

Asentamientos en fundaciones continuas con modelos numéricos de simulación con elementos finitos

Settlements in continuous foundations with numerical models of simulation with finite elements

Briceño, Johannes¹; Uzcátegui, Andrea¹; Belandria, Norly²; León, Francisco³; Verjel, Victor⁴

¹Departamento de Vías, Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela.

²Grupo de Investigación en Geología Aplicada (GIGA), Escuela de Ingeniería Geológica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela.

³Laboratorio de Vibraciones Mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela.

⁴Programa de Ingeniería Civil, Universidad de Pamplona. Pamplona, Colombia.
ingjebb@gmail.com, johannes@ula.ve

Resumen

El propósito de esta investigación es la estimación de asentamientos elásticos y la capacidad de carga del suelo, en los diferentes perfiles y tipos de suelo analizados, producidos por una fundación aislada continua, utilizando un método analítico tradicional probado (Schmertmann 1970), (Terzagui y col., 1943) y el método numérico de simulación basado en el análisis de elementos finitos, con el uso del programa de aplicación geotécnica, Plaxis. Los asentamientos elásticos se estimaron a través de cada método, así como la capacidad de carga del suelo y el factor de seguridad. Seguidamente, se realiza el análisis y la comparación de los resultados obtenidos, concluyéndose que el método numérico de simulación arroja valores conservadores para la evaluación de los asentamientos, la capacidad de carga del suelo y el factor de seguridad, resultados a tener en cuenta al diseñar las fundaciones, lo que demuestra la viabilidad de utilizar métodos numéricos de simulación con análisis de elementos finitos con la misma seguridad que los métodos analíticos tradicionales, además de la ganancia en tiempo de análisis.

Palabras Claves: Fundación continua, Asentamiento elástico, Factor de seguridad, Modelos numéricos, Elementos finitos.

Abstract

The purpose of this investigation is the estimation of elastic settlements and the load capacity of the soil, in the different profiles and types of soil analyzed, produced by a continuous isolated foundation, using a proven traditional analytical method (Schmertmann 1970), (Terzagui et al. 1943) and the simulation numerical method based on the analysis of finite elements with the use of the Plaxis geotechnical application program. The elastic settlements were estimated through each method, as well as the load capacity of the soil and the safety factor. Next, the analysis and comparison of the results obtained was performed, concluding that the simulation numerical method yields conservative values for the evaluation of the settlements, the load capacity of the soil and the safety factor, results to be taken into account when designing the foundations, which demonstrating the feasibility of using simulation numerical methods with finite elements analysis with the same safety as traditional analytical methods, in addition to the gain in analysis time.

Keywords: Continuous foundation, Elastic settlement, Safety factor, Numerical models, Finite elements.

1 Introducción

Las fundaciones o cimentaciones son parte esencial de toda construcción civil, son las encargadas de aportar la estabilidad y servir de anclaje entre la estructura y el suelo, además de ser parte fundamental en la interacción suelo – estructura, transmitiendo o trasladando al suelo las cargas de la estructura y su peso propio (Delgado 1996), las cuales generan incrementos de esfuerzo, que producen cambios volumétricos que se traducen en asentamientos. Toda obra civil debe contar con una fundación apta para sus requerimientos y que se adapte a las condiciones del suelo existentes para la perdurabilidad de la misma, garantizando que la capacidad de carga del suelo sea suficiente para controlar asentamientos considerables que puedan comprometer la estabilidad y seguridad general de la estructura.

Por otra parte, en el diseño de la infraestructura (fundaciones o cimentaciones) es necesario aceptar que se deben considerar criterios de seguridad y confiabilidad para garantizar la estabilidad, seguridad y funcionalidad de la obra durante su vida útil, con tanto rigor como se diseña la superestructura (Delgado 1996).

En las últimas décadas la tecnología ha sido desarrollada exponencialmente, creando software con la finalidad de ayudar y facilitar muchos procesos antes complejos de ejecutar, sistematizando y masificando los resultados que pudieran ser obtenidos con algunas de las fórmulas analíticas y/o empíricas más complejas. En especial en el análisis de casos de ingeniería geotécnica se ha venido trabajando con los métodos numéricos basados en el análisis de elementos finitos por simulación, como (Juárez 2002) que utilizó en su trabajo de investigación el software FRANC2D (Fracture analysis code for two dimensional problems), de igual forma (Zumaquero 2012) con el software de simulación Plaxis y hojas de cálculo programadas en MathCad, al igual que (Lemus 2017). (Nápoles 2016) realizó un trabajo de investigación en fundaciones superficiales donde utilizó programación digital con el paquete MatLab.

En la ingeniería de fundaciones el comportamiento del suelo portante controla el de la fundación, los cuales son susceptibles a deformaciones bajo la acción de las cargas (Delgado 1996), por lo que los asentamientos han sido objeto de estudio a través de los años, desarrollando métodos y ecuaciones analíticas e empíricas para estimarlos, con el propósito de tomar medidas de diseño para que no puedan generar daños importantes en las estructuras civiles. Estos métodos

y ecuaciones se han catalogado por ser métodos comprobados dando un valor estimado de lo que pudiera ocurrir realmente.

Los métodos para la estimación de asentamientos elásticos son muy variados y desarrollados por muchos autores: (Terzagui y Peck, 1948), (Bjerrum y Eggstad, 1963), (Peck, Hanson y Thorburn, 1974), (D'Appolonia y col., 1970), (Peck y Bazaraa, 1969), (Burland y Burbridge, 1985), entre otros, adaptándose a las condiciones del suelo que esté siendo estudiado, tomando en consideración todos los posibles factores que se ven involucrados para que se generen estos. Dichos métodos han sido aplicados a lo largo de los años siendo comprobada su eficacia, dando resultados satisfactorios y con muy poco margen de error con respecto a los valores generados en campo. El manejo de software de aplicación lleva a estimar el asentamiento del suelo de forma rápida, en comparación con los métodos tradicionales y además de esperar resultados similares entre ellos.

Dentro de este orden de ideas, el siguiente trabajo de investigación tiene como propósito estudiar, analizar y comparar para un tipo de suelo de fundación los asentamientos elásticos producidos por una fundación continua, la cual define (Delgado 1996), como aquella donde su longitud es mucho mayor que su ancho, usada generalmente para cargas lineales, como muros de contención. Con los resultados obtenidos por el método tradicional comprobado (Schmertmann 1970) basado en la prueba normal de penetración (SPT), además de conocer la capacidad de carga del suelo de fundación planteada por (Terzagui y col., 1943) y el factor de seguridad para cada caso en estudio, y los obtenidos por simulación con métodos numéricos de análisis de elementos finitos, al igual que (Berrocal 2013) a través de comparación de los resultados obtenidos por cada método, comprobar la factibilidad de utilizar los métodos de simulación basados en el análisis de elementos finitos con la misma seguridad de los métodos tradicionales de análisis.

2 Marco metodológico

Con el fin de lograr los objetivos planteados, se cumplió con una serie de pasos a continuación descritos para obtener valores confiables sobre los resultados comparados en este trabajo de investigación: Se establecieron las dimensiones geométricas para las fundaciones modeladas, las condiciones del perfil del suelo y de borde, con la finalidad de estimar los asentamientos con las condiciones establecidas, utilizando métodos analíticos tradicionales comprobados.

Posteriormente se simulan las mismas condiciones del perfil del suelo, utilizando software de análisis de elementos finitos con aplicación en geotecnia, para estimar los asentamientos, con la finalidad de compararlos con los hallados por los métodos tradicionales, para finalmente presentar recomendaciones sobre los resultados obtenidos.

2.1 Análisis por métodos analíticos tradicionales comprobados.

A continuación en las tablas 1 y 2 se tienen las propiedades mecánicas del suelo y las dimensiones de la fundación que van a ser consideradas por los métodos analíticos y de elementos finitos.

Tabla 1. Datos Geotécnicos del suelo.

Datos del suelo	
γ_h (kN/m ³)	20,00
γ_{sat} (kN/m ³)	22,00
ϕ (°)	35,00
C (kN/m ³)	1,00
Nf (m)	2,90

Tabla 2. Datos de dimensiones de la fundación.

Datos de Fundación	
B (m)	2,00
hc (m)	0,50
Df (m)	1,50
γ_c (kN/m ³)	24,00
Q(kN/ml)	500,00

Asimismo, con los datos mostrados anteriormente en las tablas 1 y 2 se procede a la estimación del asentamiento por el método comprobado seleccionado (Schmertmann1970).

2.1.1 Estimación del asentamiento elástico o inmediato (S_e):

Cálculo de la presión efectiva a la cota de fundación (σ'_o), carga admisible limitada por los asentamientos (q'_a), factor de influencia de la deformación unitaria ($I_{z_{max}}$), modulo de Young (E) para las diferentes capas en las que se dividió el perfil del suelo y estimación del asentamiento elástico o inmediato (S_e).

Presión efectiva:

$$\sigma'_o = \gamma_h * Df \dots \dots \dots \text{Ec. (1)}$$

Donde:

γ_h es el peso específico del suelo de fundación.

Df representa la cota de fundación.

Carga admisible limitada por los asentamientos:

$$q'_a = \frac{Q}{Bx1} + (\gamma_c * h_c) + (Df - h_c) * \gamma_h \dots \dots \text{Ec. (2)}$$

Donde:

Q corresponde a la carga sobre la fundación, aportada por la superestructura.

B define el ancho de la base de la fundación (zapata).

γ_c es el peso específico del concreto.

hc define la altura o espesor de la zapata de fundación.

Cálculo del factor de influencia de la deformación unitaria:

$$I_{z_{max}} = 0,5 + 0,1 * \sqrt{\frac{q_{neta}}{\sigma'_z}} \dots \dots \dots \text{Ec. (3)}$$

Donde:

q'_a es igual a la q_{neta}

q_{neta} es la carga neta.

σ'_z es la presión efectiva en el diagrama del factor de influencia de la deformación unitaria

Modulo de Young: Para zapatas continuas.

$$E = 3,5q_c \dots \dots \dots \text{Ec. (4)}$$

$$q_c = N * \text{factor tipo de suelo} \dots \dots \dots \text{Ec. (5)}$$

Donde:

q_c es la capacidad de carga del cono.

N representa el número de golpes del ensayo SPT (Ensayo de penetración estándar).

Factor tipo de suelo es tomado de la tabla 3.

Tabla 3. Correlación entre capacidad de carga por punta del ensayo del cono (q_c) y la resistencia a la penetración normal (SPT) (Sanglerat, 1972). Tomado de Fundaciones superficiales, Febres, E. 1998

Tipos de suelo	q_c/N^*
Limos, limos arenosos, mezclas de limo y arena con algo de cohesión	2,0
Arenas limpias finas a medias y arenas algo limosas	3-4
Arenas gruesas y arenas con algo de grava	5-6
Gravas y gravas arenosas	8-10

*valores de q_c ($\frac{kg}{cm^2}$), valores de N en golpes/pie

Estimación del asentamiento (S_e):

$$S_e = C_1 * C_2 * q_{neta} * \sum_{i=1}^n \frac{I_z}{E * \Delta z_i} \dots \dots \dots \text{Ec. (6)}$$

$$C_1 = 1 - 0,5 \left(\frac{\sigma'_0}{\Delta q} \right) \geq 0,5 \dots \text{Ec. (7)}$$

$$C_2 = 1 + 0,2 \log_{10} \left(\frac{t}{0,1} \right) \dots \text{Ec. (8)}$$

Donde:

Δq es igual a q'_a e igual a q_{neta}

t representa el tiempo en años.

En la figura 1 se muestra el perfil del suelo con perforación del ensayo SPT, vista lateral de la fundación con su carga (Q) y perfil del factor de influencia de la deformación unitaria.

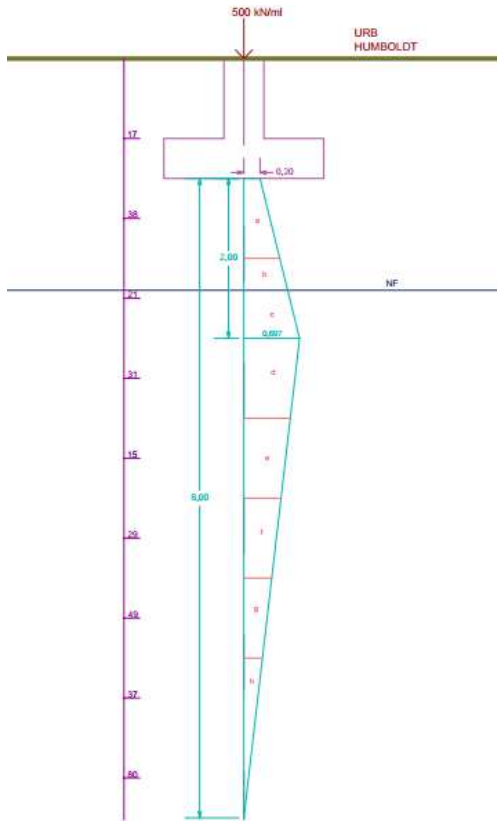


Figura 1. Diagrama del factor de influencia de la deformación unitaria. Zapata continua. Método de Schmertmann, 1970.

2.1.2 Capacidad de carga.

Usando los datos mostrados en la tabla 1 y el ancho B mostrado en la tabla 2, se procede al cálculo de capacidad de carga última, carga admisible y factor de seguridad, aplicando la ecuación general de capacidad de carga, (Terzagui y col., 1943).

Capacidad de carga última:

$$q_{ult} = CN_c S_c d_c + \sigma'_0 N_q S_q d_q + 0,5 \gamma B N_\gamma S_\gamma d_\gamma \dots \text{Ec. (9)}$$

Donde:

C representa la cohesión del suelo.

Factores de capacidad de carga:

$$N_q = e^{x \tan \phi} \tan(45 + \frac{\phi}{2})^2 \dots \text{Ec. (10)}$$

$$N_c = \left(\frac{N_q - 1}{\tan \phi} \right) \dots \text{Ec. (11)}$$

$$N_\gamma = 2(N_q + 1) \tan \phi \dots \text{Ec. (12)}$$

Factores de forma:

$$S_c = S_q = S_\gamma = 1 \dots \text{Ec. (13)}$$

Factores de profundidad:

$$d_c = d_q = \frac{1 - d_q}{N_c \tan \phi} \dots \text{Ec. (14)}$$

$$d_q = 1 + 2 \tan \phi (1 - \sin \phi)^2 \frac{D_f}{B} \dots \text{Ec. (15)}$$

$$d_\gamma = 1 \dots \text{Ec. (16)}$$

Donde:

ϕ es el ángulo de fricción interna del suelo.

Carga admisible:

$$q_{adm} = \frac{q_{ult}}{F_{s\text{asumido}}} \dots \text{Ec. (17)}$$

$F_s=2$ (Suelos arenosos).

Carga aplicada:

$$q_{aplic} = \frac{Q}{B \times l} + h_c * \gamma_c + ((D_f * h_c) * \gamma_h) \dots \text{Ec. (18)}$$

$$q_{aplic} \leq q_{adm} \dots \text{Ec. (19)}$$

2.2 Análisis por simulación.

Usando los datos mostrados en la tabla 1 y el ancho B mostrado en la tabla 2, se determina por simulación con el uso del software de aplicación geotécnica Plaxis, la capacidad de carga, carga admisible y el asentamiento.

Condiciones de borde:

Se limita el modelo de simulación en las caras laterales y cara de fondo, tanto para el desplazamiento vertical y horizontal, como también la rotación, para evitar que afecten el análisis, como se muestra en la Figura 2.

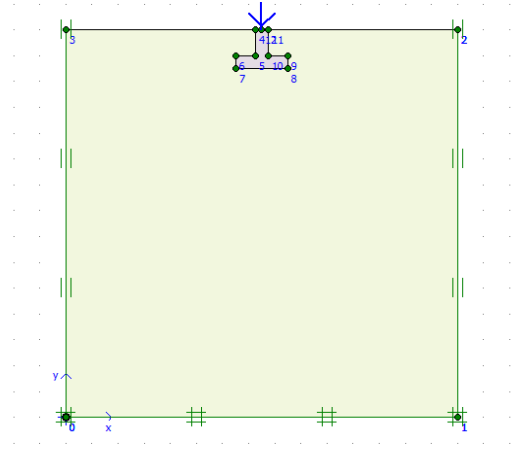


Figura 2. Imagen de Plaxis. Condiciones de borde.

Discretización:

Para la simulación es necesario desarrollar la discretización del modelo, utilizando un mallado muy fino recomendado por el software de aplicación geotécnica Plaxis, como se muestra en la figura 3.

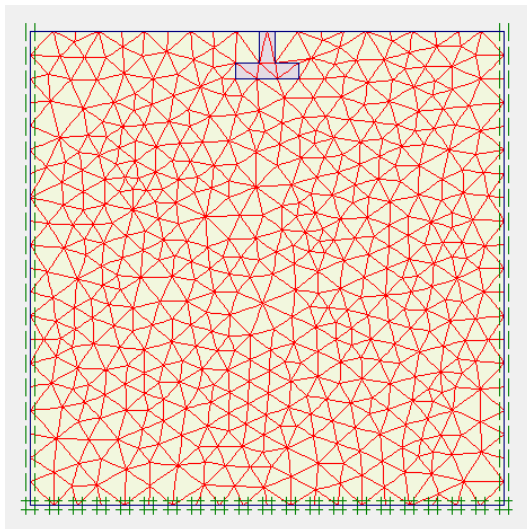


Figura 3. Imagen de Plaxis. Mallado del modelo.

Se deben establecer las condiciones iniciales para el análisis de la simulación. Se comienza por la ubicación del nivel freático, para este caso de análisis según perfil de exploración de la zona en estudio (Urbanización Humboldt, Mérida Estado Mérida, Venezuela), además se calcula la presión de poros inicial y la presión efectiva, como se muestra en las figuras 4, 5 y 6, respectivamente.

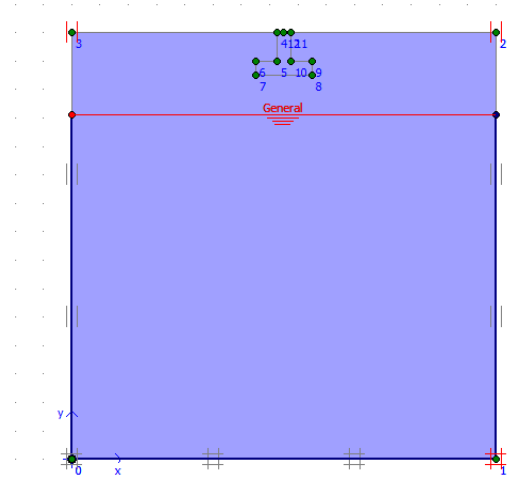


Figura 4. Imagen de Plaxis. Ubicación del nivel freático.

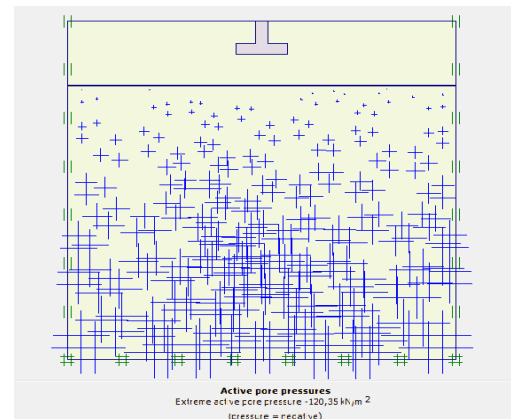


Figura 5. Imagen de Plaxis. Presión de poros inicial.

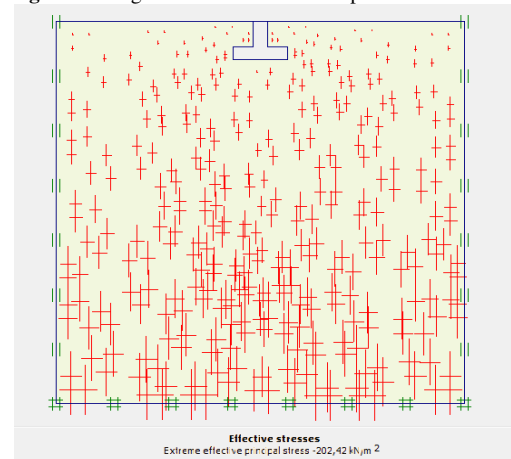


Figura 6. Imagen de Plaxis. Presión efectiva.

Para iniciar la etapa de proceso de la simulación del modelo, se considera un análisis por etapas mostrado en la figura 7.

- Etapa I, Fundación, vaciado del concreto de la fundación.
- Etapa II, Carga vertical,

posicionamiento de la carga vertical que soportará la fundación.

- Etapa III, Carga multiplicada, incremento en la carga vertical antes de su falla.
- Etapa IV, FS, factor de seguridad asociado a la carga vertical sin incremento.

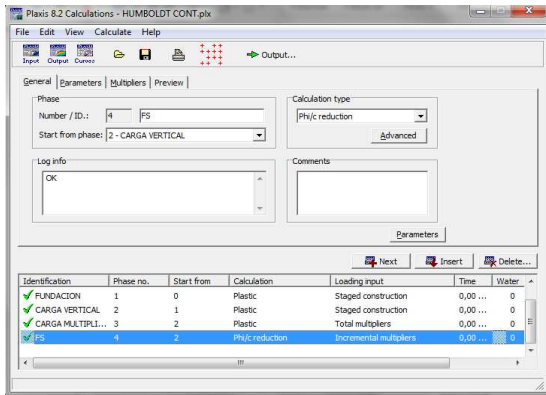


Figura 7. Imagen de Plaxis. Análisis por etapas.

En la figura 8 se muestra el resultado del análisis de deformación del modelo (Etapa II), donde se determina el desplazamiento vertical que se traduce en el asentamiento de la fundación. En la figura 9 se muestra la deformación de la malla en una escala incrementada.

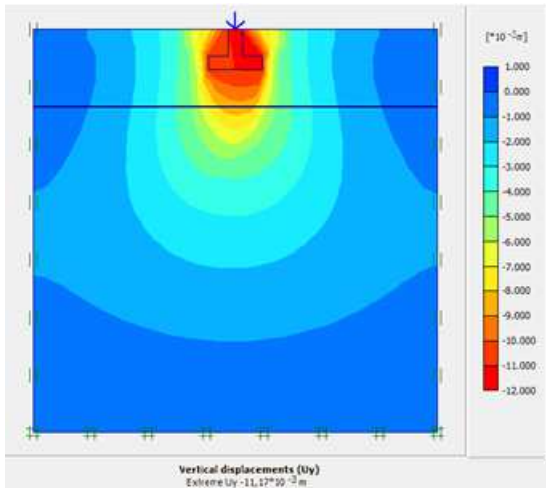
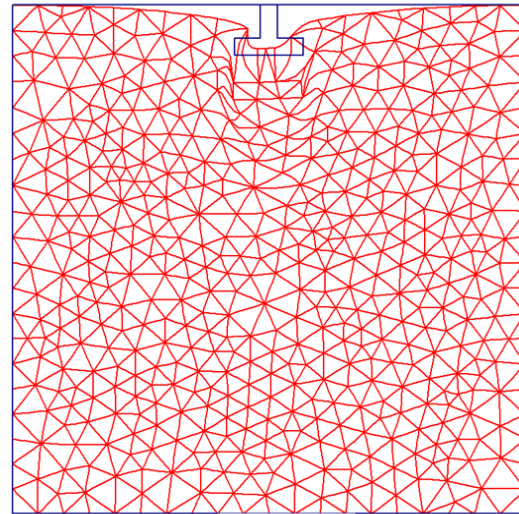


Figura 8. Imagen de Plaxis. Desplazamiento vertical.



Deformed Mesh
Extreme total displacement 13,12*10⁻³ m
(displacements scaled up 100,00 times)

Figura 9. Imagen de Plaxis. Deformación de la malla.

Capacidad de carga:

Con el ancho B y la carga Q de la fundación mostrada en la tabla 2 se procede a calcular la capacidad de carga.

Multiplicador de carga: En la etapa de carga vertical (Etapa III) mostrado en la figura 7 se obtiene el gráfico carga-desplazamiento (figura 10) y se consigue el multiplicador que corresponderá al incremento máximo al que puede llegar la carga antes del colapso de la fundación.

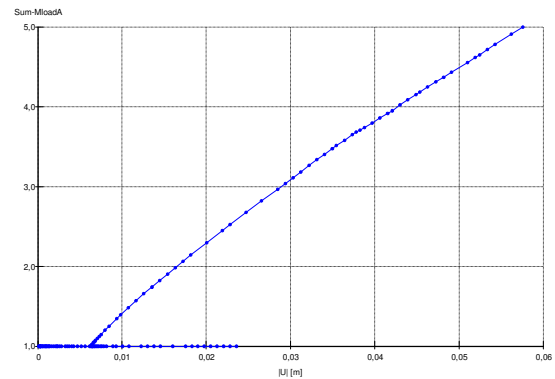


Figura 10. Imagen Plaxis. Multiplicador de la carga vertical.

Capacidad de carga última simulación (q_{ult(s)}):

$$q_{ult(s)} = \frac{Q * \text{Multiplicador}}{B * 1} \dots \dots \dots \text{Ec. (20)}$$

Factor de seguridad por simulación (FS_(s)): Se muestra en la figura 11.

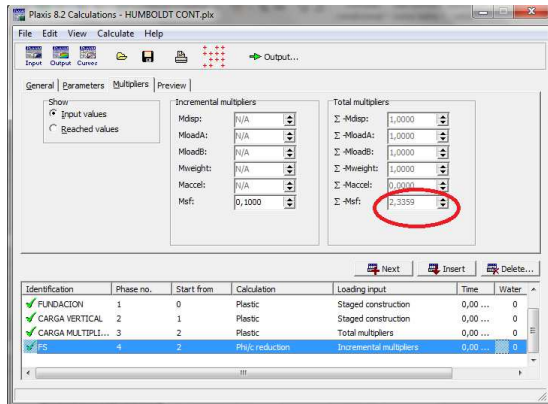


Figura 11. Imagen Plaxis. Factor de seguridad para capacidad de carga.

Capacidad de carga admisible por simulación ($q_{adm(s)}$):

$$q_{adm(s)} = \frac{q_{ult(s)}}{F_{s(s)}} \dots \dots \dots \text{Ec. (21)}$$

2 Análisis de resultados.

Después de haber aplicado la metodología descrita para las diferentes condiciones de suelos y tras haber finalizado el proceso de cálculo por el método analítico tradicional comprobado y el procesamiento de la simulación por el método de elementos finitos, se presentan los resultados de asentamientos y capacidad de carga de quince (15) perfiles de suelo ubicados en distintos sectores del Municipio Libertador, Mérida Estado Mérida – Venezuela, en la tabla 4 y 5 para su análisis.

Tabla 4. Resultados método analítico tradicional comprobado, (Schmertmann1970).

Ubicación perforación	Método analítico tradicional comprobado (Schmertmann 1970)					FS (asumido)
	Asetamiento Elástico (Se) (m)	q _{ult} (kN/m ²)	q _{aplic} (kN/m ²)	q _{adm} (kN/m ²)	q _{adm} ≥ q _{aplic}	
Humboldt	1.107E-02	2090.17	282.00	1045.08	√	2.00
Av. Universidad	7.161E-03	3207.46	284.00	1603.73	√	2.00
Humboldt Nro 2	9.809E-03	1592.00	280.00	796.00	√	2.00
La Pompeya	7.386E-03	1974.90	282.00	987.45	√	2.00
El Parque	6.605E-03	1621.73	280.00	810.87	√	2.00
Centro	1.561E-02	2043.41	284.00	1021.70	√	2.00
Av. Las Americas	8.579E-03	1682.00	279.00	841.00	√	2.00
La Mata	3.110E-02	1185.90	280.00	592.95	√	2.00
El Rodeo	3.958E-03	2151.50	284.00	1075.75	√	2.00
El Parque Nro 2	1.080E-02	1906.26	280.00	953.13	√	2.00
C.C El Viaducto	4.863E-03	2205.44	282.00	1102.72	√	2.00
El Campito	2.248E-02	1137.22	279.00	568.61	√	2.00
Zona Industrial	2.129E-03	1673.62	282.00	836.81	√	2.00
C.C Las Tapias	5.114E-03	1346.41	278.00	673.20	√	2.00
Av. 2	8.271E-03	1528.57	279.00	764.29	√	2.00

Tabla 5. Resultados por simulación con software Plaxis.

Ubicación perforación	Simulación					FS _(s)
	Asetamiento Elástico (Se) _(s) (m)	q _{ult(s)} (kN/m ²)	q _{aplic(s)} (kN/m ²)	q _{adm(s)} (kN/m ²)	q _{adm(s)} ≥ q _{aplic(s)}	
Humboldt	1.000E-03	1250.00	282.00	534.19	√	2.34
Av. Universidad	7.260E-03	750.00	284.00	431.03	√	1.74
Humboldt Nro 2	1.230E-03	750.00	280.00	390.63	√	1.92
La Pompeya	6.680E-03	1250.00	282.00	531.91	√	2.35
El Parque	7.640E-03	1250.00	280.00	621.89	√	2.01
Centro	1.174E-02	1250.00	284.00	565.61	√	2.21
Av. Las Americas	7.760E-03	1250.00	279.00	625.00	√	2.00
La Mata	4.888E-02	500.00	280.00	349.65	√	1.43
El Rodeo	5.170E-03	1250.00	284.00	520.83	√	2.40
El Parque Nro 2	1.352E-02	1250.00	280.00	625.00	√	2.00
C.C El Viaducto	6.580E-03	1250.00	282.00	529.66	√	2.36
El Campito	2.060E-02	250.00	279.00	156.25	X	1.60
Zona Industrial	7.980E-03	750.00	282.00	375.00	√	2.00
C.C Las Tapias	8.600E-03	750.00	278.00	416.67	√	1.80
Av. 2	8.390E-03	750.00	279.00	394.74	√	1.90

3.1 Asentamientos:

En la tabla 4 y 5, se muestran los resultados de los asentamientos de forma analítica por el método tradicional comprobado y por el método elementos finitos.

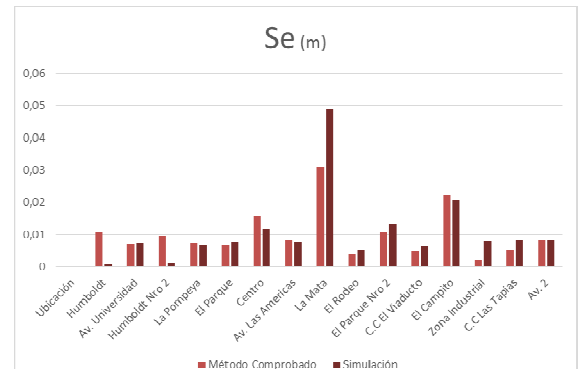


Figura 12. Asentamiento elástico. Método analítico tradicional comprobado y por simulación.

En la figura 12 se muestran los resultados de los asentamientos obtenidos en ambos casos. Se puede notar que para las ubicaciones Humboldt, Humboldt Nro. 2, el resultado del asentamiento elástico por el método comprobado es mayor en un promedio del 90% al hallado por simulación con métodos numéricos de análisis de elementos finitos con el uso del programa de aplicación geotécnica Plaxis. Para la ubicación El Campito, La Pompeya, Centro y Av. Las Américas, el resultado del asentamiento elástico por el método comprobado es mayor en un promedio del 13% al hallado por simulación. Para los casos de El Parque, La Mata, El Rodeo, El Parque Nro. 2, C. C. El Viaducto, Zona industrial y C.C. Las Tapias, el resultado hallado por simulación es mayor en un porcentaje promedio del 29% al del resultado por el método tradicional; así mismo las ubicaciones Av. Universidad y Av. 2 dan como resultado valores muy similares entre el método tradicional y por simulación.

3.2 Capacidad de carga

3.2.1 Capacidad de carga última:

De igual forma la tabla 3 y 4 muestra los resultados obtenidos para la capacidad de carga última por medio de ambos métodos, el comprobado y por simulación.

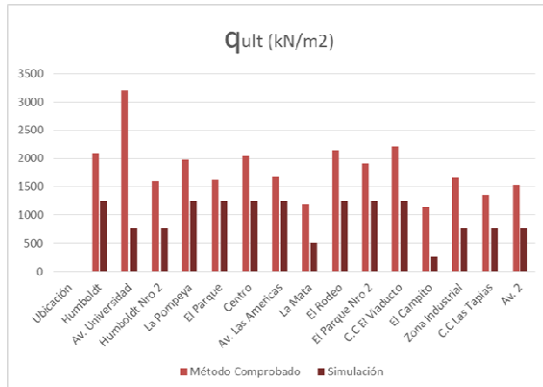


Figura 13. Capacidad de carga última. Método analítico tradicional comprobado y por simulación.

En la figura 13 se muestran los resultados arrojados por ambos métodos evaluados. Se puede observar que, en los casos de la Av. Universidad y El Campito, los resultados por el método tradicional comprobado son considerablemente mayores a los del método de simulación hasta en un 77% de promedio. Para todos los demás casos los resultados obtenidos del método comprobado son mayores que los obtenidos por el método de simulación, hasta en un 42% de promedio.

4.2.2 Capacidad de carga admisible:

Por otra parte, se puede observar en la tabla 4 y 5 los resultados obtenidos para la carga admisible por el método comprobado y por la simulación con métodos números por análisis de elementos finitos.

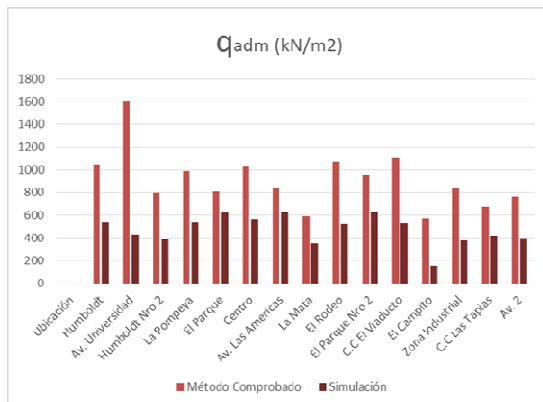


Figura 14. Capacidad de carga admisible. Método analítico tradicional comprobado y por simulación.

En la figura 14 se puede apreciar que, en el caso de la Av. Universidad, es mucho mayor el resultado obtenido por el método comprobado, en un 73% contra el resultado hallado por la simulación. En cuanto a los casos restantes se puede observar que los resultados por el análisis comprobado son mayores a los obtenidos por la simulación, hasta en un promedio del 43%. Sin embargo, para el caso de la ubicación El Campito, el resultado de la capacidad de carga admisible arrojó un valor menor al valor de la carga aplicada por el programa de aplicación geotécnica Plaxis.

3.3 Factor de seguridad

En la tabla 4 y 5 se puede observar que los valores hallados por el método de simulación en los casos de Av. Universidad, Humboldt Nro. 2, La Mata, El Campito, C.C. Las Tapias y Av. 2, son menores al valor del factor de seguridad asumido para el método analítico, hasta en un promedio del 13%. Para los casos de ubicación Humboldt, La Pompeya, Centro, El Rodeo y C.C. El Viaducto, los valores de simulación superan en un porcentaje promedio del 11.90% a los del método analítico. En los casos de Av. Las Américas, El parque Nro. 2 y Zona Industrial, dieron como resultado el mismo valor del supuesto en el método tradicional.

4 Conclusiones.

Finalizado el proceso de análisis de los resultados de los diferentes casos mostrados, se obtienen las siguientes conclusiones:

Asentamientos:

Para analizar el asentamiento de fundaciones es factible utilizar el método de simulación planteado al igual que los tradicionales, teniendo en cuenta que con ambos métodos no se superan los 4cm de asentamientos permitidos para el tipo de fundación estudiada.

Capacidad de carga última:

Es viable utilizar el método de simulación planteado para determinar la capacidad de carga última en fundaciones continuas dado que los resultados obtenidos aseguran el buen comportamiento de la fundación, ya que en la mayoría de los casos muestra un margen de seguridad aceptable al momento de diseño, además de ser este un método más conservador en comparación con el método tradicional.

Capacidad de carga admisible:

Dado que en todos los casos los valores arrojados por el método tradicional comprobado son mayores a la simulación, se considera que el método de simulación es más conservador.

En conclusión, para analizar la capacidad de carga admisible en fundaciones continuas es factible utilizar el método de simulación planteado, con mayor seguridad que el método tradicional comprobado, ya que los resultados son más conservadores, es decir, arroja una capacidad admisible de carga menor del suelo, lo que garantiza un predimensionado suficiente y seguro a la hora de diseñar la fundación.

Factor de Seguridad:

Para analizar el factor de seguridad en fundaciones continuas es factible utilizar el método de simulación planteado dado que arroja valores que garantizan la seguridad y el buen funcionamiento de las fundaciones.

Para finalizar, el análisis de los asentamientos elásticos y capacidad de carga en fundaciones aisladas puede realizarse con tanta seguridad con los métodos numéricos de simulación como con los tradicionales comprobados, ya que arroja resultados con mucha precisión para el diseño, teniendo como ventaja el método de simulación la rapidez del análisis al igual que permite estudiar varios aspectos de una vez, como son asentamientos, deformaciones laterales y distribución de esfuerzos. Por todo esto, es recomendable el uso de estas herramientas basadas en los métodos numéricos por simulación con el análisis de elementos finitos, para la estimación de asentamientos en fundaciones, tanto como método complementario a los métodos tradicionales, como sustitutivo con la prudencia que esto implica.

Recomendaciones:

- Como regla general se recomienda para el diseño de las fundaciones donde la carga aplicada sea muy cercana a la capacidad de carga admisible aumentar las dimensiones de la base de la fundación (zapata) para distribuir mejor los esfuerzos y disminuir los asentamientos.
- Evaluar el asentamiento elástico de las fundaciones con otros perfiles de suelo y condiciones de carga.
- En el caso de la ubicación El Campito se recomienda aumentar las dimensiones de la fundación para que la distribución de esfuerzos se produzca en un área mayor, lo que disminuirá los asentamientos.
- Se recomienda el uso de los métodos numéricos por simulación con el análisis de elementos finitos, como una herramienta adicional para el diseño y chequeo de asentamientos en fundaciones, ya que disminuye el tiempo de análisis obteniendo resultados tan buenos como los métodos comprobados.

Referencias

- Ahvil RG, Ulery HH, 1962, Tabulated values of determining the composite pattern of stress, strains, and deflections beneath a uniform load on a homogeneous half space, Highway Research Board Bulletin 342, pag. 1-13.
- Boussinesq J, 1885, Application des potentiels a l'étude de l'équilibre et du mouvement es solides éstatiques, Paris, Ghautier-Villard.
- Celigüeta J, 2011, Método de los elementos finitos para análisis estructural, España, TECNUN (Universidad de Navarra).
- Crespo V, 2004, Mecánica de suelos y cimentaciones 5TA Edición, México, Limusa Noriega Editores.
- Das B, 2006, Principios de ingeniería de cimentaciones. 5ta. Edición. Editorial Thompson.
- Delgado M, 1996, Fundamentos e introducción al análisis geotécnico. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Eggstad A, 1963, Deformation measurement model footing on the surface of drysand, Memorias de la Conferencia Europea de Mecánica de Suelos e Ingeniera en Fundaciones, Wiesbaden, Alemania Occidental, vol. 1, pag. 233
- Febres E, 1998, Fundaciones superficiales, Venezuela, Universidad de Los Andes.
- Ibáñez L, 2012, Recomendaciones para la modelación delas cimentaciones sobre pilotes por método de elementos finito vol6, Cuba, Revista de ingeniería Universidad Marta Abreu.
- Juárez L, 2002, Aplicación de la mecánica de fractura a problemas de la geotecnia, México, Instituto Politécnico Nacional.
- Meyerhof GG, 1974, General report: state of the art on penetration testing in countries outside Europe, Memories, European symposium on penetration testing.
- Nápoles J, 2016, Diseño automatizado de cimentaciones superficiales con matlab, Cuba, Universidad Central Marta Abreu de las Villas.
- Newmark N, 1935, Simplified computation of vertical pressure in elastic foundation, Circular 24, University Of Illinois Engineering Experimental Stationn, Urbana, IL.

Sanglerat G, 1972, The penetrometer and soil exploration, Amsterdam, Elsevir, pag. 464.

Schmertmann J, 1970, Static cone to compute settlement over sand, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, American Society Of Civil Engineers, vol. 96, no SM3, pag. 1011-1043.

Schmertmann J y Hartman J, 1978, Improved strain influence factor diagram, Journal of the Geotechnical Engineering Division, American Society of Civil Engineers, vol. 104, no. GT8, pag. 1113-1135.

Schultze E y Sherif G, 1973, Prediction of settlement from evaluation of settlement observations for sand, Memorias de la 8va Conferencia Internacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería en Fundaciones, Moscú, vol. 1, parte 3, pag.225.

Skempton A y McDonald D, 1956, The allowable settlement of buildings, Proceedings of Institute of Civil Engineers, vol. 5, part III, pag. 727.

Sotomayor M, 2007, Aplicación del método de elementos finitos y programas computacionales en el diseño estructural de un galpón para el taller de la empresa proscopets.a, Quito, Escuela Politécnica Nacional.

Tapia G, Tapia U, 1986, Avances recientes en el ensayo de penetración estática, IX Seminario de Geotécnica, Exploración y Caracterización del Subsuelo para Estudio Geotécnicos, SVMSIF.

Terzaghi K, 1943, The oretical soil mechanics, John Wiley and Sons.

Valero E, 2004, Tesis doctoral aportaciones al estudio de las máquinas eléctricas de flujo axial mediante la aplicación del método de los elementos finito, España, Universidad Politécnica de Catalunya (UPC).

Zumaquero W, 2012, Análisis de cimentaciones balsas combinadas con pilotes, Cuba, Universidad Central Marta Abreu de las Villas

Recibido: 13 de noviembre de 2019

Aceptado: 12 de marzo de 2020

Johannes Briceño B.: Ingeniero Civil, Magister en Ingeniería vial. Profesor Asistente investigador de la Universidad de los Andes, Mérida-Venezuela, Departamento de Vías, Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes. Mérida Venezuela. Correo electrónico: ingjebb@gmail.com, johannes@ula.ve

Andrea Uzcátegui: Ingeniero Civil, Egresada de la Universidad de los Andes, Mérida-Venezuela. Correo electrónico: abum28.au@gmail.com.

Belandria, Norly: Ingeniero Geólogo. Magister en Matemática aplicada a la ingeniería. Doctora en Ciencias Aplicadas. Coordinadora del grupo de investigación en Geología Aplicada (GIGA). Profesor agregado e investigadora de la Universidad de los Andes, Mérida-Venezuela. Correo electrónico: norlyb@gmail.com

Francisco León Oviedo: Ingeniero Mecánico, ULA. PhD in Mechanical Engineering University of South Florida (USF), Tampa, FL, USA. Investigador y Profesor de la Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela. Correo electrónico: fleon@ula.ve

Victor Hugo Verjel Tarazona: Ingeniero Civil, Magister en gestión de proyectos. Profesor programa de Ingeniería Civil, Universidad de Pamplona, República de Colombia. Correo electrónico: victor.verjel@unipamplona.edu.co