

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

The paper was published in the proceedings of XVI Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVI PCSMGE) and was edited by Dr. Norma Patricia López Acosta, Eduardo Martínez Hernández and Alejandra L. Espinosa Santiago. The conference was held in Cancun, Mexico, on November 17-20, 2019.

Mejoramiento de suelos residuales mediante el uso de Electro-osmosis

Manuel BUILES^{a,1}, Mario León HINCAPIE^b y Jorge ARBOLEDA^c

^aGerente Técnico, TERRASOIL SAS, COLOMBIA

^bCoordinador de proyectos Coninsa Ramon H.

^cProgressa, COLOMBIA

Resumen. En este artículo se describe la utilización del método descrito por Casagrande para el mejoramiento de suelos residuales, en la implementación de un lleno de aproximadamente 15m de espesor. Se propusieron varios métodos para poder acelerar el proceso de consolidación del lleno descrito, se recomendaron las técnicas convencionales tales como, precargas, precargas con drenes de arena, precarga con *wick drains*, pero debido al tiempo de entrega del proyecto no se alcanzaban a disminuir considerablemente los asentamientos, entonces se propuso realizar un ensayo a escala sobre el lleno con la técnica de la ELECTRO-OSMOSIS, la cual había sido empleada en otras partes del mundo. Por lo tanto, se instalaron varillas de acero en una geometría triangular con variaciones angulares de 120 grados entre varillas y con una separación de 1.5m, y con un armado eléctrico que permitiera que el agua pudiera fluir entre las varillas insertadas en el terreno fluyendo del ánodo hacia el cátodo en la corriente. Generando una presión de poros negativa debido a la generación de una corriente directa sobre el suelo, se tomaron muestras hasta una profundidad de 12m de suelo antes y después de la aplicación de la Electroósmosis (EO) y se compararon sus respectivos resultados, se realizaron ensayos de humedad, límites de Atterberg, se realizaron ensayos de corte directo tipo UU y ensayos de consolidación, se observó que con el voltaje aplicado en el tiempo empleado, se logró un incremento de los parámetros de resistencia y de comportamiento ante deformaciones muy significativo, principalmente en los niveles de asentamientos para el proyecto que observaron reducciones del orden del 25%.

Palabras Clave. Mejoramiento de suelos, electro-osmosis.

1. Introducción

El término *electroósmosis* se refiere al movimiento de líquido inducido por un campo eléctrico aplicado. Tal movimiento se produce cuando se aplica un campo eléctrico a través de un material poroso. El flujo resulta de la presencia de una doble capa eléctrica a lo largo de una interfaz sólido-líquido. La aplicación del campo eléctrico hace que los iones en la doble capa se muevan. Hacia un electrodo o el otro. Porque los iones en la doble capa son predominantemente de un signo, su movimiento da lugar a una fuerza corporal sobre el líquido en la doble capa, y es esta fuerza del cuerpo que establece el líquido en movimiento. [1]

La electroósmosis se ha utilizado para tratar una amplia variedad de materiales, el propósito del tratamiento ha sido predominantemente la deshidratación de mezclas

¹ Corresponding Author, manuel.builes@terrasoil.com.co

compresibles sólido-líquido. Es especialmente eficaz en la eliminación de líquidos de las partículas finas del suelo, para las cuales la mecánica convencional no ha sido muy exitosa.

Cuando el gradiente eléctrico directo se aplica a un sistema de arcilla-agua, la superficie o la partícula se fija, pero la capa móvil difundida se mueve y la solución es transportada. Una mayor superficie de partículas del suelo produce mayores transferencias de película de humedad [2]. El potencial eléctrico aplicado y la viscosidad también pueden afectar este fenómeno [2]. El mecanismo principal en la electroósmosis es la migración de iones, lo que significa que los cationes migran al cátodo y los aniones se mueven hacia el ánodo [3].

Reuss (1809) descubrió que el gradiente eléctrico externo podría persuadir el flujo de agua a través de un capilar [4]. Existen varias teorías para la descripción de la electroósmosis, incluida la teoría de Helmholtz-Smoluchowski, la teoría de Schmid, el modelo de fricción de Spiegler, la teoría de Buckingham π y la teoría de la hidratación iónica [5-6].

En la década de los años 30's Arthur Casagrande fue el primero de exponer este tipo de aplicación en la Ingeniería Civil y después de él, se han presentado múltiples aplicaciones, entre las que se destacan, mejorar la capacidad de pilas de fricción (Milligan [7]), el fortalecimiento y la estabilización de arcillas blandas (Casagrande [8]; Lo et al. [9]; Burnotte et al. [10]), controlando el agua de poros en los sitios de excavación (Bjerrum et al. [11]) y deshidratación de presas de relave (Sprute y Kelsh [12]; Sprute et al. [13]; Lockhart [14]; Fourie et al. [15]).

2. Electro-osmosis

La electro-ósmosis es el fenómeno electro-cinético más aplicable al mejoramiento del suelo.

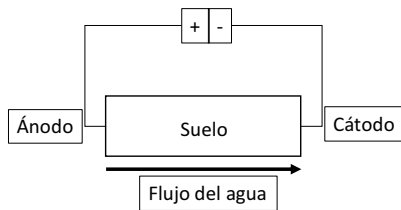


Figura 1. Diferencia de potencial [16].

Se han desarrollado varias teorías para explicar el transporte electro-osmótico de agua en Suelos arcillosos. De estos, la teoría de Helmholtz-Smoluchowski es una de las más antiguas y más utilizada (Mitchell, [17]).

Un capilar lleno de agua se considera como un condensador eléctrico con cargas de un signo cerca de la superficie de las paredes del capilar y cargas de signo contrario concentradas en una capa que se encuentra en el agua a una pequeña distancia de la superficie del capilar.

Mitchell y Soga [17], señalan que, si v es la velocidad del flujo, μ la viscosidad dinámica y δ la distancia entre la superficie y el centro del plano de movimiento, entonces, la fuerza por unidad de área viene dada por la ley de viscosidad de Newton:

$$\tau = \mu \frac{v}{\delta} \tag{1}$$

Si se aplica un diferencial de potencial dV/dL a través de una capa con una densidad superficial de carga σ' , la fuerza por unidad de área debida al campo eléctrico generado viene dada por la expresión 2:

$$\varepsilon = \sigma' \frac{\Delta V}{\Delta L} \tag{2}$$

Se debe cumplir el equilibrio, por lo que:

$$\mu \frac{v}{\delta} = \sigma' \frac{\Delta V}{\Delta L} \tag{3}$$

$$v = \frac{\Delta V}{\Delta L} * \left(\frac{\sigma' \delta}{\mu} \right) \tag{4}$$

Para un solo capilar de área a , se obtiene el caudal de salida:

$$q = va = \frac{\Delta V}{\Delta L} * \left(\frac{\sigma' \delta}{\mu} \right) * a \tag{5}$$

Y para N capilares se obtiene el caudal total:

$$Q = qN = \frac{\Delta V}{\Delta L} * \left(\frac{\sigma' \delta}{\mu} \right) * aN \tag{6}$$

Si la porosidad del suelo es n y el área de todos los capilares es A , se debe cumplir que:

$$N * a = n * A \tag{7}$$

$$Q = \left(\frac{\sigma' \delta}{\mu} * n \right) * \frac{\Delta V}{\Delta L} * A \tag{8}$$

Y análogamente con la ley de Darcy, se puede escribir el caudal de salida así:

$$Q = Ke * ie * A \tag{9}$$

donde $Ke = \left(\frac{\sigma' \delta}{\mu} * n \right)$ es denominada permeabilidad electro-osmótica. Mitchell y Soga [17].

Para medir correctamente la permeabilidad electro-osmótica se debe obtener la potencial zeta (ζ). Asadi, K. Huat, Nahazanan, y Keykhah [18]., afirman que

$$Ke = \frac{\varepsilon \zeta}{\mu} * n \tag{10}$$

donde ε : permitividad eléctrica del suelo; ζ : potencial zeta; n : porosidad; μ : viscosidad dinámica del fluido del poro. Además:

$$\zeta = 4\pi\mu * \frac{EM}{Dt} \quad (11)$$

donde EM: movilidad electroforética (velocidad de las partículas/gradiante de voltaje); Dt: constante dieléctrica.

3. Caracterización del sitio del ensayo

En la zona sur de la ciudad de Medellín, cerca al municipio de Caldas, en un proyecto de construcción, hay una zona que tiene un lleno antrópico realizado con material de corte proveniente de la misma zona de la construcción, el cual tiene un espesor de lleno de aproximadamente 15m; lleno construido en capas de hasta 15cm de espesor hasta alcanzar una densidad seca mayor o igual al 98% del Proctor modificado; el lleno fue construido con un limo arcilloso producto de la meteorización de esquisto micáceo y grafitoso, las propiedades del material del lleno se presentan en la tabla 1.

Tabla 1. Propiedades del material del lleno.

Densidad Húmeda (kN/m ³)	Limite Liquido (LL)	Indice de plasticidad (IP)	Humedad % (w)	Gs
18.9	32-40	1-7	17-24	2.76-2.81

Para la caracterización geotécnica del ensayo se realizaron ensayos de clasificación, humedad, corte directo UU, consolidación; ensayos que se realizaron antes y después del proceso de electro-osmosis.

3.1. Ubicacion en campo

Siguiendo las recomendaciones de Sahib et al [19] un tetraedro con un cátodo central y tres ánodos fueron instalados en campo, como se observa en la figura 2.

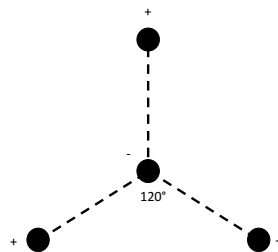


Figura 2. Tetraedro utilizado en campo (fuente propia).

4. Caracterización del ensayo de electro-osmosis

Varillas de acero utilizadas en construcción de 12m de longitud, y un diámetro de 19.05mm (3/4") fueron colocadas en el sitio designado, siguiendo la distribución de la figura 2, se realizaron perforaciones en el cátodo con equipo de perforación, se introdujo

la varilla de acero y se llenaron las paredes del hueco con material granular para facilitar el movimiento del agua; posteriormente se realizó la instalación eléctrica la cual se concibió bajo la premisa de aplicar de manera constante un voltaje al terreno a través de los ánodos, se aplicaron 30 voltios en un lapso de tiempo de 15 días.

- Longitud de varillas: 12m
- Separación horizontal: 1.5m
- Voltaje aplicado: 30v
- Tiempo de ensayo: 15 días
- K_e ($\text{cm}^2/\text{s V}$): 5×10^{-5}

5. Resultados

Se presentan en las siguientes figuras los resultados de los ensayos de laboratorio antes y después del ensayo de electro-osmosis.

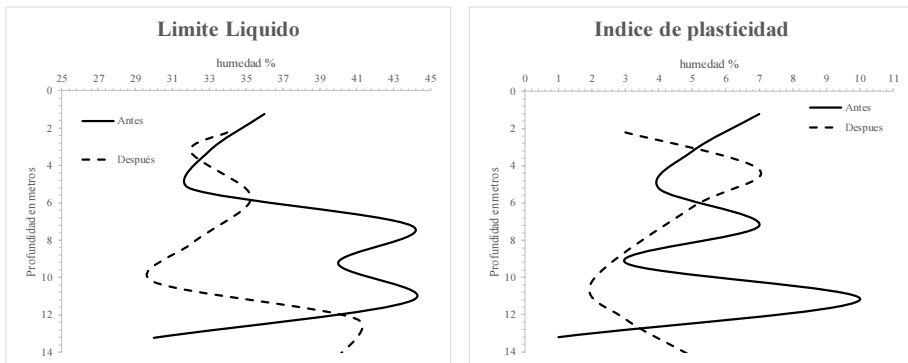


Figure 3. Variación de los límites de Atterberg.

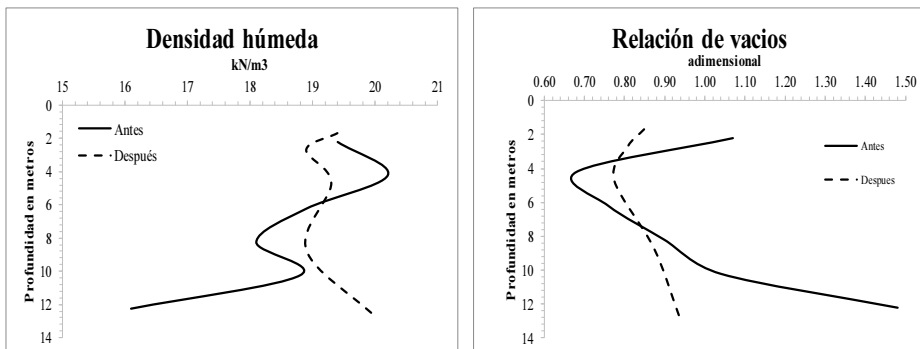


Figure 4. Variación de la densidad y la relación de vacíos.

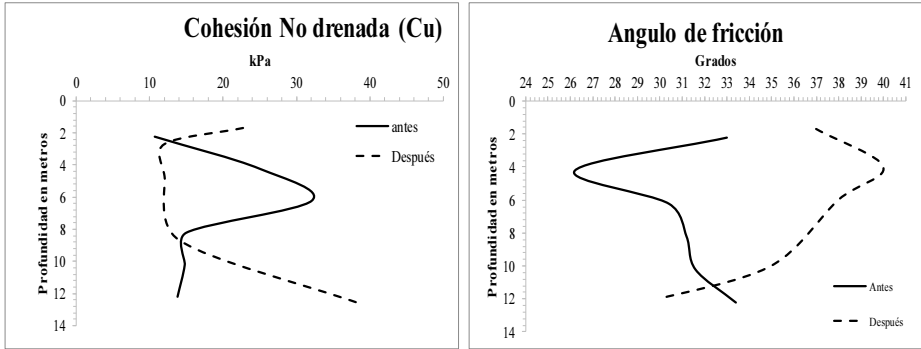


Figure 5. Variación de parámetros de resistencia.

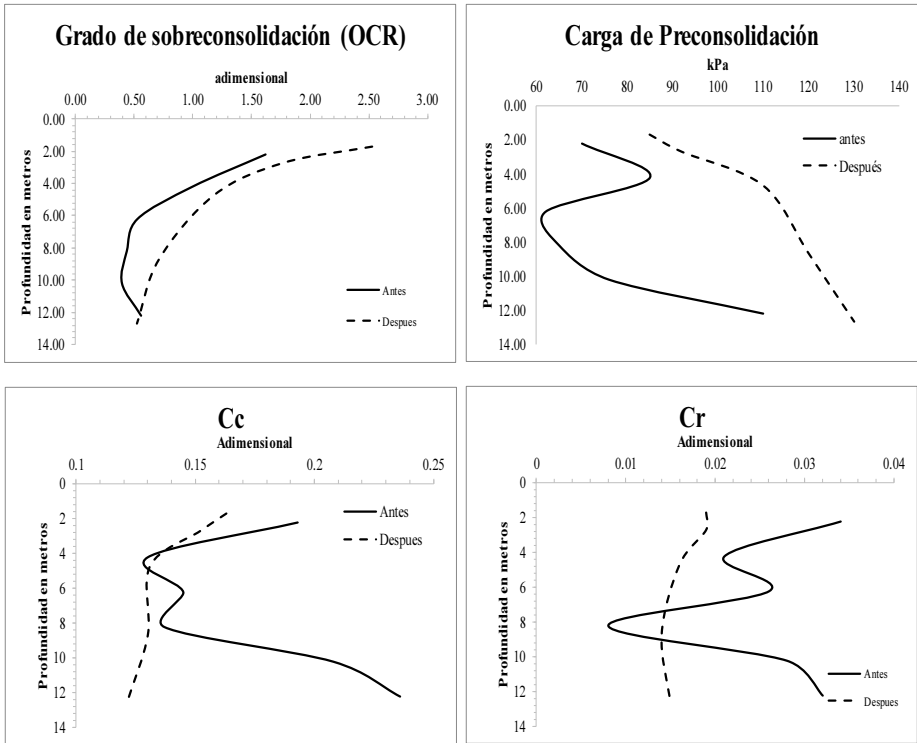


Figure 6. Variación de parámetros de consolidación.

6. Discusión

En la figura 3 se observa una disminución en los valores del Limite líquido, lo que indica una disminución de la humedad del suelo cambiando su estado de líquido a menos líquido, de igual forma se observa una disminución en el índice de plasticidad del suelo

convirtiéndolo en un suelo mas rígido por la disminución en la humedad del mismo después de la realización del ensayo de electro-osmosis.

En la figura 4 se observa que hay un incremento en a la densidad húmeda del material en profundidad, posiblemente por la rigidización del material producto de la disminución de la humedad y por ende una disminución significativa de la relación de vacíos a la misma profundidad, asociado probablemente a un mayor esfuerzo vertical; mientras que superficialmente no se presentan los mismos cambios.

En la figura 5, se presenta un incremento en la cohesión no drenada hacia el fondo de la perforación, mientras que en la parte media hay una disminución y los valores se mantienen constantes en el tercio medio; con el ángulo de fricción hay un incremento considerable el cual va disminuyendo con la profundidad.

En la figura 6, se observa que hay un incremento generalizado en las propiedades que controlan el comportamiento de deformaciones del suelo en general, llama la atención el incremento de la carga de preconsolidación y la disminución tan marcada del coeficiente de compresibilidad (Cc).

7. Asentamientos

Con base en los parámetros mejorados se realizó una evaluación del comportamiento del lleno en el tiempo, en función de la carga viva de servicio de 50kPa (5 t/m²) que tendría durante la vida útil de la estructura y se compara con la curva de deformación medida en campo.

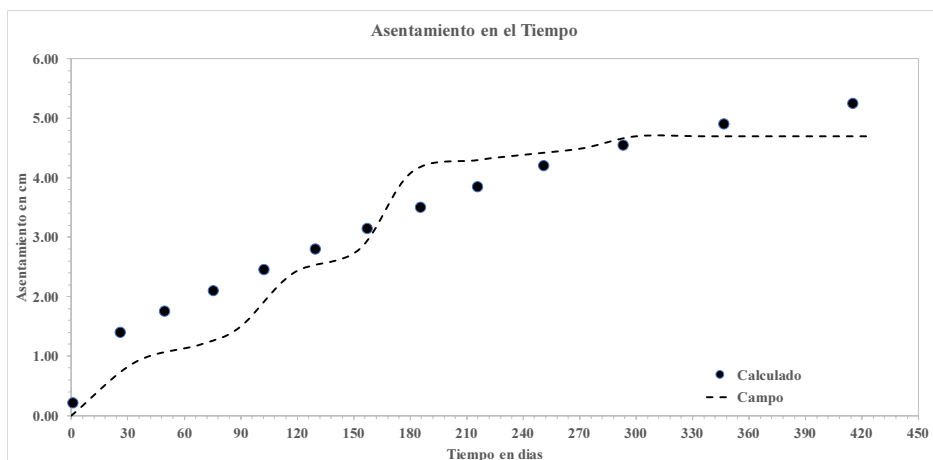


Figure 7. Comparación de asentamientos calculados vs campo.

8. Conclusiones

Un ensayo de mejoramiento de suelos basado en electro-osmosis en suelos residuales ha sido realizado y ha sido probada su efectividad en cuanto al incremento en a la resistencia del suelo y disminución de la deformación ante una carga impuesta.

Mas investigación es requerida en cuanto a utilizar otro tipo de suelos residuales, la geometría a utilizar, equipos, investigar el cambio químico, generación de gases etc.

Agradecimientos

Los autores, quieren expresar su mas sincero agradecimiento al ingeniero Jorge Arboleda, al Ingeniero Santiago Hinestroza, al arquitecto Héctor Camilo Mejía, por la confianza depositada para la realización de esta prueba piloto en sus obras.

Referencias

- [1] Hunter, R.J. Foundations of Colloid Science, 2nd Ed; Oxford University Press: New York, 2001.
- [2] M.R., Hausmann, Engineering Principles of Ground Modifications, New York: McGraw Hill Publishing Company (1990).
- [3] S.A., Tajudin, I., Jefferson, C.D.F., Rogers, and D.I., Boardman, An International Conference on Recent Advances in Engineering Geology, Kuala Lumpur, Malaysia, (2008)143-150.
- [4] M.B., Das, Advanced Soil Mechanics. Taylor and Francis, New York, (2008) 594p.
- [5] D.H., Gray, Geotechnique, 20(1970) 81-93.
- [6] D.H., Gray, and H.K., Mitchell, Journal of the Soil Mechanics and Foundations, ASCE 93 (1967) 209-236.
- [7] Milligan, V., First application of electro-osmosis to improve friction pile capacity - three decades later. Proceedings - ICE: Geotechnical Engineering, 1995. 113(2): p. 112-116.
- [8] Casagrande, L., Stabilization of soils by means of electro-osmosis-State of the art. Journal of the Boston Society of Civil Engineers Section, American Society of Civil Engineers, 1983. 69(2): p. 255-302.
- [9] Lo, K.Y., I.I. Inculat and K.S. Ho, Electroosmotic strengthening of soft sensitive clays. Can Geotech J, 1991. 28: p. 362-73.
- [10] Burnotte, F., G. Lefebvre and G. Grondin, A case record of electroosmotic consolidation of soft clay with improved soil-electrode contact. Can Geotech J, 2004. 41(6): p. 1038-1053.
- [11] Bjerrum, L., J. Moum and O. Eide, Application of electro-osmosis to a foundation problem in a Norwegian quick clay. Geotechnique, 1967. 17(3): p. 214-235.
- [12] Sprute, R.H. and D.J. Kelsh, Dewatering fine-particle suspensions with direct current. In: Proc. Int. Symp. Fine Particle Processes, vol.2. 1980. La Vegas, Nevada, p.1828-1844.
- [13] Sprute, R.H., D.J. Kelsh and S.L. Thompson, Electrokinetic densification of solids in a coal mine sediment pond: a feasibility study. Report of Investigations. 1982, Avondale, Md.: U.S. Dept. of the Interior, Bureau of Mines.
- [14] Lockhart, N.C., Electro-dewatering of fine suspensions. Advances in Solid-liquid Separation, 1986: p. 241-274.
- [15] Fourie, A.B., D.G. Johns and C.F. Jones, Dewatering of mine tailings using Electrokinetic geosynthetics. Can Geotech J, 2007. 44(2): p. 160-172.
- [16] Glendinning, S., Jones, C. J., & Lamont-Black, J. (2005). The Use of Electrokinetic Geosynthetics (EKG) to Improve Soft Soils. Elsevier Geo-Engineering Book Series, 999-1002.
- [17] Mitchell, J., & Soga, K. (2005). Fundamentals of Soil Behaviour. Hoboken: John Wiley & Sons.
- [18] Asadi, A., K. Huat, B., Nahazanan, H., & Keykhah, H. (2013). Theory of electroosmosis in Soil. International Journal of electrochemical science, 1016-1025.
- [19] Sahib, Amal Azad & Vinod, P. (2010). Evaluation of Various Electrode Configurations in Electro-Osmosis. December 16–18, 2010. IGS Mumbai Chapter & IIT Bombay. 301-304