Geotechnical Engineering in the XXI Century: Lessons learned and future challenges
N.P. López-Acosta et al. (Eds.)

© 2019 The authors and IOS Press.
This article is published online with Open Access by IOS Press and distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License 4.0 (CC BY-NC 4.0).
doi:10.3233/STAL190127

Evaluación de una cimentación profunda en sistema placa pilote e inclusiones rígidas para un edificio construido en suelo colapsable del Distrito Federal, Brasil

Julian Asdrubal BURITICA GARCIA[a,1], Juan Félix RODRIGUEZ REBOLLEDO[a], Juliana ALARCÓN POSSE[a] y Renato PINTO DA CUNHA[a]
[a] *Universidad de Brasília, UnB*

Resumen. Las inclusiones son elementos de refuerzo que no son conectadas estructuralmente con la losa de cimentación. Por otro lado, el sistema placa pilote tiene conexiones rígidas entre la placa de concreto y los pilotes individuales. Las inclusiones pueden ser construidas de varias formas, perforación con tornillo helicoidal, excavación manual y vaciado de concreto, inyecciones a baja presión, pilotes de grava, pilotes de arena, vibro substitución y mezclas entre suelo, cemento y cal. Dependiendo del material utilizado en la construcción y la diferencia de rigidez entre las inclusiones y el suelo circundante, las inclusiones se pueden clasificar como rígidas y flexibles. Las inclusiones rígidas se han mostrado más favorables para el uso en cimentaciones convencionales. La técnica de las inclusiones rígidas ha sido estudiada desde las últimas décadas para aumentar la capacidad de carga y principalmente controlar asentamientos en suelos blandos o zonas de características geotécnicas complejas y desfavorables, para dar un mejor uso al suelo en superficie que debido a la escasez en las grandes ciudades se ha convertido en un problema crítico por el crecimiento abrupto de la población. En este trabajo se presenta una evaluación comparativa de una estructura de cimentación en el sistema placa pilote y en inclusiones rígidas para un edificio de poca altura típico del Distrito Federal, Brasil. Que está asentado en suelos colapsables típicos de la región centro oeste de Brasil y que presentan en su composición elevadas cantidades de óxidos de hierro y de aluminio, formando una estructura bastante porosa y compleja. La comparación se desarrolló utilizando el programa Plaxis 3D, obteniéndose cargas, esfuerzos y asentamientos totales y relativos en cada uno de los elementos. El trabajo mostró que las inclusiones rígidas pueden tornarse competitivas para la reducción de costos en proyectos similares en la región.

Palabras Clave. Cimentaciones, inclusiones rígidas, pilotes, losa pilotada, asentamientos.

1. Introducción

Brasil está ubicado en América del sur, presenta zonas con suelos lateríticos debido a su clima tropical, específicamente Brasilia y el Distrito Federal se encuentran en una región caracterizada por la presencia de suelos lateríticos arcillosos colapsables.

[1] Julian Asdrubal Buritica Garcia, Universidad de Brasilia, Departamento de Ingenieria Civil y Ambiental, Facultad de Tecnologia, Brasilia, Brasil; E-mail: julianburitica@gmail.com

El fenómeno de colapso se presenta en suelos con estructuras metaestables, donde existe una débil cimentación entre los granos que genera resistencia temporal. El colapso puede ocurrir en suelos porosos no saturados por aumento de las cargas y/o por variación de la saturación.

El colapso ocurre cuando las cimentaciones son perdidas por acción de agentes externos y los vacíos son ocupados por otras partículas de forma brusca y repentina, generando un cambio en el volumen (Figura 1). El grado de colapso y de inestabilidad estructural depende también de la composición del flujo de inundación, donde la agresividad o pH del líquido controla la magnitud del ataque a las uniones cementarías [1].

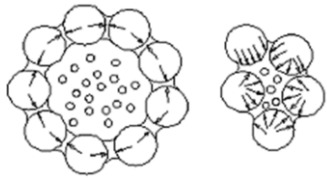


Figura 1. Representación del fenómeno de colapso [2].

Los suelos colapsables son encontrados en aluviones, coluviones y suelos residuales que sufrieron una evolución pedológica producto de la lixiviación en los horizontes superficiales en las regiones donde hay alternancia de periodos muy secos y periodos lluviosos en regiones semiáridas [3].

2. Suelos colapsables en el Distrito Federal

Araki [4] concluyó que los suelos del Distrito Federal (Brasil) son formados por micro agregados unidos por medio de puentes de arcilla y cimentaciones que sustentan una estructura bastante porosa. La estructura porosa es más pronunciada en la capa superficial y aproximadamente a los 10 m de profundidad no se observan grandes vacíos.

El perfil geotécnico de Brasilia consiste en un suelo con alto grado de meteorización, nivel freático profundo, suelo superficial conocido por los ingenieros geotécnicos de la región como arcilla porosa a pesar de su alto contenido de arena, permeabilidad media, baja resistencia (resistencia a la penetración estándar menor a 5 golpes)

Según Camapum de Carvalho et al [1] la arcilla porosa de Brasilia es constituida por arcillas, limos y arenas combinadas en diferentes proporciones dependiendo del dominio geológico local presenta SPT inferior a 6 golpes, límite de liquidez entre 25 y 78%, límite de plasticidad entre 4 y 38%, Relación de vacíos entre 1,2 e 2,2.

En el Distrito Federal, problemas relacionados con colapso son comunes en los periodos de lluvias intensas, se presentan casos de colapso en estructuras antiguas, algunos casos divulgados por la prensa local como el caso de un estacionamiento en el sector comercial sur que generó un desnivel de 60 cm aproximadamente.

El Distrito Federal se caracteriza por tener un periodo de lluvias intensas y un periodo seco lo que ocasiona las características particulares del suelo. En la Figura 2 se muestra un corte típico del distrito federal en donde se evidencia el perfil de suelo homogéneo en los primeros metros y el promedio de lluvias mensuales para la región.

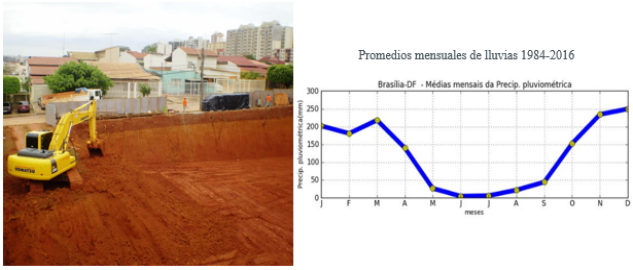


Figura 2. Suelo típico del D.F y promedios mensuales de lluvias entre 1984 y 2016.

3. Conjuntos residenciales en Brasilia

Brasilia fue declarada patrimonio cultural de la humanidad por la Unesco el 7 de diciembre de 1987 por ser un hito de gran importancia en la historia del urbanismo. Brasilia refleja un concepto armonioso de la ciudad, desde el trazado de los barrios administrativos y residenciales y los edificios públicos que asombran por su aspecto audaz e innovador.

Por este motivo existen decretos gubernamentales para la preservación del patrimonio de la ciudad. El decreto número 10.189 de 14 de octubre de 1987 reglamenta el artículo 38 de la ley 3571 del 13 de abril de 1960, esta ley estipula la altura de los edificios en Brasilia, en algunas regiones queda limitado a 7 niveles y en otras regiones a 4 pisos.

Esos edificios a pesar de ser de poca altura son construidos con cimentaciones profundas que pueden variar entre 10 y 30 m de profundidad tornando los proyectos residenciales bastante caros comparados con otras zonas del país.

Según la compañía de desarrollo habitacional del Distrito Federal CODHAB el déficit de viviendas en la región es superior a 120 mil viviendas, por este motivo en los últimos años diferentes programas de gobierno han invertido altas sumas de dinero para financiamiento y construcción de megaproyectos habitacionales que pueden atender hasta 30.000 habitantes en cada proyecto y que pueden variar entre 200 y 500 edificios de poca altura con características semejantes.

Obtener una economía en el ítem de cimentación puede representar grandes economías para estos megaproyectos de vivienda de interés social.

4. Estudio de caso

Este trabajo presenta un comparativo entre dos métodos de cimentación profunda, sistema placa pilote que es bastante usada en el Distrito Federal y el sistema de inclusiones rígidas que es una alternativa que se encuentra en fase de estudios para ofrecer una solución viable técnica y económicamente para ese tipo de proyectos residenciales de poca altura.

Como parte de un proyecto de investigación se están realizando modelos físicos en escala real y modelos físicos en centrífuga geotécnica para estudiar el comportamiento de las inclusiones rígidas con el suelo colapsable presente en la ciudad de Brasilia y utilizando el mismo material compactado como capa rígida de transferencia de carga.

La Figura 3 muestra los diferentes tipos de cimentación utilizadas en la ciudad.

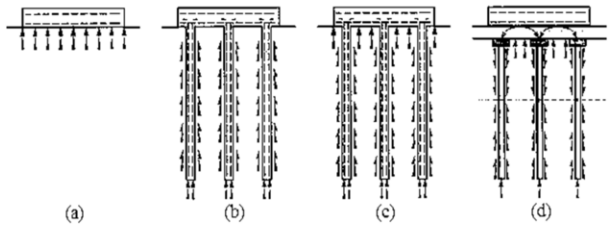


Figura 3. Tipos de cimentaciones [5].

En la Figura 3a se muestra la cimentación superficial convencional, la Figura 3b muestra la cimentación profunda de grupo de pilotes, la Figura 3c muestra la cimentación en el sistema placa pilote o placa pilotada, y la Figura 3d muestra el sistema de inclusiones rígidas.

El sistema de inclusiones rígidas muestra la asociación de elementos cilíndricos verticales con una losa de concreto sin unión estructural, la transición entre el bloque de concreto y las inclusiones es una capa de material compactado mejorado que se conoce como capa de repartición.

4.1. Descripción general del proyecto

El proyecto típico analizado consiste en la cimentación de un edificio con estructura aporticada convencional de 4 niveles que transmite una carga distribuida de 44 kN/m^2. Serán comparados el sistema placa pilote y el sistema de inclusiones rígidas. El área de proyección en planta del edificio objeto del caso de estudio se muestra en la Figura 4

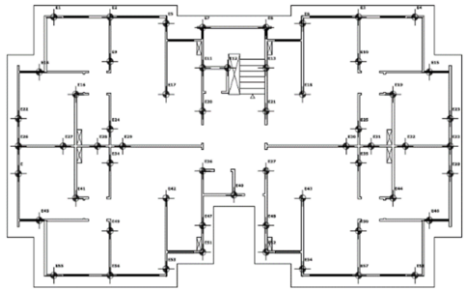


Figura 4. Distribución de los elementos del sistema placa pilote.

El proyecto en losa pilotada consiste en 58 pilotes de 30 cm de diámetro y 15 m de profundidad conectados estructuralmente con la losa de 20 cm de espesor. El proyecto alternativo propuesto consiste en un sistema de inclusiones rígidas de 64 elementos de 30 cm de diámetro y 10 m de profundidad sin conexión con la losa de 20 cm de espesor.

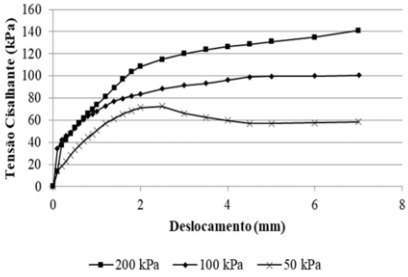
La capa de repartición de cargas es de 1 m de espesor y es conformada por suelo natural superficial de la zona compactado con la energía Proctor normal.

4.2. Capa de repartición de carga

La capa de repartición de carga de 1 m de espesor consiste en un material superficial típico do Distrito Federal, mejorado con el proceso de compactación con energía Proctor

normal. Los parámetros de la capa de repartición fueron obtenidos a partir de ensayos de corte directo realizados en cuerpos de prueba compactados en la humedad óptima de 24%. El suelo fue clasificado con una arcilla arenosa de baja plasticidad (CL).

El ensayo de corte y las propiedades del suelo se muestran en la Figura 5.



	γ(kN/m³)	Φ(°)	c (kPa)	v	E (kPa)	e
Capa de repartición	19.1	26	48	0,3	22000	0,8

Figura 5. Corte directo y parámetros de la camada de repartición.

4.3. Perfil geotécnico típico

Rodríguez [6] calibró el modelo *Hardening soil* para un perfil típico del Distrito Federal, la calibración del modelo constitutivo fue realizado utilizando pruebas triaxiales, ensayos de consolidación y pruebas de carga estáticas realizadas en la Universidad de Brasilia. Los parámetros utilizados se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros geotécnicos.

	Capa					
	1 (0,0 m a 1,5 m)	2 (1,5 m 3,5 m)	3 (3,5 m a 5,0 m)	4 (5,0 m a 7,0 m)	5 (7,0 m a 8,5 m)	6 (8,5 m a 20,0 m)
Yn(kN/m3)	13,1	12,8	13,9	14,3	16,0	18,2
e	1,6	1,1	0,9	0,9	0,9	0,9
c'(kPa)	5,0	5,0	5,0	20,0	75,0	20,0
φ(°)	25,0	25,0	26,0	32,0	20,0	22,0
ψ	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
$E_{50}^{ref}(kPa)$	3200	2500	4000	12000	13200	12200
$E_{oed}^{ref}(kPa)$	4900	1450	2200	6900	7000	5700
$E_{ur}^{ref}(kPa)$	14000	14000	36900	37500	54000	54000
m	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,7
ν_{ur}	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
$P^{ref}(kPa)$	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
POP (kPa)	65,7	31,8	0,0	31,4	0,0	0,0
K_o^{nc}	0,58	0,58	0,56	0,47	0,66	0,63
k_o	1,37	0,77	0,56	0,56	0,66	0,63
R_f	0,8	0,8	0,9	0,9	0,9	0,8

5. Resultados y discusión

Se utilizó el programa Plaxis 3D para simular las dos condiciones propuestas. Según Burland [7] los asentamientos máximos permitidos para edificios aporticados son de 65 mm.

En la primera simulación se analizó el sistema de losa pilotada y en la segunda se analizó el sistema de inclusiones rígidas.

5.1. Sistema placa pilote

De acuerdo con la geometría y los parámetros presentados, fue generado el modelo tridimensional con todos los elementos estructurales como se muestra en la Figura 6.

La losa pilotada posee elementos de 30 cm de diámetro, 15 m de profundidad y espesor de la losa de 20 cm.

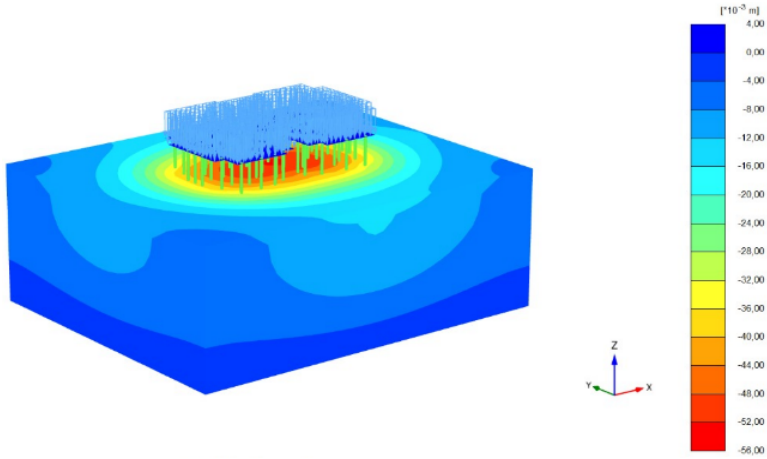


Figura 6. Modelo tridimensional sistema placa pilote

Los asentamientos máximos calculados son de 52,3 mm que está conforme a los límites establecidos para este tipo de estructuras, inclusive puede encontrarse una mejor solución que sea más económica y que también cumpla los límites encontrados en la literatura técnica. Para mejorar la visualización un corte del sistema de cimentación se presenta en la Figura 7. Se puede observar que los mayores asentamientos se presentan en el centro del modelo.

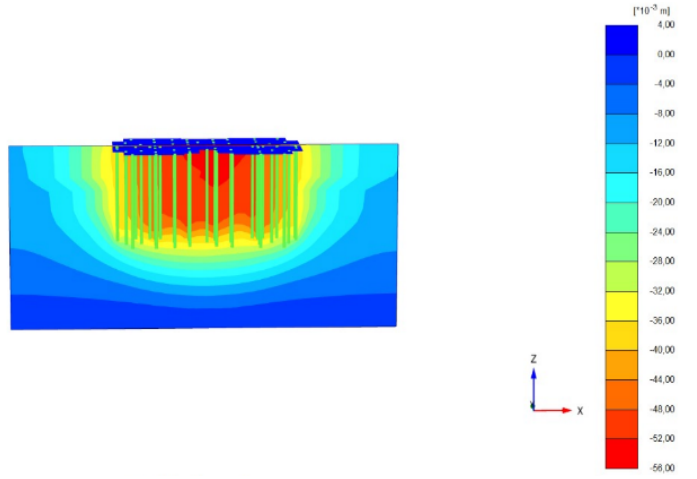


Figura 7. Sección transversal de los asentamientos totales para el sistema placa pilote

5.2. Inclusiones rígidas

Como solución alternativa al proyecto de losa pilotada y con la finalidad de hacer un comparativo técnico, se propuso una solución con 64 inclusiones rígidas de 30 cm de diámetro e 10 m de profundidad, con una capa de repartición de suelo compactado de 1 m de espesor.

La simulación numérica fue realizada en el programa Plaxis 3D, la malla de elementos finitos, la geometría del problema y los asentamientos se muestran en la Figura 8.

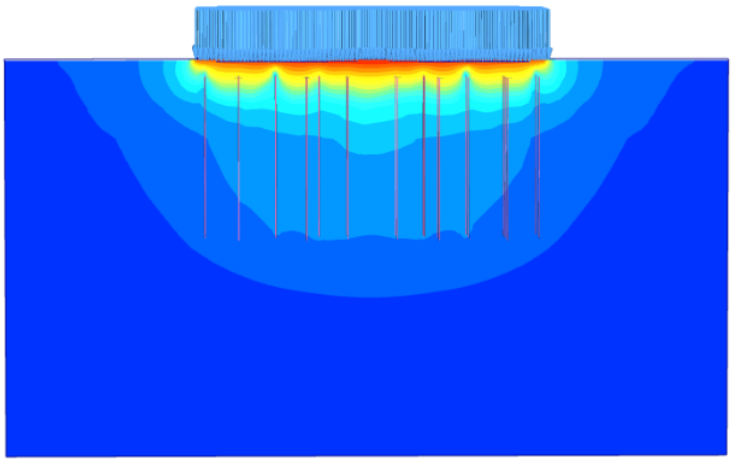


Figura 8. Modelo tridimensional sistema inclusiones rígidas

Los asentamientos totales obtenidos para el sistema de cimentación en inclusiones rígidas fueron de 66 mm que está muy próxima de lo que se considera aceptable para este tipo de proyectos.

En todos los casos fue calculada la distorsión angular máxima y todos los valores son considerados aceptables con valores de máximo 1/500.

6. Conclusiones

Los modelos tridimensionales en el programa Plaxis 3D son favorables para la estimativa de los asentamientos totales y distorsiones angulares para cualquier tipo de sistema de cimentación utilizando modelos constitutivos complejos.

Para diversos casos de estudio en Brasilia, el sistema de inclusiones se ha mostrado favorable para disminuir los asentamientos totales.

Técnicamente la solución en inclusiones rígidas es viable, se deben realizar un análisis económico para evaluar el impacto del cambio de solución de cimentación.

Se pasó de una solución de cimentación de losa pilotada de 58 elementos a 15 m de profundidad a una solución en inclusiones rígidas de 64 elementos a 10 m de profundidad, manteniendo valores de asentamiento y distorsión dentro de los límites recomendados en la literatura técnica.

Tanto para el sistema de inclusiones rígidas y sistema placa pilote deben tenerse cuidados especiales y deben ser desarrollados estudios más detallados, porque casos de colapso son frecuentes en el Distrito Federal principalmente en la época de lluvias.

El trabajo presentado tiene fines académicos, están siendo desarrollados estudios complementares en modelos físicos 1g y modelos físicos en centrífuga geotécnica para entender el mecanismo de transferencia de carga y mecanismo de ruptura de la camada de repartición cuando es utilizado el suelo arcilloso de la ciudad de Brasilia compactado.

Referencias

[1] Camapum de Carvalho, J., Alves, A. R., Duarte, L. C. M., Silva, J. P., (2010). "*Caracterização de um solo colapsível de Brasília por métodos diretos de quantificação de potencial de colapso".* Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Gramado.

[2] Jennings, J. E. & Knight, K. (1975). A guide to construction on or with materials exhibiting additional settlement due collapse of grain structure. Proceedings sixth regional conference for Africa on Soils Mechanics and Foundation Engineering, Durban, South Africa.

[3] Ferreira, S.R.M. & Lacerda, W.A. (1993). Variações de volume em solo colapsível medidas através de ensaios de laboratório e campo. Solos e rochas: Revista Brasileira de Geotecnia, São Paulo, vol 16. P 245 – 253.

[4] Araki, M. S. (1997). Aspectos relativos às propriedades dos solos porosos colapsíveis do Distrito Federal. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, D.F.

[5] Irex (2012). Asiri National Project. Recommendations for the design construction and control of rigid inclusion ground improvements. IREX's Soil Specialist Cluster, France.

[6] Rodriguez, J. F., Perez, R.F. & Camapum de Carvalho, J. (2019). Obtaining the mechanical parameters for the hardening soil modelo f tropical soils in the city of Brasilia. Soils and Rocks, Volume 41 (1). pp 61-74

[7] Burland, J. B., Broms, B. B., Mello, F. B., (1977). "*Behaviour of Foundations and Structures".* 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundations Engeneering, Tokyo.