

Influencia del Cemento en la Conductividad Hidráulica en Suelos Tropicales Compactados

Gregori, Diego Armando^a, Romero, Yamila Mercedes^a, Trindades, Elías Joel^a, Bressan, Daniel Antonio^b, Reinert, Hugo Orlando^c, Bogado, Gustavo Orlando^d

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

^b Integrante del proyecto, Docente del Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones (UNaM), Oberá, Misiones, Argentina.

^c Dirección de 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: diegogregoricai@gmail.com, yami369romero@gmail.com, etrindades22@gmail.com, bressanobe@gmail.com, hugo.reinert@fio.unam.edu.ar, gustavobogado@conicet.gov.ar

Resumen

Los suelos arcillosos al mezclarse con cemento modifican sus propiedades mecánicas. En este artículo se detalla la metodología de construcción y ensayo para la determinación del coeficiente de permeabilidad en probetas de mezclas de suelo cemento compactadas, para ser utilizadas en barreras de rellenos sanitarios. La rutina de ensayo se realizó con materiales disponibles al no haber un procedimiento normalizado. Los resultados dan la misma tendencia en ambas muestras analizadas, mejorando para la mezcla con 2% de cemento respecto a la probeta de 0% y empeorando a medida que aumenta la graduación en la mezcla.

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

1 Introducción

El estudio de las propiedades de los materiales nos permite tener mayor comprensión de su comportamiento y de cómo utilizarlos de una manera más sustentable y eficiente. Los suelos tropicales lateríticos en la provincia de Misiones, entre sus múltiples aplicaciones, son utilizados en barreras hidráulicas en rellenos sanitarios, donde se ha comprobado el cumplimiento de estándares internacionales para dicho uso (Gregori et al., 2022) [1]. Sin embargo, la combinación del suelo con otros materiales podría mejorar o cambiar las condiciones hidráulicas, conduciendo a una mayor seguridad ambiental.

Es sabido que el cemento en suelos arcillosos reduce la plasticidad al absorber parte del agua del suelo, así como también mejora la capacidad portante. Por ello, en el presente ensayo, se busca determinar el comportamiento de la mezcla compactada frente a la percolación del agua. En este artículo se muestran los resultados de las mediciones de la conductividad hidráulica en muestras que fueron dosificadas con distintos porcentajes de cemento portland.

2 Construcción de elementos de ensayo

2.1 Preparación de moldes

La construcción de los permeámetros se realizó siguiendo la normativa ASTM D 5856, (2002b) [2], que establece el uso de cilindros de material sólido que permitan la compactación de suelo directamente en el molde sin que éste sufra deformaciones horizontales, y a su vez, que garantice la estanqueidad de los mismos. Se optó por utilizar caños de PVC de 110mm de diámetro y 100mm de longitud, con tapas adaptadas mediante picos de salida recta y a 90°, tal como se indica en fig. 1, que luego permiten la conexión de las mangueras en el banco de ensayo.



Fig. 1 Probetas de Suelo compactado.

2.2 Preparación del suelo

Las humedades y densidades de compactación se determinaron para cada porcentaje de cemento agregado en el marco del proyecto de investigación “Estabilización de suelos mediante la incorporación de cemento y residuos de la industria misionera”. Estos valores se definieron conforme a las Normas IRAM, utilizándose la IRAM 10501 [3] para la determinación del límite

líquido y del límite plástico, la IRAM 10503 [4] en la determinación de la densidad relativa del suelo, la IRAM 10507 [5] en la determinación de la granulometría por tamizado mediante vía húmeda, la IRAM 10509 [6] para la clasificación del suelo, y la IRAM 10511 [7] que establece el método de ensayo de compactación en laboratorio.

Las propiedades índice y geomecánicas se detallan en Tabla 1 para la muestra FI-001 “Cabañas” y en la Tabla 2 para la muestra FI-002 “Campo Viera”:

Tabla 1: Propiedades índice y geomecánicas de la muestra FI-001

Porcentaje de cemento [%]	LL [%]	LP [%]	IP [%]	Proctor tipo	Densidad seca máxima [gr/cm ³]	Humedad óptima [%]
0	-	-	-	1	1,400	32,5
2	-	-	-	1	1,435	31,7
4	-	-	-	1	1,440	30,7
6	55,5	48,8	6,8	1	1,440	30,5
8	55,3	47,0	8,3	1	1,443	30,4
10	52,8	48,6	4,2	1	1,443	28,9

Tabla 2: Propiedades índice y geomecánicas de la muestra FI-002

Porcentaje de cemento [%]	LL [%]	LP [%]	IP [%]	Proctor tipo	Densidad seca máxima [gr/cm ³]	Humedad óptima [%]
0	42,9	34,8	8,1	1	1,468	30,7
2	41,4	34,1	7,2	1	1,475	30,0
4	40,1	34,2	5,9	1	1,483	30,3
6	41,7	34,1	7,6	1	1,490	28,4
8	39,4	33,3	6,0	1	1,490	28,0
10	39,6	33,9	5,8	1	1,505	27,8

Se inició la preparación del suelo con la separación de la cantidad de suelo necesario para cada permeámetro a la cual se le determinó la humedad a la que se encuentra. Conocido el contenido de humedad, se agregó agua hasta alcanzar la humedad del ensayo. Los permeámetros se realizaron para la humedad óptima y densidad seca máxima de la curva Proctor, determinada para cada porcentaje de cemento incorporado. Para cada permeámetro de debió preparar aproximadamente 1800 gr de suelo pasante tamiz #4. Se trabajó con seis puntos de contenido de cemento portland por muestra (0%, 2%, 4% 6%, 8% y 10% de porcentaje en peso), el cual se fue añadiendo de forma gradual con un tamiz #100. El porcentaje de cemento añadido es respecto del peso seco de la muestra.

Cada vez que se manipuló el suelo, se dejó en bolsas cerradas, al menos 24 horas, para garantizar la uniformidad de humedad en el total de la muestra. El día previo al moldeo, se

determinó nuevamente la humedad para determinar la cantidad de cemento a agregar a la muestra y realizar una eventual corrección a la cantidad de agua presente.

2.3 Moldeo de probetas

El moldeo de probetas se realizó a partir de la determinación del volumen del molde y el peso teórico de suelo que cabría dentro para alcanzar la densidad máxima Proctor. Este suelo se dividió en tres capas y se verificó el cumplimiento del peso y volumen compactado de cada una. Entre capa y capa se escarificó el suelo para generar rugosidad y fricción entre las capas sucesivas.

Una vez compactadas las muestras, en ambas caras se colocó un filtro de arena de dos fracciones (mediana y gruesa) enrasando el permeámetro, para evitar la pérdida de suelo. Además, se incorporó, antes de cerrar el molde, una malla de PVC en toda la superficie, y se reforzó la zona de los picos. Finalmente, se colocaron las tapas y se selló la unión con silicona para evitar filtraciones.

Una vez finalizado el moldeo, se tomó muestra de humedad del suelo para compararla con la humedad óptima de la curva Proctor, considerada de diseño.

2.4 Montaje en el banco de ensayos y mediciones

Los permeámetros se montaron en un banco de ensayos adaptado para que el flujo sea ascendente (fig. 2), conectando la manguera que genera la carga hidráulica mayor en la parte inferior de la probeta. Éstas últimas se fijaron a una altura de 1,56 metros del banco de ensayos, donde se demarcó el nivel 0, que es la referencia para carga y recarga de nivel de agua. Las mediciones se realizaron de tres a cinco veces por semana, registrando el descenso del fluido, la fecha y la hora y, recargando hasta el nivel 0 cuando el descenso superase los 50 centímetros.



Fig. 2 Banco de ensayos de permeabilidad con los seis permeámetros de la muestra FI-002

2.5 Procesamiento de datos

Las mediciones realizadas fueron incorporadas a una hoja de cálculo, en donde se determinó el valor de la conductividad hidráulica de cada permeámetro. En base de la ecuación 1, se determinó el coeficiente de permeabilidad k en cada caso.

$$k = \frac{2,303 * a * L}{A * t} * \log \left(\frac{h_1}{h_2} \right) \quad (1)$$

Donde a : diámetro de la manguera; h_1 : distancia desde el banco de ensayo hasta el nivel 0; h_2 : altura hasta la salida de la probeta; t : tiempo transcurrido; A : área de la muestra de suelo; L : altura de la muestra analizadas.

3 Resultados

Los resultados indican un aumento de la permeabilidad a medida que se agrega más cemento a la mezcla. En ambas muestras se observó la misma tendencia, donde el mejor comportamiento del suelo como barrera hidráulica se produce con 2% de cemento, dado que es el único porcentaje donde se logró una pequeña reducción en la permeabilidad del suelo con cemento. Luego, a medida que aumenta el porcentaje de cemento en la mezcla, aumenta los valores de la permeabilidad del suelo, incumpliendo la normativa internacional de $1,00E-07$ cm/seg.

Tabla 3. Coeficiente de permeabilidad promedio para cada porcentaje de contenido de cemento. Muestra FI-001

Porcentaje de cemento [%]	Coefficiente de permeabilidad promedio [cm/seg]	Variación respecto a suelo sin cemento

0	7,54E-08	0%
2	7,31E-08	-3%
4	1,62E-07	114%
6	1,32E-07	76%
8	1,55E-07	106%
10	7,60E-07	907%

Tabla 4. Coeficiente de permeabilidad promedio para cada porcentaje de contenido de cemento. Muestra FI-002

Porcentaje de cemento [%]	Coeficiente de permeabilidad promedio [cm/seg]	Variación respecto a suelo sin cemento
0	1,00E-07	0%
2	9,38E-08	-6%
4	1,07E-07	7%
6	2,54E-07	153%
8	1,16E-07	16%
10	3,08E-07	208%

En la fig. 3, se presentan en una gráfica los resultados expresados en Tablas 3 y 4, donde se puede apreciar que, para el caso de suelo sin cemento y suelo con la incorporación de 2% de cemento, el coeficiente de permeabilidad obtenido se encuentra por debajo del límite recomendado de 1.00×10^{-7} , mientras que para contenidos mayores hay un incremento en la permeabilidad del suelo/cemento.

Si bien entre las sucesivas lecturas se observan diferencias sin regresión definida, la tendencia al aumento, en mayor o menor medida, con el incremento de porcentaje de cemento, está confirmada para ambas muestras estudiadas.

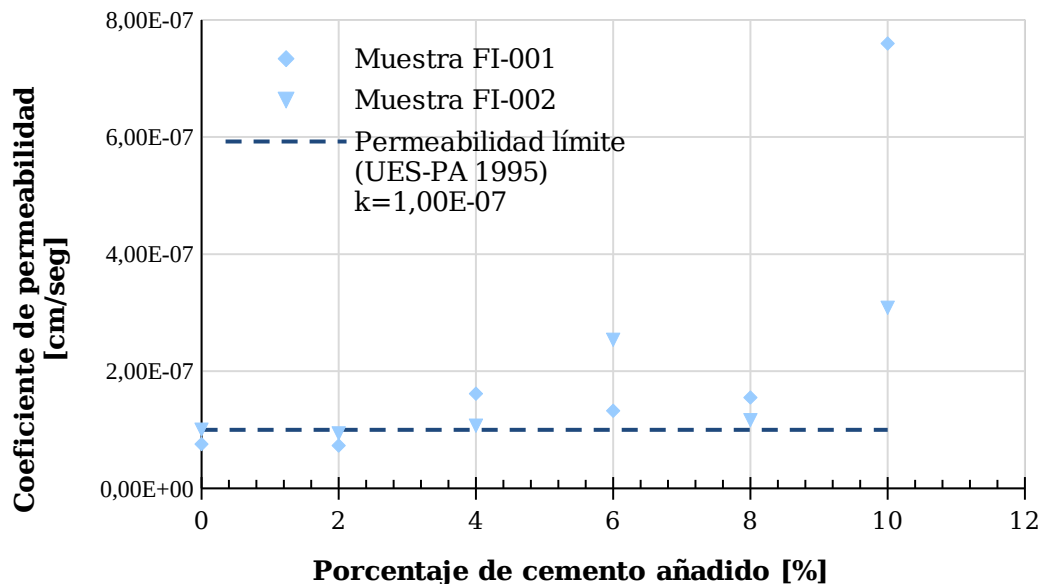


Fig. 3 Coeficientes de permeabilidad según porcentaje de cemento incorporado.

4 Conclusiones

En base a los resultados obtenidos, se aprecia una disminución de la permeabilidad para el 2% de contenido de cemento, lo cual es una mejora en el caso de que se quiera realizar barrera hidráulica con suelo cemento. Sin embargo, para porcentajes mayores, el comportamiento cambia y se produce un aumento de la conductividad hidráulica medida.

El ensayo se realizó compactando el suelo a humedad óptima y densidad seca máxima del Proctor. Se debe buscar replicar el ensayo a otras muestras de diversos puntos de la provincia, así como también realizar el moldeo de las probetas con compactación en ramas húmeda y rama seca de ensayo Proctor, a fin de poder describir en mejor medida el desempeño de suelo/cemento desde el punto de vista de sus propiedades hidromecánicas.

Otra línea de investigación que surge de este análisis es la de determinar entre 0% y 4% el valor óptimo de cemento añadido a la mezcla, entendiéndose como el porcentaje de cemento adicionado al suelo que logre la permeabilidad mínima.

Agradecimientos

Se agradece la participación de los estudiantes becarios de la Beca Manuel Belgrano, quienes realizaron las mediciones del descenso de agua en los permeámetros y recarga de los mismos. Los autores agradecen a Burger, Yamila B., Hein, Wilson F., Lorenzo, Solange D. y Ríos, Gonzalo A.

Referencias

- [1] Gregori, D. A et al. "Variación de la conductividad hidráulica en suelos residuales compactados según fluido de prueba para uso en rellenos sanitarios". Jornada de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Extensión y Muestra de la Producción. Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Misiones. 2022.
- [2] ASTM D 5856, 2002b. "Standard test method for measurement of hydraulic conductivity of porous material using a rigid-wall, compaction-mold permeameter".
- [3] 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.
- [4] Norma IRAM 10503 " Método de determinación de la densidad relativa de los sólidos y de la densidad de los sólidos de un suelo " - 2007.
- [5] Norma IRAM 10507 " Método de determinación de la granulometría por tamizado mediante vía húmeda " - 1986.
- [6] Norma IRAM 10509 "Clasificación de los suelos, con propósitos ingenieriles " - 1982.
- [7] Norma IRAM 10511 "Método de ensayo de compactación en laboratorio"- 1972