

Estudio experimental del efecto de grupo de pilotes cortos excavados en un perfil de suelo granular

Experimental study of the group effect of short piles excavated in a granular soil profile

Victor Hugo Fernandes Bonan^{1*} Alfran Sampaio Moura¹ Grover Romer Llanque Ayala¹

Recibido 30 de Diciembre de 2017, aceptado 23 de Diciembre de 2018

Received: December 30, 2017 Accepted: December 23, 2018

RESUMEN

Al utilizar pilotes para la concepción de un proyecto, dependiendo de la distancia entre ellos, el comportamiento de uno interfiere con el otro. Esto ocurre tanto en términos de capacidad de carga como en la relación de asentamientos. Investigaciones sobre el efecto de grupo en suelos típicos de Fortaleza son escasas, lo que justifica y motiva este trabajo. El objetivo de la presente investigación es evaluar el efecto de grupo de pilotes excavados en un perfil de suelo granular, típicos a los que ocurren en el subsuelo de la ciudad de fortaleza –Ceará– Brasil. Para esto se ejecutaron 26 pilotes, en un terreno situado en el interior del campus de la Universidad Federal de Ceará (Campus experimental de Geotecnia y fundaciones de la UFC). Pilotes aislados en grupos de 2 a 4 pilotes, variando la distancia entre ellos. El subsuelo fue caracterizado a partir de la colecta de resultados de ensayos que fueron realizados anteriormente en el sector. Además, se realizó una excavación de sondeo por percusión (SPT), con resultados de índices de resistencia (N_{SPT}) corregidos en función de estimativas realizadas de la eficiencia. Posteriormente, se realizaron pruebas de carga estática (PCE) en los grupos de pilotes ejecutados. Fue verificado que los pilotes ejecutados trabajan apenas por fricción lateral y se observa el efecto de grupo en todos los espaciamientos investigados.

Palabras clave: Efecto de grupo, capacidad de carga, fundaciones, pilotes.

ABSTRACT

When designing a project using piles, depending on the distance between them, the behavior of one interferes with the other. This interference occurs in terms of both the carrying capacity and the settlement ratio. Research on the group effect on typical Fortaleza soils is scarce, which justifies and prompts this work. The objective of the present investigation is to evaluate the group effect of piles excavated in a granular profile soil, typical to those that occur in the subsoil of the city of Fortaleza –Ceará– Brazil. For this, 26 piles were emplaced in a field located inside the campus of the Universidade Federal do Ceará (Campus experimental of Geotecnia and foundations of the UFC). Piles were isolated in groups of 2 to 4 piles, varying the distance between them. The subsoil was characterized by the collection of test results that were previously made in the sector. Additionally, a percussion drill excavation (SPT) was performed, with results of resistance indexes ($NSPT$) corrected based on efficiency estimates. Subsequently, static load tests (PCE) were performed on the groups of piles executed. It is verified that the piles worked only by lateral friction, and the group effect is observed in all the investigated spacings.

Keywords: Effect of group, load capacity, foundations, piles.

¹ Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental. Universidade Federal do Ceará. Campus do Pici - Bloco 713. Cep: 60440-970. Fortaleza-Ceará/ Brasil. E-mail: victorhfonan@gmail.com; alfransampaio@ufc.br; groverllanque@gmail.com

* Autor de correspondencia: victorhfonan@gmail.com

INTRODUCCIÓN

Las fundaciones en una edificación pueden ser del tipo superficial o profunda. Entre las profundas los pilotes son actualmente las más utilizadas. Los pilotes pueden ser utilizados aislados o en grupo.

El comportamiento de los pilotes puede variar cuando los mismos son ejecutados en grupo, debido a la proximidad entre ellos. Esta interacción ocasiona una superposición de tensiones, modificando la capacidad de carga y el asentamiento de los grupos de pilotes.

Vesic (1975) [18] observó que la eficiencia de un grupo de pilotes aumenta con la separación entre ellos, hasta un máximo de 3 veces el diámetro, siendo que a partir de tal valor la capacidad del conjunto comienza a estabilizar. Con la finalidad de reducir el efecto de grupo entre los pilotes la literatura de (Poulos y Davis, 1980; Bowles 1997; Braja 2001) [11, 3, 4] proponen una separación mínima de eje a eje entre pilotes de 2.5 a 3.5 veces el diámetro.

Mientras tanto, aún existe divergencia con relación a los espaciamientos mínimos entre los pilotes para que se evite el efecto de grupo. Por ejemplo, *The Canadian Foundation Engineering Manual, CGE (1992)*, recomienda que el efecto de grupo pueda ser desconsiderado para una separación entre pilotes superior a 8 veces el diámetro (entre ejes).

De acuerdo con Chan (2006) [7], el análisis suelo-estructura de un grupo de pilotes representa un problema de alta complejidad, debido al comportamiento de dicho efecto que puede ser influido por los siguientes: método de instalación del pilote (con desplazamiento o con sustitución de suelo); forma dominante de la transferencia de carga (pilote flotante o de punta); naturaleza del macizo de suelo de fundación; geometría tridimensional de la configuración del grupo; presencia y rigidez del bloque de coronamiento; rigidez relativa del bloque de los pilotes y del suelo.

El efecto de grupo es estudiado de forma separada en términos de capacidad de carga y en términos de asentamiento, con este efecto pudiendo ser un beneficio o en su caso un perjuicio.

Con relación a la capacidad de carga, la eficiencia de un grupo de pilotes normalmente puede variar

de acuerdo con el efecto causado en el suelo cuando son ejecutados los pilotes, con el tipo de suelo y su grado de compacidad, y con el espaciamiento dado entre los pilotes.

Silva y Cintra (1996) [13] realizaron 6 pruebas de carga estática, siendo 2 en bloques con pilotes aislados y los 4 restantes con las siguientes configuraciones: un bloque de dos pilotes (1 x 2); dos bloques de tres pilotes siendo uno en formato de línea (1 x 3) el otro en formato triangular (3 Δ); y el último con 4 pilotes, dispuesto en forma de cuadrado (2 x 2). Las eficiencias encontradas con y sin contribución del bloque de coronamiento respectivamente, son las siguientes: 1,15 y 0,90 (1 x 2); 1,17 y 0,92 (1 x 3); 1,20 y 1,09 (3 Δ); 1,07 y 0,97 (2 x 2). Todos los pilotes fueron del tipo broca de 0,25 m de diámetro por 6m de longitud y un espaciamiento de 3 D.

Sales (2000), a través de pruebas de carga estática en zapata con pilotaje de 4 pilotes broca de 0,15 m de diámetro por 5 m de longitud y espaciamiento de 5D encontró una eficiencia de 100%.

Por otro lado, García (2015) [8] a través de pruebas de carga estática en un radier pilotado, con pilotes excavados mecánicamente con barrenas, siendo de dimensiones de 0,25 m de diámetro por 5 m de longitud. Los bloques de fundación tipo radier fueron compuestos de un, dos, tres y cuatro pilotes, con espaciamientos de 5 D. Las eficiencias, solamente de los pilotes encontrados fueron de 79,1% (2 pilotes), 69% (3 pilotes) y 76,1% (4 pilotes).

Para pilotes incrustados en suelos arenosos débiles la literatura menciona, como ejemplos a Kezdi (1957) [9] y Stuart et al (1960) [15] que indican que la eficiencia sería máxima para espaciamientos de 2 D, debido al efecto de la compactación causado por la vibración del incrustado, volviendo a cerca de 1 para espaciamientos de orden de 6 D.

Por otro lado, Meyerhof (1976) [10] sugiere que sea adoptado para grupos de pilotes excavados en arenas, una eficiencia de 2/3 para espaciamientos (entre ejes) de pilotes de 2 a 4 diámetros.

La eficiencia de grupos de pilotes puede ser evaluada por la realización de pruebas de carga en grupos o por medio de formulaciones, normalmente empíricas. Entre las muchas formulaciones empíricas existentes,

se puede citar los métodos de *Feld*, regla de origen incierto propuesto por Poulos y Davis (1980) [11], Converse-labarre, ecuación de Los Ángeles, método de Sayed Bakeer y el método propuesto por la NBR 6122 (ABNT, 2010) [1].

Este trabajo pretende a partir de la realización de pruebas de carga en grupos de 2 y 4 pilotes, evaluar la ocurrencia del efecto de grupo de pilotes excavados en un perfil de suelo predominantemente granular, medianamente compactado.

METODOLOGÍA

La metodología utilizada para la elaboración del presente trabajo tiene como base la ejecución de las siguientes etapas:

- i. Revisión bibliográfica del tema propuesto;
- ii. Colecta de datos;
- iii. Elaboración de sondeo a percusión (SPT)
- iv. Ejecución de pilotes aislados y en grupos;
- v. Realización de pruebas de carga estática (PCE), en pilotes aislados y en grupo de pilotes;
- vi. Análisis de resultados y establecimiento de conclusiones de la investigación.

La ejecución de los pilotes y de los bloques de coronamiento fue iniciada con la elaboración de una guía de madera, con barras que indicaron el nivel de referencia de la obra.

Anteriormente a la realización de los pilotes fueron definidas las separaciones entre éstos, para los bloques de 2 y 4 pilotes, fueron adoptados espaciamientos de 2 D, 2,5 D, 3 D y 4 D entre pilotes. También, fueron ejecutados 2 bloques de pilotes aislados, totalizando 26 pilotes distribuidos en 10 bloques de coronamiento. Para evitar el efecto de grupo entre bloques vecinos se adoptó un espaciamiento de 8 D entre los bordes de los bloques. Para evaluar la distribución de carga en los pilotes fueron ejecutados 2 pilotes aislados, siendo uno de ellos con poli-estireno en la punta.

Con relación a las dimensiones de los pilotes, fueron adoptados 10 cm de diámetro por 1,50 m de longitud (dimensiones adoptadas a un tamaño de escala representativa para efectos de la investigación).

Para la ejecución de los pilotes, fue seguido al nivel de referencia marcado en la guía de madera, de

forma que la cabeza de los pilotes estuviesen todas en el mismo nivel, siendo esta decisión tomada con la finalidad de facilitar la realización de las pruebas de carga.

La ejecución de los pilotes se realizó en dos días consecutivos, siendo 13 de ellas en el primer día y las restantes en el día posterior. En los bloques de 4 pilotes, fueron ejecutados 2 pilotes por día, en disposición diagonal y en los bloques de 2 pilotes, fue ejecutado un pilote por día. Para la excavación fue utilizado un muestreador y agua.

Para el armado y concretado fue adoptado la siguiente metodología: armado y colocado de la armadura de refuerzo, mezcla de concreto en una mezcladora de 320 lt, luego en seguida, se realiza la medición del revenimiento de la mezcla, a través del ensayo de cono de Abrams, y su posterior liberación para lanzamiento. El lanzamiento del concreto fue realizado con baldes de 18 lt, con el propósito de estimar el volumen lanzado y así disminuir el riesgo de vacíos en el pilote; finalmente el concreto es vibrado de forma manual, con una barra metálica. Cabe observar que el revenimiento adoptado para la liberación del concretado fue de 22 a 24 cm y la resistencia a la compresión (F_{ck}) de 20 MPa. Más detalles sobre la ejecución de los pilotes, así como de los bloques de coronamiento, pueden ser obtenidos en Bonan (2017). La Figura 1 presenta una vista del lugar de elaboración de los pilotes.

Los bloques de coronamiento de los pilotes fueron ejecutados, posteriormente, de forma que los mismos quedaran sin contacto con el suelo, de forma que no haya contribución de los suelos como “apoyo” por la base de los bloques. Dicho procedimiento fue adoptado con el propósito de observar en el presente trabajo la influencia solamente de la proximidad entre los pilotes, y en trabajos posteriores se analizara el bloque de coronamiento. La Figura 2 presenta un detalle esquemático del procedimiento adoptado.

Se debe mencionar también que la altura de los bloques de coronamiento variaran en función del número de pilotes en cada bloque y de la distancia entre ella, de 20 a 50 cm.

Las pruebas de carga fueron ejecutadas de forma estática, con la aplicación de carga en etapas de forma rápida y siguiendo criteriosamente las recomendaciones de la NBR 12131 (ABNT, 2006) [2].



Figura 1. Vista del ambiente de hormigonado de pilotes.

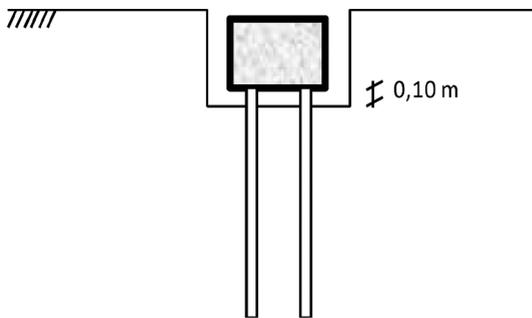


Figura 2. Detalle esquemático de los bloques de coronamiento y pilotes.

Durante los ensayos fueron aplicadas 7 a 9 etapas de cargamento. El descargue fue realizado en 3 etapas. Las lecturas de deformaciones en los 2 extensómetros utilizados fueron realizadas en los instantes de 0, 1, 2, 5 y 10 min. En los casos en que fue observada la estabilización de los asentamientos antes de 10 min, la próxima etapa era aplicada.

Destacar que un factor limitante para la ejecución de los ensayos fue el sistema de reacción.

Mencionar también que el perfil del suelo adyacente y debajo de las puntas de los pilotes es del tipo granular y sin presencia de nivel de agua. De esta forma la aplicación de carga en los pilotes implica solamente asentamientos inmediatos, razón por la cual fueron realizados ensayos de pruebas de carga con aplicación de carga rápida.

El montaje y ejecución de las pruebas de carga realizadas acontecieron conforme ilustrado en la Figura 3. El sistema de reacción utilizado fue un camión cargado con suelo en su interior.

Ambiente de estudio y ejecución de los pilotes

El presente estudio fue realizado en el campo experimental de geotecnia de la Universidad Federal de Ceará (UFC), localizado conforme la Figura 4.

Los pilotes ensayados para la realización de la presente investigación fueron ejecutadas en lugares descritos en las Figura 5 que muestra un esquema de distribución y localización de los pilotes ejecutados y la Figura 6 con una vista panorámica del terminado de los grupos de pilotes ejecutados en dicho campo experimental.

Caracterización Geotécnica

La caracterización geotécnica del subsuelo del campo experimental de la UFC fue realizada a



Figura 3. Vista de las PCEs realizadas.



Figura 4. Localización del campo experimental de geotecnia de la UFC.

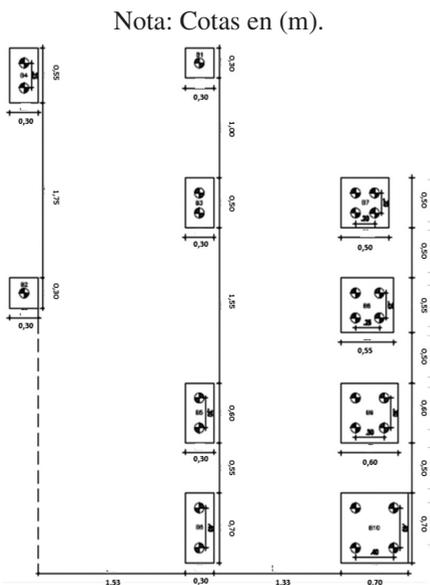


Figura 5. Localización de los pilotes en el campo experimental de la UFC.



Figura 6. Vista de los grupos de pilotes de lo campo experimental de la UFC.

partir de la elaboración de ensayos de laboratorio y de campo cuyos resultados son presentados en un resumen a continuación. La ubicación de los ensayos de campo, así como los lugares de obtención de muestras deformadas e in deformadas, están esquemáticamente indicadas en la Figura 7.

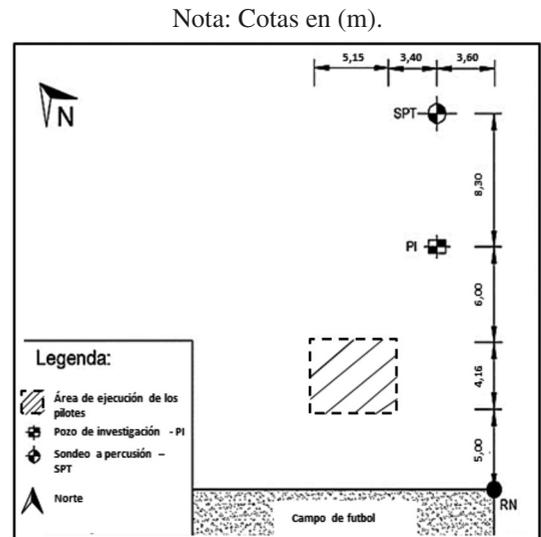


Figura 7. Localización de los ensayos de campo y de los lugares de colecta de muestras deformadas e in deformadas.

Ensayos de laboratorio

En laboratorio fueron realizados ensayos para la determinación de la humedad natural, granulometría, densidad real de los granos y límites Atterberg. La Tabla 1 muestra el resumen de los resultados de los ensayos de caracterización que fueron realizados a partir de la toma de muestras deformadas de 0,2 a 1,5 m de profundidad.

Se puede apreciar en la Tabla 1 que no se cuenta con Límite Líquido y Límite Plástico donde

Tabla 1. Resumen de resultados de los ensayos de caracterización.

Prof. muestra (m)	LL (%)	LP (%)	Humedad (%)	% que pasa		
				Arcilla	Limo	Arena
0,20	NL	NL	1,1%	16	4	78
0,70	NL	NL	2,4%			
1,50	NL	NL	6,9%			

respectivamente no se contara con un Índice de Plasticidad en ninguna de las diferentes profundidades analizadas. La densidad real de los granos (Gs) obtenida es de 2,62 proveniente de las profundidades estudiadas.

Las humedades de las muestras de las profundidades de 0,20, 0,70 y 1,50 m variaron de 1,1 a 6,9%. Las muestras más superficiales son las que presentaron menores humedades, debido a una mayor exposición a los rayos solares.

Los ensayos de granulometría fueron realizados en muestras de suelo obtenidas en las profundidades de 1,0 a 1,5 m y de 1,5 a 2,0 m.

Ensayos de campo.

En campo fueron realizados ensayos de prueba de carga directa y sondeo a percusión (SPT). La Figura 8 presenta los resultados de una excavación de sondeo a percusión (SPT) realizado en el campo experimental de geotecnia de la UFC.

Las informaciones presentadas son las siguientes: el N_{SPT} a cada metro; la estratigrafía del suelo en el transcurso de la profundidad y la profundidad del nivel de agua.

PENETRACION - PERCUSION					MATERIAL	
PROF. (m) DE HASTA	GOLPES P115 cm			GOLPES P130 cm		PROF. (m) 0.00
	1º	2º	3º	2º + 3º		
				10	20	
0.20						Arena fina limosa, color gris, medianamente compacto.
0.85	4	6	7	13		
1.00						Limo arenoso, color amarillo, medianamente compacto.
1.45	5	5	7	12		
2.00						Limo arenoso, color amarillo con pigmentación roja, poco compacta a medianamente compacto.
2.45	6	8	7	15		
3.00						Limo arenoso, color jaspeado, debil.
3.45	7	9	9	18		
4.00						Limo arenoso, color amarillo con pigmentación roja, poco compacta a medianamente compacto.
4.45	7	9	9	18		
5.00						Limo arenoso, color jaspeado, debil.
5.45	2	3	3	6		
6.00						Limo arenoso, color jaspeado, debil.
6.45	1	2	2	4		
7.00						Limo arenoso, color jaspeado, debil.
7.45	2	2	2	4		

Figura 8. Resultado de sondeo a percusión realizado (SPT).

Fue realizada una prueba de carga directa (PCD) superficial en el campo experimental de geotecnia de la UFC, cercano al lugar donde fueron ejecutadas los pilotes aislados y en grupo. El ensayo fue ejecutado

en fases de carga, hasta la estabilización de los asentamientos, con una placa circular metálica de 50 cm de diámetro. La curva presión vs asentamiento medido en la base de la placa es presentada en la Figura 9.

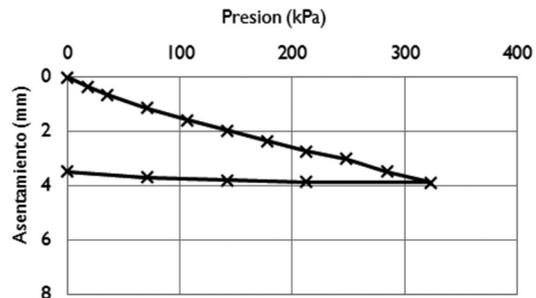


Figura 9. Prueba de carga directa realizada en la superficie del terreno del campo experimental de geotecnia de la UFC.

La máxima presión aplicada con el ensayo fue 323,7 kN, obteniéndose un desplazamiento máximo de 3,87 mm. El asentamiento residual obtenido fue de 3,47 mm. Por los resultados mostrados en la Figura 9, se observa un suelo superficial bastante rígido, resultado compatible con las indicaciones obtenidas con la realización del sondeo a percusión (Figura 8).

Pruebas de Carga

Las pruebas de carga estáticas (PCEs) fueron ejecutadas a mediados del mes de noviembre de 2016. A continuación se presentan las curvas carga vs asentamiento obtenidas con la realización de las PCEs en los pilotes experimentales, aislados y en grupo. En estas figuras son presentadas las medidas de los deslizamientos medios medidos en 2 extensómetros utilizados y dispuestos diametralmente opuestos en la base de los bloques de coronamiento de los pilotes aislados o en grupo.

Pilotes Aislados

Inicialmente, fueron ejecutados 2 PCEs en pilotes aislados. En la primera de ellas el ensayo fue hecho normalmente con el pilote sometido a las etapas de carga programada, con dicho pilote apto de absorber carga por la punta y por la superficie lateral. La Figura 10 muestra los resultados de la PCE ejecutada en el pilote mencionado. En la referida PCE fueron realizadas 8 etapas de cargamento,

en cuanto que la descarga se produjo en 3 etapas. Mediante la Figura 10 se observa la ruptura física para una carga de aproximadamente 65 kN. El asentamiento máximo medido fue de 7,12 mm y el residual fue de 6,83 mm.

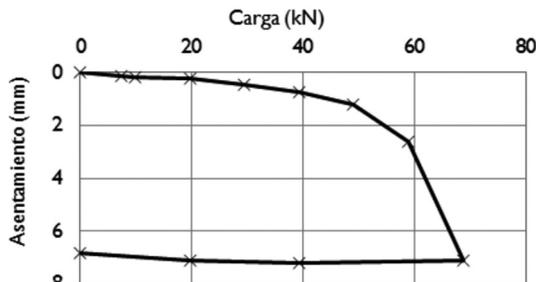


Figura 10. Curva carga x asentamiento del pilote aislado con punta.

Posteriormente, fue realizada una PCE en un pilote idéntico al anterior, sin embargo fue colocado un segmento de poli estireno en el fondo de la excavación del pilote, de forma que esta no absorba carga por la punta, durante las etapas de carga aplicada al pilote. La Figura 11 muestra los resultados obtenidos con la realización de la mencionada PCE.

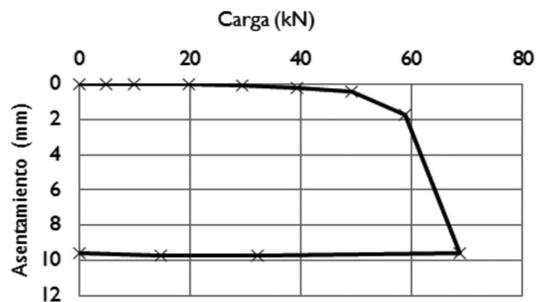


Figura 11. Curva carga x asentamiento del pilote aislado sin punta.

La PCE del pilote aislado sin punta, fue ejecutada de manera similar al primer pilote aislado. En este caso la carga de ruptura física prácticamente fue la misma del pilote aislado con punta. De esta forma se verifica que los pilotes ensayados están trabajando apenas por fricción lateral, o sea son flotantes. Por lo tanto vale la pena mencionar que análisis posteriores reflejaran el efecto de grupo apenas con relación a las fricciones laterales de los pilotes.

La Figura 12 muestra los resultados de las PCEs ejecutadas en los pilotes aislados, con y sin punta, en un mismo gráfico.

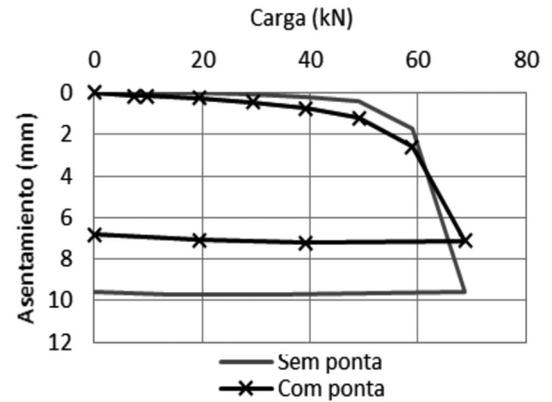


Figura 12. Comparación de las curvas carga x asentamiento de los pilotes aislados con y sin punta.

Grupo de Pilotes

Posteriormente fueron realizadas las PCEs en grupos de pilotes. Vale mencionar que así como en los pilotes aislados, en los grupos de pilotes no hay contacto de los bloques de coronamiento con el suelo. Para esto fue realizada una cuidadosa excavación por debajo de cada bloque de coronamiento introduciéndose un espaciamiento de cerca de 10cm entre la base de los bloques y la superficie del suelo.

En la Figura 13 se muestra las curvas carga x asentamiento obtenidas con las PCEs realizadas en los bloques de coronamiento con 2 pilotes. Cabe mencionar que para evaluar la ocurrencia

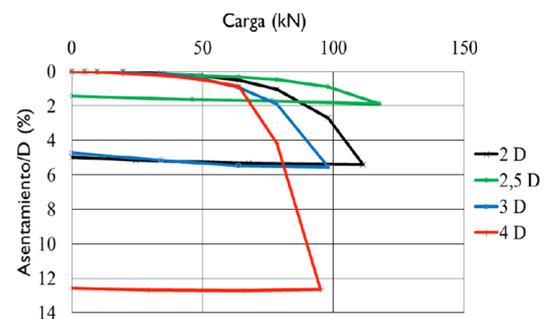


Figura 13. Curva carga x asentamiento de los grupos con 2 pilotes.

del efecto de grupo, se varió los espaciamientos entre los pilotes. De esta forma, fueron realizados PCEs en 4 grupos de pilotes, de manera a tener espaciamientos de 2 D, 2,5 D, 3 D y 4 D, siendo D el diámetro de los pilotes.

Las PCEs de los grupos de 2 pilotes, presentadas en la Figura 13, fueron realizados con 9 etapas de cargamento para los grupos con espaciamientos de 2 D y 2,5 D, ya para los grupos con espaciamientos de 3 D y 4 D fueron ejecutados con 8 etapas. Todas las descargas fueron realizadas en 3 etapas.

La Figura 14 muestra las curvas, carga vs asentamiento de los grupos de 4 pilotes para espaciamientos de 2 D, 2,5 D, 3D y 4 D, obtenidos a través de la ejecución de PCEs.

Las PCEs de los grupos de 4 pilotes fueron realizadas con 7 etapas para los grupos con espaciamientos de 2 D, 2,5 D y 3 D, los des cargamentos procedieron en 3 etapas. Fue observado que uno de los pilotes del bloque con espaciamiento 4 D rompió en su 4^a etapa, correspondiente a 68,7 kN, posteriormente, fue verificado la existencia de una patología en el pilote, que influyo en la ruptura anticipada del grupo ensayado.

RESULTADOS

Capacidad de Carga

En la Tabla 2 son presentados los resúmenes de los valores de Q_{ult} estimados por Van der Veen (1953) [16] de los pilotes aislados y en grupo. También en la presente tabla, es presentada la eficiencia η de los grupos, que fue obtenida dividiendo Q_{ult}

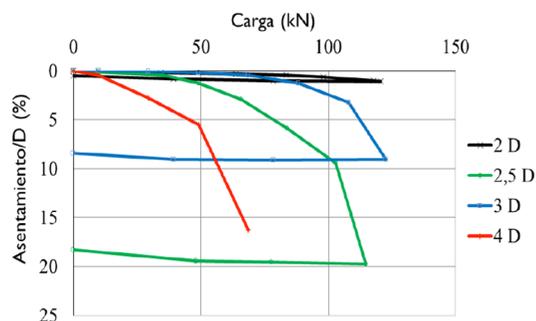


Figura 14. Curva carga x asentamiento de los grupos con 4 pilotes.

del grupo por la cantidad de pilotes pertenecientes al bloque multiplicado por 68,6 kN o sea, Q_{ult} del pilote aislado.

Cabe mencionar la Q_{ult} del pilote fue determinado directamente en la curva carga x asentamiento sin la necesidad de extrapolación, ya que la misma indica una notable ruptura física.

Tabla 2. Resumen de las mediciones de Q_{ult} de los pilotes aislados y en grupo.

Cantidad de pilotes	s/D	Q_{ult} (kN)	η
Aislado		68,6	
2	2	114,0	0,82
2	2,5	121,7	0,88
2	3	99,0	0,71
2	4	95,5	0,69
4	2	131,8	0,47
4	2,5	116,6	0,42
4	3	123,1	0,44

De acuerdo con la Tabla 2 se verifica que la eficiencia de los grupos tiene su valor, en todos los casos, inferior a la unidad. Se observa que para los grupos de 2 pilotes cuanto mayor espaciamiento menor será la eficiencia de grupo. Esa tendencia no fue observada entre los espaciamientos de 2 D y 2,5 D. En los grupos de 4 pilotes la eficiencia, prácticamente presentó valor constante para todos los espaciamientos.

Para re evaluar los resultados obtenidos se procedió también al cálculo de la eficiencia, definiéndose la carga de ruptura por un criterio único, tanto para los grupos de pilotes como para los pilotes aislados.

En este caso, fue utilizado el método europeo, cuya ruptura es convencionalmente definida para un desplazamiento de 10% de su diámetro. De la misma forma la ruptura de un grupo de pilotes ocurre para un desplazamiento de 10% del diámetro de uno de sus pilotes.

En la Figura 15 se presenta un gráfico resumen de eficiencia vs el espaciamiento para los grupos estudiados adoptándose los dos criterios de ruptura mencionados anteriormente.

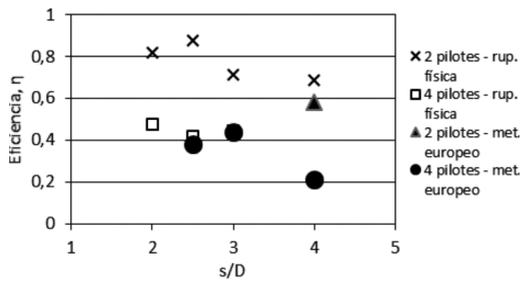


Figura 15. Gráfico de la eficiencia vs el espaciamiento para los grupos de 2 y 4 pilotes.

Para la Figura 15, a partir del criterio de ruptura física se observa que los grupos con 2 pilotes presentan eficiencia variando de 0,69 a 0,88. Ya en los grupos de 4 pilotes se observa nuevamente que fueron obtenidos bajos valores de eficiencia, variando apenas entre 0,42 a 0,47.

Por el método europeo nuevamente fueron obtenidos valores de la eficiencia también inferiores a la unidad y bastante aproximados a los obtenidos a partir del criterio de ruptura física.

Adicionalmente se utilizaron aun expresiones empíricas en la determinación de la eficiencia. Las Tablas 3 y 4 muestran los valores estimados para los grupos de 2 y 4 pilotes para los espaciamientos investigados.

Conforme se puede observar en la Tabla 3, los valores de la eficiencia estimados por las expresiones empíricas para los grupos de 2 pilotes fueron por todos los métodos utilizados, dando valores inferiores a la unidad con variación de 0,76 a 0,97, excepto por el método de la NBR 6122 (ABNT, 2010) cuyo valor fue muy inferior y discordante, comparándose

Tabla 3. Resumen de estimaciones de eficiencias en los grupos con 2 pilotes.

Método	Espaciamientos (s/D)			
	2	2,5	3	4
Regla de Feld	0,94	0,94	0,94	0,94
Regla de origen incierto	0,94	0,95	0,96	0,97
Ec. de Converse-labarre	0,84	0,87	0,89	0,92
Ec. de Los Ángeles	0,92	0,94	0,95	0,96
Ec. de Sayed y Bakeer	0,76	0,79	0,80	0,83
NBR 6122 (ABNT, 2010)	0,16	0,19	0,22	0,28

Tabla 4. Resumen de estimaciones de eficiencias de los grupos con 4 pilotes.

Método	Espaciamientos (s/D)			
	2	2,5	3	4
Regla de Feld	0,81	0,81	0,81	0,81
Regla de origen incierto	0,83	0,86	0,89	0,92
Ec. de Converse-labarre	0,68	0,75	0,79	0,84
Ec. de Los Ángeles	0,78	0,83	0,86	0,89
Ec. de Sayed y Bakeer	0,61	0,67	0,71	0,76
NBR 6122 (ABNT, 2010)	0,26	0,37	0,49	0,78

esos valores con los valores obtenidos a partir de las pruebas de carga realizadas en los grupos de 2 pilotes, presentados en la Figura 15, se verificó una concordancia de valores entre las 2 metodologías.

Para los grupos de 4 pilotes, nuevamente se estimó valores inferiores a la unidad (Tabla 4), sin embargo en este caso la mayoría de los métodos utilizados estimaron eficiencias de orden de 0,80, que es considerablemente superior a los valores determinados a partir de las pruebas de carga realizados y presentados en la Figura 15.

Comparando ahora los valores de la eficiencia, obtenidos a partir de las pruebas de carga realizadas en los grupos de 2 pilotes, con los valores colocados por Meyerhof observándose concordancia en los resultados, puesto que Meyerhof (1976) [10] sugiere que sea adoptado para grupos de pilotes excavados en arenas, una eficiencia de 2/3 para espaciamientos (entre ejes) de pilotes de 2 a 4 diámetros. Por otro lado, para los grupos de 4 pilotes se observa valores de eficiencia considerablemente inferiores.

Cabe mencionar también que la discordancia entre los valores obtenidos en esta investigación con los valores obtenidos por Vesic (1969) [17] es comprensible debido al hecho de haber sido utilizado grupos de pilotes incrustados en arenas, que aumenta la compacidad del suelos debido al proceso de ejecución, al contrario de la situación de esta investigación, que fue realizado en pilotes excavados en suelo granular con compacidad media. El mismo razonamiento puede ser aplicado cuando se compara los resultados de esta investigación con los de Soares (2011) [14] que realizo su investigación en grupos de pilotes *hollow auger*. En este caso así

como en los pilotes incrustados existe una tendencia de mejoría del suelo por el propio proceso ejecutivo.

Es importante mencionar también que en la presente investigación y por lo tanto en los cálculos de la eficiencia no existe contribución de los bloques de coronamiento en los grupos de pilotes ensayados.

Asentamiento

En la Tabla 5 son presentados los valores de los asentamientos, obtenidos directamente de las PCEs ejecutadas, para 2 cargamentos considerados de referencia o sea 17,2 kN y 34,3 kN por pilotes, para ambos grupos con 2 y 4 pilotes. Nuevamente los espaciamientos evaluados fueron de 2 D, 2,5 D, 3 D y 4 D.

De acuerdo a la Tabla 5 se observa que en la mayoría de los grupos de pilotes los asentamientos sobre los mismos cargamentos, fueron superiores a los del pilote aislado.

Entre las Figuras 16 a 18 son presentadas comparaciones entre los asentamientos medidos en las PCEs realizadas, para los grupos de 2 y 4 pilotes en relación a los asentamientos presentados por el pilote aislado ensayado.

Para las Figuras 16, 17 y 18 se observa que para los grupos de pilotes con 2 pilotes y carga de 34,3 kN por pilote, el efecto de grupo fue básicamente pronunciado, llegando a presentar asentamientos de hasta 3 a 4 veces el valor de pilote aislado. Para los grupos de 4 pilotes, el efecto de grupo fue aún

Tabla 5. Resumen de los asentamientos de los grupos en función de la cantidad de pilotes y de cargamento por pilote.

Cantidad de pilotes	s/D	Asentamiento (mm)	
		17,2 kN/pilote	34,3 kN/pilote
Aislado	–	0,22	0,59
2	2	0,10	0,70
2	2,5	0,15	0,37
2	3	0,15	1,25
2	4	0,23	1,98
4	2	0,34	–
4	2,5	3,39	–
4	3	0,47	–

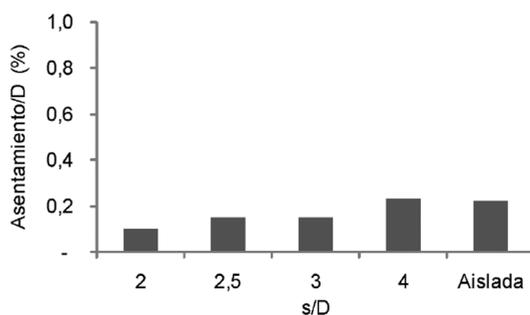


Figura 16. Comparaciones entre asentamientos de los grupos de 2 pilotes para cargas de a) 17,2 kN/ por pilote.

más pronunciado, con los asentamientos de todos los grupos superiores a los del pilote aislado.

En la Figura 19 se presenta un gráfico que muestra la relación (ξ) entre los asentamientos de los grupos de pilotes por el asentamiento del pilote aislado versus el espaciamiento (s/D).

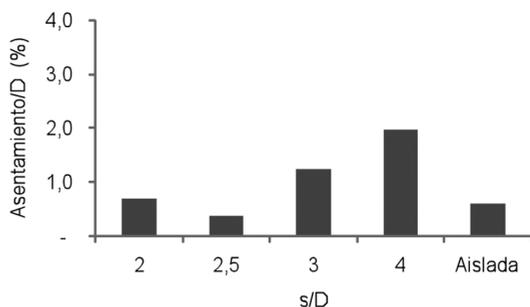


Figura 17. Comparaciones entre asentamientos de los grupos de 2 pilotes para cargas de b) 34,3 kN/ por pilote.

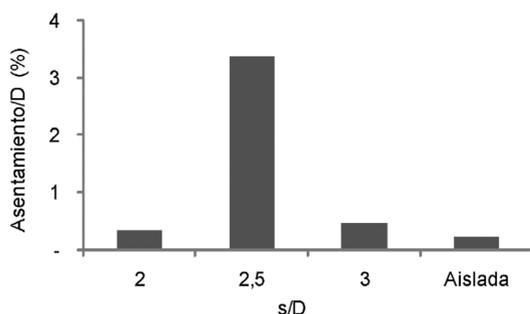


Figura 18. Comparaciones entre asentamientos de los grupos de 4 pilotes para carga de 17,2 kN /por pilote.

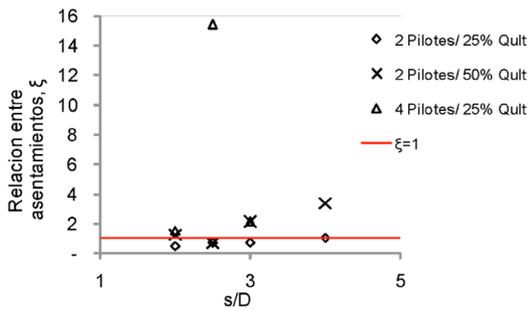


Figura 19. Relación entre asentamientos, ξ , versus el s/D para los grupos de 2 y 4 pilotes.

CONCLUSIONES

A partir de la realización de este trabajo se concluye que:

Comparando los resultados de las PCEs realizadas en los pilotes aislados, con y sin punta, se observa que los pilotes excavados absorben todo el cargamento apenas por fricción lateral.

En todos los grupos de pilotes, constituidos por 2 y 4 pilotes y s/D de 2, 2,5, 3 y 4, fue verificado efecto de grupo con relación a la capacidad de carga.

Prácticamente en todos los grupos de pilotes fue verificado el efecto de grupo en relación al asentamiento, obteniéndose asentamientos superiores a los del pilote aislado para la misma carga.

Fue observado que para los grupos de pilotes evaluados, cuanto mayor el espaciamiento mayor será los asentamientos del grupo.

Se verificó que para los grupos de 2 pilotes la eficiencia oscilo alrededor de 0,80 para los espaciamientos 2 a 4 veces del diámetro de los pilotes. Sin embargo, para los grupos de 4 pilotes la eficiencia presento un valor constante aún menor para todos los espaciamientos, alrededor de 0,40; de esta forma para los espaciamientos investigados, el efecto de grupo aumento con el incremento del número de pilotes en el grupo.

Fue observado también que a partir de los resultados de la presente investigación, la eficiencia de grupo de pilotes con poco espaciamiento en arenas puede ser inferior a la unidad como consecuencia del procedimiento ejecutivo del pilote y de la compacidad del suelo arenoso.

AGRADECIMIENTOS

Los autores hacemos un reconocimiento especial a todas las entidades participantes para que haya sido posible la elaboración del presente trabajo. Agradecemos a la Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) por el financiamiento en el presente trabajo. Agradecemos a la Universidade Federal do Ceará (UFC) - Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental por el apoyo académico y un agradecimiento especial al Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação de la UFC, por la colaboración y brindarnos los ambientes para la elaboración de los distintos ensayos de campo y laboratorio.

REFERENCIAS

- [1] Associação Brasileira de Normas Técnicas. "6122: Projeto e execução de fundações". Rio de Janeiro: Moderna, 2010. 91 p.
- [2] Associação Brasileira de Normas Técnicas. "12131: Estacas – Prova de carga estática – Métodos de ensaio". Rio de Janeiro: Moderna, 2006. 16 p.
- [3] J.E Bowles. "Foundation Analysis and Design". Singapore: The McGraw-Hill Companies, 1207 p. 1997.
- [4] D.M. Braja. "Principios de Ingeniería de Cimentaciones", 880 p. 2001.
- [5] V.H.F. Bonan. "Estudo Experimental do Efeito de Grupo de Estacas Escavadas em Perfil de Solo Granular". Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Geotecnia, Fortaleza. 2017.
- [6] CGE. "Canadian Foundation Engineering Manual". 3th ed. Ottawa: Canadian Geotechnical Society, 512 p. 1992.
- [7] R.K.S. Chan. "Foundation design and construction". Geo Publication, Nº 1. The Government of the Hong Kong Special Administrative Region. Hong Kong. 2006.
- [8] J.R. Garcia. "Análise experimental e numérica de radiers estaqueados executados em solo da região de Campinas/SP". 2015. 359 f. Tese (Doutorado). Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2015.
- [9] A. Kezdi. "Bearing Capacity of piles and piles groups". In: ICSMFE, 4, 1957,

- London. Proceedings... London, Vol. 2, p. 47-51. 1957.
- [10] G.G. Meyerhof. "Bearing capacity and settlements of piled foundations". Journal of the Geotechnical Engineering Division. Vol. 102, pp. 197-228. 1976.
- [11] H.G. Poulos and E.H. Davis. "Pile Foundation Analysis and Design". John Wiley & Sons, New York. 1980.
- [12] M.M. Sales. "Análise do Comportamento de Sapatas Estaqueadas". 229 f. Tese (Doutorado) - Universidade de Brasília, Brasília, 2000.
- [13] P.A.B.A. Silva, J.C.A. Cintra. "Capacidade de Carga de Grupos de Estacas Escavadas de Pequeno Diâmetro". São Paulo, Brasil: 3º Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia (SEFE III). 1996.
- [14] W.C. Soares. "Radier Estaqueado com Estacas Hollow Auger em Solo Arenoso". 302 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 2011.
- [15] J.G. Stuart, T.H. Hanna, A.H. Naylor. "Notes on the behaviour of model pile groups in sand". In: Symposium on Pile Foundations, Stockholm. Proceedings... Stockholm: intern. Assoc. Bridge and Struct. Engrg, p. 97-103. 1960.
- [16] C. Van Der Veen. "The bearing Capacity of a Pile". In: Proceeding of the 3th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Vol. II, Switzerland. 1953.
- [17] A.S. Vesic. "Experiments with instrumented pile groups in sand". In: American Society for Testing and Materials. Performance of deep foundations. Philadelphia, (ASTM Special Technical Publication). N° 444, p. 177-222. 1969.
- [18] A.S. Vesic. "Principles of pile foundation design". Soil Mechanics Series. N° 38, School of Engineering, Duke University. 1975.