

Medición de Conductividad Hidráulica Saturada en Suelos Lateríticos Compactados: Construcción de equipamientos y primeros avances

Franchini, Andrea B.^{a,*}, Piñeyro, Verónica A.^a, Tkachuk, Matías G.^a, Demonari, Fernando E.^b
Bogado, Gustavo O.^c, Reinert, Hugo O.^d.

^a Integrante de Proyecto, Becario de Grado, Estudiante de Ing. Civil, FI-UNaM, Oberá, Misiones, Argentina

^b Becario de Laboratorio, Estudiante de Ing. Civil, FI-UNaM, Oberá, Misiones, Argentina

^c Co-director del Proyecto, Ing. Civil, Docente del Departamento de Ing. Civil, FI-UNaM, Oberá, Misiones, Argentina.

^d Director del Proyecto, Ing. Civil, Docente del Departamento de Ing. Civil, FI-UNaM, Oberá, Misiones, Argentina.

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

Resumen

Los suelos lateríticos abarcan gran parte del territorio misionero por lo que conocer sus propiedades hidráulicas es de vital importancia para realizar transferencias directas a problemas geotécnicos y ambientales. El presente artículo detalla la metodología utilizada en la preparación de permeámetros que permitan una correcta interpretación del coeficiente de conductividad hidráulica de los suelos lateríticos. Debido a que no se cuenta con un procedimiento normalizado para la elaboración de permeámetros, en base a ensayos y publicaciones internacionales y, teniendo en cuenta experiencias propias, se ha adoptado una metodología de construcción que se adapte a los materiales y elementos disponibles en la zona. Dichos permeámetros se moldearon con dos muestras de suelos de distinta procedencia y dos métodos de compactación, los cuales permitieron analizar la variabilidad del coeficiente de permeabilidad del suelo. La determinación de la conductividad hidráulica en base a los diferentes coeficientes de permeabilidad permitirá evaluar las aptitudes de los suelos lateríticos, teniendo en cuenta las características óptimas de humedad y compactación requeridas para diferentes tipos de obras, tanto civiles como industriales.

Palabras Clave: Agua, Coeficiente de Permeabilidad, Compactación Proctor, Conductividad Hidráulica, Permeámetros, Suelos Lateríticos.

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. La determinación de la misma se puede realizar mediante diferentes métodos experimentales, con ensayos de laboratorios y/o mediciones en campo. Uno de los más utilizados es el ensayo de conductividad hidráulica a carga variable, el cual es frecuentemente utilizado en suelos finos. En este artículo, se describe el procedimiento de la realización de permeámetros para la medición de conductividad hidráulica en suelos residuales compactados.

2. Materiales y Métodos:

2.1. Materiales:

Los materiales utilizados fueron:

- Caño PVC 110mm de diámetro.
- Tapas de PVC 110mm.
- Picos de ½”, de salida recta y a 90°.
- Manguera transparente de ½”.
- Malla metálica.
- Sellador Adhesivo de silicona.
- Balanza digital METTLER TOLEDO (precisión: 0,1gr; N° inv: FI6443).
- Tamiz #4.
- Pesafiltros con tapa.
- Recipientes de acero inoxidable.
- Rociadores.
- Horno.
- Pisón de compactación Proctor
- Pala de plástico
- Pala metálica
- Espátula metálica
- Cepillo de acero.
- Arena retenida Tamiz N°16.
- Arena fina.
- Placa Base Metálica de 12,4mm de espesor.
- Regla de 30cm.
- Calibre de Precisión.

2.2. Muestras de Suelo utilizadas:

Tabla 1. Características de las muestras utilizadas

Muestra	Descripción	Procedencia	L.L.	L.P.	I.P.	Clasificación	pasa #200	Pe Aparente	Proctor Tipo	Densidad Seca máxima	Humedad óptima
FI010	Suelo laterítico	Parque Termal	49,45	35,15	14,3	ML	0,968	-	I	1,48	29
								-	III	1,51	28
FI011	Suelo laterítico	El Chachi	56,98	44,6	12,4	MH	0,967	-	I	1,39	32,5
								-	III	1,42	31,5

2.3. Métodos:

2.3.1. Preparación del Permeámetro:

En primer lugar, se cortó el caño de PVC 110 mm en tramos de aproximadamente 100 mm de longitud. Cada permeámetro se numeró, pesó y midió con el calibre de precisión, registrando su diámetro, espesor y altura interior una vez colocada la base metálica, realizando dos mediciones de cada parámetro y registrando el promedio. Ver Fig. N°1 (a) y (b).

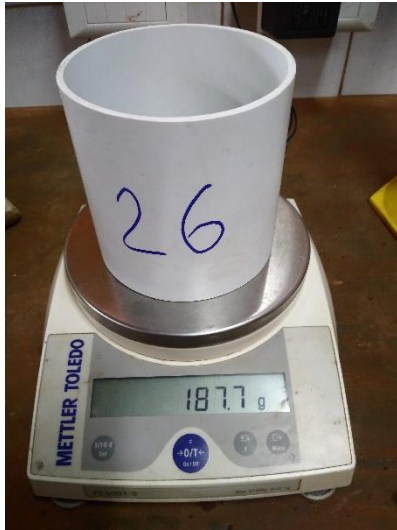


Fig. 1 (a). Pesaje del Permeámetro.



Fig. 1 (b). Medición del Permeámetro con calibre de precisión.

Así mismo, se prepararon dos tapas para cada permeámetro, una acondicionada con un pico de salida recta y la otra con un pico de salida a 90°, aptos para conectar una manguera de 1/2 pulgada. Para armarlas se debió realizar un orificio en la tapa comercial para caño de PVC de 110mm del diámetro de una rosca de 1/2 pulgada, para luego colocar los picos roscados en las tapas y sellarlas con silicona. Ver Fig. 2.



Fig. 2. Tapas preparadas con salida a 90° y salida recta.

Finalmente, se generó una rugosidad en el interior de los permeámetros y las tapas con un cepillo metálico para mejorar la adherencia del suelo a las paredes del permeámetro.

2.3.2. Preparación de la muestra de suelo:

Hasta la fecha, las probetas han sido realizadas utilizando las muestras de la Tabla 1., las cuales han sido caracterizadas en el marco del proyecto de investigación “Estudio del Comportamiento Geomecánico de Suelos Residuales Lateríticos”. Para cada permeámetro se extrajo aproximadamente 1600gr de suelo pasante Tamiz #4. El mismo se debió dejar reposar para unificar la humedad dentro

de una bolsa plástica debidamente rotulada. Una vez pasadas 24 hs, se tomó una muestra en pesa filtro para determinar el porcentaje de humedad que presenta la muestra.

Antes de la preparación de cada probeta se definió el tipo de compactación Proctor (tipo I o tipo III) y la humedad buscada, teniendo en cuenta la densidad seca y la humedad óptima para cada tipo de suelo según lo planteado en la Tabla 1. Hasta el momento se han moldeado dos puntos de la rama seca y dos de la rama húmeda la curva densidad-humedad, para cada tipo de compactación.

Una vez elegida la humedad que se desea alcanzar, se prepararon 1,5 kg de muestra, teniendo como base la humedad natural del suelo. Si la humedad requerida era mayor, se debió adicionar agua a la muestra, lo cual se realizó rociando la cantidad necesaria de agua y mezclando lentamente el suelo para lograr cierta uniformidad en la mezcla. Ver Fig. 3.



Fig. 3. Suelo preparado a la humedad requerida.

En cambio, si la humedad natural era superior a la requerida, se dejó secar la muestra completamente en el horno y luego se le adicionó la cantidad necesaria de agua, utilizando la metodología anterior.

Las muestras se dejaron reposar al menos 24 hs para lograr la uniformidad de humedad. Una vez pasado el tiempo se extrajo una muestra en pesafiltro para determinar la humedad real alcanzada. Ver Fig. 4 (a) y (b).



Fig. 4 (a). Muestra extraída en Pesafiltro.



Fig. 4 (b). Pesaje del Pesafiltro con la muestra seca.

2.3.3. Moldeo de la probeta:

Dependiendo el tipo de compactación elegida, se colocó el suelo en 3 o 4 capas. La cantidad de suelo por capa se define de manera tal que al final de la compactación el suelo tenga una altura de 9 cm. De la curva del ensayo Proctor elegido se determina la densidad seca y la humedad correspondiente para determinar la densidad húmeda:

$$Dh\left[\frac{gr}{cm^3}\right] = Ds\left[\frac{gr}{cm^3}\right] * \left(1 + \frac{W[\%]}{100}\right) \quad (1)$$

Una vez determinado dicho valor, se calculó el peso teórico que debía tener el suelo al finalizar la compactación, teniendo en cuenta el diámetro de la misma y una altura de 9cm de suelo:

$$Ph[gr] = Dh\left[\frac{gr}{cm^3}\right] * V[cm^3] \quad (2)$$

Finalmente se determinó la cantidad de suelo por capa:

$$Peso\ por\ capa\ [gr] = \frac{Ph\ [gr]}{n\ capas} \quad (3)$$

Para realizar la compactación, se debió colocar el permeámetro con la placa base en su interior, y por encima un separador plástico para que sea más sencillo desmoldar la base una vez compactado. Ver Fig. 5 (a) y (b).



Fig. 5 (a). Permeámetro con Base Metálica.



Fig. 5 (b). Elementos utilizados en la compactación.

Se colocó cada capa de suelo y se compacta según el tipo de energía de compactación elegida (4 capas con 28 golpes para tipo 1 y 3 capas con 39 golpes para tipo 3). Se dibujó una flecha en cada permeámetro para representar el sentido en el que fue compactado.

Una vez finalizada la compactación, se generó cierta rugosidad en el suelo, en ambos extremos de la probeta, lo cual permite una mejor adherencia entre suelo y arena. La probeta con el suelo compactado se pesó para así determinar la densidad real lograda. Ver Fig. 6.



Fig. 6. Rugosidad generada en el Suelo compactado.

Luego, se colocó en cada lado de la probeta un filtro de arena, el cual consiste en colocar por encima del suelo arena mediana y en la parte superior una capa de arena gruesa, hasta enrasar el permeámetro. Ver Fig. 7 (a) y (b).



Fig. 7 (b). Capa de Arena Mediana del Filtro.



Fig. 7 (b). Capa de Arena Gruesa del Filtro.

Encima de la arena se puso una malla metálica en toda la superficie, reforzando la zona del pico con otra capa de malla, para evitar que la arena sea transportada fuera del permeámetro. Finalmente, se cerró la probeta con la tapa y se selló la unión con silicona líquida para evitar filtraciones. Ver Fig. 8 (a) y (b).



Fig. 8 (a). Colocación de la Malla.



Fig. 8 (b). Sellado de la Probeta con silicona.

2.3.4. Montaje de probetas

Las probetas se colocaron en un banco de ensayos adaptado para su uso, el cual cuenta con orificios para las conexiones de las mangueras, como se muestra en la Fig. 9. Cada permeámetro se conectó a una manguera transparente de 1,5m de altura, la cual se encuentra sujeta en la parte superior con abrazaderas metálicas y vinculada a una regla para medir el descenso de agua. Ver Fig. 10. Las mangueras se conectan en la parte inferior del permeámetro, para que el flujo sea ascendente y así lograr la completa saturación del suelo.

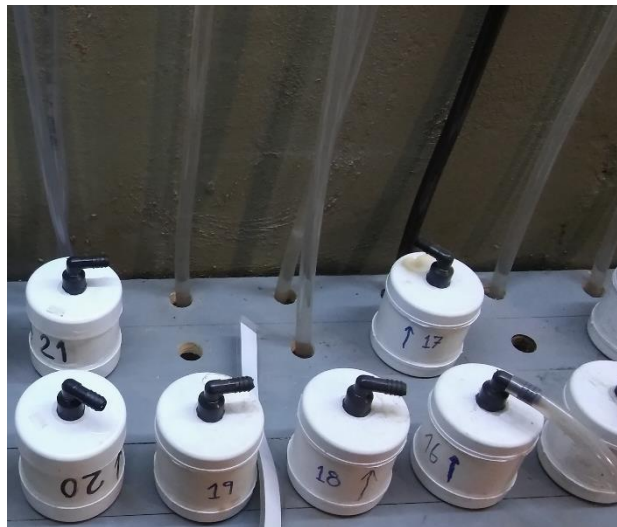


Fig. 9. Banca de Ensayos con perforaciones.



Fig. 10. Montaje de mangueras y reglas.

Una vez colocada cada probeta en el banco de ensayo, se llenó la manguera con agua hasta el nivel 0 de la regla. Ver Fig. 11.



Fig. 11. Permeámetros colocados en la Banca de Ensayos.

2.3.5. Mediciones

Las mediciones se realizan de dos a tres veces por semana, registrando la fecha, la hora y descenso del nivel de agua. Si el nivel del agua supera la regla, se debió volver a cargar la manguera hasta el nivel 0.

Otro parámetro que se tuvo en cuenta fue si el agua atravesó el permeámetro o aún no, verificando si salió agua del pico superior de la probeta. Una vez que el agua llegó a dicho estado, se registró que el agua alcanzó la altura entre el nivel 0 de la manguera y la salida del permeámetro. Las mediciones obtenidas se utilizaron para determinar el coeficiente de permeabilidad del suelo.

2.3.6. Determinación del Coeficiente de Permeabilidad:

La conductividad del suelo se determinó mediante (4), donde el parámetro a es el diámetro de la manguera, h_1 la distancia desde el banco de ensayo hasta el nivel 0 de la regla, h_2 la altura hasta la salida de la probeta, t el tiempo transcurrido, A el área de la muestra de suelo y L su altura.

$$k = 2,303 * \frac{a * L}{A * t} * \log_{10} * \frac{h_1}{h_2} \tag{4}$$

Una vez que los valores de conductividad se mantuvieron constantes, se registró que el ensayo entró en régimen y los valores hallados reflejan la permeabilidad del suelo.

3. Resultados y Análisis

Se muestran en la Fig. 12 los resultados obtenidos para la primera probeta realizada. La muestra utilizada en dicho ensayo fue FI011, con una Compactación Proctor Tipo I.

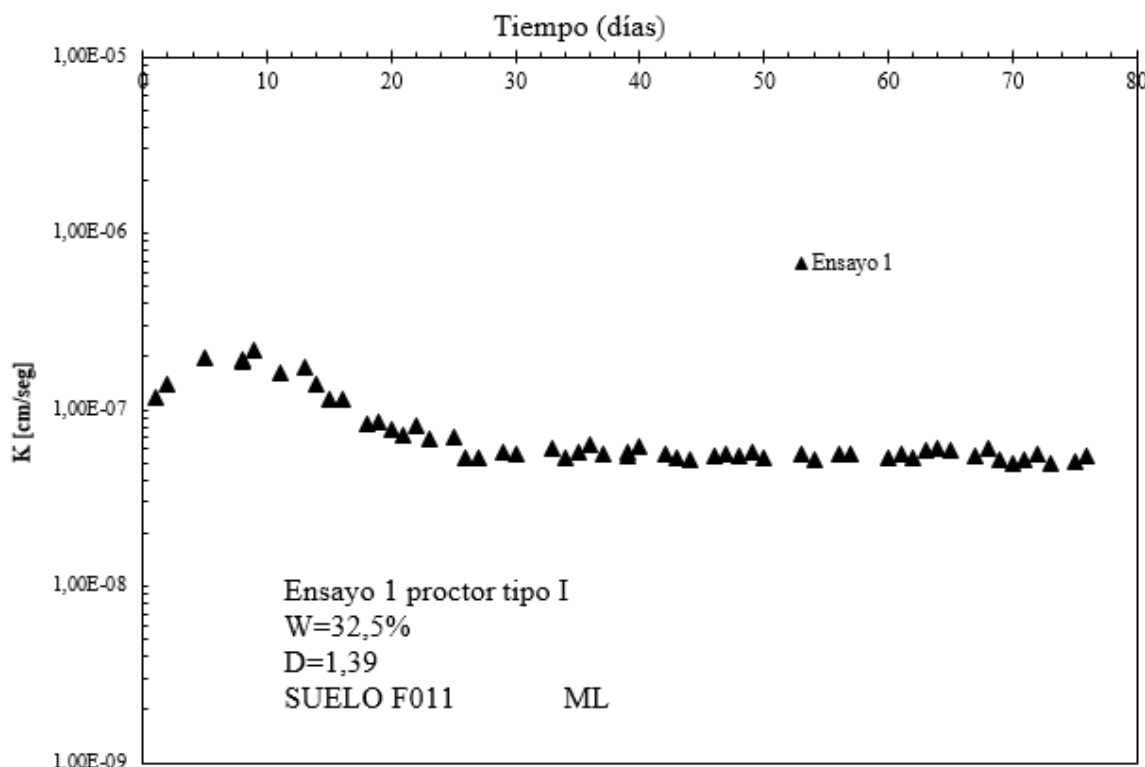


Fig. 12. Permeabilidad del Ensayo 1

Se puede observar que el régimen se alcanza luego de aproximadamente 30 días, y la permeabilidad obtenida es de $5,036 E-08$.

4. Conclusiones

En este artículo se presentó las primeras experiencias relacionadas con la construcción de permeámetros para medir un parámetro de vital importancia en el flujo de medios porosos. Los resultados obtenidos indicaron un valor de conductividad hidráulica razonable para este tipo de

geomateriales. En futuras investigaciones se pretenden analizar diferentes factores como; la plasticidad del suelo, densidad, interacción con el tipo de fluido, etc.

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”. Franchini, Piñeyro y Tkachuk agradecen a la UNaM y al CIN por las becas de iniciación científicas otorgadas.

Referencias

- [1] Bogado, G. O., Reinert, H. O., Francisca, F. M. Geotechnical properties of residual soils from the North-east of Argentina. *International Journal of Geotechnical Engineering*, p.1-10, 2017.
- [2] ASTM D 4318, 1984. “Standard test method for liquid limit, plastic limit and plasticity index of soils”. *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 4, N° 8. pp. 579-589.
- [3] ASTM D 698, 2000. “Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort [12,400 ft-lbf/ ft³ (600 kN-m/m³)]”. D 698, *Annual Book of Standards*, Vol. 04.08, ASTM Int., West Conshohocken, Pa.
- [4] ASTM D 5856, 2002b. “Standard test method for measurement of hydraulic conductivity of porous material using a rigid-wall, compaction-mold permeameter.”, *Annual Book of Standards*, Vol. 04.09, ASTM Int., West Conshohocken,