de parafina V90; d) aceite de parafina V180.

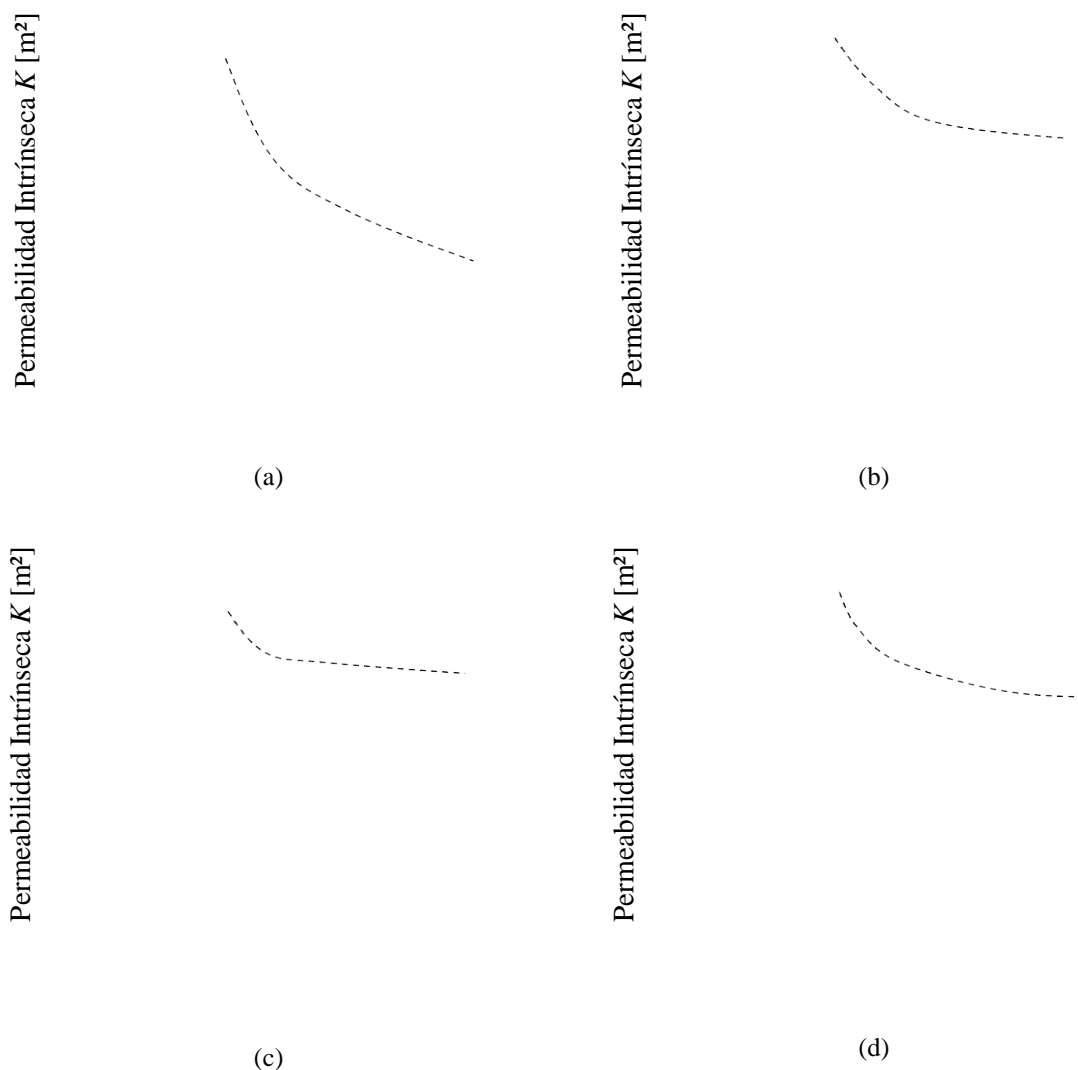


Figura 4: Permeabilidad intrínseca en función del coeficiente de curvatura determinada con: a) agua; b) querosén; c) aceite de parafina V90; d) aceite de parafina V180.

Las discrepancias en esta tendencia se deben a la forma de definición de los coeficientes, ya que ambos dependen de los diámetros d_{10} , d_{30} y d_{60} . De estos diámetros, el que mejor representa el comportamiento hidráulico de las muestras en cuestión es el d_{10} , aunque para el caso de las muestras con más del 12% de finos el tamaño efectivo es prácticamente el mismo, la variación de permeabilidad es insignificante, pero el cambio en los coeficientes de uniformidad y curvatura resulta muy significativo.

Las variaciones de la permeabilidad con la relación de vacíos, coeficiente de uniformidad, coeficiente de curvatura y tamaño efectivo de partículas indican que existe una cierta relación entre la permeabilidad y las propiedades granulométricas para los suelos ensayados.

En las Figuras 5 y 6 se presenta la relación entre los valores de permeabilidad determinados con una solución de 10 mol/m³ de CaCl₂ y el coeficiente de uniformidad (C_u) y el coeficiente de curvatura (C_c), respectivamente. Para las otras concentraciones empleadas se obtuvo tendencias similares. Las tendencias observadas guardan relación con los patrones esperados, ya que se verifica una disminución de los valores de la permeabilidad de las muestras con el aumento del coeficiente de uniformidad (Figura 5) y el coeficiente de curvatura (Figura 6). Tanto para la variación de la permeabilidad con el coeficiente de uniformidad, coeficiente de curvatura y diámetro efectivo, se verifica un aumento en

la dispersión de los valores a medida que aumenta la superficie específica de las muestras ensayadas (o el contenido de partículas finas).

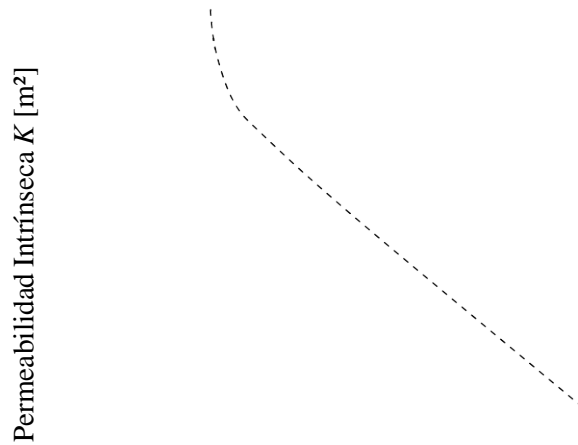


Figura 5: Cambio en la permeabilidad intrínseca con el coeficiente de uniformidad determinado con una solución de 10 mol/m³ de CaCl₂.

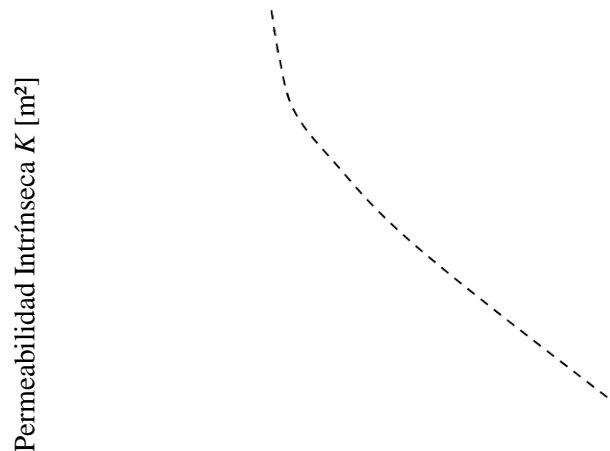


Figura 6: Cambio en la permeabilidad intrínseca con el coeficiente de curvatura determinado con una solución de 10 mol/m³ de CaCl₂.

Se trató de representar todos los resultados obtenidos a partir de los diferentes modelos fenomenológicos de permeabilidad disponibles. Se calculó la permeabilidad para cada muestra y para cada uno de los fluidos. Para cada uno de los modelos se determinó la norma logarítmica del error. Los modelos que presentan el menor error cambian de acuerdo al fluido. Para agua destilada el modelo que mejor ajusta es el de Zunker con un error medio de 1.17 y una desviación estándar del error de ± 1.12 , en tanto que para querosén es el de Sauerbrei con un error medio de 0.95 y una desviación estándar del error de ± 0.21 . Para el caso de los aceites de parafina, el modelo que mejor los representa es el

de Krüger con un error medio de -0.92, una desviación estándar del error de ± 0.5 para el aceite V90, en tanto que para el aceite V180 el error medio es -0.94 y la desviación estándar del error es de ± 0.49 .

Para el caso de los valores determinados con concentraciones de cloruro de calcio de 1 mol/m^3 y 10 mol/m^3 el mejor ajuste se logra con el modelo de Slichter, con un error medio de 0.73 y desviación estándar del error de ± 0.73 . En el caso de las muestras ensayadas con la solución de 1000 mol/m^3 de CaCl_2 el mejor ajuste se obtuvo con el modelo de Terzaghi, el cual presentó un error medio de 0.82 y desviación estándar del error de ± 0.67 .

De la aplicación de los modelos se observó que en todos los casos la permeabilidad para los fluidos orgánicos fue subestimada mientras que para el caso del agua destilada y las soluciones de cloruro de calcio, las mismas fueron sobreestimadas.

CONCLUSIONES

En este trabajo se determina la permeabilidad de mezclas de arena con limo, zeolita y bentonita, ensayadas con fluidos orgánicos e inorgánicos. Las principales conclusiones obtenidas se detallan a continuación:

Los factores más importantes a determinar en problemas de flujo son la conductividad hidráulica y la permeabilidad intrínseca del medio poroso. Según sean las características del fluido y posibles mecanismos de interacción fluido-partícula pueden verse afectada tanto la conductividad hidráulica como la permeabilidad intrínseca. La velocidad con la cual el fluido puede desplazarse dentro de los poros del suelo controla los mecanismos de escorrentía e infiltración en el caso de grandes precipitaciones lo cual es determinante para la erosión del terreno como también frente a posibles grandes inundaciones.

Los valores de permeabilidad intrínseca determinados sobre diferentes muestras con los distintos fluidos orgánicos son similares entre sí y similares entre muestras con igual contenido de fracción fina pero de diferente naturaleza. Los valores determinados con agua presentan un amplio espectro y son muy diferentes entre muestras con igual contenido de fracción fina debido al efecto de interacción fluido-partícula y a la posibilidad de formación de estructuras dispersas. La alta conductividad hidráulica observada en los suelos en contacto con fluidos orgánicos favorecería el rápido escurrimiento de estos líquidos lo que genera un problema importante para la detección de fallas en tuberías o ductos que transportan hidrocarburos. Consecuentemente, al no detectarse rápidamente la pérdida la contaminación del suelo y acuíferos en estos casos resulta seriamente agravada.

Se verificó una tendencia al incremento de la permeabilidad con el aumento de la relación de vacíos de las muestras, encontrando una dependencia con la relación $e^3/(1+e)$ cuando las determinaciones se realizaron con fluidos orgánicos. Sin embargo, no se pudo encontrar una dependencia clara cuando la determinación se realizó con agua, debido a la importancia que toman tanto la interacción fluido-partícula como la microestructura lograda al compactar la mezcla.

Los valores de permeabilidad de todas las muestras determinados con los diferentes fluidos presentan relación con el coeficiente de curvatura, el coeficiente de uniformidad y el diámetro efectivo de grano. Esto permitiría una mejor clasificación del comportamiento hidráulico del suelo a partir de las propiedades granulométricas del mismo.

Respecto de los ensayos realizados con electrolitos, en todos los casos la magnitud del cambio en la permeabilidad, atribuible a efectos de interacción, fue mayor para los suelos con altas superficies específicas. Estos resultados permiten corroborar la importancia relativa de las fuerzas eléctricas respecto de las másicas en este tipo de suelo. En el caso de agrietamientos y fugas en canales o tuberías sanitarias la interacción entre el líquido con una alta concentración iónica y el suelo podría modificar la estructura del terreno generando mecanismos de colapso y/o ablandamiento del terreno lo que produciría aún mayores daños en las obras de infraestructura civil.

Conocer la permeabilidad de un suelo respecto de distintos tipos de fluidos con los que pudiera estar en contacto permitirá incorporar nuevas variables en los análisis de vulnerabilidad a desastres naturales relacionados con los riesgos de inundación, derrumbes, colapso y contaminación de acuíferos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional de Córdoba (SECYT-UNC), al CONICET y a la Agencia Nacional de Promoción Científica y Técnica por el apoyo financiero brindado para la ejecución de este trabajo. M.A.M agradece a CONICET por la beca de doctorado.

REFERENCIAS

- ASTM (2007). Annual book of ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken, P.A., Vol. 4, No. 8.
- Boadu, F. K. (2000). "Hydraulic Conductivity of Soils from Grain Size Distribution: New Models", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 126, No. 8, pp. 739 – 746.
- Chapuis, R. P. y Aubertin, M. (2003). "On the Use of the Kozeny – Carman Equation to Predict the Hydraulic Conductivity of Soils", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 40, pp. 616 – 628.
- Corey, A. T. (1986). *Mechanics of immiscible Fluids in Porous Media*, Water Resources Publications, Littleton, Colorado.
- Daniel, E. D.; Anderson, D. C. y Boyton, S. S. (1985). "Fixed Wall Versus Flexible Wall Permeameters", *American Society for Testing and Materials*, Special Technical Publication, No. 867.
- Dullien, F. A. L. (1992). *Porous Media: Fluid Transport and Porous Structure*, Segunda Edición, Academic Press, San Diego.
- Gleason, M. H.; Daniel, D. E. y Eykholt, G. R. (1997). "Calcium and Sodium Bentonite for Hydraulic Containment Applications", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 123, No. 5, pp. 438 – 445.
- Gnanapragasam, N.; Lewis, B. G. y Finno, R. (1995). "Microstructural Changes in Sand – Bentonite Soils when Exposed to Aniline", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 121, No. 2, pp. 119 – 125.
- Jarsjö, J.; Destouni, G. y Yaron, B. (1997). "On the Relation Between Viscosity and Hydraulic Conductivity for Volatile Organic Liquid Mixtures in Soils", *Journal of Contaminant Hydrology*, No. 25, pp. 113 – 127.
- Jo, H. Y.; Katsumi, T.; Benson, C. H. y Edil, T. B. (2001). "Hydraulic Conductivity and Swelling of Nonprehydrated GCLs Permeated with Single – Species Salt Solutions", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 127, No. 7, pp. 557 – 567.
- Jo, H. Y., Benson, C. H., Shackelford, C. D., Lee, J. M. y Edil, T. B. (2005). "Long – Term Hydraulic Conductivity of a Geosynthetic Clay Liner Permeated with Inorganic Salt Solutions", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 131, No. 4, pp. 405 – 417.
- Kodikara, J. K., Rahman, F. y Barbour, S. L. (2002). "Towards a more Rational Approach to Chemical Compatibility Testing of Clay", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 39, pp. 597 – 607.
- Kolstad, D. C.; Benson, C. H. y Edil, T. B. (2004). "Hydraulic Conductivity and Swell of Nonprehydrated Geosynthetic Clay Liners Permeated with Multispecies Inorganic Solutions", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 130, No. 12, pp. 1236 – 1249.
- Lee, J. M. y Shackelford, C. D. (2005). "Impact of Bentonite Quality on Hydraulic Conductivity of Geosynthetic Clay Liners", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 131, No. 1, pp. 64 – 77.
- Lee, J. M.; Shackelford, C. D.; Benson, C. H.; Jo, H. Y. y Edil, T. B. (2005). "Correlating Index Properties and Hydraulic Conductivity of Geosynthetic Clay Liners", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 131, No. 11, pp. 1319 – 1329.
- Mercer, J. W. y Cohen, R. M. (1990). "A Review of Immiscible Fluids in the Subsurface: Properties, Models, Characterization and Remediation", *Journal of Contaminant Hydrology*, No. 29, pp. 319 – 346.
- Mitchell, J. K. y Soga, K. (2005). *Fundamentals of Soil Behavior*, 3rd Edition, John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey.
- Montoro, M. A. y Francisca, F. M. (2010). "Soil Permeability Controlled by Particle – Fluid Interaction", *Geotechnical and Geological Engineering*, Springer, Verlag, Vol. 28, No. 6, pp. 851 – 864.
- Muhammad, N. (2004). "Hydraulic, Diffusion and Retention of Inorganic Chemicals in Bentonite", PhD Thesis, University of South Florida.
- Nagaraj, T. S., Pandian, N. S. y Narasimha Taju, P. S. R. (1993). "Stress State – Permeability Relationships for Fine – Grained Soils", *Geotechnique*, Vol. 43, No. 2, pp. 333 – 336.
- Palomino, A. M. y Santamarina, J. C. (2005). "Fabric Map for Kaolinite: Effect of pH and Ionic Concentration of Behavior", *Clays and Clay Minerals*, Vol. 53, No. 3, pp. 211 – 223.
- Petrov, R. y Rowe, R. (1997). "Geosynthetic Clay Liner (GCL) – Chemical Compatibility by Hydraulic Conductivity Testing and Factors Impacting its Performance", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 34, pp. 863 – 885.
- Rinaldi, V. A. y Francisca, F. M. (2006). "Removal of Immiscible Contaminants from Sandy Soils Monitored by Means of Dielectric Measurement", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 132, No. 8, pp. 931 – 939.

- Ruhl, J. L. y Daniel, D. E. (1997). "Geosynthetic Clay Liners Permeated with Chemical Solutions and Leachates", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 123, No. 4, pp. 369 – 381.
- Santamarina, J. C., Klein, K. A., Wang, Y. H. y Prencke, E. (2002). "Specific Surface: Determination and Relevance", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 39, pp. 233 – 241.
- Schaap, M. G. y Lebron, I. (2001). "Using Microscope Observations of Thin Sections to Estimate Soil permeability with the Kozeny – Carman Equation", *Journal of Hydrology*, Vol. 251, pp. 186 – 201.
- Schenning, J. A. (2004). "Hydraulic Performance of Polymer Modified Bentonite", Master Thesis, University of South Florida.
- Segnestam, L., Winograd, M. y Farrow, A. (2000). "Developing Indicators: Lessons Learned from Central America", World Bank, Washington D.C.
- Sridharan, A. y Nagaraj, H. B. (2005). "Hydraulic Conductivity of Remolded Fine Grained Soils versus Index Properties", *Geotechnical and Geological Engineering*, Springer, Vol. 23, pp. 43 – 60.
- Stern, R. T. y Shackelford, C. D. (1998). "Permeation of Sand – Processed Clay Mixtures with Calcium Chloride Solutions", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 124, No. 3, pp. 231 – 241.
- United Nations Environment Programme (2002). Global Environmental Outlook 3 (GEO-3): Past, Present and Future Perspectives, London.
- Vuković, M. y Soro A. (1992). "*Determination of Hydraulic Conductivity of Porous Media from Grain Size Distribution*", Water Resources Publications, Littleton, Colorado.