

Variación de la conductividad hidráulica en suelos residuales compactados según parámetros de compactación

Tkachuk, Matías Gabriel ^a, Piñeyro, Verónica Alejandra ^a, Franchini, Andrea Belén ^a, Demonari, Fernando Emanuel ^b, Reinert, Hugo Orlando ^c, Bogado, Gustavo Orlando ^d

^a Integrante del proyecto, Becario de Grado, Estudiante de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones (UNaM), Oberá, Misiones, Argentina.

^b Becario de Laboratorio, Estudiante de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones (UNaM), Oberá, Misiones, Argentina.

^c Director del proyecto, Ingeniero Civil, Docente Departamento Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones (UNaM), Oberá, Misiones, Argentina.

^d Co-director del proyecto, Ingeniero Civil, Docente Departamento Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones (UNaM), Oberá, Misiones, Argentina. Investigador Asistente. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, CONICET.

e-mails: matiastkachuk@gmail.com, veronica.alejandra.93@gmail.com, andreabelen30@gmail.com,
fernandodemonari@gmail.com, reinert@fio.unam.edu.ar, gustavobogado@fio.unam.edu.ar,

Resumen

Los suelos compactados son utilizados en diversas aplicaciones geotécnicas. Por lo general, el nivel de compactación mejora diferentes propiedades, entre ellas, la conductividad hidráulica. En este artículo se detallan mediciones de conductividad hidráulica saturada en suelos residuales compactados. Se describen los procedimientos de confección de los permeámetros y primeros resultados de mediciones de dicho parámetro. Los resultados obtenidos constituyen las primeras mediciones realizadas en la región y se confirmó la disminución de la conductividad hidráulica con el aumento de la energía de compactación

Palabras Clave – Densidad seca, Energía de compactación, Conductividad hidráulica, Humedad, Lateríticos, Permeabilidad

1. Introducción

La conductividad hidráulica de suelos arcillosos compactados es el aspecto fundamental que gobierna el flujo en los medios porosos, y depende de numerosas propiedades entre las que se encuentran la composición mineralógica, los límites de Atterberg, la distribución del tamaño de partículas y las condiciones de compactación (Benson et al., 1994; Benson et al. 1994). Estas últimas determinan la macro y microfábrica del suelo afectando significativamente el flujo de los fluidos a través de los mismos (Benson y Daniel, 1990, Shackelford, 1994). La compactación de suelos produce una mejora de las propiedades tanto hidráulicas como tensodeformacionales. La estructura de los suelos compactados dependerá principalmente de la humedad de compactación. Cuando se produce la compactación con humedades inferiores a la humedad óptima, se dice que se está compactando en la rama seca y en el caso de humedades mayores la rama húmeda. Según Alonso et al., (2013), los suelos compactados del lado seco del óptimo de compactación muestran una estructura abierta formada por agregados de partículas orientados aleatoriamente y tienden a tener una distribución de tamaño de poros bimodal, que se evidencia mediante la existencia de dos picos en estudios de porosimetrías. Los interporos (poros entre agregados) existentes son mayores que los intraporos (poros formados dentro de los agregados). Generalmente, en el contenido de humedad óptimo, los agregados son menos visibles, observándose una estructura más densa y con interporos menos grandes. Bogado et. al., (2017) a través de ensayos de porosimetría de intrusión sobre suelos residuales determinó que en la rama seca y húmeda se posee una microestructura caracterizada por una doble porosidad. Estos resultados resultan de amplia relevancia para determinar el nivel óptimo de compactación que se requiere para disminuir la conductividad hidráulica. El objetivo de este trabajo es comparar la conductividad hidráulica de suelos compactados a diferentes energías de compactación, Próctor normal (Tipo I) y la alternativa B (Tipo III). Estos resultados son interesantes para el proyecto ya que se busca obtener una conductividad hidráulica, como lo especifica (USEPA, 1998), para su utilización en rellenos sanitarios

2. Materiales y métodos

Las muestras utilizadas (Tabla 1), para evaluar la conductividad hidráulica mediante el ensayo a carga variable, fueron las que se disponían en el “Laboratorio de Ingeniería Civil (LIC) de la Facultad de Ingeniería” y han sido caracterizadas conforme los ensayos de referencia (límites de Atterberg -IRAM 10501-2007-, Granulometría por tamizado vía húmeda -IRAM 10507-1986-, Clasificación de Suelos -IRAM 10509-1982-, ensayos Próctor normal (Tipo I) y Próctor normal alternativa B (Tipo III) IRAM 10511, y ensayo de compresión Triaxial) en el marco del proyecto de investigación “Estudio del Comportamiento Geomecánico de Suelos Residuales Lateríticos”.

Tabla 1: Muestras de Suelo utilizadas

Designación	Procedencia	Clasificación SUCS	LL	LP	IP	Pasa Tamiz #200
FI010	Parque Termal – Oberá, Misiones	ML	49	35	14	0,968
FI011	Reserva Ecológica “El Chachí” – Oberá, Misiones	MH	57	45	12	0,967

De la curva de la rutina de ensayo Próctor Tipo III, para cada muestra de suelo, se obtuvieron puntos (Tabla 2), con su respectiva densidad seca y humedad, para volver a reproducirlos y de esta manera se los compactó en los permeámetros y luego se midió la conductividad hidráulica de los mismos.

Tabla 2: Parámetros de compactación

Muestra	Permeámetro	Densidad seca (gr/cm ³)	Humedad (%)	Observación
FI010	P17	1,48	26,5	Rama seca (RS)
	P7	1,51	28,0	Humedad óptima (HO)
	P18	1,48	29,8	Rama húmeda (RH)
	P19	1,45	31,0	Rama húmeda (RH)
FI011	P9	1,36	28,8	Rama seca (RS)
	P4	1,42	31,5	Humedad óptima (HO)
	P11	1,40	33,1	Rama húmeda (RH)
	P12	1,36	34,7	Rama húmeda (RH)

Se confeccionaron permeámetros (0,75 dm³ de capacidad de suelo), con caños de PVC 110 mm y en ellos se compactó, cada muestra de suelo, a la respectiva energía (Próctor Tipo III: $E \approx 8,40 \text{ kg.cm/cm}^3$) y humedad correspondiente. Para esto, el método de compactación utilizado, se tomó como referencia la Norma (IRAM 10511-1972) realizando algunas modificaciones, debido a que el volumen del permeámetro difiere al del molde especificado por la misma (0,94dm³). A cada muestra se compactó en cuatro capas iguales con un pisón normalizado (2500 gr de masa y 50mm de diámetro) a una altura de caída de 160mm con 39 golpes por capa.

Una vez compactado el suelo se armaron las probetas poniendo en cada extremo una capa de arena fina y seguidamente una capa de arena gruesa, luego se colocó una malla de abertura N 10 para formar un filtro. Posteriormente se taparon las probetas y se sellaron con silicona líquida.

Finalmente, pasadas las 24hs, se los insertó en un banco de ensayos, donde se generó la circulación de agua destilada a través de los mismos por medio de mangueras transparentes y se midieron las diferencias de alturas en las columnas de carga, para luego determinar la conductividad hidráulica saturada según el ensayo a carga variable conformemente a la Norma (ASTM D 5856), cuyos resultados fueron evaluados a razón de la siguiente fórmula:

$$k = \frac{aL}{At} \ln\left(\frac{h1}{h2}\right) = 2,3 \frac{aL}{At} \log\left(\frac{h1}{h2}\right)$$

Dónde:

k: coeficiente de conductividad hidráulica (cm/seg.)

a: Sección de tubo alimentador (cm²)

L: Altura de muestra (cm)

A: Sección de muestra (cm²)

t: tiempo de ensayo (seg.)

h1: carga hidráulica inicial (cm)

h2: carga hidráulica final (cm)

3. Resultados

En las figuras mostradas a continuación, para cada suelo, podemos apreciar los valores medidos del coeficiente de conductividad hidráulica a medida que transcurre el tiempo de ensayo en cada permeámetro (Pi). Se logra ver que tardan entre 25 a 30 días en estabilizar o tender a un valor.

Además, se indican para cada permeámetro ensayado los valores de conductividad medio (k Pi) obtenidos y el k límite (k = 1,00E-07 cm/seg.) que corresponde al coeficiente de conductividad hidráulica mínimo que deben tener los suelos para poder ser utilizados como material base de rellenos sanitarios, según la norma EPA 1996. Los valores de k medio, que están por debajo del k límite, son aptos para su uso.

Cabe aclarar que para los puntos de la rama seca que tenían la misma densidad seca que los puntos de la rama húmeda, no se obtuvieron valores de medición en el tiempo, ya que los mismos se comportaban como un material poroso y dificultaban su medición. Con esto podemos notar que el coeficiente de conductividad hidráulica no depende solamente de la densidad seca alcanzada, sino que también debe estar compactado a una cierta humedad para que lo haga más impermeable.

Para la muestra FI010 ML (limo de baja plasticidad) se puede ver que los k medios están alejados considerablemente del k límite, por lo cual, al alcanzar las densidades y humedades respectivas en campo, se puede lograr un material más impermeable que la muestra FI011 MH (limo de alta plasticidad).

En ambas muestras ensayadas a la humedad óptima se logra el menor coeficiente de conductividad hidráulica, ya que, se alcanza la mayor densidad seca, por lo cual, disminuye la porosidad. Y además, se puede observar que a medida que nos alejamos de la humedad óptima, en la rama húmeda, se incrementa el valor de k.

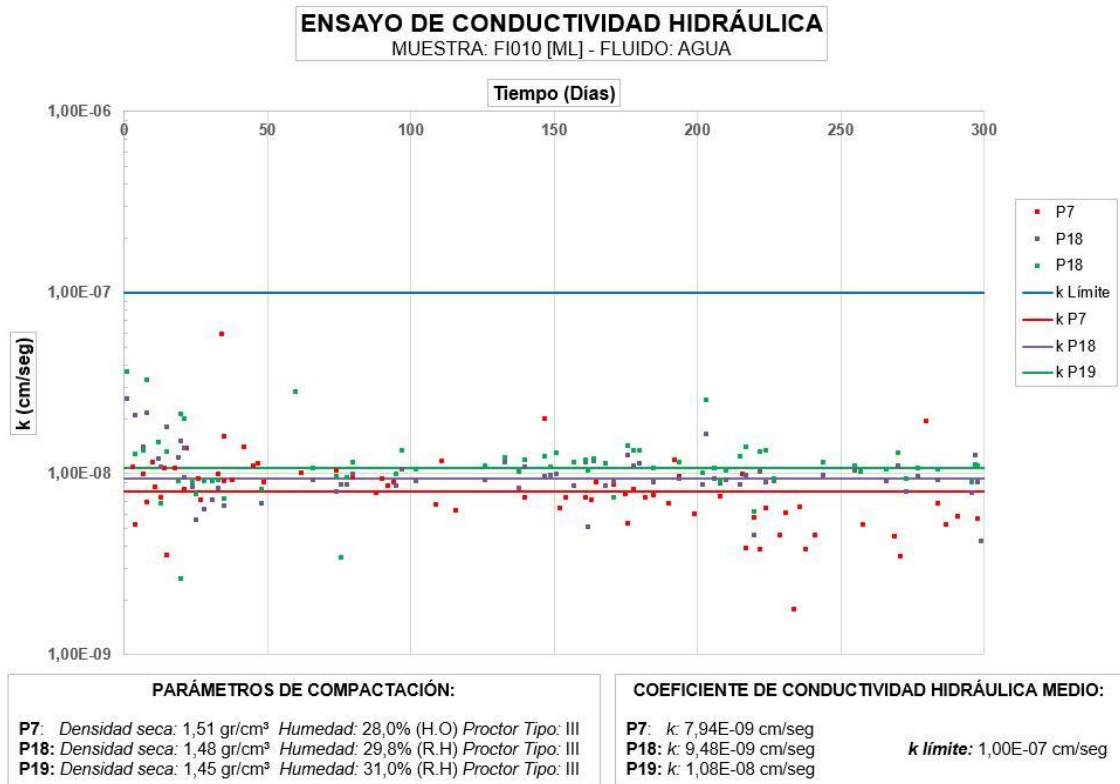


Figura 1: valores de ensayo de Permeabilidad a carga variable - Muestra de suelo del Parque termal Oberá, Misiones

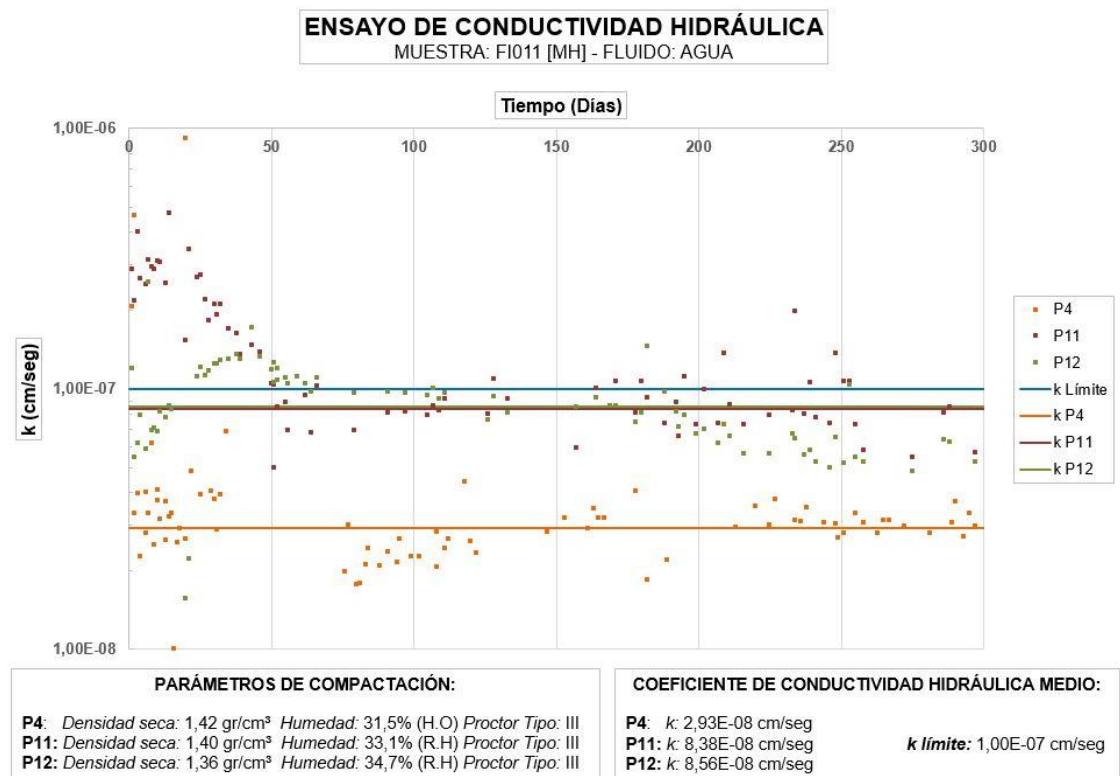


Figura 2: valores de ensayo de Permeabilidad a carga variable - Muestra de suelo de la reserva ecológica “El Chachí”- Oberá, Misiones

En la tabla 3 se presentan los resultados de conductividad hidráulica saturada medio obtenidos para cada punto ensayado en cada permeámetro con sus respectivos parámetros de compactación.

Tabla 3: Resultados de conductividad hidráulica saturada medio

Muestra	Permeámetro	Densidad seca (gr/cm ³)	Humedad (%)	K medio (cm/seg)
FI010	P17	1,48	26,5	-
	P7	1,51	28,0	7,94E-09
	P18	1,48	29,8	9,48E-09
	P19	1,45	31,0	1,08E-08
FI011	P9	1,36	28,8	-
	P4	1,42	31,5	2,93E-08
	P11	1,40	33,1	8,38E-08
	P12	1,36	34,7	8,56E-08

4. Conclusiones

En general, podemos concluir que, al alcanzar la mayor densidad seca en la compactación, se obtiene el menor coeficiente de conductividad hidráulica saturada para cada suelo, lo cual, se logra el mayor grado de impermeabilidad.

Se puede concluir que, en ambos suelos se puede conseguir un buen desempeño como material base de relleno sanitario, compactándolos a humedades superiores a la óptima, lo cual se pueden disminuir costos en obra, ya que a menor densidad se requieren menos pasadas de los compactadores mecánicos y además se puede evitar en algunos casos la necesidad de airear el suelo para descender su humedad, con lo cual, disminuye también el tiempo de construcción.

Para humedades inferiores a la óptima, ambos suelos se comportan como un material poroso, aumentando su permeabilidad, por lo cual no se los puede considerar como aptos para su uso en rellenos sanitarios.

El limo de baja plasticidad es un material más impermeable que el limo de alta plasticidad.

5. Agradecimientos

Este trabajo forma parte del proyecto de investigación 16/I157 “Comportamiento Hidromecánico De Suelos Residuales Compactados Para Su Empleo En Barreras De Rellenos Sanitarios”.

Se agradece la colaboración en laboratorio a Demonari, Fernando Emanuel, Becario de laboratorio y al Ing. Neudeck, Néstor Hugo, responsable de laboratorio de ingeniería civil (LIC).

A la Universidad Nacional de Misiones (UNaM) - Facultad de Ingeniería de Oberá (FIO) por el financiamiento de las Becas de Iniciación a la Investigación de la alumna de la Carrera de Ingeniería Civil, Franchini Andrea Belén y también al Consejo Interuniversitario Nacional por el financiamiento de las Becas de Investigación a los alumnos Piñeyro Verónica Alejandra y Tkachuk Matías Gabriel de la misma institución y en el marco del mismo proyecto.

Por último se agradece al director del proyecto Ing. Reinert, Hugo Orlando y al co-director Ing. Bogado, Gustavo Orlando, por la dedicación puesta para la confección de los permeámetros y por el apoyo durante todos los meses de ensayos.

6. Referencias

- [1] Norma IRAM 10501 " Método de determinación del límite líquido y del límite plástico de una muestra de suelo. Índice de fluidez e índice de plasticidad " - 2007.
- [2] Norma IRAM 10503 " Método de determinación de la densidad relativa de los sólidos y de la densidad de los sólidos de un suelo " - 2007.
- [3] Norma IRAM 10507 " Método de determinación de la granulometría por tamizado mediante vía húmeda " - 1986.
- [4] Norma IRAM 10509 "Clasificación de los suelos, con propósitos ingenieriles " - 1982.
- [5] Norma IRAM10511 "Método de ensayo de compactación en laboratorio"- 1972
- [6] ASTM D 5856, 2002b. "Standard test method for measurement of hydraulic conductivity of porous material using a rigid-wall, compaction-mold permeameter".
- [7] SW-846 Test Method 9100 "Saturated Hydraulic Conductivity, Saturated Leachate Conductivity, and Intrinsic Permeability"
- [8] SW-925 "Soil Properties, Classification, and Hydraulic Conductivity Testing"