

## Incremento de resistencia en pilotes de fricción, con electrósmosis.

Walter I. Paniagua  
Pilotec, SA de CV

**1. Introducción.** Cuando se hinca un pilote en un suelo cohesivo, se remoldea el suelo alrededor del pilote. Al recuperarse ese suelo del remoldeo, se genera un incremento en la capacidad de carga por fricción del pilote. Este fenómeno no puede predecirse con base en las propiedades ingenieriles del suelo; sin embargo, se han propuesto diferentes mecanismos para explicar este comportamiento:

- Reconsolidación del suelo, después de disiparse el exceso de presión de poro durante el hincado; este proceso puede tomar entre algunos minutos, hasta varias semanas, e incluso años (Paniagua e Ibarra, 2012). Ha sido reportado ampliamente en la literatura, y se han generado recomendaciones para tomarlo en cuenta en el diseño geotécnico (Zeevaert, 1982).
- Efectos relacionados con el fenómeno de envejecimiento, como tixotropía, compresión secundaria, interferencia de partículas y dispersión de arcillas (Schmertmann, 1991).

Con el objetivo de incrementar artificialmente la resistencia por fricción de pilotes metálicos en suelos cohesivos después del hincado, desde el primer tercio del siglo XX se aplicó el procedimiento conocido como electrósmosis en pilotes metálicos (Soderman and Milligan, 1961; Milligan, 1994).

**2. Principio de electrósmosis.** El proceso de electrósmosis fue descubierto al inicio del siglo XIX y fue aplicado a los suelos por Leo Casagrande desde los 1930 (Casagrande, 1948). Está basado en el hecho de que cuando una corriente eléctrica directa (CD) se establece entre dos electrodos, insertados en suelos finos, el agua fluye del ánodo (carga positiva) al cátodo (carga negativa), Figura 1. La razón del movimiento del agua es debido a que las partículas de arcilla están cargadas negativamente y atraen cationes (cargados positivamente) como el sodio, calcio y magnesio a su superficie. Cuando se establece una CD entre dos barras de metal, los cationes que están en la superficie de las partículas de arcilla empiezan a deslizarse hacia el cátodo por atracción eléctrica. El movimiento de esta capa en la frontera de cationes arrastra el agua libre del suelo con ella. El agua que se acumula en el cátodo se extrae y el contenido de agua de la arcilla disminuye, con un incremento asociado de la resistencia y de la rigidez. Adicionalmente, las reacciones electroquímicas asociadas con este proceso, alteran las propiedades físicas y químicas del suelo, y llevan a incrementos posteriores de la resistencia al corte (Mitchell, 1993).

El procedimiento tiene aplicaciones geotécnicas tales como el bombeo de agua en el suelo, estabilización de taludes y zanjas, prevención de expansión y contracción del suelo, el mejoramiento masivo a través de consolidación y el incremento de capacidad de carga por

fricción en pilotes. El método es considerado aplicable para proyectos que requieran un incremento rápido de las propiedades de suelos arcillosos blandos (Chu et al, 2009).

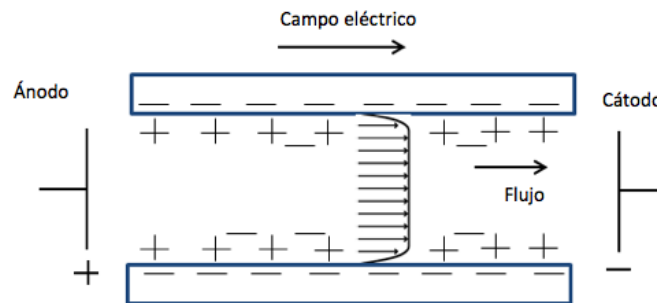


Figura 1, Principio de funcionamiento de la electrólisis.

En México, se realizaron experimentos para incrementar la resistencia del suelo con tratamiento electrosmótico, tanto en laboratorio, como en campo, Figura 2. En este caso, se reportan las resistencias al corte medidas en el suelo, a través de una veleta de campo, además de indicarse el incremento de resistencia después del tratamiento electrosmótico. También se realizaron pruebas de carga estática en pilotes metálicos para este propósito, Figura 3, aunque no se reporta una prueba de referencia, en un pilote sin tratamiento. Un elemento a destacar, es que el pilote de prueba estuvo instrumentado a lo largo del fuste, lo cual permite la interpretación de curvas de transferencia de carga, Figura 3b. Es importante mencionar que en ninguno de los dos casos citados se menciona el gradiente eléctrico aplicado, ni la duración de la aplicación de la CD, además de que no se presentan otros datos importantes como el arreglo de electrodos.

Por otro lado, al aplicar la CD, la resistencia del suelo en el pilote cátodo disminuye, y en el pilote ánodo se incrementa. Butterfield y Johnston (1980), reportan para el pilote cátodo disminuciones drásticas de hasta casi 5 veces (de 0.4 a 0.1) en el valor del factor de adhesión de Skempton  $\alpha$  para pequeñas longitudes de penetración, y de 0.1 a 0.2 cuando el pilote está totalmente hincado. Esta circunstancia puede aplicarse para facilitar el hincado en pilotes cátodo (Nikolaev, 1962), y de hecho el procedimiento se encuentra incluso patentado como ayuda para el hincado de pilotes (Christenson, 1979). Este método ha sido planteado también para disminuir la fricción negativa en pilotes (Davis and Poulos, 1980).

En este trabajo, en adelante se hará referencia únicamente a los pilotes ánodo, en los cuales se busca incrementar el valor de la fricción; Butterfield y Johnston (1980) indican un incremento del valor de  $\alpha$  de hasta 1.5 con 2m de penetración y valores cercanos a 2 en la punta del pilote.

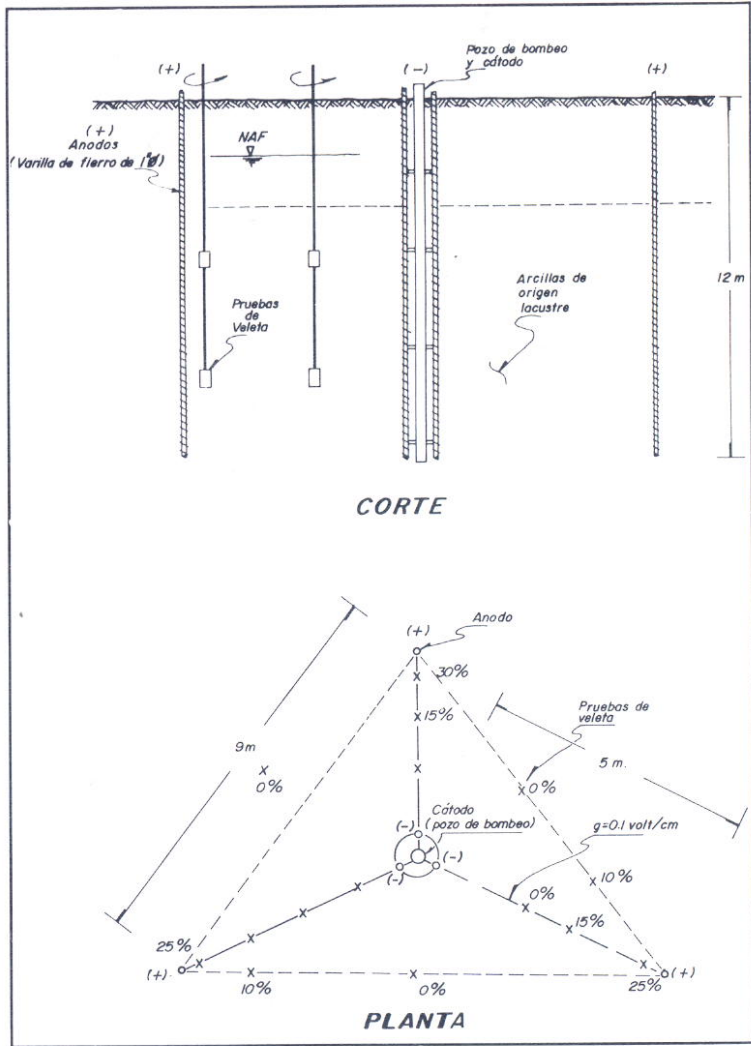
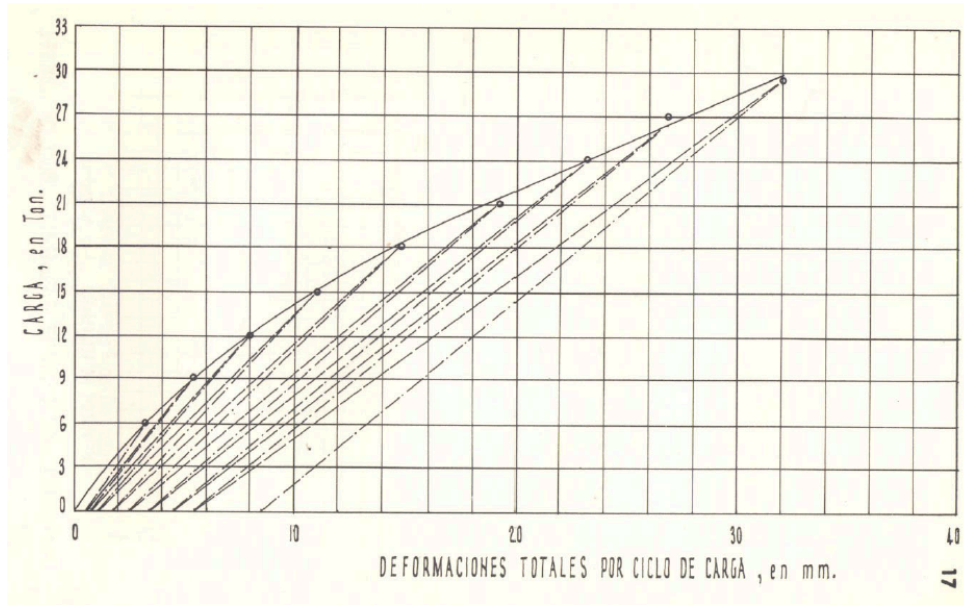
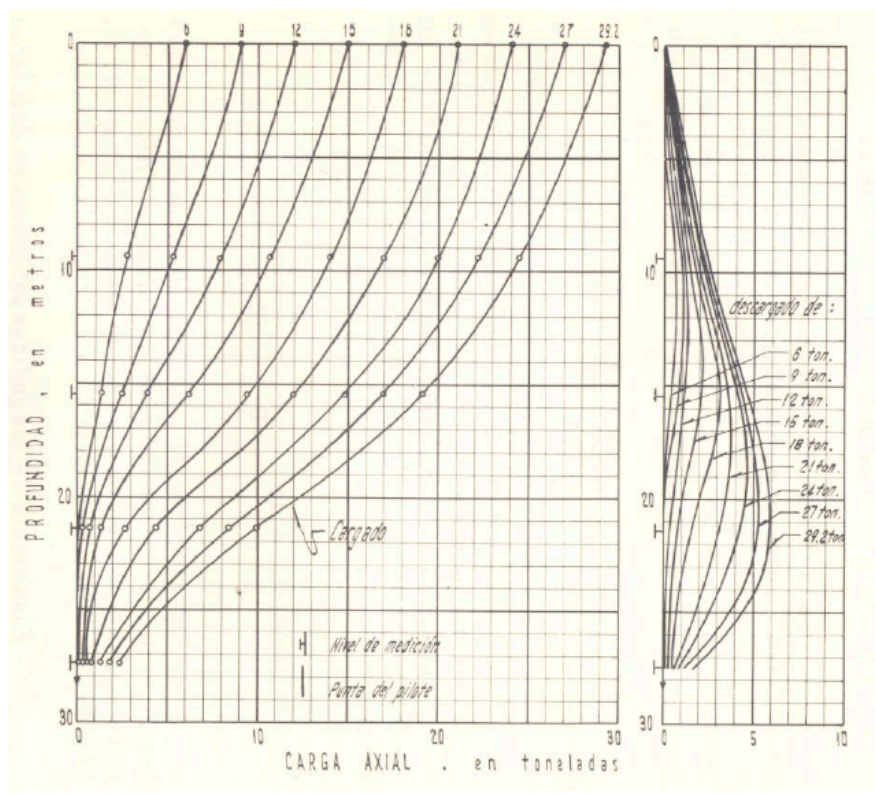


Figura 2, Instalación de ánodos y cátodos y pruebas de veleta. Se indica el porcentaje de incremento después del tratamiento, Lartigue (1993)



a) Deformaciones totales por ciclo en la cabeza del pilote



b) Gráficas de distribución de carga con la profundidad

Figura 3, Pruebas de carga en pilotes metálicos, con tratamiento electrosmótico, Paniagua-Espinosa y Silva (1966)

**3. Aplicación en pilotes metálicos.** Para evaluar el desempeño de pilotes electrosmóticos, desde el punto de vista del diseño geotécnico, se sugieren tres indicadores (Nizar and Clarke,

2014): factor de mejoramiento, eficiencia del sistema y consumo de energía. Para evaluar el primer aspecto, Kolwalkar (2009) propone la siguiente expresión, para arcillas de la familia de la caolinita:

$$\frac{Q_t}{Q_0} = 1 + A \left[ \log \left( \frac{t}{t_0} \right) \right] + B \left[ \log \left( \frac{E + E_0}{E_0} \right) \log \left( \frac{t_e + t_0}{t_0} \right) \right] \quad (\text{ec. 1})$$

donde:

- $Q_t$  capacidad de carga axial, al tiempo  $t$  después del hincado
- $Q_0$  capacidad de carga axial, al tiempo  $t_0$  después del hincado
- $A$  constante, depende del tipo de suelo, se propone 0.6
- $B$  constante, que depende de las propiedades electrocinéticas del suelo, se propone 1.6
- $t_0$  tiempo de referencia, en días = 2 días
- $E$  gradiente eléctrico aplicado, en volts
- $E_0$  gradiente eléctrico de referencia en volts = 2 volts
- $t_e$  duración de la aplicación del gradiente eléctrico, en días

Se hace notar que el factor de mejoramiento está influido por los siguientes elementos: capacidad de intercambio de cationes del suelo, tipo de minerales de la arcilla, gradiente eléctrico, duración y tiempo de aplicación del gradiente eléctrico, contenido de agua, tamaño y tipo de pilote, características del electrodo (tipo, número y posición). Nizar y Clarke (2014) sugieren que un arreglo hexagonal es óptimo, con ánodos en cada vértice del hexágono y un cátodo en el centro.

En la Figura 4 se muestran resultados, en un modelo de laboratorio, del incremento de la capacidad de carga con el tiempo, en función del gradiente eléctrico aplicado, comparado con un pilote de referencia, sin tratamiento. Se observa que, dependiendo del voltaje aplicado, el incremento en la capacidad de carga del pilote con tratamiento electrosmótico, puede ser hasta de 4 veces la del pilote sin tratamiento.

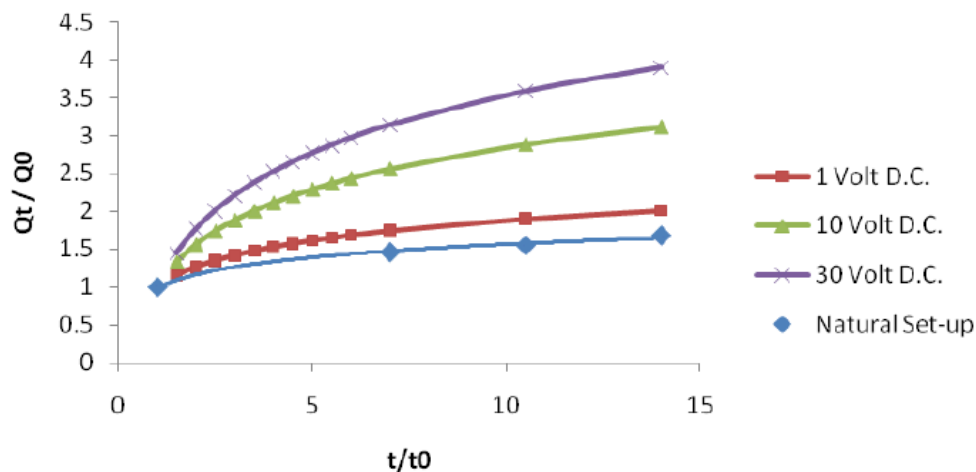


Figura 4, Incremento de la capacidad de carga vs. tiempo, con diferentes gradientes eléctricos, Kolwalkar (2009)

Para evaluar el segundo indicador, la eficiencia del sistema, Nizar and Clarke (2014) sugieren medir el asentamiento (que es una función directa del agua expulsada) por unidad de carga eléctrica, durante el tiempo de tratamiento. El tercer indicador, relacionado con el costo, es el consumo de energía durante el tratamiento, o bien, el consumo de energía por unidad de volumen de suelo tratado. En la Tabla 1 se muestran los indicadores mencionados.

Tabla 1, Indicadores del desempeño para pilotes electrosmóticos, Nizar y Clarke (2014)

<b>Indicador</b>	<b>Valor</b>
Factor de mejoramiento	$S_o/S_t$
Factor de eficiencia	$(S_t A_o)/(I t)$
Factor de energía	$(V I t)/(A_o h)$

donde:

- So    asentamiento del suelo no tratado
- St    asentamiento del suelo tratado
- Ao    área total de tratamiento
- V    voltaje
- I    corriente promedio en el tiempo de tratamiento
- h    profundidad del suelo tratado

Se advierte que el mejoramiento es una función del tiempo de tratamiento, así como de la densidad de voltaje, que a su vez es una función del espaciamiento entre electrodos, el voltaje aplicado y el número de ánodos. El ingeniero de diseño puede especificar el arreglo, densidad de voltaje y tiempo de tratamiento y los resultados se pueden extrapolar de pruebas de campo en el sitio.

**4. Comentarios finales.** El proceso electrosmótico induce cambios en las propiedades físicas y químicas del suelo. El tratamiento extrae agua del suelo e induce presión de poro negativa, que resulta en un asentamiento por consolidación, y una disminución del contenido de agua. El incremento en la resistencia al corte es permanente, debido al incremento significativo en la carga de preconsolidación y el cambio en las propiedades inherentes del suelo (Indraratna et al, 2015).

El uso del tratamiento electrosmótico en pilotes metálicos tiene antecedentes de hace casi 90 años; sin embargo, las experiencias en la Ciudad de México se suspendieron al abandonarse el bombeo electrosmótico a mediados de los 1970. Es necesario realizar mayores investigaciones para predecir el comportamiento de estos elementos, y adecuar la ec. (1) a los suelos locales, o encontrar una expresión equivalente, de preferencia soportado con pruebas de carga en campo. Es importante reportar las variables involucradas, para capitalizar la experiencia y aplicarla en casos prácticos; las variables de interés son: arreglo geométrico de electrodos, CD aplicada (voltaje y duración) y resultados obtenidos en el incremento de la resistencia a la fricción, referidos a elementos sin tratamiento.

El empleo de la electrósmosis en pilotes se prevé como una alternativa viable, tomando en cuenta que se ha retomado recientemente el uso de los pilotes metálicos de sección H en esta zona (Figura 5) o bien, aplicarlo en los pilotes metálicos helicoidales.



Figura 5, Pilotes metálicos H, hincados en 2018, en la Ciudad de México.

### Referencias

Butterfield, R. and Johnston, I.W. (1980) "Influence of electro-osmosis on metallic piles in clay", *Géotechnique* 30, N° 1, 17-38.

Casagrande, L. (1948) "Electro-osmosis", *Proceedings, 2nd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, vol I.

Christenson, L. (1979) "Method of assisting pile driving by electro-osmosis", *United States Patent 4157287*.

Chu J., Varaksin S., Klotz U. and Mengé P. (2010) "Construction processes", Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, IOS Press.

Davis, E.H. and Poulos, H.G. (1980) "The relief of negative skin friction on piles by electro-osmosis", Third Australia-New Zealand Conference on Geomechanics, Wellington.

Indraratna B., Chu J. and Rujikiatkamjorn C. (2015) "Ground improvement case histories. Chemical, electrokinetic, thermal, and bioengineering methods", Elsevier.

Kolwalkar, S.R. (2009) "Increasing pile capacity and set-up in clay by electrokinetics", PhD Thesis, Cleveland State University. US.

Lartigue, G. (1993) "Experimentos sobre envejecimiento artificial en suelos de la ciudad de México", Simposio Envejecimiento de Suelos, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, México.

Milligan, V. (1994) "First application of electro-osmosis to improve friction pile capacity-three decades later", Proceedings XIII International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, New Dehli, India.

Mitchell, J.K. (1993) "Fundamentals of soil behavior", 2nd edition, John Wiley and Sons, New York.

Nikolaev B.A. (1962) "Pile driving by electroosmosis", Consultants Bureau, New York.

Nizar, K. and Clarke B.G. (2014) "Electro Osmotic piles", Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement, Volume 167 Issue 2, pp. 135-144.

Paniagua-Espinosa W. y Silva H. (1966) "Experiencias sobre pilotes electrometálicos en la ciudad de México", Publicación interna N° 15, Solum, México.

Paniagua, W.I. e Ibarra, E. (2012) "Evolución de la capacidad de carga de pilotes hincados", XXVI Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica, Cancun, Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica.

Schmertmann, John H. (1991). "The Mechanical Aging of Soils," Journal of Geotechnical Engineering, Volume 117, No. 9, September 1991, ASCE, pp.1288-1330.

Soderman L.G. and Milligan V. (1961) "Capacity of friction piles in varved clay increased by electro-osmosis", Proceedings International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Paris, Vol. 2.

Zeevaert, L. (1982) "Foundation engineering for difficult subsoil conditions", Van Nostrand Reinhold, New York.