

Variación de la Conductividad Hidráulica debido a la humedad de compactación en suelos residuales mejorados con Cemento

Diego Gregori ^a, Hugo Reinert ^a, Gustavo Bogado ^{a,b}, Camila Korpys ^a

^a Universidad Nacional de Misiones, Facultad de Ingeniería, Laboratorio de Ingeniería Civil, Oberá, Misiones, Argentina.

^b Universidad Nacional de Misiones, Facultad de Ingeniería, Laboratorio de Ingeniería Civil, CONICET.

e-mails: diegogregoricai@gmail.com, hugo.reinert@fio.unam.edu.ar, gustavobogado@conicet.gov.ar, camila.korpys@fio.unam.edu.ar

Resumen

La compactación de muestras de suelos influye en la porosidad y relación de vacíos del mismo, y por lo tanto en su conductividad hidráulica. Este artículo presenta la influencia de la variación de la humedad de moldeo en las permeabilidades de mezclas de suelo-cemento compactado a humedad óptima, y en humedades por encima y por debajo de ésta. Se detalla la metodología de preparación de muestras, confección de los permeámetros, y el ensayo para la determinación del coeficiente de permeabilidad a distinto porcentaje de cemento incorporado al suelo. Se prepararon probetas compactadas en humedades propias de la rama seca, óptima, y rama húmeda del Proctor de referencia. Los resultados arrojan una reducción de la permeabilidad para la mezcla con 2% de cemento respecto a la probeta de 0%, en las tres condiciones de humedad, así como una reducción en general para todas las muestras compactadas en humedad óptima y rama húmeda, adecuándose a las referencias límites internacionales para su empleo como barrera hidráulica.

Palabras Clave – Conductividad hidráulica, Permeabilidad, Proctor, Suelo-Cemento

1 Introducción

El comportamiento hidromecánico del suelo varía según el contenido de humedad al momento de la compactación, la energía aplicada, la granulometría y la composición mineralógica. Por otro lado, añadir cemento a un material arcilloso como lo es el suelo laterítico residual presente en la provincia de Misiones, reduce la plasticidad del material al absorber agua, así como también, aumenta su capacidad portante.

Al variar la humedad de la mezcla de suelo-cemento compactada, se modifica la porosidad final alcanzada. Esta propiedad influye directamente en el coeficiente de permeabilidad del material, cuyo comportamiento es fundamental conocerlo, ya que los suelos, entre sus múltiples aplicaciones, pueden ser utilizados como barreras hidráulicas en rellenos sanitarios.

En trabajos anteriores, se abordaron aspectos para la caracterización hidromecánica de los suelos lateríticos residuales, presentes en la provincia de Misiones. En un primer artículo, “Variación de la conductividad de hidráulica en suelos residuales compactados según fluido de prueba para uso en rellenos sanitarios” (Gregori et al., 2022) [1], se verificó la utilización del suelo como barrera hidráulica comparando los valores alcanzados con la referencia de $k=1.00 \times 10^{-7}$ cm/seg, al ser percolación por fluidos como agua, lixiviado, solución de agua y sal (1 molar y 2 molar), y solución de agua con hipoclorito de sodio (1 molar).

En un segundo trabajo, “Influencia del Cemento en la Conductividad Hidráulica en Suelos Tropicales” (Gregori et al., 2023) [2], se comprobó que una mezcla del orden de 2% de cemento con el suelo laterítico produce una disminución de la permeabilidad a la percolación en las muestras compactadas a humedad óptima determinada en el ensayo Proctor.

Recrear de forma precisa las condiciones de ensayo en laboratorio en la realidad representa cierta dificultad, por lo que finalmente se podría estar por encima o por debajo un parámetro a alcanzar. Por ello, en el presente trabajo, se pretende conocer el comportamiento de la permeabilidad en mezclas de suelo-cemento, compactadas en condiciones de humedad por encima y por debajo del valor óptimo de referencia, en relación con la mayor densidad seca (rama seca y rama húmeda de la curva Proctor).

2 Metodología

2.1 Organización general

La construcción de los permeámetros se realizó siguiendo la normativa ASTM D 5856, (2002b) [3], 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, y 3.20mm de espesor, 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 de carga y de desagote en el banco de ensayo.



Fig. 1. Permeámetro de PVC.

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 [4] para la determinación del límite líquido y del límite plástico, la IRAM 10503 [5] en la determinación de la densidad relativa del suelo, la IRAM 10507 [6] en la determinación de la granulometría por tamizado mediante vía

húmeda, la IRAM 10509 [7] para la clasificación del suelo, y la IRAM 10511 [8] que establece el método de ensayo de compactación en laboratorio.

Las propiedades índice y geomecánicas de las muestras de suelo y suelo-cemento se detallan en Tabla 1 para la muestra FI-002 “Campo Viera”, al cual se empleó en el presente análisis.

Las humedades para moldeo de las probetas en ramas seca y húmeda, se adoptaron correspondientes al 95% de la densidad seca máxima en las curvas Proctor, tal como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 1: Propiedades índice y geomecánicas de la muestra FI-002

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

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

Porcentaje de cemento [%]	Rama Húmeda		Rama Seca	
	Densidad [gr/cm ³]	Humedad [%]	Densidad [gr/cm ³]	Humedad [%]
0	1,395	34,0	1,395	27,4
2	1,401	33,4	1,401	26,3
4	1,409	33,7	1,409	26,9
6	1,415	32,8	1,415	25,4
8	1,415	33,6	1,415	25,1

La preparación del suelo se inicia con la separación de la cantidad necesaria 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 1800gr de suelo pasante tamiz #4. Se trabajó con cinco puntos de contenido de cemento portland por muestra además del moldeo sin cemento (0%, 2%, 4% 6% y 8% de porcentaje en peso), el cual se fue añadiendo de forma gradual pasando por un tamiz #100 para desagregar los grumos. El porcentaje de cemento añadido se determina respecto del peso seco de la muestra.

Cada vez que se manipuló el suelo, se dejó en bolsas cerradas, al menos por 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. En la Fig. 2 se muestran las probetas moldeadas en rama seca.

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.



Fig. 2. Probetas moldeadas a diferentes porcentajes de cemento añadido en rama seca.

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 dentro de la probeta (Fig. 3), conectando la manguera que genera la carga hidráulica mayor en la parte inferior de la probeta, dado que la circulación ascendente del fluido permite facilitar la saturación inicial a consecuencia de la expulsión de aire presente, lo que garantiza que cuando el volumen permeado es de entre una y dos veces el volumen de vacíos de la probeta, la muestra se encuentra saturada. Las mangueras 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, en un plazo del orden de los cuatro meses, registrando el descenso del fluido, la fecha y la hora y, recargando hasta el nivel 0 cuando el descenso superase los 50centímetros.

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 analizada.



Fig. 3. Banco de ensayos de permeabilidad.

3 Presentación y Análisis de Resultados

Los resultados obtenidos de la secuencia de ensayos desarrollados se detallan en Tabla 3 para los tres casos de humedad de moldeo y todos los casos de contenido de cemento estudiados, mientras que en las Figuras 4 y 5 se muestran los resultados discretos representados, así como las correspondientes líneas de tendencia que permiten realizar algunas observaciones.

La incorporación de cemento genera para un rango bajo de contenido incorporado de cemento (2%), una disminución de la permeabilidad del suelo para los tres casos de humedad de moldeo analizadas, representando en primera instancia mejoras en el desempeño como barrera hidráulica.

A partir de allí con el aumento del contenido de cemento, se analiza la línea de tendencia, dado que el análisis de los puntos discretos no guarda relación / proporción en este ensayo desarrollado particularmente con valores altos de contenido de cemento (6% y 8%).

El análisis de la tendencia demuestra que con el aumento del contenido de cemento se produce un incremento en la permeabilidad resultante, conforme se ha expresado en Figuras 4 y 5.

La compactación a humedad de rama seca del ensayo Proctor, indica en todos los casos valores de coeficiente de permeabilidad más altos, entre uno y dos órdenes de magnitud, por lo que está claro que no resulta apto trabajarlos en este entorno de humedad de moldeo.

En cuanto a la compactación a humedad óptima y aun en rama húmeda, los resultados obtenidos son del orden y aun menores que el requerimiento límite de $k=1.00 \times 10^{-7}$ cm/seg para su empleo como barrera hidráulica.

Tabla 3. Coeficiente de permeabilidad promedio para cada porcentaje de contenido de cemento.

Porcentaje de cemento [%]	Coeficiente de permeabilidad promedio [cm/seg]		
	Humedad óptima	Rama Húmeda	Rama Seca
0	9,84E-08	7,86E-08	3,47E-05
2	9,13E-08	2,91E-08	1,76E-06
4	9,15E-08	4,20E-08	5,58E-05
6	3,39E-07	4,30E-08	3,35E-05
8	1,15E-07	2,07E-07	3,97E-05

En la Fig. 5, se presentan en una gráfica los resultados expresados en Tablas 3, donde se puede apreciar que, para el caso de suelo compactado en humedad óptima los puntos con 0%, 2% y 4% se encuentran ligeramente por debajo del límite recomendado de 1.00×10^{-7} cm/seg., mientras que para contenidos de cemento superiores hay un incremento en la permeabilidad del suelo-cemento.

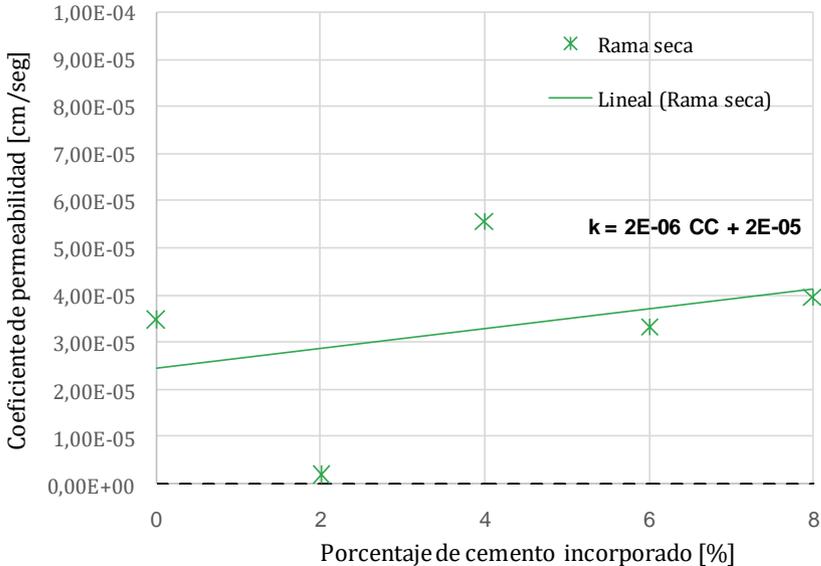


Fig. 4. Resultados de coeficiente de permeabilidad. Moldeo a humedad de Rama Seca.

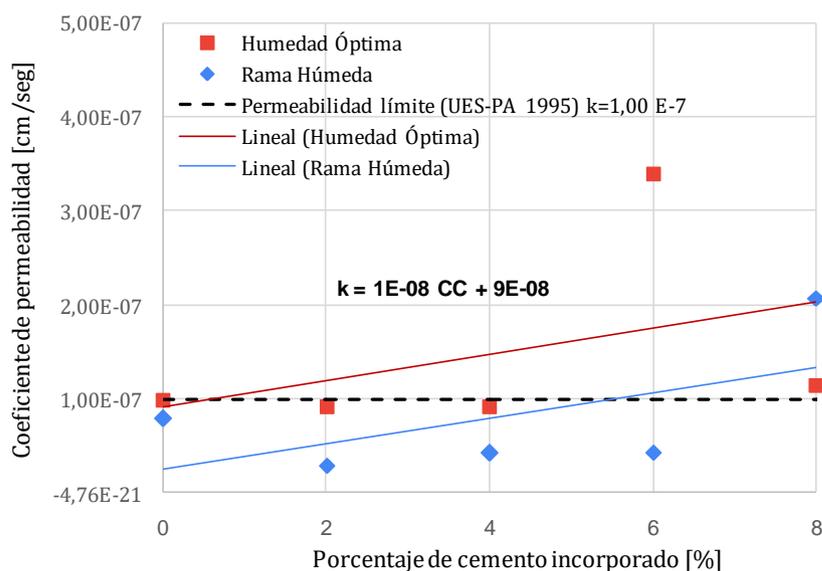


Fig. 5. Resultados de coeficiente de permeabilidad. Moldeo a humedad de Rama Seca.

Para el caso de la humedad óptima, los valores de coeficiente de conductividad hidráulica para cada porcentaje de cemento responden a los mismos ensayos presentados en trabajos anteriores (Gregori, et al., 2023) [2], aclarando de existen pequeñas variaciones en los valores informados, debido a la continuidad de las mediciones por un período mayor.

El caso particular del contenido de cemento del 8% se obtuvieron valores muy próximos para el caso de humedad óptima y rama húmeda, pero con valores cruzados respecto de los demás casos. En otras palabras, arrojó un valor menor que el caso de humedad óptima cuando el resultado esperado debiera de ser mayor. Es por esto, que se requiere ampliar el número de ensayos, y en particular replicar el caso del moldeo al 8%.

4 Conclusiones

Las mezclas de suelo residual estudiado con un 2% de contenido de cemento presentan una mejora en la reducción de conductividad hidráulica de las mezclas respecto del suelo sin cemento para los tres casos de humedad de moldeo analizadas, rama seca, óptima y rama húmeda.

Respecto del empleo para barrera hidráulica teniendo en cuenta el límite recomendado por las referencias internacionales, $k=1.00 \times 10^{-7}$ cm/seg., se logra cuando se compacta la mezcla en condiciones de humedad de moldeo óptima y en rama húmeda referida al Próctor.

El incremento del contenido de cemento en la mezcla y el consecuente aumento que se observa en los valores de conductividad hidráulica en todos los casos de humedad de moldeo, se podría justificar en un cambio en la granulometría del suelo producto de la interacción físico-química del cemento y los elementos del suelo.

Por otra parte, el comportamiento observado en rama húmeda sugiere que se produce mayor aglomeración de la mezcla con cemento y un mejor acomodamiento de las partículas del suelo durante la compactación, que reducen el tamaño de los poros.

A partir de estas características hidromecánicas del suelo-cemento, se debería hacer foco en el análisis de las mezclas entre 0% y 4%, como así también ir variando las humedades dentro de la rama húmeda para analizar cambios en la permeabilidad y definir rangos de condiciones óptimas durante la materialización de presas y barreras hidráulicas.

5 Agradecimientos

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

6 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] Gregori, D. A et al. "Influencia del cemento en la conductividad hidráulica en suelos tropicales compactados". Jornada de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Extensión y Muestra de la Producción. Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Misiones. 2023.
- [3] ASTM D 5856, 2002b. "Standard test method for measurement of hydraulic conductivity of porous material using a rigid-wall, compaction-mold permeameter".
- [4] 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.
- [5] Norma IRAM 10503 " Método de determinación de la densidad relativa de los sólidos y de la densidad de los sólidos de un suelo " - 2007.
- [6] Norma IRAM 10507 " Método de determinación de la granulometría por tamizado mediante vía húmeda " - 1986.
- [7] Norma IRAM 10509 "Clasificación de los suelos, con propósitos ingenieriles " - 1982.
- [8] Norma IRAM 10511 "Método de ensayo de compactación en laboratorio"- 1972