

Desempeño de cimientos superficiales aislados en suelos colapsables bajo la acción de cargas excéntricas

Pinzon-Atencio, Wenddy

Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Panamá
0009-0009-9857-6262

Vargas, Carlos

Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Panamá
carlos.vargas2@utp.ac.pa

Grajales-Saavedra, Francisco

Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Panamá
0000-0003-1705-864X

Abstract

This research is based on a real case of shallow foundation corresponding to a temporary structure that exerts eccentric vertical loads on the foundation. Located in an area with very heterogeneous soil, where the nearest borehole was 5 m away. The scope includes the modeling of the conditions presented in the field of the soil-structure system using finite element tools, with the aim of comparing the settlements observed in the field with those presented in the finite element models. In this way, it was possible to determine whether the soil properties assigned according to the nearest borehole did indeed produce the observed settlements. During the installation and operation of the temporary structure, the variations in elevation of the four corners of the concrete block were monitored. Subsequently, finite element modeling was performed using RocScience RS3 and Plaxis 3D software. The results obtained during modeling with the aforementioned tools show differential settlements between the corners of the foundation, but with values much lower than those measured in the field. The variation between these results suggests that, due to the heterogeneity of the site, the soil properties present in the foundation area do not correspond to those causing the differential settlements presented. Therefore, it is recommended that in soils with high variability, foundations be positioned in areas where there are boreholes at closer proximity.

Keywords: shallow foundation, differential settlement, heterogeneous soil, temporal foundation, finite elements.

Resumen

Esta investigación se fundamenta en un caso real de cimiento superficial correspondiente a una estructura temporal la cual ejerce cargas verticales excéntricas sobre el cimiento. Ubicada en un área correspondiente a un suelo muy heterogéneo, cuya perforación más cerca se encontraba a 5 m de distancia. El alcance incluye el modelado de las condiciones presentadas en campo del sistema suelo-estructura utilizando herramientas de elementos finitos, con el objetivo de comparar los asentamientos observados en campo con relación a los que se presentan en las modelaciones mediante elementos finitos. De tal forma, determinar si las propiedades del suelo asignadas, de acuerdo con la perforación más cercana, en efecto producían los asentamientos observados. Durante el proceso de instalación y operación de la obra temporal se llevó a cabo un monitoreo de las variaciones en elevación de las 4 esquinas del macizo de hormigón. Posteriormente, se realizaron modelaciones de elementos finitos en los softwares RocScience RS3 y Plaxis 3D. Los resultados obtenidos durante el modelado con las herramientas previamente mencionadas muestran los asentamientos diferenciales entre las esquinas de la base, pero con valores mucho menores a los medidos en campo. La variación entre estos resultados sugiere que, debido a la heterogeneidad del sitio, las propiedades del suelo presentes en el área de fundación no corresponden a las causantes de los asentamientos diferenciales presentados. Por lo que se recomienda que en suelos con mucha variabilidad fundaciones sean posicionadas en áreas en donde se tengan perforaciones a mayor cercanía.

Palabras claves: zapatas, asentamiento diferencial, suelo heterogéneo, fundación temporal, elementos finitos.

1. INTRODUCCIÓN

En la industria de la construcción, a nivel mundial, desde los años 50's se comenzaron a usar con mayor frecuencia grúas torres [1] como solución al poco espacio disponible para construir grandes edificaciones en las ciudades [2]. Estas son estructuras verticales fijas con capacidad de rotación en la parte superior en el que su montaje, operación y desmontaje representan gran peligrosidad [3]. Uno de los riesgos asociados es el volteo por falla geotécnica [4]. Generalmente las perforaciones existentes están principalmente en la huella del edificio y la ubicación de estas grúas a veces no cuentan con una lo suficientemente cerca [5]. Por lo que se debe determinar si la información existente es suficiente. En los casos donde el suelo es favorable, se usan fundaciones superficiales genéricas del fabricante [6].

Un caso por el que se pueden dar fallas geotécnicas es la presencia de suelos colapsables (predominantemente compuestos por arenas y/o limos suaves) no identificados [7]. Estos tienen la característica de que cuando se someten a cambios en contenido de humedad o cargas o ambas, presentan cambios de volumen repentinos [8]. El Reglamento Estructural de Panamá, especifica que para fundaciones superficiales, en suelos cohesivos, se admiten asentamientos verticales máximos de 50 mm y distorsiones angulares máximas de 1/500 [9]. No obstante, cuando la cimentación es para una grúa torre el fabricante, en este caso de estudio, exige que los asentamientos diferenciales no deben pasar los 5 mm. Estos asentamientos deben ser sumamente controlados debido a que si se exceden representan peligro, atraso y pérdidas para el proyecto porque no se puede continuar con la obra hasta solucionarlo.

El objetivo de esta investigación consiste en comparar asentamientos observados con modelaciones mediante elementos finitos para determinar si las propiedades del suelo asignadas, de acuerdo con la perforación más cercana, en efecto producían los asentamientos observados.

2. MÉTODO

La investigación consistió en realizar: (1) el estudio geotécnico, (2) la construcción de la fundación temporal, (3) la instalación de la grúa torre, (4) el monitoreo de asentamientos e identificación de cargas asociadas, (5) la determinación de las cargas aplicadas, (6) la modelación del cimiento y (7) la comparación de resultados entre los valores de campo con los modelados por elementos finitos.

La figura 1, muestra la ubicación de 7 sondeos realizados y la ubicación del cimiento temporal, donde la perforación más cercana corresponde a H-9 (aprox. 5 m de cercanía). En la figura 2, se observa que el suelo es altamente variable con existencia de limos y arena a diferentes profundidades. A partir de la información geotécnica se determinan las propiedades del suelo de los estratos encontrados en la perforación H-9, tabla 1.

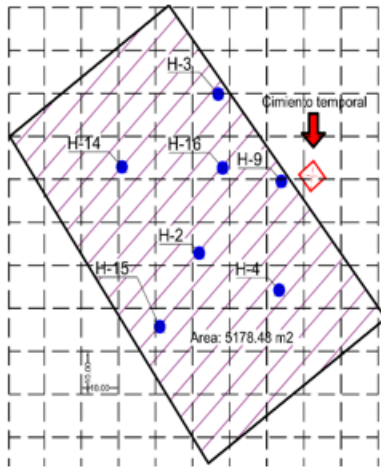


Fig 1. Ubicación de sondeos

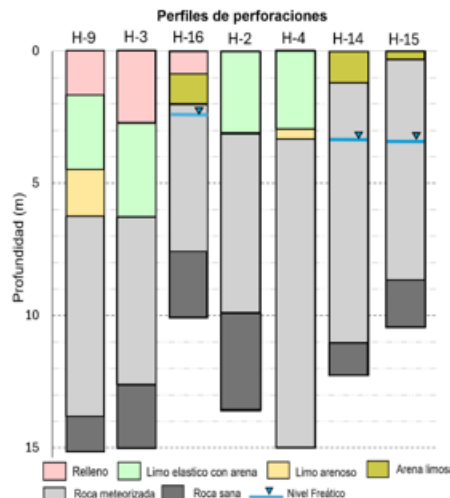


Fig 2. Perfiles de sondeos

Tabla 1. Propiedades del suelo

Parámetro	Limo elástico firme	Limo arenoso firme	Roca Meteorizada
Peso específico saturado [kN/m ³]	18,0	18,0	20,0
Peso específico no saturado [kN/m ³]	18,0	18,0	20,0
Módulo de Young [kN/m ²]	60000,0	85901,0	3076937,0
Poisson (v)	0,2	0,2	0,2
Cohesión efectiva [kN/m ²]	20,0	40,0	
Ángulo de fricción [°]	30,0	35,0	
Compresión Axial [kN/m ²]			8900,00
RQD [%]			53

La fundación temporal por su parte se desplanta a 1,93 m de profundidad. Con dimensiones de 5 x 5 x 1,35 m, con concreto reforzado ($f'c = 24,5$ MPa), en contacto directo con el suelo. Luego, la grúa torre se instaló por etapas y se monitoreó el asentamiento de la fundación en sus esquinas con el nivel de los puntos rojos observados en la figura 3 y representados en la figura 4. Posteriormente se procedió a calcular, de forma simplificada, las cargas asociadas que recibe la fundación en el centro. La tabla 2, muestra la carga puntual (Q) y el momento (M). Cabe destacar, estas cargas son considerando el peso propio de cada elemento de la grúa conforme lo indica la ficha técnica del fabricante.



Fig 3. Fundación en campo

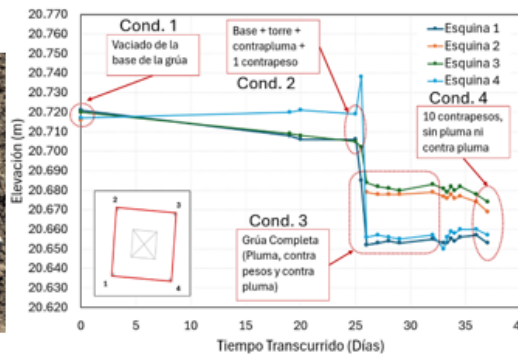


Fig 4. Gráfico de asentamientos observados

Tabla 2. Cargas por condición

	Q (kN)	M (kN-m)
Cond. 1		
Cond. 2	-387,6	-1976,31
Cond. 3	-596,2	548,57
Cond. 4	-785,4	1059,6

*No incluye peso propio del cimiento

Para la modelación se utiliza RS3 y Plaxis 3D, ambos softwares de elementos finitos. RS3. Para definir la geometría del modelo se genera un espacio de 3 veces la base del elemento de hormigón (35 m x 35 m). Se definen las propiedades del suelo con el modelo de Mohr-Coulomb y de la roca como Hoek-Brown. Dado que el software no permite aplicar directamente momentos concentrados, se opta utilizar un sistema de par de fuerzas para

inducir las cargas excéntricas. Posteriormente se restringen de movimiento las superficies laterales del modelo a excepción de las caras superiores para evitar que el mismo colapse. Por último, se configuran las propiedades de la malla como tetraedros de 4 nodos graduados y se computan las fases conforme las condiciones identificadas.

Plaxis 3D. La geometría del suelo se modeló con dimensiones de 50 x 50 m para evitar que los bordes interfirieran con la modelación de la zapata, la cual fue modelada como volumen con sus respectivas propiedades. Por otra parte, el suelo se definió bajo el modelo de Mohr-Coulomb y la roca con el modelo lineal elástico, ambos en condiciones drenadas. Posteriormente se realizó el refinamiento de la malla en término medio con 10458 elementos y 16858 nodos. Por último, se definieron las etapas de construcción de acuerdo con las condiciones identificadas, procurando conservar los desplazamientos asociados a cada una.

3. RESULTADOS

El monitoreo de asentamientos verticales de la fundación temporal en campo demostró asentamientos diferenciales que incrementaban a medida que pasa el tiempo en el montaje de la grúa torre. Se observó que los asentamientos incrementaron hasta 15 mm al agregar la torre, la contrapluma y los contrapesos necesarios, y que se acrecentaron hasta 69 mm con la colocación de la pluma. Por lo cual, se desmonta parte de la grúa y al agregar contrapesos a la zapata, los asentamientos continúan incrementando. La modelación en software, tanto en RS3 como en Plaxis 3D muestran una distribución no uniforme de esfuerzos sobre el suelo, lo que a su vez se refleja en asentamientos diferenciales en los extremos del elemento producidos en cada una de las etapas debido al momento ejercido por el peso propio de la grúa. En las figuras 5 y 6 se observan los asentamientos verticales para cada condición en RS3 y Plaxis 3D respectivamente.

En la tabla 3, se observa la comparación de asentamientos medidos y obtenidos en las modelaciones. Se aprecia que los asentamientos en cada esquina observados en campo no son congruentes con aquellos obtenidos en las modelaciones tanto en RS3 como en Plaxis 3D, los cuales no presentan asentamientos diferenciales mayores a 5 mm en ninguna de sus condiciones.

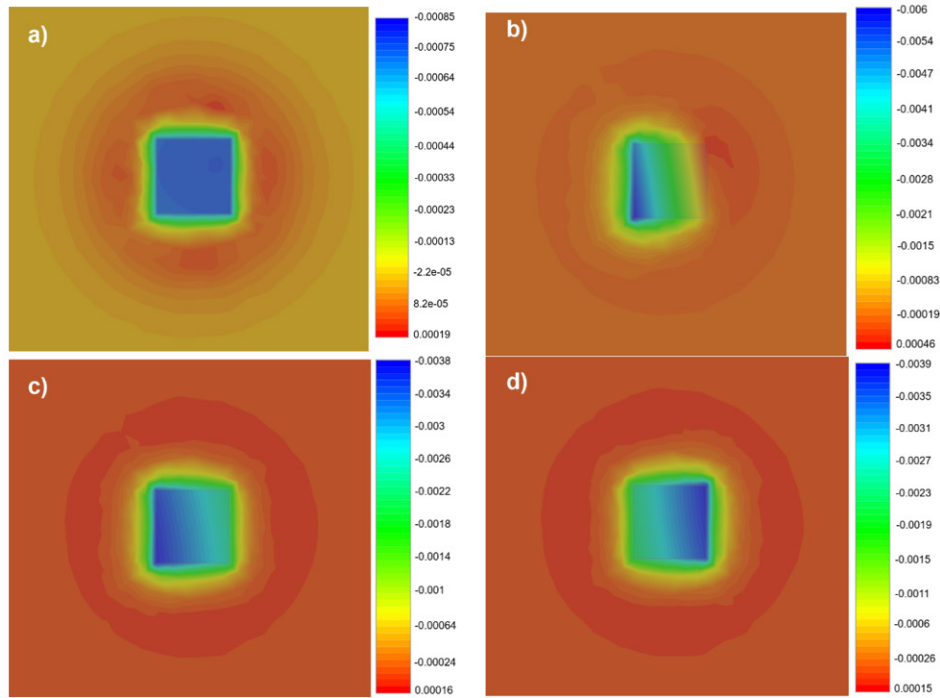


Fig 5. Asentamientos verticales (m) - RS3: a) condición 1, b) condición 2, c) condición 3 y d) condición 4

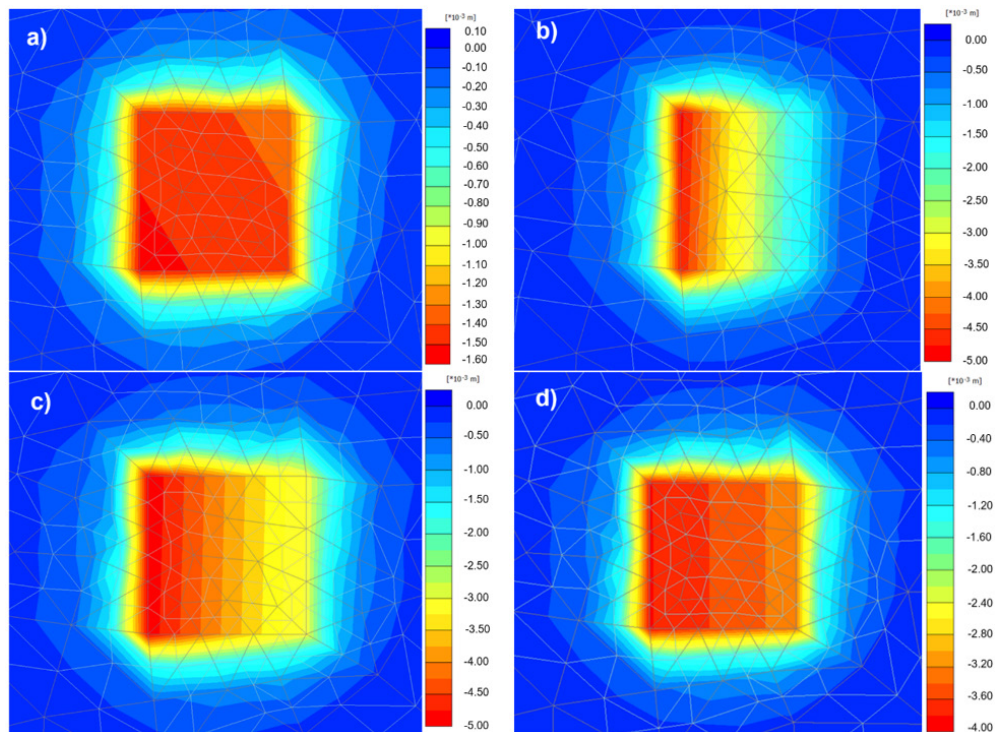


Fig 6. Asentamientos verticales - Plaxis 3D: a) condición 1, b) condición 2, c) condición 3 y d) condición 4

Tabla 3. Asentamientos totales (m)

Esquina	Condición 1			Condición 2			Condición 3			Condición 4		
	Medido	Plaxis 3D	RS3	Medido	Plaxis 3D	RS3	Medido	Plaxis 3D	RS3	Medido	Plaxis 3D	RS3
1	0	-0.002	-0.001	-0.015	-0.005	-0.001	-0.069	-0.004	-0.004	-0.068	-0.004	-0.008
2	0	-0.001	-0.001	No se midió	-0.005	-0.001	-0.037	-0.004	-0.004	-0.047	-0.004	-0.008
3	0	0.000	-0.001	-0.015	-0.001	-0.001	-0.036	-0.002	-0.009	-0.046	-0.003	-0.011
4	0	0.000	-0.001	0.002	0.000	-0.001	-0.061	-0.001	-0.009	-0.060	-0.003	-0.011

4. CONCLUSIONES

Los asentamientos medidos superan el máximo permitido por el Reglamento Estructural de Panamá (50 mm verticales) y por el fabricante (5 mm diferenciales), en condiciones de instalación de grúa.

Los modelos en software no indican asentamientos significativos en las etapas analizadas. Los resultados obtenidos durante el modelado muestran los asentamientos diferenciales entre las esquinas de la base, pero con valores mucho menores a los medidos en campo. La variación entre estos resultados sugiere que, debido a la heterogeneidad del sitio, las propiedades del suelo consideradas de acuerdo con la perforación 9 (la más cercana) no corresponden a las causantes de los asentamientos diferenciales observados.

Se recomienda que en suelos con mucha variabilidad, las fundaciones sean posicionadas en áreas en donde se tengan perforaciones a mayor cercanía. De tal forma, se puede detectar si existe la presencia de un estrato intermedio más débil. De forma específica, se recomienda que para la instalación de obras temporales, se realice al menos una perforación mecánico rotativa en el lugar de emplazamiento de la estructura.

Referencias

- [1] L. K. Shapiro y H. I. Shapiro, «Construction Cranes», *Scientific American*, vol. 258, pp. 72-79, 1 de marzo de 1988. doi: 10.1038/scientificamerican0388-72.
- [2] R. T. Ratay, «Temporary Structures in Construction - USA Practices», doi: doi.org/10.2749/101686604777963649.
- [3] Y. Zhang y K. Chen, «DIGITAL TECHNOLOGIES FOR ENHANCING CRANE SAFETY IN CONSTRUCTION: A COMBINED QUANTITATIVE AND QUALITATIVE ANALYSIS», *Journal of Civil Engineering and Management*, vol. 29, n.o 7, pp. 604-620, sep. 2023, doi: 10.3846/jcem.2023.19574.
- [4] J. Ma, T. Del Pino, J. Manuel, y M. Melero, «Nota técnica de prevención - NTP 782». Accedido: 9 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.insst.es/documentacion/coleccionestecnicas/ntp-notas-tecnicas-de-prevencion/22-serie-ntp-numeros-751-a-785-ano-2007/nota-tecnica-de-prevencion-ntp-782>
- [5] «Crane mats: support systems».
- [6] T. Kodikara, T. L. Kodikara, y G. A. S. C. Samararatne, «Innovative Tower Crane Foundation Designs», en *Annual Sessions 2013 - Society of Structural Engineers Sri Lanka (SSESL)*, jun. 2013. [En línea].

Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/307562928>

- [7] D. P. . Coduto, W. A. . Kitch, y M. Ronald. Yeung, Foundation design : principles and practices, 3.a ed. Pearson, 2016.
- [8] P. C. Knodel, «R-92902: Characteristics and Problems of Collapsible Soils», feb. 1992.
- [9] «Reglamento Estructural de Panamá 2021», 2023.

Autorización y Licencia CC

Los autores autorizan a APANAC XX a publicar el artículo en las actas de la conferencia en Acceso Abierto (Open Access) en diversos formatos digitales (PDF, HTML, EPUB) e integrarlos en diversas plataformas online como repositorios y bases de datos bajo la licencia CC:

Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0) <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>.

Ni APANAC XX ni los editores son responsables ni del contenido ni de las implicaciones de lo expresado en el artículo.