

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.

Efecto de Levantamiento del Terreno por Hincas de Pilotes en Suelos Blandos de Bogotá

Jorge Alberto RODRIGUEZ^{a,1} y David Leonardo QUIROS^b

^a Jeoprobe SAS, Colombia. jorge.rodriguez@jeoprobe.com

^b Jeoprobe SAS, Colombia. david.quiros@jeoprobe.com

Resumen. La hincas de pilotes produce levantamiento del terreno por efecto de desplazamiento de suelos saturados en condición no drenada y posterior asentamiento por consolidación. Se presenta la experiencia en la evaluación de este efecto mediante soluciones analíticas reportadas en la literatura, y se comparan con registros de construcción de un proyecto de pilotaje monitoreado al norte de la ciudad de Bogotá, presentando conclusiones sobre la aplicabilidad de los métodos de predicción. En este proyecto se instalaron puntos de control a varias distancias desde el sitio de instalación de los pilotes y se midió el levantamiento del terreno y su efecto con la distancia y con la cantidad de pilotes instalados. Se encontró muy buena correspondencia entre lo medido y lo predicho por el método semi analítico expuesto por Sagaseta y Whittle [1]. Se presentaron levantamientos que alcanzaron los 20 cm en inmediaciones del borde del proyecto y de hasta 14cm a 13m de distancia. El efecto se atenúa con la distancia pero alcanza a afectar un área a distancia del orden de la longitud de los pilotes, por lo que se presentaron deformaciones del terreno en zona de edificaciones vecinas. El movimiento de suelo ocurrió también dentro de la zona de trabajo donde se registraron levantamientos de los pilotes. Luego de la instalación de los pilotes se han seguido monitoreando las deformaciones donde se corrobora que el efecto de levantamiento es temporal hasta producir asentamientos netos en el suelo. Este es un efecto importante que se debe tener en cuenta en proyectos de pilotes hincados en suelos arcillosos blandos.

Palabras Clave. Levantamiento de terreno, pilotes hincados.

1. Introducción

El efecto del levantamiento del terreno en suelos arcillosos ha venido siendo estudiado desde hace varias décadas reportando el mecanismo generado en el suelo y los efectos que conlleva en la afectación del área de trabajo y en las edificaciones vecinas [2,3]. La naturaleza de baja permeabilidad de los materiales arcillosos hace que el procedimiento de hincas de un pilote, ya sea mediante percusión o por presión hidráulica, sea un proceso de carga en condición no drenada el cual genera excesos de presión de poros en el suelo donde está siendo instalado el pilote [1,2]. Se han desarrollado métodos analíticos de sencilla aplicación que pueden ser utilizados como primera aproximación para la evaluación de la magnitud de desplazamientos que se tendrán a causa de la hincas de

¹ Autor de correspondencia, PhD., Av. Suba calle 115-58, Torre A, oficina 405, Bogotá, Colombia.
E-mail: jorge.rodriguez@jeoprobe.com.

pilotes. El conocimiento del efecto resulta valioso para la toma de decisiones de actividades propias del proceso de pilotaje, considerando que es un efecto que ha sido validado en proyectos reales [4, 5, 6].

2. Perfil Estratigráfico

El norte y occidente de la ciudad de Bogotá se encuentra sobre una planicie formada por un depósito de profundidad variable de origen lacustre, subyacente por un depósito de origen aluvial. Los depósitos lacustres están compuestos mayormente por arcillas de muy alta plasticidad, que por su origen y velocidad de sedimentación, presentan altos contenidos de humedad y relaciones de vacíos elevadas que condicionan un material muy blando de bajo peso unitario y alta compresibilidad.

En la Figura 1 se presenta un perfil típico de la zona norte de la ciudad, correspondiente al sitio del proyecto, donde se observan contenidos de humedad de hasta 200% muy cercanos a su valor de límite líquido. Ocasionalmente se observan valores que llegan al 300% los cuales corresponden a pequeños estratos de turba que delimitan al menos las últimas dos glaciaciones [7]. La resistencia del perfil se midió mediante ensayos de veleta donde se obtuvo el valor de resistencia pico al corte en condición no drenada (C_u), esfuerzo en la punta por el avance de piezocono (q_c) y golpes/pie del ensayo SPT. En estas gráficas se observa a los 55m de profundidad aproximadamente, el límite entre el depósito de origen lacustre y el inicio del depósito aluvial, reflejado en el aumento del número de golpes del SPT y en el rechazo de la sonda del piezocono. A esa profundidad se observaron muestras con presencia de arenas y gravas y se obtuvo el inicio de una tendencia decreciente del valor de humedad y un aumento en el peso unitario que continuó hasta la profundidad máxima de exploración.

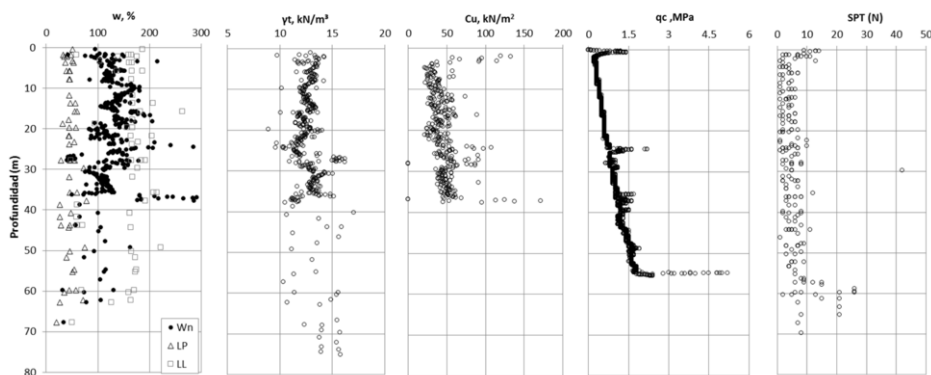


Figura 1. Perfil de suelos en el proyecto.

3. Características del Proyecto e Instrumentación

La cimentación de un proyecto localizado en la ciudad de Bogotá y compuesto por 2 torres de edificios residenciales de 17 pisos y 3 sótanos, fue diseñada mediante un sistema placa-pilote en orden de transmitir la carga en profundidad, predominantemente por fricción a estratos de mejor competencia mecánica que los encontrados superficialmente.

Con este objetivo los pilotes fueron diseñados como elementos de mejora para el control de asentamientos, buscando movilizar una carga cercana a la última dadas las magnitudes de los asentamientos esperados a largo plazo.

Para la cimentación se seleccionó el uso de pilotes hincados de sección cuadrada de 40 cm de lado y longitudes de 43m y 52m considerando las características blandas de los primeros 30m del depósito de origen lacustre. Para alcanzar dichas longitudes se utilizaron uniones mecánicas para vincular 4 segmentos prefabricados de 10.5m y 13m de longitud. Antes del inicio de la instalación de los pilotes se instalaron 2 pilotes de prueba de 52m de longitud donde se estimó la curva carga - desplazamiento de un pilote individual mediante la interpretación de pruebas de carga dinámica, cuyos resultados complementaron la información con la que finalmente se diseñó la cimentación presentada en la Figura 2. En esa figura se localizan adicionalmente los puntos de control colocados dentro y en inmediaciones del proyecto, los cuales se monitorearon antes, durante y después de la instalación de los pilotes. Principalmente el monitoreo se compuso por puntos superficiales de control de desplazamiento vertical, medición de niveles piezométricos en piezómetros de hilo vibrátil y puntos de control de desplazamiento vertical dentro del área de pilotaje, a varias profundidades.

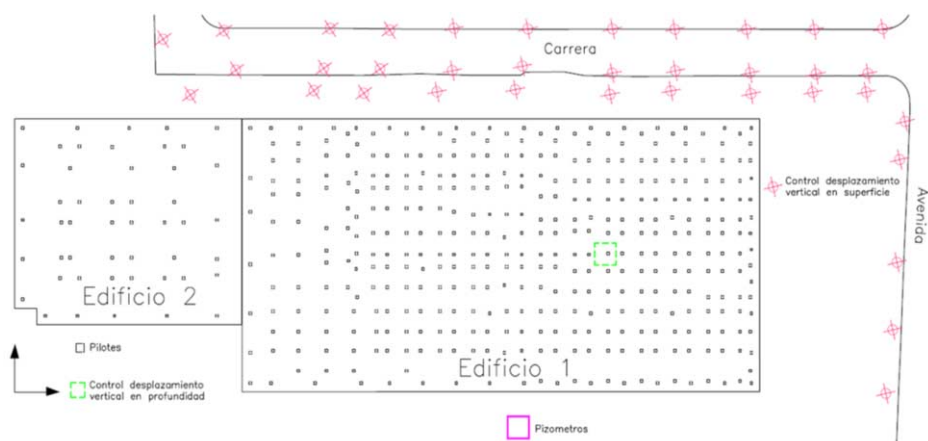


Figura 2. Cimentación y puntos de control.

4. Niveles Piezométricos y Desplazamientos Verticales Medidos

La hincado de pilotes en suelo arcilloso, que se hicieron tanto a percusión como a presión, genera como parte del proceso de avance de instalación, un desplazamiento y el aumento en la presión de poros en el suelo que van penetrando los pilotes. Dicho efecto corresponde a uno de los principales factores que inciden en la magnitud del levantamiento del suelo dentro del área de pilotaje como en sus alrededores [6]. Dependiendo del sector en donde se haga el monitoreo se tendrán diferentes valores de incremento de presión de poros, que pueden llegar incluso a superar el valor del esfuerzo efectivo en la profundidad donde llega la punta del pilote [5].

En el proyecto monitoreado se instaló, previamente al inicio de la hincado, una batería de piezómetros de hilo vibrátil con medición a profundidades de 15m, 35m y 65m en

relación al nivel del terreno. En la Figura 3 se presentan los resultados medidos en los tres piezómetros donde se enmarca en líneas verticales el inicio y final de la hinca de los pilotes. En ese lapso se observa un aumento de las presiones claramente identificado en los piezómetros con medición a los 35m y 65m de profundidad, mientras que en el piezómetro a 15m de profundidad no se identificó ninguna variación considerable durante el desarrollo de la hinca. Llama la atención la diferencia en el nivel piezométrico entre las tres profundidades, la cual no describe un comportamiento hidrostático sino una presión alterada probablemente por la presencia de gas generado en materia orgánica en el suelo arcilloso y los estratos de turba identificados en el depósito lacustre. Por conocimiento posterior en el avance del proyecto, se logró detectar que el nivel freático del área está alrededor de los 10m de profundidad respecto a la superficie del terreno, por lo que el piezómetro a 65m está verdaderamente reportando el nivel de la tabla de agua. En este piezómetro se observa una caída progresiva en sus valores justo después de la hinca que describe la disipación de la presión que generó la instalación de la cimentación profunda.

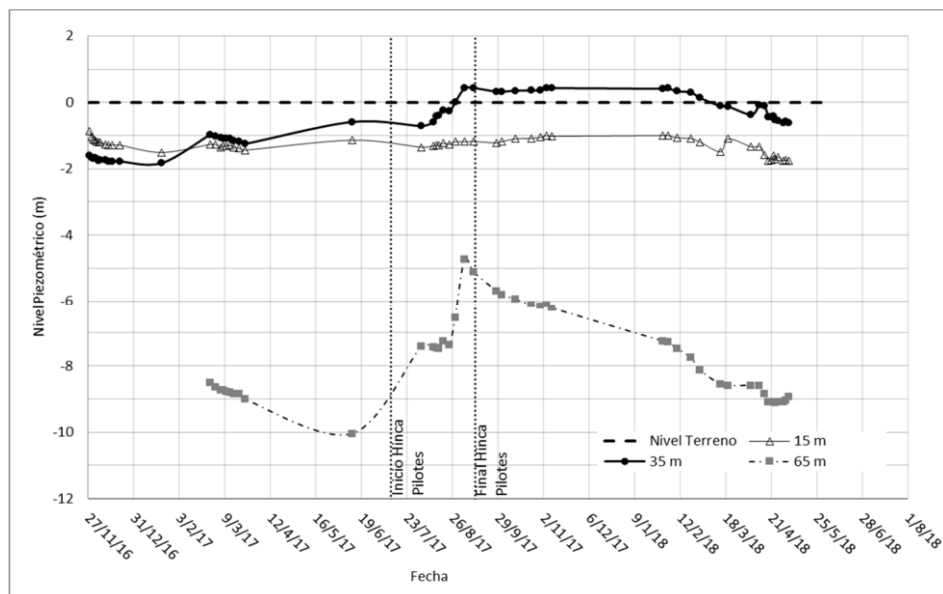


Figura 3. Niveles piezométricos medidos en el proyecto.

Puntos de control de desplazamiento en profundidad se localizaron dentro del área del edificio a una profundidad de 15m, 20m, 25m, 50m, 55m y 60m respecto al nivel del terreno. Los resultados se presentan en la Figura 4, donde se observa que el punto a 15m de profundidad presentó un levantamiento cercano a 40cm, mientras que los localizados a 20m y 25m que presentaban una tendencia similar, se averiaron por actividades propias de construcción alcanzando a registrar en su última medida levantamientos de hasta 25cm. Por su parte los puntos localizados a 50m, 55m y 60m registraron levantamientos entre 10cm y 12cm, contrario a lo expuesto por Sagasetta y Whittle [1] donde el pilote en un segmento cercano a su punta genera asentamientos y no levantamientos en el suelo circundante.

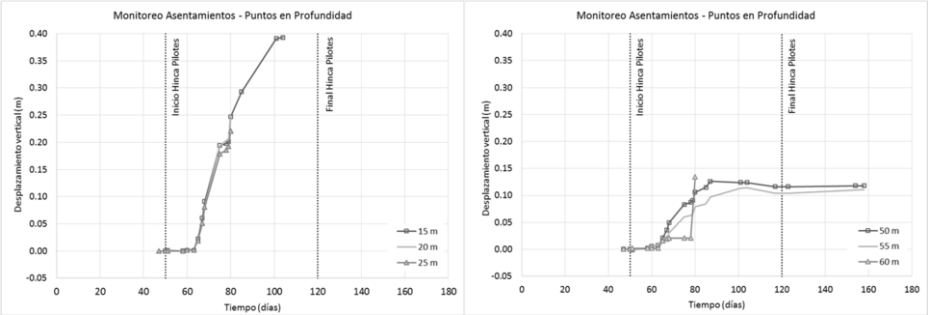


Figura 4. Desplazamientos verticales presentados durante la hinca en puntos de control de desplazamiento vertical en profundidad.

5. Métodos Analíticos de Predicción de Levantamiento

Se calcularon los desplazamientos en superficie utilizando la metodología de Rehnman descrita por Hernqvist y Nguyen [5], y la propuesta de Sagaseta y Whittle [1]. Ambos métodos tienen la particularidad de depender únicamente de características geométricas de los elementos instalados y del área que enmarca la zona de pilotaje, donde no intervienen directamente características mecánicas ni de rigidez del depósito en donde se instalan los pilotes. Para el caso de Rehnman el método proporciona únicamente un desplazamiento global en toda el área de pilotaje y una atenuación lineal del levantamiento a medida que se distancia del límite del proyecto. Por su parte el método de Sagaseta y Whittle [1] establece el aporte individual de cada pilote al levantamiento del terreno en función de la distancia, por lo que es posible obtener desplazamiento vertical superficial de un área delimitada, mediante la suma de los aportes de cada pilote teniendo en cuenta su distribución y sus características geométricas. La predicción obtenida para el proyecto por el método de Sagaseta y Whittle [1] se presenta en la Figura 5.

6. Comparación de Resultados Analíticos con Mediciones en Campo

Basados en los datos de la Figura 5, se compararon las predicciones analíticas con las proporcionadas por los puntos de control del monitoreo del proyecto. En primera instancia se observa que el mayor desplazamiento vertical sucede al interior de la zona de pilotaje donde se tiene una mayor densidad de pilotes, alcanzando valores de hasta 45cm de levantamiento, concordando bastante bien con los valores registrados en el proyecto a los 15m de profundidad. En la parte externa al área de pilotaje, donde fueron instalados la mayoría de puntos de control, se trazaron perfiles transversales de desplazamiento vertical al momento de finalizar con el pilotaje. Los perfiles medidos comparados con los calculados se presentan en la Figura 6. La correspondencia de los valores medidos en la parte central, es bastante cercana a los valores calculados. Sin embargo en las zonas más alejadas del área de pilotaje, el método de Sagaseta y Whittle [1] sobrestimó los levantamientos, al presentarse en realidad menores valores que los calculados. La sobreestimación fue en promedio del 30%.

Por su parte la estimación del método de Rehnman comparado con los puntos de medición, se presenta en la Figura 7. Se observa que la estimación lineal de Rehnman no solo proporciona valores más altos que los medidos, sino que no captura el comportamiento real de la atenuación del levantamiento del terreno en la distancia.

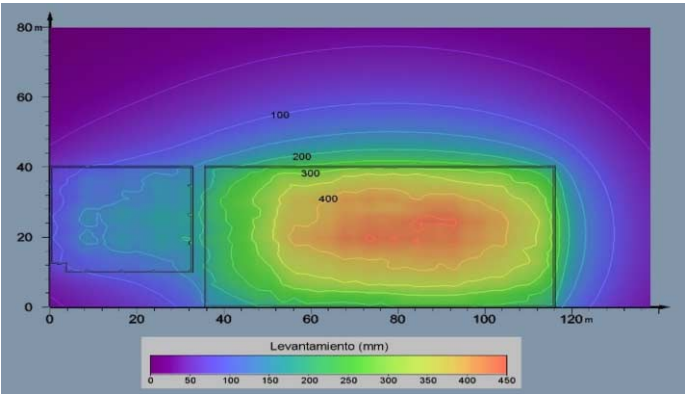


Figura 5. Levantamiento calculado para el Proyecto siguiendo la metodología de Sagaseta y Whittle [1].

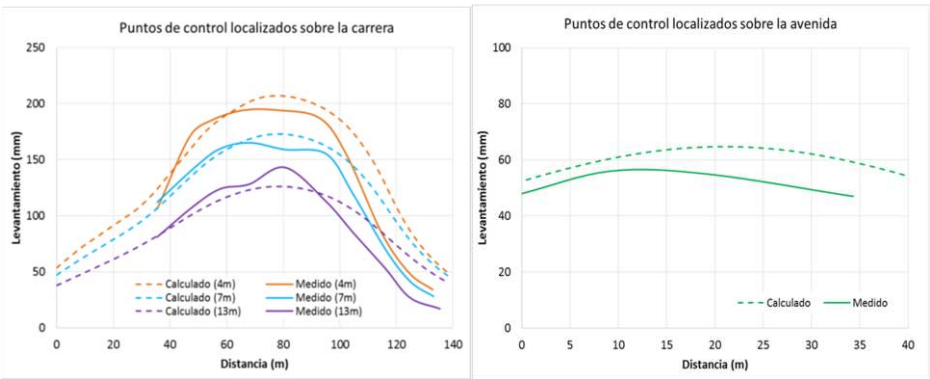


Figura 6. Perfiles de desplazamiento vertical medidos y calculados (método Sagaseta y Whittle [1]) trazados transversalmente sobre la localización de los puntos de control instalados en cercanías al proyecto.

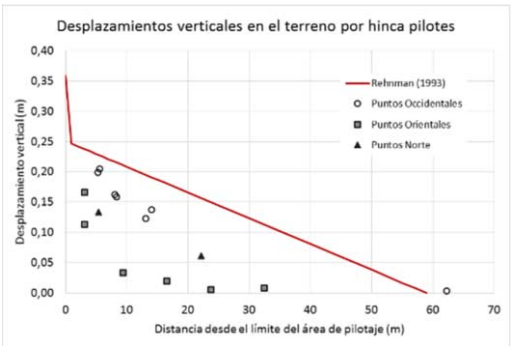


Figura 7. Estimación de levantamientos del terreno método Rehnman en comparación con los datos medidos por los puntos de control instalados en cercanías del proyecto.

7. Comportamiento Posterior a la Hinc

Posterior a la hinc de los pilotes se continuó el monitoreo en el tiempo de los puntos de control alrededor del proyecto para evaluar el comportamiento del terreno frente al avance de construcción. Los resultados se presentan en la Figura 8 y se observa como el levantamiento finalizó luego de terminada la hinc de los pilotes, para posteriormente iniciar con la recuperación de los levantamientos luego de 180 días de finalizada la instalación de la cimentación. Es posible que la tasa de recuperación del levantamiento exhibida esté incidida por la excavación de los sótanos, sin embargo se pudo corroborar que el efecto de levantamiento es temporal y que la magnitud de su recuperación está también en función de la distancia del punto al área de pilotaje.

En el momento de iniciar con la construcción de la losa de cimentación, se observó que la mayoría de los pilotes presentaron levantamientos significativos que pudieran haber afectado las juntas de los tramos de pilotes hincados, con lo cual se consideró necesario verificar la integridad y capacidad de carga de los pilotes. Para llegar al nivel de cimentación, al nivel -11m aproximadamente se construyó la infraestructura en una excavación parcial a nivel -3m y el cajón resultante se hincó [12], lo cual pudo haber inducido movimientos de los pilotes hincados previamente. Sin embargo se considera muy probable que esto haya contribuido al levantamiento de los pilotes, por lo que este efecto se considera como resultado de la instalación de los pilotes. El nivel observado de los pilotes condujo a la realización de una campaña de rehinca con el uso de gatos hidráulicos para garantizar que los elementos llegaran a su cota de diseño y evaluar el comportamiento de los pilotes ante cargas axiales. Se realizaron en total 344 re-hincas de las cuales 273 fueron en pilotes de 52m de longitud y las 71 restantes en pilotes de 43m. La aplicación de carga fue escalonada manteniendo la carga 10 minutos y se registró durante el procedimiento el desplazamiento en la cabeza de los pilotes.

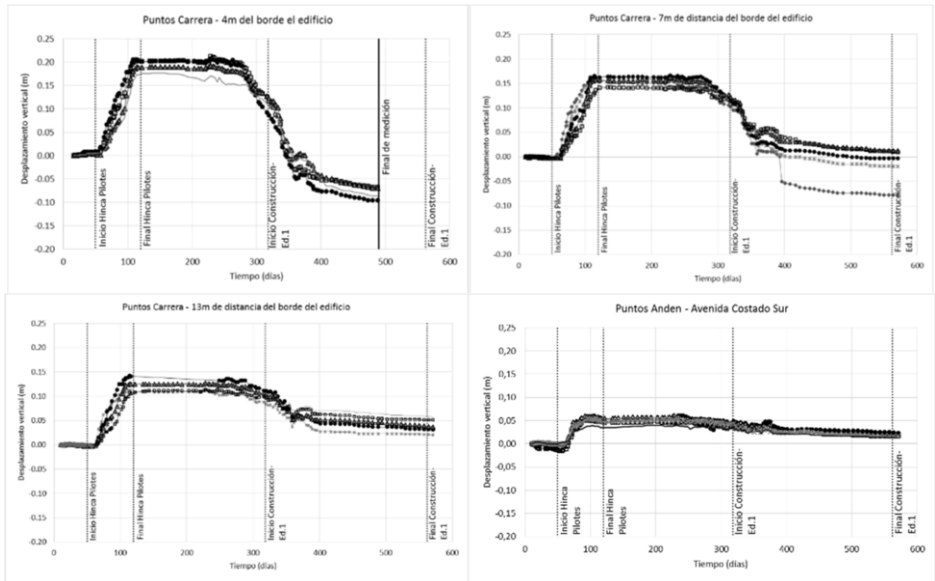


Figura 8. Desplazamiento vertical del terreno en el tiempo.

Las curvas obtenidas se presentan en la Figura 9, donde se enmarca un límite denominado como comportamiento normal esperado de un pilote a la carga axial en el perfil estratigráfico del proyecto. El límite normal fue trazado con la curva carga - desplazamiento obtenida en los dos pilotes de prueba instalados en el área antes del inicio de la hinca y considerando variaciones normales que han sido evidenciadas en otros proyectos con pilotes y perfiles de suelo similares. Aproximadamente el 50% de los pilotes presentó un comportamiento por fuera de los límites de normalidad, exhibiendo una curva escalonada de carga desplazamiento alcanzando valores finales entre 10 a 40cm. En algunos casos se hicieron pruebas de descarga y recarga y se verificó que luego de la re-hinca la capacidad y rigidez de los pilotes se mantenía y era adecuada. Los resultados de las re-hincas confirmaron la necesidad de haber restablecido la condición de los pilotes que había sido afectada por los procesos constructivos para conformarse a las condiciones de diseño.

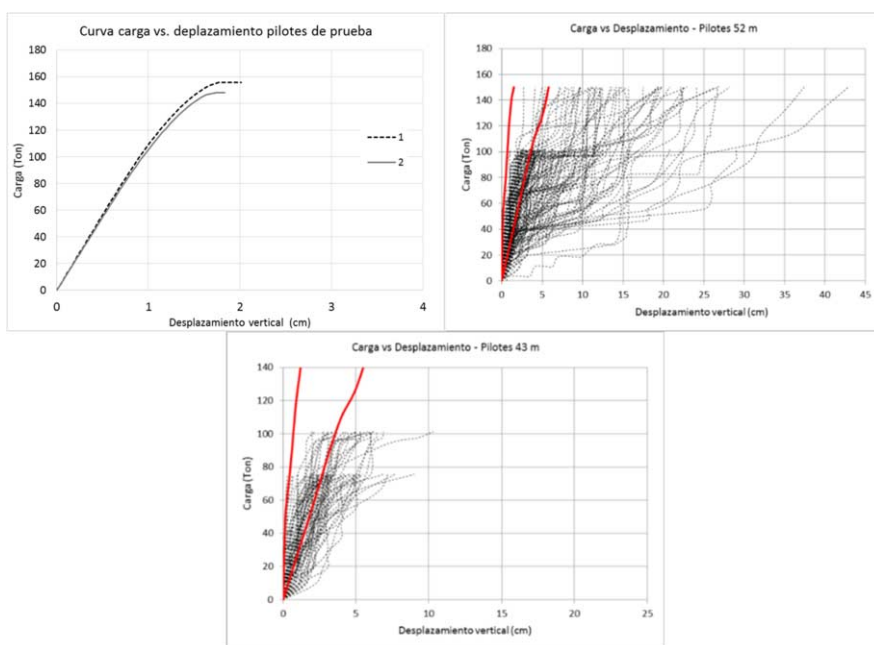


Figura 9. Curvas carga desplazamiento de a) pilotes de prueba instalados antes del inicio del Proyecto b) re-hincas sobre pilotes de 52m de longitud y c) re-hincas sobre pilotes de 43m de longitud.

8. Conclusiones

Para un proyecto en la ciudad de Bogotá cuya cimentación se planteó con pilotes hincados de 43m y 52m, se realizó un monitoreo que consistió en puntos de control en superficie del desplazamiento vertical en inmediaciones del proyecto, medición de niveles piezométricos a varias profundidades y control de desplazamiento vertical dentro del área de pilotaje. Con lo obtenido en el monitoreo se midió el efecto del aumento de la presión de poros en el depósito y el desarrollo del levantamiento del terreno a causa de la hinca de los pilotes de cimentación. El desplazamiento vertical fue estimado con los métodos analíticos de Rehman y Sagasetta y Whittle [1] los cuales están en función

únicamente de la distribución de los elementos y sus características geométricas. Los resultados obtenidos del método de Sagaseta y Whittle [1] coinciden bastante bien con lo obtenido durante la medición, sobre todo en la parte central donde hay más densidad de pilotes, pero sobreestiman sus valores para puntos que se alejan del área de pilotaje.

El efecto del levantamiento del terreno generó levantamientos máximos del orden de 40cm en el área interna que afectaron el comportamiento ante cargas axiales de los pilotes. El efecto fue temporal, como se ha corroborado con mediciones de los puntos de control posteriores a la hincia y a la reducción del nivel piezométrico para ese lapso en el piezómetro que mide a 65m de profundidad,

Se considera que los proyectos que involucren pilotes hincados en la ciudad de Bogotá y en depósitos arcillosos de consistencia blanda, sea previamente evaluado el levantamiento que se tendrá en el terreno dentro y fuera del proyecto utilizando como primera aproximación el método de Sagaseta y Whittle [1], para analizar las posibles afectaciones que se puedan presentar tanto en la cimentación del proyecto como tal, y en las edificaciones vecinas a causa de los movimientos del terreno, y poder definir acciones correctivas y preventivas de los efectos del proceso de hincia.

Referencias

- [1] Sagaseta, C. and Whittle, A. J. 2001. Prediction of ground movements due to pile driving in clay. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 127(1):55-66.
- [2] Hagerly, D. J. and Peck, R. B. 1971. Heave and lateral movements due to pile driving. *J. Soil Mech. and Found. Div., ASCE*, 97(11), 1513–1532.
- [3] Sew, G. 1984. Ground heave around driven piles in clay. PhD thesis, Hertford College, University of Oxford, England.
- [4] Hernqvist, H. and Nguyen, D. 2016. Analysis and FE-modelling of soil displacement associated to pile driving. MS thesis, Chalmers University of technology, Gothenburg, Sweden.
- [5] Tong, Y. X., Chen, Q. H. and Chen, X. L. 1981. Pile foundations in soft soils. *International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 10, Stockholm. Proceedings, Vol. 2, 869-872.
- [6] Dugan, J. P. and Freed, D. L. 1984. Ground Heave Due to Pile Driving. *International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*. 28.
- [7] Dueñas, H. 1986. Registro palinológico de las tres últimas épocas glaciales en la sabana de Bogotá, cordillera oriental, andes colombianos. *Geología Colombiana* No. 15, pp. 48-54.
- [8] Engin, H. K. and Brinkgreve, R. B. J. 2009. Investigation of Pile Behaviour Using Embedded Piles. M. Hamza et al. (Eds.), *Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Alexandria, Egypt, October 5-9.
- [9] Oostveen, J. P. and Koppers, J. A. G. 1985. Pile driving of soil displacing piles through soft soils. *Proc., 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 3, 1455–1458.
- [10] Rodríguez, J. F., Auvinet, G. and Martínez, H.E. 2015. Settlement analysis of friction piles in consolidating soft soils. *DYNA* 82 (192), pp. 211-220.
- [11] Wersäll, C. and Massarsch, R. 2013. Soil Heave Due to Pile Driving in Clay In *Proceedings of Sound Geotechnical to practice* (Stuedlein, A. W. (ed)). *Geotechnical Special Publication (GSP 230)*, pp. 481-499.
- [12] Rodríguez, J. Quiros, D. 2018. Edificio con Cajón Hincado como Solución de Excavación en Suelos Blandos de Bogotá. *Soil Heave Due to Pile Driving in Clay*. Submitted to XVI Pan American Congress on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering.