

ESTUDIO DE LA INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA DE UNA CIMENTACIÓN AISLADA MEDIANTE SIMULACIÓN NUMÉRICA

STUDY OF THE INTERACTION SOIL-STRUCTURE OF AN INSULATED FOUNDATION BY NUMERICAL SIMULATION

Autores: Beatriz Clero Jiménez¹

Darisley López Martín²

Gilberto Rodríguez Plasencia¹

Institución: ¹Universidad de Ciego de Ávila, Cuba.

²Empresa constructora Militar UCM, Cuba

Correo electrónico: gilbertor@unica.cu

RESUMEN

En este trabajo se realiza un estudio de la Interacción Suelo-Estructura (ISE) de una cimentación aislada sometida a carga estática y con predominio de esfuerzos normales, mediante simulación numérica. Para la modelación numérica de esta estructura se utiliza el software ABAQUS, donde se evalúa el comportamiento tenso-deformacional para diferentes solicitaciones de cargas y diferentes materiales de la base de cimentación. Se toma como patrón de la calibración el diseño geotécnico de una cimentación aislada diseñada por el 1^{er} y 2^{do} Estado Límite propuestos en la Norma Cubana (NC). La modelación de los materiales se considera en régimen no lineal, para el cimiento de hormigón armado se utiliza el Modelo de Daño Plástico, donde en el refuerzo se considera un modelo bilineal con criterio de rotura de Von Mises y la base de cimentación es modelada con un modelo de Mohr Coulomb. A partir de la adecuada calibración y validación de las consideraciones del modelo inicial, se procede al estudio de la influencia de factores físico-mecánicos que posibilitan una mejor comprensión del comportamiento de la cimentación.

Palabras clave: cimentación aislada, modelación numérica, asentamientos lineales, Interacción Suelo-Estructura.

SUMMARY

This paper presents a study of the Soil-Structure Interaction (ISE) of an isolated foundation under static load and prevalence of normal stress through numerical simulation is performed. For numerical modeling of this structure it is used the

software (ABAQUS, 2014), where the tenso-deformational behaviour for different loads and different materials of the foundation base is evaluated. It is taken as calibration pattern the geotechnical design of an isolated foundation by the 1st and 2nd limit state proposed in the National Standard (NC). The modeling of materials is considered in nonlinear regimen, for the reinforced concrete foundation are utilized the Concrete Damaged Plasticity model, where are considered a bilinear model with Von Mises failure criteria for reinforcement and in the foundation base is used a Mohr Coulomb model. Beginning with calibration and validation adecuated of the considerations of the initial model, we proceed to the study of the influence of physical-mechanical factors that enable a better understanding of the behavior of the foundation.

Keywords: isolated foundation, numerical modeling, linear settlements, Interaction Soil-Structure.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad existen varias tendencias sobre los métodos más adecuados para el cálculo de los asentamientos en las cimentaciones. Unos toman como bases los resultados que se obtienen directamente de los ensayos realizados en el suelo y aplican correlaciones a estos parámetros, otros parten de expresiones totalmente empíricas, pero en ambos casos garantizan la linealidad del suelo. Además, existe una tercera tendencia al cálculo de asentamientos por métodos no lineales.

Los métodos más utilizados para el cálculo de los asentamientos han sido los basados en modelos lineales. En éstos se analiza el comportamiento lineal del suelo garantizando que la tensión actuante sea menor que la tensión límite de linealidad para las cargas de servicio, como lo hace la escuela rusa (Malishev y Nikitina, 1982) (Quevedo, 1989).

El cálculo de las deformaciones o desplazamientos de las bases de los cimientos va a depender de:

- Comportamiento tenso-deformacional del medio sobre la cual se apoyan los cimientos, pudiendo estos tener un comportamiento tenso-deformacional lineal o no lineal.

- Incremento de las tensiones verticales que se pueden desarrollar en la masa de suelo debido a la acción de las presiones netas actuantes que ejercen las bases de las cimentaciones.
- Espesor del medio compresible sobre el que se apoyan los cimientos, el cual al ser comprimido genera las deformaciones o desplazamientos de la base de las cimentaciones, que se define como Potencia Activa.

En el cálculo de las deformaciones o desplazamientos de las bases de los cimientos se utilizarán los valores promedio de parámetros que definen la compresibilidad de los suelos y las cargas serán las características, con las combinaciones de cargas correspondientes a este Estado Límite.

En la propuesta de Norma Cubana de diseño geotécnico de cimentaciones superficiales se propone la utilización de métodos no lineales en el cálculo de asentamientos para los siguientes casos.

- Bases constituidas por suelos friccionales, cuando en la combinación de carga para el diseño por el 1er Estado Límite existan valores de excentricidad no considerables.
- Cuando el estado tensional actuante en el 2do Estado Límite sobrepase la Tensión Límite de Linealidad del Suelo.

Recomendación dada debido a que se ha demostrado que bajo estas condiciones la base presenta una capacidad de carga relativamente alta, respecto a los valores de tensión límite de linealidad, posibilitando el aprovechamiento de la capacidad portante del suelo de forma más real y de esta forma el área de la base no se encontrará limitada a garantizar un comportamiento lineal del suelo, sino que puede contar con dimensiones menores cuando cumpla con las deformaciones límites permisibles. La ausencia de constatación de resultados experimentales del estudio de la Interacción Suelo-Estructura (ISE) es bastante reducida y a su vez existen limitaciones en la comprensión del comportamiento tenso-deformacional que el suelo manifiesta en su interacción inevitable con el cimiento.

Con los recursos de cálculo disponibles hoy día, el diseño geotécnico y estructural de cimentaciones se puede facilitar a través de la utilización de hojas de cálculo y otros softwares implementados que garantizan su rápida ejecución, sin embargo,

estas herramientas están limitadas por la implementación en su mayoría de métodos lineales para el cálculo de los asentamientos en el suelo. Por tal motivo se hace necesaria la utilización de otras herramientas que permitan una mejor comprensión del comportamiento tenso-deformacional que garantice un uso más racional y eficiente de los recursos.

La modelación numérica es una poderosa herramienta que presenta reconocidas ventajas, porque permite la evaluación de la influencia de numerosos y diferentes factores, siendo así una alternativa muy económica para describir el comportamiento de las estructuras a un costo mínimo de recursos. Entre las bondades que brinda la simulación numérica se puede ejemplificar, la posibilidad de apreciar de forma visual a través de los tonos policromáticos la propagación de los estados tensionales que tienen lugar en el interior de las estructuras, así como la evolución que experimenta el daño físico-mecánico bajo la acción de las cargas, durante todo el proceso hasta llegar a la falla.

MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Modelación de una cimentación aislada sometida a cargas axiales

Con el objetivo de validar la utilización del Método de los Elementos Finitos (MEF) implementado en el software ABAQUS para la modelación numérica de una cimentación aislada sometida a cargas estáticas y con predominio de esfuerzos normales, se simulan las partes siendo consecuente con la geometría del cimiento diseñado, la forma de aplicación de la carga y las condiciones de apoyo e interface entre los cuerpos del modelo, establecidas en el software de aplicación práctica para el diseño geotécnico de cimentaciones superficiales (Norma Cubana 1: 2007).

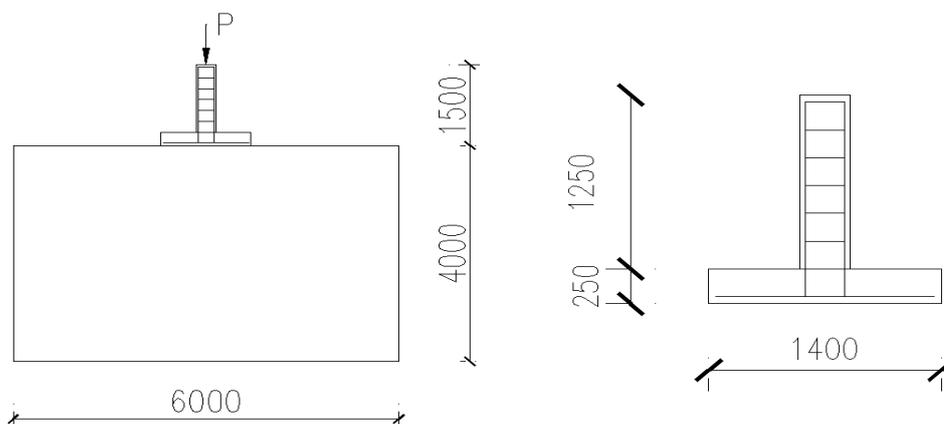


Figura 1. Esquema geométrico de la cimentación aislada.

En la figura 1, se puede observar la geometría de la cimentación tomada como patrón para la modelación numérica, estas dimensiones son obtenidas del diseño geotécnico (Norma Cubana 1: 2007) para una carga de 600 kN, valor de carga similar a las sollicitaciones obtenidas en edificaciones.

Las partes que componen el modelo son: cemento, armadura de refuerzo y suelo (véase Figura 2). Cada uno de estos cuerpos o partes que componen la probeta a simular han sido construidos individualmente en el módulo partes y posteriormente ensamblados en el módulo de ensamblaje del ABAQUS/CAE.

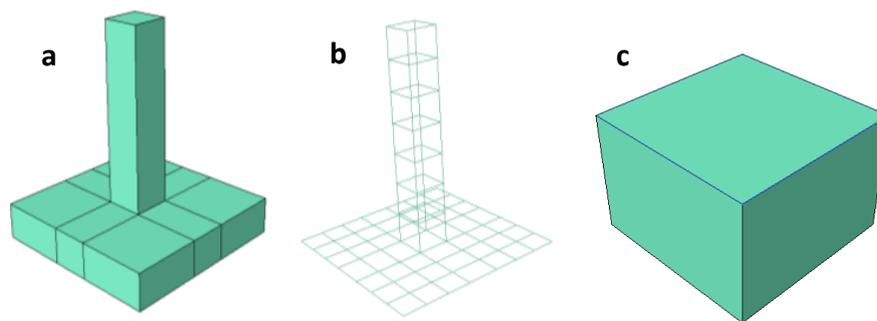


Figura 2. Partes geométricas del modelo: a) Cimiento, b) Malla de refuerzo, c) Suelo.

La resistencia a compresión del hormigón es de 25 MPa y el acero del refuerzo presenta una tensión de fluencia de 300 MPa. Se ha considerado la no linealidad de los materiales, donde se toman consideraciones de modelación en correspondencia con investigaciones precedentes (Hernández, Bonilla y Rodríguez, 2014), (Bonilla, et al., 2015), (Rodríguez, Bonilla y Hernández, 2016), adoptando para el caso del refuerzo un modelo bilineal con criterio de rotura de Von Mises, para el hormigón un modelo de daño plástico (Concrete Damaged Plasticity) y para el suelo el modelo de Mohr-Coulomb utilizado por (Broche, 2005).

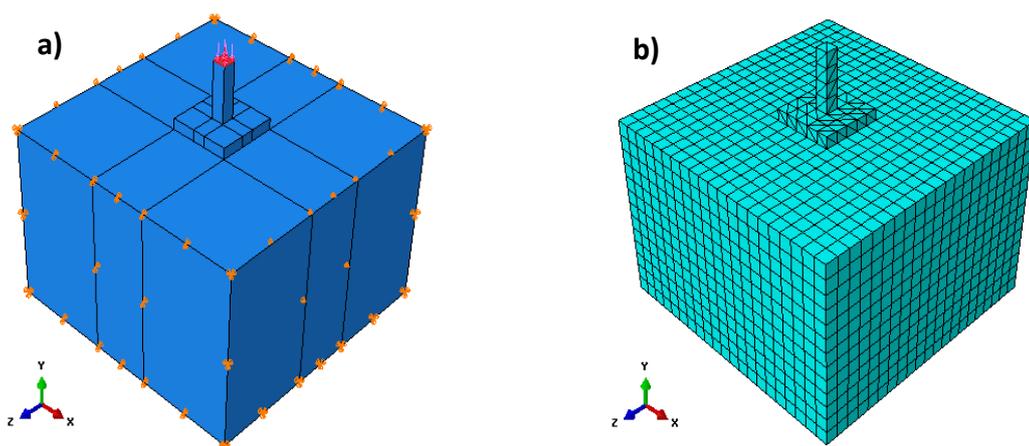


Figura 3. Esquema de la cimentación: a) Condiciones de contorno, b) Modelo discreto.

En la figura 3a, se puede observar el esquema geométrico del modelo donde se tiene en cuenta las condiciones de contorno y aplicación de la carga, donde al volumen de suelo se le restringe el desplazamiento en los ejes X y Z en las caras laterales y se restringe además el desplazamiento en el eje Y en el fondo, garantizando así el equilibrio estático inicial. Cada elemento se particiona con el objetivo de obtener un mallado uniforme adecuado para que esta discretización garantice una mejor convergencia numérica del modelo analizado (véase figura 3b), es necesario comentar que la armadura del refuerzo es embebida en el volumen de hormigón creando una interface mediante el comando “embebed region” que modela adecuadamente la interface malla de refuerzo con el plato y pedestal, la interface cimiento-suelo se simula a través de un contacto normal-tangencial que se corresponde con el comportamiento físico real de esa ISE. El refuerzo de acero se discretiza con elementos T3D2 y para el cimiento de hormigón se utiliza los elementos finitos C3D4 y para la base de cimentación el C3D8R, ya que estos elementos tienen una geometría que se adapta muy bien a los volúmenes modelados (Rodríguez, Bonilla y Hernández, 2017).

ABAQUS cuenta en su biblioteca de elementos sólidos (3D) con tres tipologías diferentes: los prismáticos de seis caras, prismáticos de cinco caras (cuñas) y tetraedros (pirámide de base triangular). Se ha hecho un estudio para la selección del tipo de elemento óptimo, el cual sea capaz de representar con la mayor aproximación posible el verdadero comportamiento físico de la cimentación que se analiza. Para tal propósito se discretiza la geometría volumétrica de cada uno de los cuerpos que intervienen en el modelo con elementos del tipo: C3D4, C3D6, C3D8 y C3D8R. El modelo virtual, frente a uno y otro formato de malla, han sido sujeto a las mismas condiciones de borde, magnitud de la carga, así como propiedades físico-mecánicas de los materiales.

Del análisis de los resultados obtenidos (ver Figura 4a) se observa que el mejor comportamiento de los asentamientos se obtiene para el discretizado con elemento finito C3D8R, ya que se aproxima en mayor medida al asentamiento obtenido en el diseño por el 2do Estado Límite.

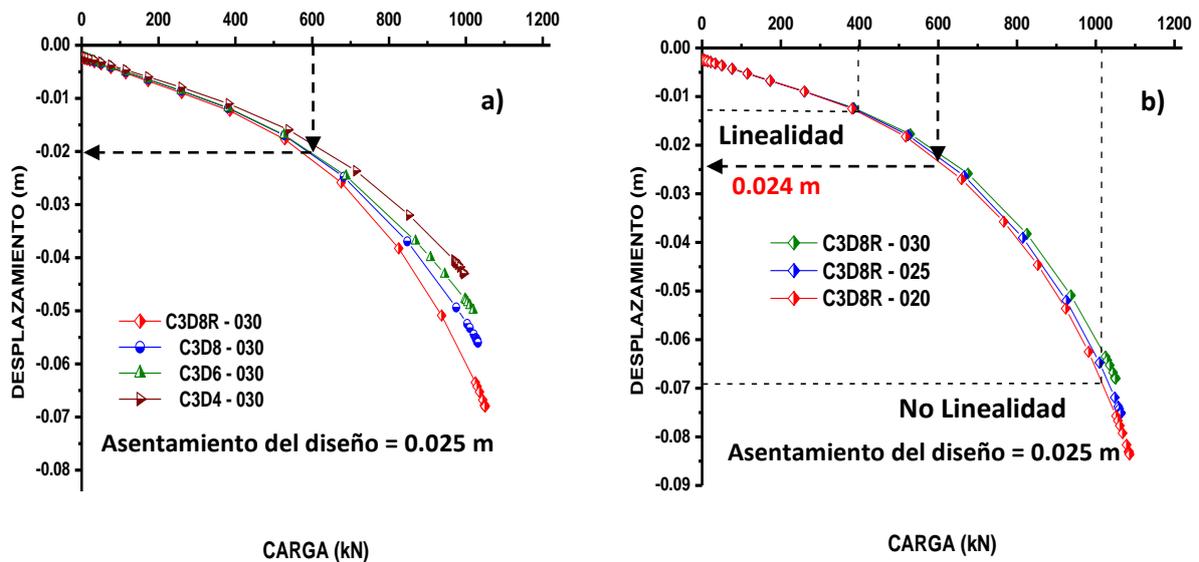


Figura 4. Curvas de carga vs desplazamientos del proceso de calibración: a) Selección del elemento finito adecuado, b) Densidad de malla óptima.

No es suficiente conocer el tipo de elemento finito a utilizar, también es necesario determinar el tamaño adecuado para estos, acorde con el costo computacional, aspecto que es además muy relativo, pues depende de la tecnología con que se cuente en materia de hardware. Por tanto, es preciso determinar la cantidad de nodos en la malla sin incrementar el error en valores considerables, aquí radica la importancia del proceso para la selección de una densidad de malla adecuada con el costo computacional y la precisión. En la Figura 4b se puede observar que la malla con elementos de 20 cm de tamaño se logra la mejor aproximación en cuanto al asentamiento de la estructura, ya que se obtiene numéricamente un asentamiento de 0.024 m que en relación con el asentamiento del diseño (0.025 m) es un valor considerablemente cercano en la aproximación.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Lograda la adecuada calibración del modelo con respecto a esquema físico real de la estructura diseñada, se realiza un estudio paramétrico para evaluar la ISE ante

diferentes condiciones de carga y para diferentes propiedades del suelo según se muestra en la Tabla 1, en correspondencia con características de suelos usados para cimentaciones. Con el objetivo de evaluar el comportamiento se definen suelos con características diferentes, que atendiendo a sus propiedades físico-mecánicas pueden clasificarse como arcillas, arenas o combinaciones de ambos.

Tabla 1. Propiedades de los suelos analizados en el estudio paramétrico.

SUELO	E (kPa)	Coefficiente de Poisson (adm)	Cohesión (kPa)	Ángulo de Fricción interna (°)	Ángulo dilatación (°)
1	15000	0.35	30	15	7.5
2	18000	0.32	40	15	7.5
3	20000	0.31	60	20	10
4	25000	0.28	10	25	12.5
5	25000	0.26	5	30	15

3.1 Análisis de los asentamientos en la base de cimentación

Se realiza un estudio del comportamiento de los distintos tipos de suelos, partiendo de los resultados obtenidos aplicando la propuesta de norma de diseño de cimentaciones superficiales (ver Tabla 2), resultados numéricos que nos permiten comprender mejor la evolución del estado tenso-deformacional de la base de cimentación en el instante que es sometida a las cargas estáticas.

Tabla 2. Resultados obtenidos mediante la simulación numérica, diseño por el 1er y 2do Estado Límite para una carga de 400 kN y 600 kN.

Suelos	Norma para el Diseño Geotécnico de Cimentaciones					MEF Δ total (cm)
	1er Estado Límite	2do Estado Límite				
	Capacidad de carga (kN)	Dimensión del plato Δ lineal (m)	Δ lineal (cm)	Δ no lineal (cm)	Δ total (cm)	

PARA CARGA DE 400 kN

Suelo 1	588.41	1.65	0.933	1.244	2.177	1.183
Suelo 2	727.35	1.50	0.968	0.943	1.911	0.989
Suelo 3	1368.93	1.15	0.892	-	0.892	0.889
Suelo 4	692.11	1.70	0.668	0.698	1.366	1.112

Suelo 5	925.03	1.60	0.714	0.682	1.396	1.283
----------------	--------	------	-------	-------	-------	-------

PARA CARGA DE 600 kN

Suelo 1	588.41	2.20	0.982	2.737	3.719	2.490
Suelo 2	727.35	1.95	1.019	1.875	2.894	1.739
Suelo 3	1368.93	1.40	1.401	-	1.401	1.402
Suelo 4	692.11	2.70	0.704	1.274	1.978	2.584
Suelo 5	925.03	2.80	1.121	2.433	3.554	4.147

En este estudio se mantuvo una dimensión del plato constante de 1.40 m y se obtuvo que la mayoría de los desplazamientos se encuentra en la rama plástica de la curva, por lo que se calcula además la dimensión necesaria del plato para que adquiriese un asentamiento lineal. La curva de los asentamientos puede considerarse construida por dos componentes: un asentamiento inicial de la cimentación en régimen lineal que describe el comportamiento elástico del material de la base de cimentación y en un segundo instante con comportamiento en régimen no lineal que describe las propiedades plásticas.

En los resultados obtenidos se aprecia como varía el asentamiento y la máxima capacidad de carga según las propiedades de los suelos. Se logró una mejor aproximación en cuanto a desplazamientos para los suelos que presentan asentamiento en régimen lineal; para el caso de los no lineales el proceso de calibración resulta un poco más complejo, y a pesar de que se obtuvieron valores cercanos a los obtenidos según la propuesta de norma para el diseño geotécnico de cimentaciones, son mejorables realizando un estudio con una densidad de malla mejor, solo posible mediante condiciones de computo superiores.

Se puede observar en la Tabla 2 que los suelos tipo 1, 2 y 5 son los que más se deforman para una carga de 600 kN, a pesar que estos tienen características muy diferentes. Además, se evidencia que el suelo 5 (suelo arenoso) soporta mayor capacidad de carga y sin embargo, es de los que mayor asentamiento experimenta, atendiendo a un comportamiento marcadamente más plástico (asentamientos no lineales) propio de este material. También se puede observar que el suelo 3 (suelo arcillo-arenoso) es el más resistente en cuanto a capacidad de carga y es el menos deformable, dado por sus excelentes propiedades para cimentaciones, donde para esta carga no se ha superado el límite de linealidad.

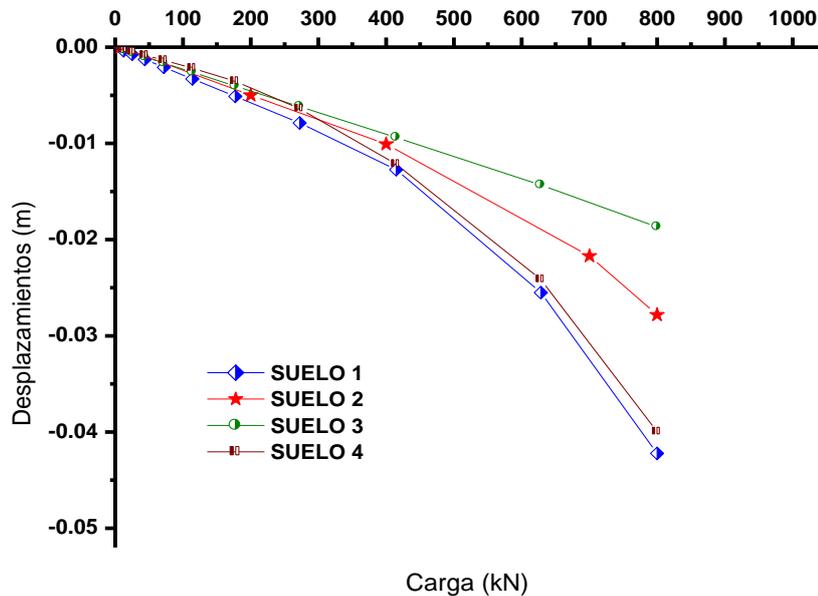


Figura 5. Curvas de asentamiento para diferentes tipos de suelo para una carga de 800 kN.

En el gráfico de la Figura 5, se presentan los asentamientos en los suelos 1, 2, 3 y 4 para una carga de 800 kN, donde en el inicio de las curvas para carga menor que 400 kN estos asentamientos tienen un comportamiento elástico lineal y ya en una segunda parte se comporta plásticamente. En el caso del suelo 3 (arcilla arenosa) para una carga de 800 kN presenta un comportamiento prácticamente lineal. Se observa además que entre el suelo 1 (arcilla) y suelo 4 (arena) en cuanto a los asentamientos se comportan de forma similar, aunque sus capacidades de carga tienden a ser diferentes para las dimensiones analizadas.

3.2 Análisis tenso-deformacional del suelo

En la comparación entre el modelo teórico de la distribución de esfuerzos en el suelo y el modelo obtenido mediante la simulación numérica (ver Figura 6), se evidencia una adecuada correspondencia en cuanto a la aplicación de la carga y la eficiencia del análisis.

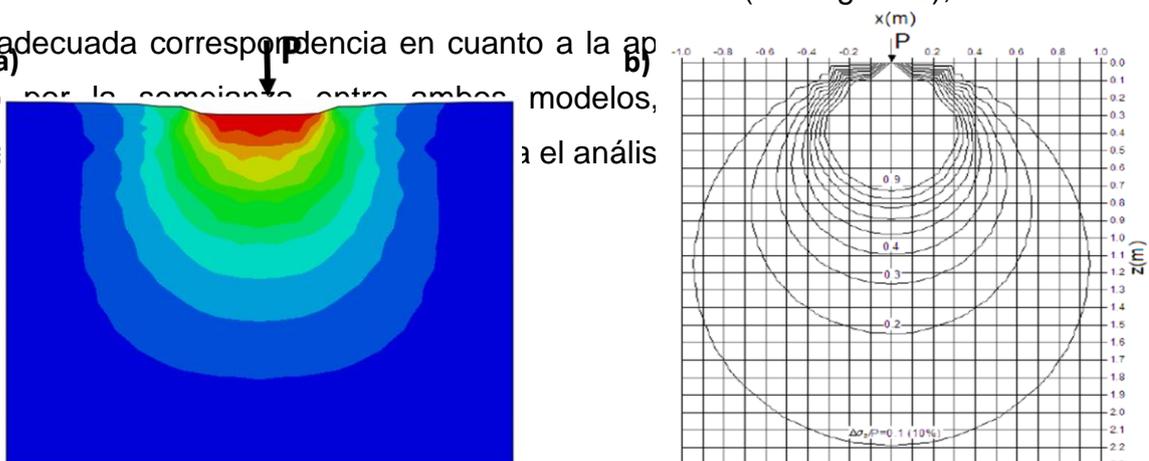


Figura 6. Comportamiento deformacional: a) Modelo numérico, b) Modelo teórico.

La distribución de presiones que hay en la superficie de contacto entre la cimentación y el suelo se da de forma muy variada y es sensible a las rigideces relativas del suelo, así como de la cimentación y a las características propias del suelo. Aspectos observados en los trabajos de (Freire, 2001).

En la Figura 7a, se observa una alta concentración de presiones ubicadas en los extremos del plato y más intensas hacia el centro se ven disminuidas en sus extremos debido al comportamiento no lineal del suelo y porque el terreno cercano al borde es ligeramente desplazado hacia fuera. A medida que aumente la carga sobre el cimiento, la zona de plastificación del suelo se propaga de los extremos hacia el centro, produciendo así presiones cada vez más uniformes lo que es característico de una cimentación rígida que está sobre un suelo cohesivo del tipo arcilloso.

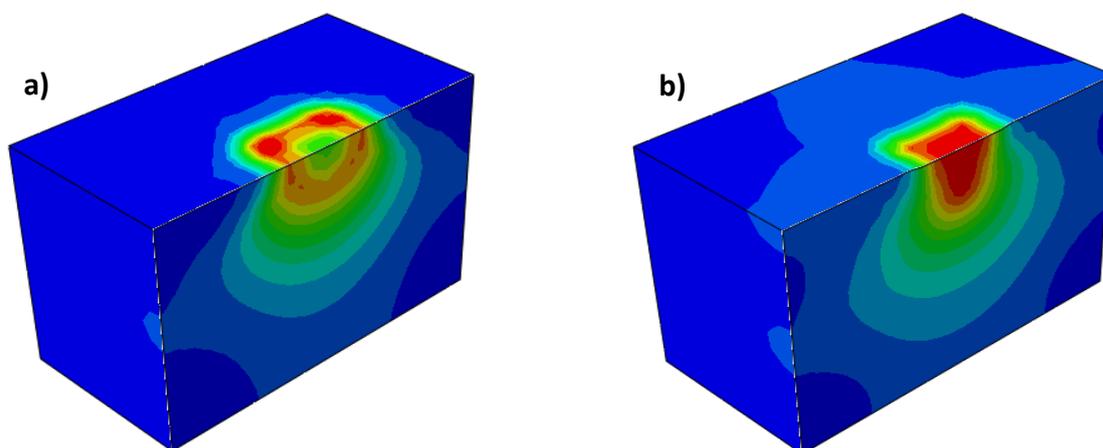


Figura 7. Comportamiento de las tensiones: a) Suelo 3 (arcillo-arenoso), b) Suelo 4 (arena).

En el suelo granular (ver figura 7.b), las distorsiones que se presentan son diferentes ya que la rigidez aumenta con el confinamiento al que están sometidas las partículas del suelo, y por esto, la rigidez es prácticamente nula en los extremos de la cimentación donde ocurren desplazamientos del suelo hacia afuera y las presiones se reducen. Por el contrario, las presiones serán máximas en el centro, puesto que

en este punto el confinamiento de las partículas es máximo. Si se presentan altos niveles de presiones ocurrirá una plastificación en las zonas sometidas a los mayores esfuerzos (centro de la cimentación) y las presiones tienden a uniformarse.

CONCLUSIONES

En el marco de este trabajo se ha el comportamiento de cimentaciones superficiales que nos ha permitido arribar a las siguientes conclusiones:

Se demuestra la fiabilidad de la modelación numérica (Método de los Elementos Finitos) para el estudio de este tipo de estructuras, aun costo mínimo de recursos. El elemento finito más adecuado para el discretizado del dominio de suelo es el C3D8R, porque permite una mejor aproximación del campo de los desplazamientos de la estructura analizada.

Se obtuvo un mejor resultado en cuanto a la aproximación de los asentamientos entre modelo numérico y el diseño por el 2do Estado Límite en condiciones de carga donde los suelos presentan comportamiento en régimen lineal. Los valores de los asentamientos obtenidos según la propuesta de norma para el diseño geotécnico de cimentaciones son más difíciles de estimar numéricamente en el régimen no lineal del material.

La distribución de tensiones en la superficie de contacto entre la cimentación y el suelo es de magnitud muy variable, y está relacionada con las propiedades de la base de cimentación, el valor de la carga aplicada y la rigidez del cimientto.

Existe correspondencia entre el modelo teórico del comportamiento de las tensiones y el obtenido mediante la simulación numérica, observándose en ambos modelos que a medida que aumenta la profundidad la magnitud de las tensiones disminuye, y a su vez se ven afectadas en menor medida las zonas que están cada vez más alejadas del punto de aplicación de la carga. Los esfuerzos que se generan en el suelo debido a las presiones del cimientto, producen asentamientos que dependen de las propiedades del suelo, así como de la aplicación de la carga y permanencia de ésta.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAQUS. (2014). User's Manual, Version 6.14-5, Hibbitt, Karlson and Sorensen, Inc.

- BONILLA, J. D. ... [et al.] (2015.). Numerical modeling with experimental validation applied to the study of stud connectors behavior in concrete and steel composite structures. *Revista Ingeniería de Construcción*, Vol. 30, No. 1, pp. 53–68,
- BROCHE, J. (2005). Conceptualización del comportamiento estructural de las cimentaciones superficiales aisladas desde una óptica integral, aplicando técnicas de modelación numérica. 141 p. Tesis de Doctorado, UCLV, Sta Clara, Cuba.
- FREIRE, M.J. (2001). Interacción del suelo, cimiento y estructura: El caso de las zapatas. *Revista Informes de la Construcción*. Vol. 52, No 472, p. 45-58.
- HERNÁNDEZ, H., BONILLA, J. D., y RODRÍGUEZ, G. (2014.). Study of the behavior of composite beams made of concrete and steel by using numerical simulation. *Revista Ingeniería de Construcción*, Vol. 29, No. 1, pp. 5–21.
- MALISHEV, M. V., y NIKITINA, N. S. (1982). Cálculo de asentamientos de cimentaciones para condiciones no lineales entre las tensiones y las deformaciones del suelo. *Revista Trabajos N.I. Bases y Construcciones Subterráneas*. Vol. 2, p. 21-25.
- Norma para el Diseño Geotécnico de Cimentaciones Superficiales (NC 2007).
- QUEVEDO, G. (1989). Determinación del área de la base de cimentaciones superficiales: Método de cálculo. 97 p. Tesis de Doctorado, UCLV, Sta Clara,
- RODRÍGUEZ, G., BONILLA, J. D., y HERNÁNDEZ, J. J. (2016). Numerical modeling of reinforced concrete continuous deep beams. *Revista Ingeniería de Construcción*, Vol 31, No 3, pp. 163–174.
- RODRÍGUEZ, G., BONILLA, J. D., y HERNÁNDEZ, J. J. (2017). Study of the behavior of reinforced concrete deep beams. Estimate of the ultimate shear capacity. *Revista de la Construcción*, Vol. 16, No. 1, pp. 43–56.