

Edificio con Cajón Hincado como Solución de Excavación en Suelos Blandos de Bogotá

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

^aJeoprobe SAS, Colombia. jorge.rodriquez@jeoprobe.com

^bJeoprobe SAS, Colombia. david.quiros@jeoprobe.com

Resumen. Se presenta la experiencia en el diseño y construcción de un cajón hincado para la subestructura de tres sótanos para un edificio en una zona de suelos muy blandos en la ciudad de Bogotá. El subsuelo de la zona corresponde en los primeros 30 m de profundidad a suelos lacustres recientes de consistencia muy blanda, conformados por arcillas y limos con capas de turba. En la zona se encuentran edificaciones de tres y cuatro niveles construidas hace unos 30 años que presentan asentamientos del orden de 50 cm o más, usualmente con inclinación importante. Experiencias recientes de excavaciones con pantallas de concreto excavadas y coladas in situ para excavaciones de varios sótanos han resultado en grandes asentamientos a distancias de hasta 50 m alrededor e incluso fallas de fondo de las excavaciones. Luego del análisis de estos problemas, como alternativa de solución se planteó hacer la construcción de la subestructura a nivel del terreno en una excavación parcial y posteriormente hincar el cajón resultante mediante excavación controlada y control activo con gatos hidráulicos actuando sobre pilotes de reacción. El sistema de cimentación final además utiliza pilotes de fricción hincados previamente para control de asentamientos. Se presentan detalles de las consideraciones de diseño de la solución, incluyendo la caracterización del terreno, una prueba de hinca de un cajón a escala y análisis de interacción suelo estructura. Se presentan detalles de la hinca y datos de la instrumentación durante el proceso.

Palabras Clave: Cajón hincado, suelos blandos.

1. Introducción

Excavaciones profundas en suelo blando representan un desafío en el diseño geotécnico debido a su baja resistencia al corte y a la susceptibilidad del material a presentar altas deformaciones ante bajas sollicitaciones de esfuerzos [1]. Existen varios métodos constructivos para acometer la excavación, siendo el método de contención con pantallas preexcavadas perimetrales y contenciones temporales siguiendo un procedimiento de excavación y apuntalamiento sucesivo por etapas (Top-Down), el más utilizado en los últimos años en proyectos que tienen varios sótanos en los suelos blandos de la Sabana de Bogotá. Si bien el método se desarrolla gradualmente, excavando por tramos y apuntalando a niveles intermedios, se han reportado en proyectos alrededor del mundo

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

en suelos de consistencia blanda, que el 50% a 75% de las deformaciones en la contención se da previo a la instalación del apuntalamiento [1]. Se han observado en Bogotá proyectos que han provocado grandes deformaciones en su vecindad. Independientemente del método de construcción y de la rigidez utilizada en la contención, no es posible eliminar en su totalidad las deformaciones en el suelo blando provocadas por la excavación, no obstante, la reducción en las deformaciones está estrechamente relacionada con la disminución en la afectación del área contigua al proyecto [2]. El método del cajón hincado se plantea como alternativa de construcción de sótanos, que por tener una estructura rígida construida antes de la excavación, y una cuadrícula de vigas de cimentación de gran rigidez reduce el movimiento lateral y el flujo plástico del suelo hacia la excavación a medida que se va profundizando el nivel interno del área de trabajo. Por ende el método disminuye la posibilidad del desarrollo de deformaciones que acarreen afectaciones importantes en su vecindad, excepto en su inmediata cercanía donde se presenta arrastre durante el proceso de hinca. El diseño de la alternativa requiere una buena exploración y el conocimiento de las características del perfil estratigráfico, así como la planeación cuidadosa del proceso constructivo y un seguimiento detallado durante su ejecución.

2. Perfil Estratigráfico

El norte de la ciudad de Bogotá se encuentra sobre una planicie sobre la cual reside un depósito de profundidad variable de origen lacustre, subyacente por un depósito de origen aluvial. Estos depósitos lacustres están compuestos mayormente por arcillas, que por su origen, edad y velocidad de sedimentación, presentan altos contenidos de humedad acompañados por relaciones de vacíos elevadas que condicionan un material de bajo peso unitario. La extensión del depósito lacustre en esa zona alcanza los 55m aproximadamente, sin embargo, los 30m más superficiales son los que presentan la consistencia más baja del perfil estratigráfico. En esa profundidad se tienen materiales con un contenido de humedad entre 120% y 200%, índices de plasticidad superiores al 100%, pesos unitarios totales de 12,5 kN/m³, resistencias al corte en condición no drenada (C_u) menores a 40 kPa y velocidades de onda de corte del orden de 100 m/s. En la Figura 1 se presenta el perfil característico de la zona el cual se obtuvo por una extensa exploración realizada en el sitio.

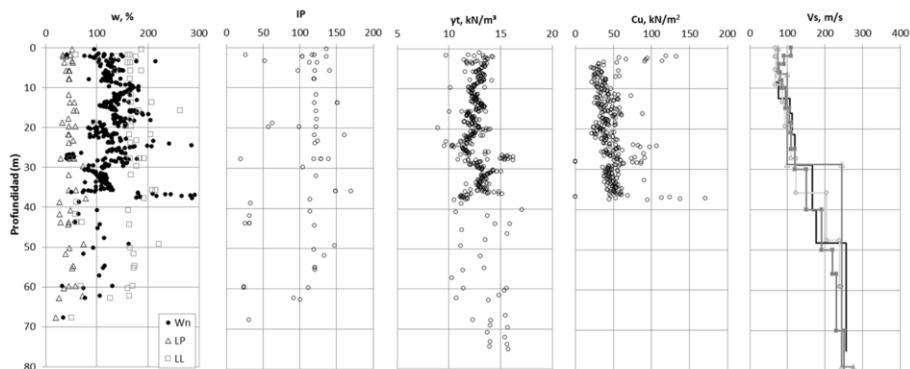


Figura 1. Perfil de suelos en el proyecto.

3. Concepto Cajón Hincado y Análisis Numérico

Debido a la baja rigidez y resistencia de los suelos lacustres, en adición a los empujes se puede presentar flujo plástico del suelo hacia la excavación, en el cual el suelo alrededor de la excavación se desplaza hacia el interior de esta, pudiendo llegar a producirse incluso una falla de fondo. Aún si esta no se produce, las deformaciones pueden ser muy grandes. El área afectada es proporcional al ancho libre de la excavación y el efecto aumenta con la profundidad de excavación. Este fenómeno acarrea deformaciones considerables a grandes distancias en los terrenos vecinos.

El cajón hincado consiste en la construcción a nivel de una plataforma superficial, de unas vigas de cimentación y de la retícula estructural de los sótanos con el muro perimetral de forma monolítica, para posteriormente hincarlo mediante peso propio y/o la aplicación de carga externa con gatos hidráulicos ayudado por excavación de suelo entre la cuadrícula de las vigas. Al hincar el cajón se produce arrastre y deformaciones en la inmediata vecindad del cajón, pero reduce la magnitud de las afectaciones vecinas al restringir deformaciones del muro de contención y limitar el ancho libre de excavación a la distancia libre entre las vigas de cimentación. Dada la poca información en la literatura acerca de este tipo de alternativa de construcción de sótanos y/o estructuras enterradas, se hizo modelación numérica para la cuantificación de afectación por el proceso, la evaluación de la estabilidad general y para detallar la secuencia constructiva, tal y como se desarrolló en los casos presentados en [3] y [4]. Para este caso en particular, se utilizó el modelo Hardening Soil Small Strain del programa Plaxis 2D con las propiedades del perfil estratigráfico de la zona, siguiendo el proceso de hinca y la excavación por etapas por nivel de sótano, se evaluaron deformaciones en la excavación y en su alrededor (Ver Figura 2), la posibilidad de flujo plástico del suelo, los empujes sobre el cajón y la resistencia del sistema durante la hinca.

Una de las consideraciones de diseño fue la capacidad de las vigas y los muros para soportar posibles desplazamientos verticales diferenciales durante la hinca del cajón. La causa de los posibles desplazamientos diferenciales considerada fue la reducción sectorizada de la resistencia del material como consecuencia de excavación diferencial y el remoldeo que genera el proceso de hinca en el suelo. De esta manera los análisis realizados incluyeron la recomendación de un rango de módulos de reacción vertical del material de apoyo del cajón, para que fueran incluidos de forma aleatoria en los análisis estructurales y poder así diseñar la estructura con suficiente rigidez para controlar posibles asentamientos diferenciales. Durante la obra se midieron deformaciones relativas máximas de 2 cm que no generaron ninguna afectación de la estructura del cajón hincado.

Dada la complejidad del proceso constructivo y las incertidumbres de la metodología planteada, se realizó una prueba a escala real de un segmento de cajón en el lote del proyecto como se describe a continuación.

4. Prueba de Hinca a Escala Real

El cajón de prueba consistió en un elemento rectangular hueco de 3.5mx3.5m, y 7.8m de altura cuya parte inferior estaba compuesta por vigas con punta como se observa en la Figura 3.

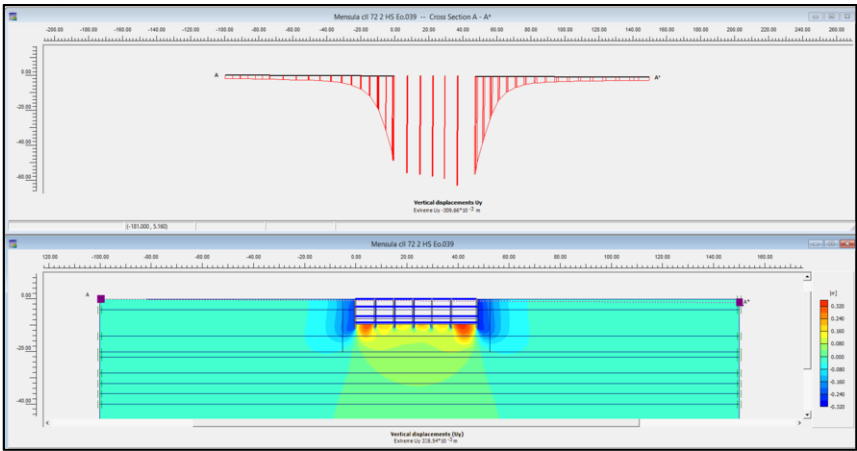


Figura 2. Desplazamientos verticales calculados generados en la vecindad al final de la hinca del cajón.

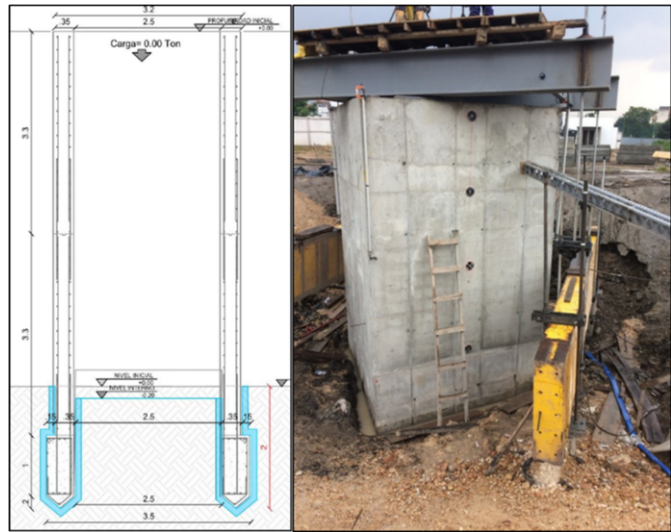


Figura 3. Sección del cajón de prueba y cajón durante el proceso de hinca.

Se adecuó una pequeña plataforma para la construcción del cajón y del sistema de reacción compuesto por 4 pilotes perimetrales. En la parte superior de los pilotes se instalaron unas vigas metálicas sobre las cuales se apoyaron gatos hidráulicos cuya función era proporcionar la fuerza externa para hincar el cajón hasta que todo el elemento quedara enterrado. El procedimiento se acompañó de mediciones en el tiempo del asentamiento, registro de la carga aplicada y el nivel interno del suelo

Basados en la totalidad de los resultados obtenidos durante la prueba, ver Figura 4, se calibró el perfil de resistencia al corte en condición no drenada, el cual presentó una disminución en profundidad afectada por el desarrollo progresivo de la hinca. Mediciones en el sitio con veleta de campo se hicieron en un punto inmediatamente al lado del cajón y en un otro a 1.5m del borde de este. En los resultados obtenidos y los cuales se presentan en la Figura 5, se observa la diferencia exhibida en el suelo respecto

a su resistencia pico y remodelada, el aumento de resistencia en profundidad y el efecto de reducción de resistencia en la cercanía al cajón a causa del remodelo que produce en el suelo la penetración de la estructura.

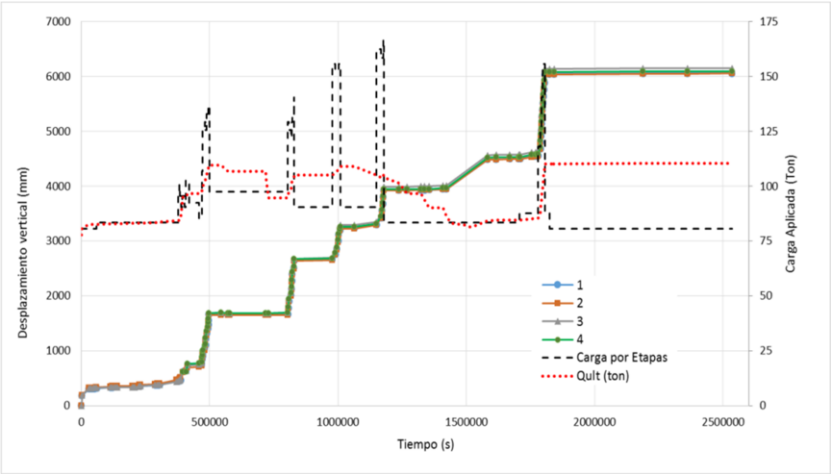


Figura 4. Resultados de la hinca del cajón en términos de desplazamiento vertical, carga aplicada y carga resistente (línea roja).

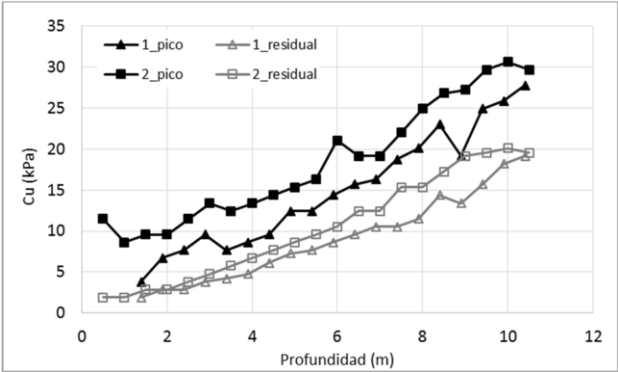


Figura 5. Resistencia al corte en condición no drenada para un punto contiguo al cajón (1) y 1.5m alejado de este (2).

Con la información recolectada por la prueba se estableció la secuencia constructiva adoptada en construcción, donde se especificó el número de pisos a construir en función del empotramiento que iba teniendo la estructura.

5. Proceso de Hinca de Cajón

El diseño del proceso de hinca se basó en el cálculo de la resistencia del cajón en cada etapa del proceso de hinca, teniendo en cuenta el componente aportado por la punta y fricción de la retícula de vigas y la fricción de los muros perimetrales. El cálculo de la capacidad última del cajón consideró la geometría final de la estructural y el perfil de

resistencia en profundidad calibrado en el cajón de prueba. Del balance entre las cargas gravitacionales de la estructura y la resistencia del cajón, se recomendó la secuencia constructiva para que el cajón presentara un equilibrio límite y poder desarrollar la hinca controladamente con la ayuda del sistema de hinca compuesto por gatos perimetrales reaccionando en pilotes previamente instalados

A medida que la hinca iba progresando el suelo entre las retículas de las vigas se iba excavando y apilando con maquinaria pequeña y luego se retiraba con una excavadora telescópica localizada en el nivel de la estructura que estuviera más cerca de la superficie del terreno. En la Figura 6 se presentan fotografías tomadas durante el proceso de hinca.



Figura 6. Gatos hidráulicos y excavación de suelo dentro de las celdas.

El nivel de hinca del cajón se iba monitoreando dos veces por día con la medición de 27 puntos de control localizados sobre la estructura, ver Figura 7. Con la información recolectada por los puntos, se calculó para cada medición, el desplazamiento vertical y las inclinaciones como cuerpo rígido del plano que mejor se ajustaba a los datos medidos. De esta manera era posible establecer de forma sencilla la posición tridimensional del cajón y encaminar la aplicación sectorizada de cargas con los gatos hidráulicos y la profundización de la excavación dentro de la retícula de vigas para buscar un descenso lo más nivelado posible.

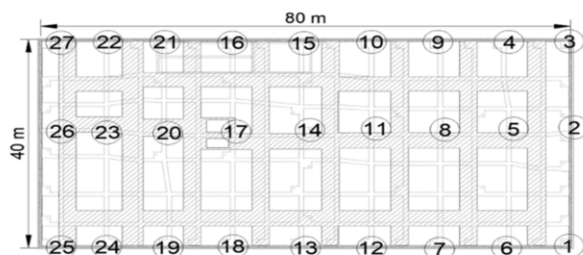


Figura 7. Puntos de control de asentamiento sobre la estructura.

En la Figura 8 se presenta el resultado resumido del proceso en términos de desplazamiento vertical del cajón y del escalonamiento de la carga proporcionada por el avance en altura del edificio, mientras que en la Figura 9 se presenta la inclinación que tuvo la estructura durante la hinca.

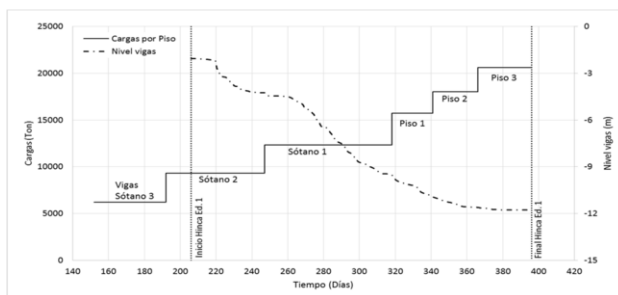


Figura 8. Nivel del cajón durante la hinca y escalonamiento constructivo adelantado en ese lapso.

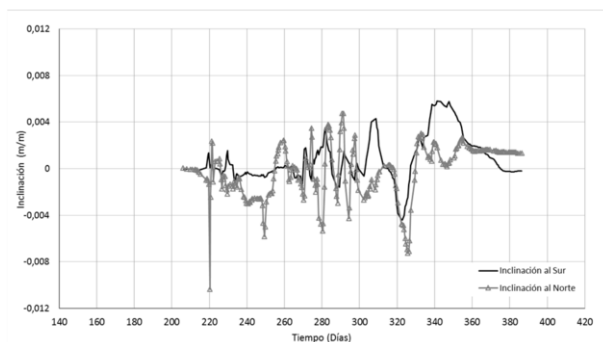


Figura 9. Inclinación del cajón durante el proceso de hinca.

6. Construcción Edificio y Comportamiento Estructura

La cimentación de las torres de 17 pisos con 3 sótanos del proyecto fue diseñada con una cimentación placa-pilote donde los elementos profundos cumplen el objetivo de reducir los asentamientos. Los pilotes fueron instalados al inicio del proyecto hasta que la parte superior de los elementos llegaran al nivel final del tercer sótano. Dentro de esos pilotes se incluyeron 52 correspondientes al sistema de reacción de los gatos hidráulicos, los cuales tenían barras de transferencia de carga para que pudieran trabajar a tensión y así proporcionar la fuerza de hinca solicitada por los gatos para el control de verticalidad.

El cajón, además de la retícula de vigas, tenía plataformas en voladizo que se utilizaron como los carreteables por donde transitaban las máquinas necesarias para la excavación y remoción del suelo a medida que se descendía la estructura. En el segmento final de la hinca las plataformas se utilizaron como superficie de contacto para que el cajón se apoyara en algunos pilotes y así detener la hinca y darle al sistema capacidad suficiente para continuar con la construcción en altura del edificio. Una vez la inclinación del cajón fue corregida, se hizo la vinculación estructural de los pilotes y la fundida de las celdas entre vigas para completar la placa de cimentación.

En la Figura 10 se presenta el resultado del desplazamiento vertical del cajón enmarcando en líneas verticales el fin de la hinca y el fin de la construcción de la superestructura, donde se ve un comportamiento satisfactorio ante la imposición de carga por la construcción del edificio. El monitoreo de asentamientos permitió comprobar que el arrastre por la hinca del cajón se mantuvo dentro de los 2m adyacentes al cajón de acuerdo con lo previsto en los análisis.

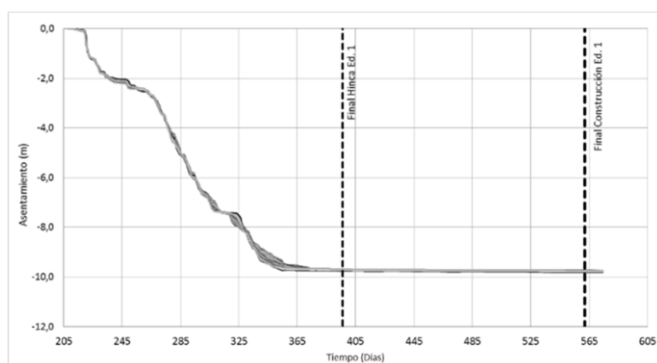


Figura 10. Asentamiento cajón durante la hincada y durante la construcción.

7. Conclusiones

Basados en las características del depósito lacustre superficial del norte de la ciudad de Bogotá, se implementó una alternativa de cajón hincado como método constructivo para la realización de un proyecto compuesto por una plataforma de 3 sótanos y 2 torres de 17 pisos. La alternativa consistió en la construcción inicial de la subestructura de los sótanos que fue posteriormente hincada hasta el nivel de cimentación.

La complejidad de este sistema hace necesario un adecuado conocimiento del suelo, en particular su resistencia y sensibilidad, y la evaluación detallada la interacción suelo estructura en cada etapa del proceso para definir la rigidez de la estructura y la capacidad de soporte. Es necesario un seguimiento detallado durante la construcción y disponer de sistemas para el control de la verticalidad y el avance de la hincada, incluyendo el frenado al nivel previsto de cimentación. Se debe también programar con detalle el método y proceso de excavación y manejo de material para la tasa de avance proyectada.

Los resultados han sido satisfactorios por lo que se considera una alternativa válida y competitiva para la ejecución de excavaciones profundas en suelos muy blandos en escenarios donde se tenga espacio suficiente para que la afectación generada por el arrastre no perjudique estructuras vecinas existentes. Esta alternativa permite saber cuál es el aporte del cajón a la capacidad de la cimentación, dado que los pilotes comienzan a trabajar cuando el edificio ya está parcialmente construido y su carga es conocida.

Los autores agradecen a Avenida Capital de Colombia SAS dueños del proyecto, y Ménsula SA, constructores, por la autorización para la publicación del presente trabajo.

Referencias

- [1] Kempfert, H. and Gebreselassie, B. 2010. Excavations and foundations in soft soils. Springer-Verlag. Berlin, Germany.
- [2] Korff, M. 2009. Deformations and damage to buildings adjacent to deep excavations in soft soils. Deltares, Delft, Netherlands.
- [3] Fisher, G., Gerszewski, W., Barchok, F. and Yavarow, M. 2004. Deep Caisson Sinking in Soft Soils, Grand Forks, North Dakota. International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering. 42.
- [4] Bame A. B. (2013). New Method of Sinking Caisson Tunnel in Soft Soil, Norwegian University of Science and Technology, Department of Civil and Transport Engineering.