

3D numerical analysis of composite piled-raft foundation

**Serguey Figueredo Sosa¹, Willian Cobelo Cristiá²,
Ingrid Fernández Lorenzo²**

¹Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (INVESCONS). Calle 100 # 9104 e/Vento y 16. Alta Habana, Boyeros. La Habana, Cuba. Fax: 537-643 8106. Teléfono: 537-643 8073.

²Facultad de Ingeniería Civil, Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría" (ISPJAE). Calle 114, No 11901, e/119 y 127, Marianao. La Habana, Cuba.

Fax: 537-2608030. Teléfono: 537-2663838.

serguey@enia.co.cu, wcobelo@civil.cujae.edu.cu, ingridfl@civil.cujae.edu.cu

Abstract

The piled-raft foundation is one of the major advances in foundation engineering in the last decades. Its use has been increased in the last years up to become a common solution to solve large structure foundations. This foundation system has been widely accepted by its efficiency on settlement reduction and favorable economic effect compared to conventional solutions. The aim of this article is to show the behavior of the combined piled-raft foundation taking into account the interaction between its three main elements: raft, soil and pile. The assessment of variation on the length, diameter and spacing of the piles on admissible load capacity is presented. Furthermore their influence on settlement reduction under axial load is referred to. Finally a study of load transfer from superstructure to the soil is performed through a computational numerical experiment developed by using PLAXIS 3D Foundation based on finite element method.

Keywords: piled raft foundation, raft-pile-soil interaction, PLAXIS.

Análisis numérico en 3D de losas de cimentación combinadas con pilotes

Resumen

Las losas de cimentación combinadas con pilotes (LCCP) constituyen uno de los principales avances de la ingeniería de cimentaciones en las últimas décadas. Su empleo se ha incrementado en los últimos años a tal punto que se ha convertido en un común denominador para solucionar las cimentaciones de las grandes estructuras. Este sistema ha tenido gran aceptación internacionalmente por la eficiencia en la disminución de los asentamientos y por el efecto económico favorable si se compara con las soluciones convencionales. El artículo muestra el comportamiento de este sistema de cimentación a partir de considerar la interacción que se genera entre los tres elementos componentes (losa-suelo-pilote). Se evalúa la influencia de la variación de la longitud, el diámetro y el espaciamiento de los pilotes en la capacidad de carga admisible y en la reducción de los asentamientos del sistema bajo carga axial. El estudio de la transferencia de carga desde la superestructura hasta el suelo se sustenta en un experimento numérico, desarrollado mediante el empleo del software PLAXIS 3D Foundation, herramienta computacional basada en el Método de los Elementos Finitos.

Palabras clave: losa combinada con pilotes, interacción losa-pilote-suelo, PLAXIS.

Introducción

La definición del tipo y forma de la cimentación a utilizar depende fundamentalmente de las características tipológicas de la superestructura y de las propiedades ingenieriles de los suelos de soporte. Las cimentaciones profundas sobre pilotes tienen como particularidad que necesitan un elemento de transición con la superestructura, pudiendo ser encepados o losas. En el análisis y diseño de cimentaciones profundas mediante el enfoque clásico se considera que los pilotes son los elementos estructurales responsables de transmitir al suelo el 100% de la carga proveniente de la superestructura y que los elementos de transición solamente garantizan que los pilotes reciban la misma magnitud de carga y por lo tanto no aportan a la capacidad resistente. Sin embargo, los ingenieros se han planteado la interrogante de hasta qué punto los elementos de transición aportan o no en la transferencia de cargas al suelo, y en caso de hacerlo cómo cuantificar ese aporte. Para ello es preciso realizar estudios de interacción suelo-estructura, término con que se define el análisis de estructuras considerando al suelo, la subestructura y la superestructura como un sistema.

El desarrollo de esta temática imprimió un gran impulso en la construcción de estructuras tales como edificios altos, torres de comunicación, silos, etc. Para responder a las grandes cargas generadas por estas estructuras y/o a su ubicación sobre suelos compresibles se han tenido que transformar algunos conceptos clásicos establecidos y adoptar nuevas soluciones de cimentación en aras de lograr construcciones viables económicamente.

Es por ello que desde la segunda mitad del pasado siglo diversos autores encabezados por Hooper [1], Brown y Wiesner [2], Poulos y Davis [3], introdujeron un nuevo enfoque de cimentación profunda, conocido actualmente como pile raft foundation o losa de cimentación combinada con pilotes (LCCP), desarrollado para considerar el trabajo conjunto de una losa de cimentación con pilotes ubicados convenientemente, de manera que se pudiera mejorar su comportamiento geotécnico y estructural. Estos primeros intentos proporcionaron métodos de cálculo aproximados, algunos de los cuales fueron definidos por Poulos y Davis [3], Clancy y Randolph [4], Randolph [5],

Poulos [6], y no fue hasta las últimas décadas que Ta y Small [7], Katzenbach *et al.* [8], Small y Liu [9], entre otros, han desarrollado métodos más rigurosos que consideran, a partir de modelos numéricos, el aporte de cada uno de los elementos que intervienen en la solución, de manera que los pilotes comienzan a introducirse para reducir los asentamientos de toda la cimentación en su conjunto y no con la única finalidad de incrementar la capacidad de carga de todo el sistema.

En el análisis del fenómeno de interacción losa-suelo-pilote se considera que los pilotes trabajan a la carga de fluencia y en algunos casos a su capacidad de carga última, de forma tal que se produzcan valores de asentamientos que permitan la deformación de la losa y que ésta comience a transmitir cargas al suelo. Con este concepto se logra que la losa tome un porcentaje importante de la capacidad de carga de la cimentación y se considere de forma más racional el aporte de los pilotes.

En los últimos años se han venido desarrollando métodos para analizar las LCCP, algunos de ellos han sido resumidos por Poulos [10] y clasificados en tres grupos:

- Cálculos simplificados basados en procedimientos analíticos.
- Cálculos aproximados basados en el uso de la computación.
- Cálculos más exactos basados en el uso de la computación.

Los métodos más exactos, basados en rigurosas herramientas de cálculo permiten simular de una manera más realista el complejo fenómeno de la interacción losa-suelo-pilote, eliminando las hipótesis simplificadoras en que se basan los otros métodos. A pesar de ello, aún persisten problemas, sobre todo en cuanto a la consideración de la interfase suelo-pilote. Esta complicación se resuelve aproximadamente, a partir de asignar propiedades que permitan la variación de la rigidez de los nudos de contacto entre los diferentes materiales. No obstante, estos métodos de análisis presentan una dificultad fundamental, y consiste en su alto costo computacional.

Desarrollo

Para el estudio del comportamiento del sistema LCCP se diseñó un experimento numérico

que permitió evaluar algunas de las variables que intervienen en cimentaciones de este tipo, entre las que se destacan la influencia del tipo de suelo, el diámetro, el número y la longitud de los pilotes [11-13].

El estudio paramétrico considera una losa de cimentación de 16×16 m (B×L) combinada con 9, 16 y 25 pilotes perforados y hormigonados “in situ” bajo la acción de cargas verticales (Figura 1). Las Tablas 1, 2 y 3 muestran las variables consideradas en el experimento, así como

las propiedades asumidas para los tres tipos de suelos y para el hormigón respectivamente. En total fueron evaluados 162 modelos.

Las cargas se adoptaron considerando que la losa soporta una estructura de pórticos espaciales con luces de 6 m en cada dirección. La magnitud de las mismas se corresponde con la ubicación de cada apoyo y su área tributaria.

Los suelos empleados son característicos de la región occidental de Cuba, donde se prevé un desarrollo urbanístico con edificios altos.

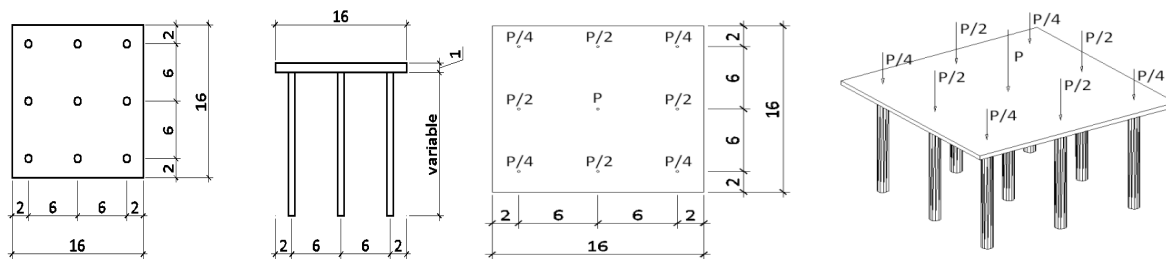


Figura 1. Dimensiones generales de la LCCP con 9 pilotes y la ubicación de las cargas.

Tabla 1
Experimento numérico de LCCP

| Tipos de suelo | Pilote | | | Losa |
|----------------|-----------------|-----------------|-----------|----------------|
| | Diámetro, D (m) | Longitud, Lp(m) | # pilotes | Espesor, H (m) |
| S-01 | 0,40 0,80 | 10 | 9 | 0,40 |
| S-02 | | 15 | 16 | 0,70 |
| S-03 | | 20 | 25 | 1,00 |

Tabla 2
Propiedades físico-mecánicas en tensiones efectivas

| Suelo | Descripción | Propiedades físico-mecánicas | | | | | |
|-------|---------------------------------|------------------------------|----------|-------------------------------------|-------------------------------------|---------|-------|
| | | ϕ' (°) | C' (kPa) | γ_{uns} (kN/m ³) | γ_{sat} (kN/m ³) | E (kPa) | μ |
| S-01 | Arcilla de consistencia firme | 20 | 10 | 20,00 | 20,00 | 6000 | 0,46 |
| S-02 | Limos de consistencia firme | 23 | 20 | 20,50 | 20,50 | 12000 | 0,45 |
| S-03 | Limos de consistencia muy firme | 27 | 30 | 21,00 | 21,00 | 20000 | 0,38 |

Tabla 3
Propiedades adoptadas para caracterizar el hormigón

| Material | f'c (MPa) | γ_h (kN/m ³) | E (kPa) | μ |
|----------|-----------|---------------------------------|-------------------|-------|
| Hormigón | 25,0 | 24,0 | $2,5 \times 10^7$ | 0,17 |

Se emplea una interfase para simular la interacción que se produce en el contacto entre dos materiales (suelo-hormigón). En este caso, se emplea un factor de reducción de la resistencia a cortante de 0,5 para el contacto arcilla-hormigón.

La nomenclatura adoptada permite identificar los modelos analizados en función de las variables dependientes, por ejemplo, 01-LC-09-410 significa:

- 01- Tipo de suelo
- LC Losa de cimentación
- 09- Número de pilotes
- 410- 0.40 m diámetro, 10 m longitud

Resultados

Capacidad de carga última

El modelo del material empleado para simular el suelo presenta un comportamiento elasto-plástico con criterio de falla de Mohr-Coulomb, por lo que la curva carga-asentamiento comprende dos etapas bien definidas, la primera en la que las deformaciones siguen una ley prácticamente lineal y la segunda donde comienzan a aparecer plastificaciones hasta llegar al punto donde sin incrementar el valor de la carga las deformaciones continúan generándose y la curva adopta un comportamiento asintótico. La capacidad de car-

ga última de la cimentación se genera en un punto intermedio entre el fin del comportamiento lineal y el comienzo del comportamiento asintótico. Resulta extremadamente difícil determinar con exactitud ese punto donde se genera la falla del suelo, sobre todo en este tipo de cimentaciones donde es necesario que se movilicen grandes asentamientos.

La Figura 2 muestra que las características físico-mecánicas y deformacionales del suelo de soporte influyen notablemente en el desempeño de la LCCP pues en la medida que estas propiedades mejoran, el dominio elástico es más amplio, se reducen los asentamientos y la capacidad de carga admisible se incrementa. En este caso, los valores de asentamientos necesarios para movilizar la capacidad de carga última del sistema oscila alrededor de 1,76 m ($0,11 \times B$), valor muy cercano al planteado por Mandolini [14] y que consiste en el 10% del lado menor de la losa. Estas magnitudes son excesivamente altas y se verán reducidas notablemente con la introducción de criterios de seguridad para definir la carga de trabajo. Este análisis es consistente con los criterios expresados por los principales investigadores en el tema, cuando afirman que en este tipo de cimentación el diseño responde a criterios deformacionales y no a aspectos resistentes. Por tal razón, el presente artículo se centra en describir el comportamiento de LCCP bajo la carga admisible.

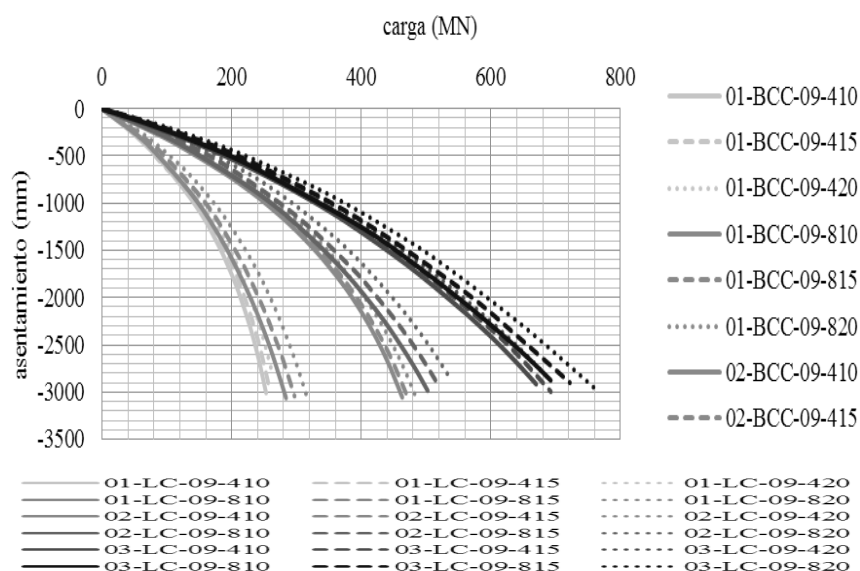


Figura 2. Curvas carga-asentamiento para la losa de cimentación combinada con 9 pilotes sobre los tres suelos considerados.

Capacidad de carga admisible

En el experimento numérico realizado se ha podido comprobar que para alcanzar la capacidad de carga última de una LCCP es necesario que se genere una magnitud importante de asentamientos que a su vez no son tolerables por las estructuras. Bajo estas condiciones el aporte de los pilotes al sistema es insignificante, debido fundamentalmente a que el asentamiento del sistema supera en más de 10 veces el asentamiento correspondiente a la capacidad de carga última de los

pilotes aislados. Sin embargo, con la introducción de los criterios de seguridad los asentamientos del sistema se verán reducidos al rango de desempeño de los pilotes y en consecuencia su aporte en la capacidad de carga se incrementará sustancialmente. Para validar este criterio y sin intentar introducir aspectos de seguridad se adoptó como valor límite del asentamiento del sistema, 10 cm Mandolini [14] y se obtuvo la capacidad de carga para esa magnitud, denotada en la investigación como capacidad admisible (Tabla 4).

Tabla 4
Relación entre la capacidad de carga última del sistema LCCP y la capacidad de carga admisible obtenida para 10 cm de asentamiento

| Modelo | Suelo | Q últ (MN) | Q adm (MN) | Modelo | Suelo | Q últ (MN) | Q adm (MN) |
|--------------|-------|------------|------------|--------------|-------------|--------------|------------|
| 01-LC-09-410 | | 205,20 | 19,58 | 03-LC-16-410 | | 560,00 | 43,41 |
| 01-LC-09-415 | | 212,80 | 20,82 | 03-LC-16-415 | | 575,00 | 46,70 |
| 01-LC-09-420 | S-01 | 219,80 | 21,68 | 03-LC-16-420 | S-03 | 588,00 | 49,90 |
| 01-LC-09-810 | | 217,20 | 20,48 | 03-LC-16-810 | | 592,00 | 46,93 |
| 01-LC-09-815 | | 221,85 | 22,18 | 03-LC-16-815 | | 633,00 | 50,12 |
| 01-LC-09-820 | | 232,00 | 24,53 | 03-LC-16-820 | | 658,00 | 54,67 |
| 02-LC-09-410 | | | 376,80 | 33,71 | | 01-LC-25-410 | |
| 02-LC-09-415 | | 387,80 | 35,93 | 01-LC-25-415 | | 249,38 | 25,14 |
| 02-LC-09-420 | S-02 | 410,40 | 37,43 | 01-LC-25-420 | S-01 | 266,95 | 26,77 |
| 02-LC-09-810 | | 407,20 | 35,63 | 01-LC-25-810 | | 261,00 | 24,45 |
| 02-LC-09-815 | | 423,30 | 38,12 | 01-LC-25-815 | | 299,20 | 28,03 |
| 02-LC-09-820 | | 448,20 | 41,48 | 01-LC-25-820 | | 334,80 | 31,80 |
| 03-LC-09-410 | | | 520,80 | 41,85 | | 02-LC-25-410 | |
| 03-LC-09-415 | | 536,40 | 43,75 | 02-LC-25-415 | | 444,60 | 40,13 |
| 03-LC-09-420 | S-03 | 550,00 | 45,92 | 02-LC-25-420 | S-02 | 467,10 | 43,97 |
| 03-LC-09-810 | | 544,50 | 45,13 | 02-LC-25-810 | | 457,60 | 40,95 |
| 03-LC-09-815 | | 562,90 | 46,90 | 02-LC-25-815 | | 496,80 | 43,70 |
| 03-LC-09-820 | | 599,20 | 49,25 | 02-LC-25-820 | | 543,20 | 48,89 |
| 01-LC-16-410 | | | 225,00 | 21,13 | | 03-LC-25-410 | |
| 01-LC-16-415 | | 233,48 | 23,17 | 03-LC-25-415 | | 609,00 | 50,24 |
| 01-LC-16-420 | S-01 | 245,40 | 24,93 | 03-LC-25-420 | S-03 | 619,50 | 54,37 |
| 01-LC-16-810 | | 242,40 | 23,00 | 03-LC-25-810 | | 621,00 | 49,96 |
| 01-LC-16-815 | | 268,80 | 25,79 | 03-LC-25-815 | | 675,00 | 53,21 |
| 01-LC-16-820 | | 287,20 | 29,51 | 03-LC-25-820 | | 733,50 | 57,79 |
| 02-LC-16-410 | | | 390,60 | 35,02 | | | |
| 02-LC-16-415 | | 407,00 | 38,19 | | | | |
| 02-LC-16-420 | S-02 | 414,70 | 40,90 | | | | |
| 02-LC-16-810 | | 416,40 | 37,47 | | | | |
| 02-LC-16-815 | | 453,60 | 41,60 | | | | |
| 02-LC-16-820 | | 480,00 | 44,75 | | | | |

Influencia de la longitud y el diámetro del pilote en la capacidad de carga admisible

La Figura 3 representa la influencia de la longitud de los pilotes en la capacidad de carga admisible de la LCCP con 9, 16 y 25 pilotes en los tres suelos considerados (para $D=0,40$ m y $D=0,80$ m).

Analizando la Figura 3, se puede interpretar un lógico incremento de la capacidad de carga admisible de la cimentación como consecuencia del aumento de la longitud de los pilotes.

El valor medio para incrementos de 5 m es del 8,5%, mientras que para 10 m se llega a alcanzar hasta 17,5%. Es importante destacar que esta influencia se hace más marcada en la medida que el número de pilotes es mayor, como se muestra en dicha figura. Tal y como sucede con la variación de la longitud de los pilotes, al duplicarse el diámetro (Figura 4) ocurre un aumento de la capacidad resistente de la LCCP, con valores medios que oscilan entre 7,08%, 8,19% y 11,64% para pilotes de 10 m, 15 m y 20 m, respectivamente.

Este comportamiento conduce al planteamiento de que para las condicionantes del estudio realizado, un aumento de la profundidad de los pilotes tiene mayor influencia que el aumento de su diámetro.

Influencia del número de pilotes en la capacidad admisible

El número de pilotes es una variable relacionada con el espaciamiento, por lo que representan la misma influencia en el comportamiento de las LCCP. La Tabla 5 muestra para cada caso, las relaciones entre el número de pilotes y el espaciamiento.

Para una mejor comprensión del fenómeno se expone en la Figura 5 el incremento en porcentaje de la capacidad de carga admisible del sistema LCCP como consecuencia del aumento del número de pilotes. Partiendo de considerar la capacidad de carga de la losa aislada (sin pilotes) como el valor inicial.

Con la introducción de pilotes en el sistema LCCP se genera un lógico incremento de la capacidad de carga. Nótese en la Figura 5 que el incremento es más significativo en la medida que el suelo presenta parámetros resistentes más bajos. Tomado como referencia la capacidad de carga de la losa aislada sin pilotes.

Si se evalúan los incrementos obtenidos con la introducción de 9 y 25 pilotes, se aprecia que para LCCP con pilotes de 0.8 m de diámetro y 20 m de longitud los incrementos varían entre 124% y 191% en el suelo S-01, entre 45% y 70% en suelo S-02 y entre 23% y 45% en el suelo S-03. De manera análoga ocurre en el resto de los modelos analizados.

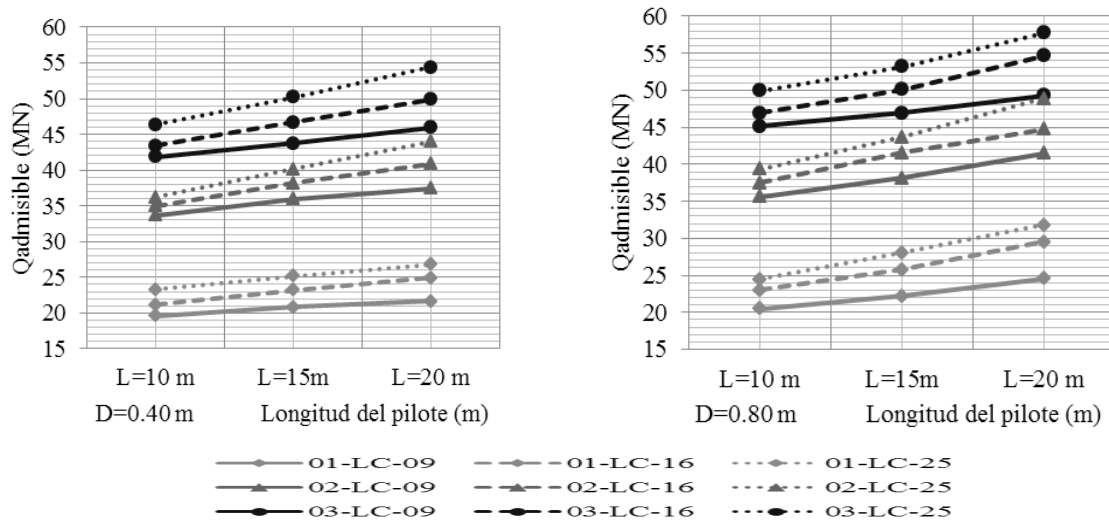


Figura 3. Influencia de la longitud de los pilotes en la capacidad de carga admisible.

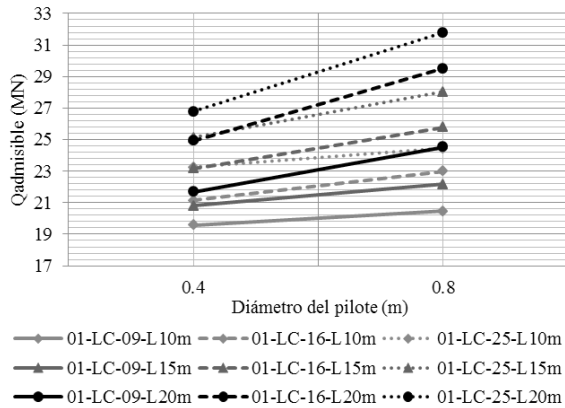


Figura 4. Influencia del diámetro de los pilotes en la capacidad de carga admisible (suelo 1).

Aporte de los elementos componentes a la capacidad de carga admisible

Uno de los parámetros fundamentales que permite evaluar el desempeño de las LCCP es el aporte que brindan cada uno de los elementos componentes del sistema, fundamentalmente los pilotes.

Katzenbach [8], definió el coeficiente α_{pr} por medio de una expresión para cuantificar el aporte de los pilotes en el sistema LCCP.

$$\alpha_{pr} = \frac{Q_{pilote}}{Q_{total}} \tag{1}$$

$$Q_{pilote} = \sum Q_{pilote\ aislado} \tag{2}$$

$$Q_{total} = \sum Q_{total\ sobre\ la\ cimentación} \tag{3}$$

En la Figura 6 se presenta el aporte de los pilotes a la capacidad de carga admisible del sistema LCCP para cada tipo de suelo considerado, donde se refleja la tendencia a disminuir la contribución de los pilotes con el aumento de la relación S/D.

El coeficiente α_{pr} alcanza sus valores máximos para un rango de variación de la relación S/D entre 3,75 y 5, siendo más significativo el aporte de los pilotes en los suelos más compresibles.

Tabla 5
Relaciones entre el espaciamiento y el diámetro de los pilotes

| # Pilotes | Diámetro (D) (m) | Espaciamiento (S) (m) | S/D |
|-----------|------------------|-----------------------|------|
| 9 | 0,40 | 6 | 15 |
| | 0,80 | | 7,5 |
| 16 | 0,40 | 4 | 10 |
| | 0,80 | | 5 |
| 25 | 0,40 | 3 | 7,5 |
| | 0,80 | | 3,75 |

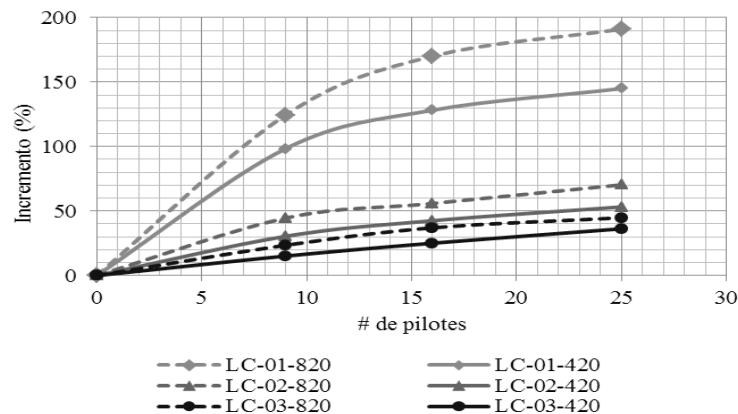


Figura 5. Influencia del número de pilotes en la capacidad de carga admisible del sistema.

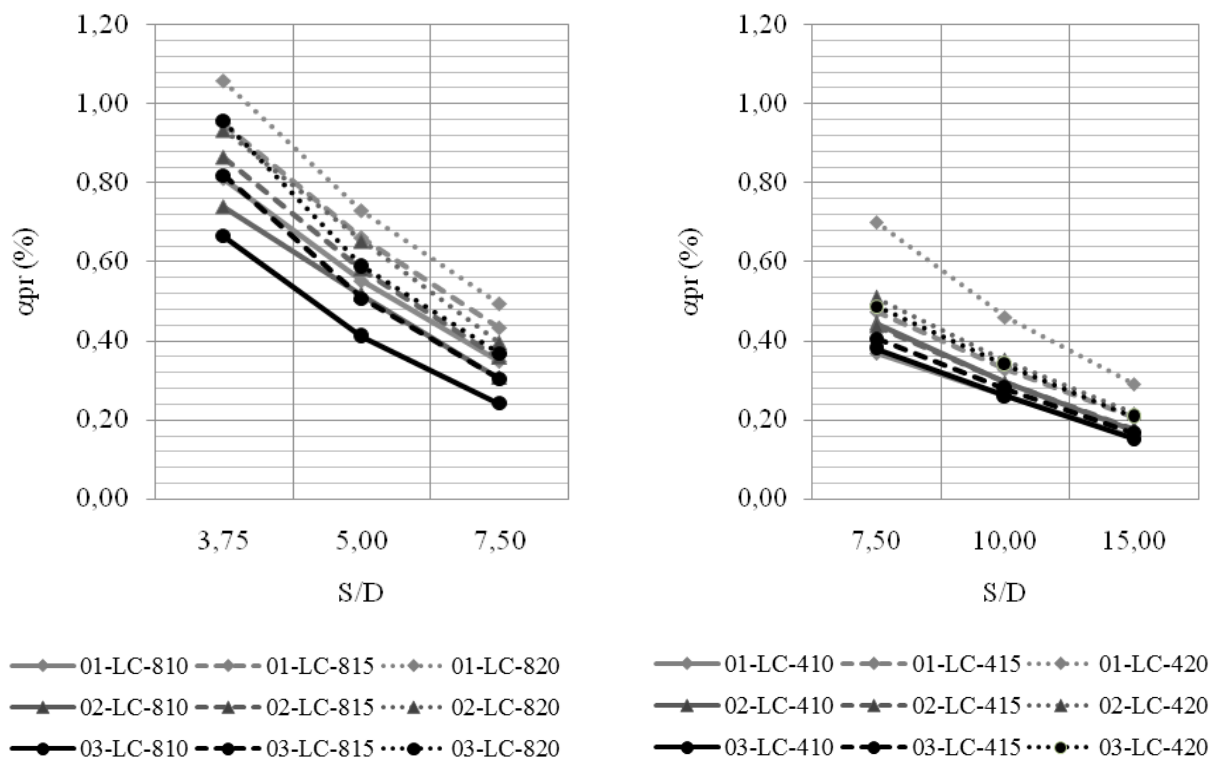


Figura 6. Comportamiento de α_{pr} para la carga admisible del sistema.

Conclusiones

A partir de las consideraciones del experimento numérico implementado y la interpretación de los resultados se pueden arribar a las siguientes conclusiones:

Las propiedades del suelo de soporte influyen significativamente en el desempeño de las LCCP, pues en la medida que estas mejoran, el dominio elástico es más amplio, se reducen los asentamientos y la capacidad de carga admisible se incrementa.

Un incremento de dos veces la longitud de los pilotes en el sistema LCCP sometido a carga vertical tiene mayor influencia en la capacidad de carga admisible que un aumento de dos veces el diámetro. Siendo más marcada esta influencia en la medida que el número de pilotes es mayor.

Se corrobora que el número de pilotes y la relación S/D son variables determinantes en el comportamiento de las LCCP, sobre todo para valores de asentamientos que se correspondan con la capacidad de carga admisible.

En la medida que la relación S/D se acerca a valores entre 3 y 4 aumenta la eficiencia del sistema de cimentación pues los pilotes aportan valores significativos a la capacidad de carga admisible.

Agradecimientos

Los autores agradecen a CAPES por el soporte brindado para la culminación de esta investigación y al PhD. Renato Pinto da Cunha del Programa de Post-graduación la Universidad de Brasilia por el aporte bibliográfico.

Referencias bibliográficas

1. Hooper J.A.: "Observations on the Behaviour of a Piled-Raft Foundation on London Clay". Proc. Instn. Civ. Engrs., Part 2, 55(1973)855-877.
2. Brown P. T. and Wiesner T. J.: "The Behaviour of Uniformly Loaded Piled Strip Footings". Soils and Foundations, Vol. 15, No. 4 (1975)13-21.

3. Poulos H. G. and Davis E. H.: "Pile foundation, analysis and design", John Willey and Sons, New York, 1980.
4. Clancy P. and Randolph M. F.: "An approximate analysis procedure for piled raft foundations". *Int. Journal NAM in Geomechanics*, Vol. 17, No. 12 (1993) 849-869.
5. Randolph M.F.: "Design methods for pile group and piled raft". *Proc. 12th Int. Conf. on Soil and Mechanics and Foundation Engineering*, New Delhi, Vol. 5, (1994) 61-82.
6. Poulos H. G.: "An Approximate Numerical Analysis of Pile Raft Interaction". *Int. Journal NAM in Geomechanics*, Vol. 18, No. 2(1994)73-92.
7. Ta L. D., and Small, J. C.: "An Approximation for Analysis of Raft and Pile Foundation". *Computers and Geotechnics*, Vol. 20, No. 2 (1997)105-123.
8. Katzenbach R., Arslan U., Moormann C. and Reul O.: "Piled Raft Foundation Interaction Between Piles and Raft". *Darmstadt Geotechnics*, Darmstadt Univ. of Technology, No. 4 (1998)279-296.
9. Small J. C. and Liu H. L. S.: "Time-settlement behaviour of piled raft foundations using infinite elements". *Computers and Geotechnics*, Vol. 35, No. 2 (2008)189-195.
10. Poulos H. G.: "Methods of analysis of piled raft foundations". A Report Prepared on Behalf of Technical Committee TC18 on Piled Foundations. ISSMGE, (2001) 46p.
11. Reul O.: "Numerical Study of the Bearing Behavior of Piled Raft". *International Journal of Geomechanics*, ASCE, Vol. 4, No. 2 (2004)59-68.
12. Reul O., Krajewski W. and Ripper P.: "Numerical Analysis of Foundations for High-Rise Buildings and Deep Excavations" FELSBAU, Vol. 24, No. 2 (2006)22-30.
13. Sales M., Small J. and Poulos H.: "Compensated piled rafts in clayey soils: behavior, measurements, and predictions". *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 47, (2010)327-345.
14. Mandolini A., Russo G. and Viggiani C.: "Pile foundations: experimental investigations, analysis and design". *Proceedings of the 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, (2005)177-213.

Recibido el 03 de Abril de 2013

En forma revisada el 21 de Abril de 2014