

ASENTAMIENTOS EN FUNDACIONES CONTINUAS CON ANÁLISIS SÍSMICO UTILIZANDO MODELOS NUMÉRICOS

Johannes E. BRICEÑO BALZA.¹ Norly T. BELANDRIA RODRÍGUEZ² Francisco M. LEÓN OVIEDO³

RESUMEN

El propósito de esta investigación es la estimación de asentamientos elásticos producidos por una fundación aislada continua en los diferentes perfiles y tipos de suelo analizados, utilizando un método analítico tradicional probado (Schmertmann 1970) y modelos numéricos de simulación basados en el análisis de elementos finitos considerando sismo con el uso del programa de aplicación geotécnica, Plaxis. Los asentamientos elásticos se estimaron a través de cada método al igual que el factor de seguridad, seguidamente se realizó el análisis y la comparación de los resultados obtenidos, concluyéndose que los modelos numéricos arrojan valores conservadores para la evaluación de los asentamientos y el factor de seguridad, resultados a tener en cuenta al diseñar las fundaciones. Esto demuestra la viabilidad de utilizar modelos numéricos con la misma seguridad que los métodos analíticos tradicionales, además de la ganancia en tiempo de interpretación.

ABSTRACT

Settlements in continuous foundations with seismic analysis using numerical models

The purpose of this research is the estimation of elastic settlements produced by a continuous isolated foundation in the different profiles and types of soil analyzed, using a proven traditional analytical method (Schmertmann 1970) and numerical simulation models based on finite element analysis considering earthquake with the use of the geotechnical application program, Plaxis. The elastic settlements were estimated through each method as well as the safety factor, then the analysis and comparison of the results obtained was carried out, concluding that the numerical models show conservative values for the evaluation of the settlements and the factor of safety, results to take into account when designing foundations. This demonstrates the feasibility of using numerical models with the same security as traditional analytical methods, in addition to the gain in analysis time.

Palabras clave: Fundación continua, asentamiento elástico, factor de seguridad, modelos numéricos, elementos finitos.

Keywords: Continuous foundation, elastic settlement, safety factor, numerical models, finite elements method.

INTRODUCCIÓN

Para toda construcción civil es fundamental un buen diseño de fundaciones ya que las mismas son la interacción entre el suelo y la estructura, sirviendo de anclaje y transmitiendo o trasladando al primero las cargas de la segunda, además de su peso propio (Delgado 2013). Estas fundaciones producen incrementos de esfuerzo en el suelo portante originando cambios volumétricos que se traducirán en asentamientos. Al diseñar una estructura, esta debe tener un sistema de fundación que garantice sus requerimientos de estabilidad y seguridad, adaptándose a las condiciones del suelo existentes para la perdurabilidad de la misma, minimizando los asentamientos y que se mantengan en un rango tal que no comprometan la estabilidad y seguridad general de la estructura; diseñando estas

fundaciones con tanto rigor como se diseña la superestructura (Delgado 2013).

En tiempos relativamente recientes, la tecnología ha sido desarrollada e implementada con rapidez mediante la creación del software –que tienen la finalidad de ayudar y facilitar muchos procesos antes complejos de ejecutar–, haciendo más rápido la obtención de resultados sin utilizar directamente algunas de las fórmulas analíticas y/o empíricas más complejas. En el caso de la Geotecnia, algunos autores han venido trabajando con los modelos numéricos, como Juárez (2002), quien 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

¹ MSc. Docente e investigador en el Departamento de Vías, Escuela de Ingeniería Civil. Grupo de Investigación en Geología Aplicada (GIGA), Escuela de Ingeniería Geológica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela. Correo-e.: ingjebb@gmail.com / johannes@ula.ve

² PhD. Directora de la Escuela de Ingeniería Geológica y docente e investigadora en el Departamento de Vías, Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela. Correo-e.: norlyb@gmail.com

³ PhD. Laboratorio de Vibraciones Mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela. Correo-e.: fleon@ula.ve

MathCad. Nápoles (2016), realizó un trabajo de investigación en fundaciones superficiales donde utilizó programación digital con el paquete MatLab, (Kardgar 2018) utilizó el software Plaxis para investigar la capacidad de soporte de fundaciones, al igual que (Briceño et al. 2020) quien utilizó este mismo programa para analizar asentamientos y capacidad de carga en fundaciones continuas, entre otros.

El comportamiento de una fundación es controlado por las condiciones del suelo portante, el cual estará sometido a esfuerzos que pudieran producir asentamientos bajo la acción de las cargas, con especial atención en aquellos que se producen en suelos granulares que, por su comportamiento y estructura, suelen ser de manera rápida. Por todo esto, a través de los años los asentamientos han sido objeto de estudio desarrollando metodologías y una serie de ecuaciones empíricas y analíticas para estimarlos, con la finalidad de ajustar el diseño estructural de las fundaciones para minimizar daños importantes en las estructuras, estos métodos se han convertido con el paso del tiempo, el desarrollo investigativo y la experiencia; en métodos comprobados dando un valor estimado de lo que pudiera ocurrir en realidad.

Los métodos para la estimación de asentamientos elásticos o inmediatos son muy variados y desarrollados por muchos autores, adaptándose cada uno de ellos a las condiciones del suelo portante: (Steinbrenner 1934), (Fox 1948), (Bjerrum 1963), (Terzagui y Peck 1967), (Schmertmann 1970), (D'Appolonia D.J., D' Appolonia E., Brissette, 1970), (Peck, Hanson y Thorburn 1974), (Mitchell y Gardner 1975), (Bowles 1977), (Schmertmann y Hartman 1978), (Burland y Burbidge 1985), (Richards 1993), (Mayne y Poulos 1999), entre otros. Los resultados obtenidos han sido comprobados en campo mostrando eficiencia con un margen de error aceptable. Con el uso de los modelos numéricos se puede estimar el asentamiento del suelo de forma rápida en comparación con los métodos tradicionales y esperar resultados similares entre ellos.

En consecuencia, el siguiente trabajo tiene como finalidad estudiar, analizar y comparar para cada perfil de suelo de fundación considerado, los asentamientos elásticos producidos por una fundación continua sometida a un sismo. Con los resultados obtenidos por el método tradicional comprobado (Schmertmann 1970) basado en la prueba normal de penetración (SPT) y los obtenidos por simulación con el modelo numérico de análisis de elementos finitos utilizando el software Plaxis; al igual que (Berrocal 2013, Briceño et al. 2020) a través de la comparación de los resultados obtenidos por cada método, comprobar la factibilidad de utilizar los modelos numéricos con la misma seguridad de los métodos tradicionales de análisis de fundaciones.

DESARROLLO DEL TEMA

Con la finalidad de lograr los objetivos planteados se cumplieron los siguientes pasos: se establecieron las dimensiones geométricas para la fundación modelada, se fijaron las condiciones del perfil del suelo y de borde, se

estimaron los asentamientos utilizando el método analítico tradicional comprobado (Schmertmann 1970). Posteriormente se simulan las mismas condiciones del perfil del suelo implementando el software de análisis de elementos finitos con aplicación en geotecnia para estimar los asentamientos; primero, sin análisis sísmico y, luego, con análisis sísmico, cuya finalidad es la de comparar los resultados con los hallados por el método tradicional.

A continuación, la tabla 1 muestra la ubicación de las perforaciones y perfiles de suelo considerados en esta investigación, todos ubicados en la ciudad de Mérida, Estado Mérida, Venezuela. La tabla 2, presenta las propiedades mecánicas y elásticas del suelo en la ubicación (11), destacando que para el caso de "E" y "v" se tomaron valores recomendados por el programa Plaxis para suelos con propiedades mecánicas similares. La tabla 3, muestra las dimensiones, peso específico del concreto y carga aplicada a la fundación.

Tabla 1. Ubicación de las perforaciones, exploración.

Perforación	Ubicación	Perforación	Ubicación
Av. 2.	1	Urb. El Parque	8
Av. Las Américas	2	Urb. El Parque 2	9
Av. Universidad	3	Urb. El Rodeo	10
C.C. El Viaducto	4	Urb. Humboldt	11
C.C. Las Tapias	5	Urb. Humboldt 2	12
Centro	6	Urb. La Mata	13
Urb. El Campito	7	Urb. La Pompeya	14
		Zona Industrial	15

Tabla 2. Propiedades mecánicas y elásticas del suelo.

Datos del suelo.					
γ_h	γ_{sat}	ϕ (°)	C	E	ν
(kN/m ³)	(kN/m ³)		(kN/m ²)	(kN/m ²)	
20	22	35	1	6,8E+4	0,4

γ_h , representa el peso específico húmedo del suelo, γ_{sat} , es el peso específico saturado del suelo, ϕ , corresponde al ángulo de fricción interna del suelo, C, define la cohesión del suelo, E, representa el módulo de Young, ν , es el módulo de Poisson.

Tabla 3. Dimensiones, peso específico del concreto y carga aplicada a la fundación

B(m)	hc(m)	Df(m)	Nf(m)	γ_c (kN/m ³)	Q(kN/ml)
2,00	0,50	1,50	2,90	24,00	500,00

B, representa el ancho de la fundación, hc, es la altura de la zapata, Df, corresponde a la cota de fundación, Nf, es la posición del nivel freático medido desde la superficie, γ_c , es el peso específico del concreto, Q, representa la carga por metro lineal sobre la fundación.

Asimismo, con los datos mostrados anteriormente en las tablas 1,2 y 3 se procede a la estimación del asentamiento elástico por el método comprobado seleccionado (Schmertmann 1970).

Análisis por el método analítico tradicional comprobado. Estimación del asentamiento elástico o inmediato (Se)

Utilizando la ecuación 1, correspondiente al método de (Schmertmann 1970) se estimó el asentamiento elástico o inmediato (Se).

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

Donde:

C1, es un factor que es función de la presión efectiva a la cota de fundación (σ'_o) y la carga neta (q_{neta}).

C2, es un factor que es función del tiempo (t) medido en años.

q_{neta} , es la carga neta a la cota de fundación.

I_z , es el factor de influencia de la deformación unitaria.

E, es el módulo de Young.

Δz_i , es el espesor de capa considerado.

En la figura 1 se muestra el perfil del suelo con ensayo SPT, vista lateral de la fundación con su carga (Q) y perfil del factor de influencia de la deformación unitaria, para la ubicación (11).

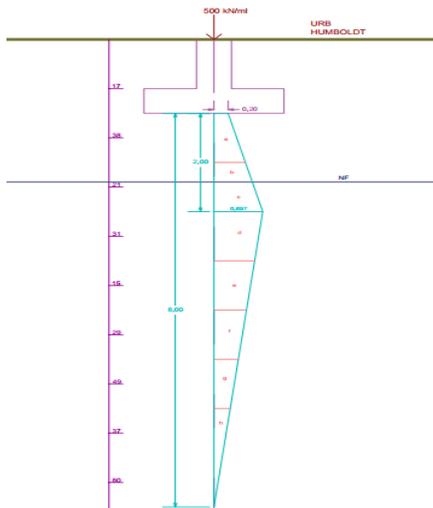


Figura 1. Diagrama del factor de influencia de la deformación unitaria. Zapata continua. Método de Schmertmann 1970.

Análisis por modelos numéricos

Aunque los modelos de los perfiles estudiados están sometidos a condiciones sencillas, donde un análisis convencional por métodos tradicionales daría resultados bastante satisfactorios y confiables, la utilización de un análisis por modelos numéricos sería una alternativa a estos métodos tradicionales y serviría de comparación de resultados, aportando seguridad para implementarlos en casos más complejos.

Usando los datos mostrados en las tablas 2 y 3, se determina por simulación con el uso del software de aplicación geotécnica, Plaxis, el asentamiento elástico y el factor de seguridad.

En la figura 2, se muestran las condiciones de borde, se limita el modelo de simulación en las caras laterales y de fondo, tanto para el desplazamiento vertical, horizontal, como también la rotación; para evitar que afecten el análisis. En la figura 3 se desarrolla la discretización o mallado del modelo, utilizando un mallado muy fino recomendado por el software. Es necesario establecer las condiciones iniciales en el modelo, como la ubicación del nivel freático, presión de poros y efectiva inicial, mostrado en las figuras 4,5 y 6 de la ubicación perfil de suelo (11).

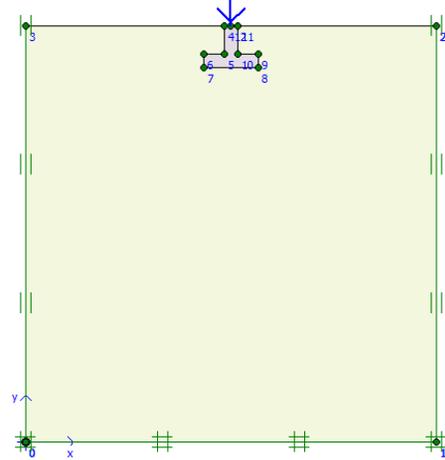


Figura 2. Imagen de Plaxis. Condiciones de borde.

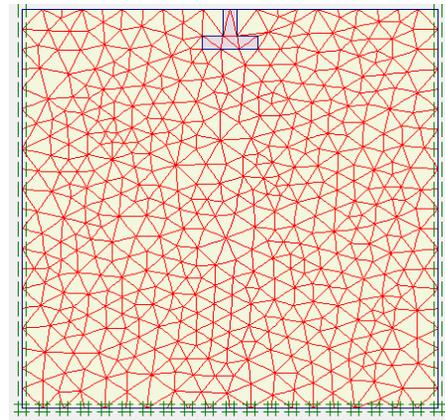


Figura 3. Imagen de Plaxis. Mallado del modelo.

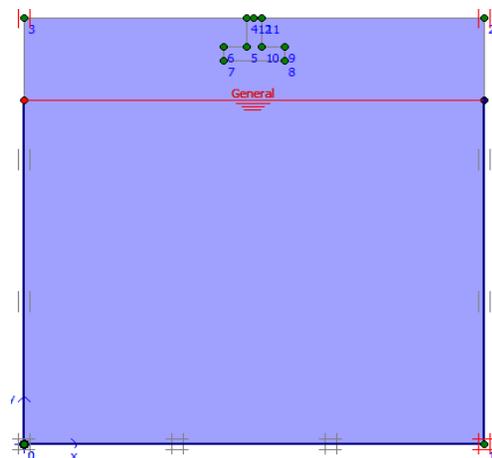


Figura 4. Imagen de Plaxis. Ubicación del nivel freático.

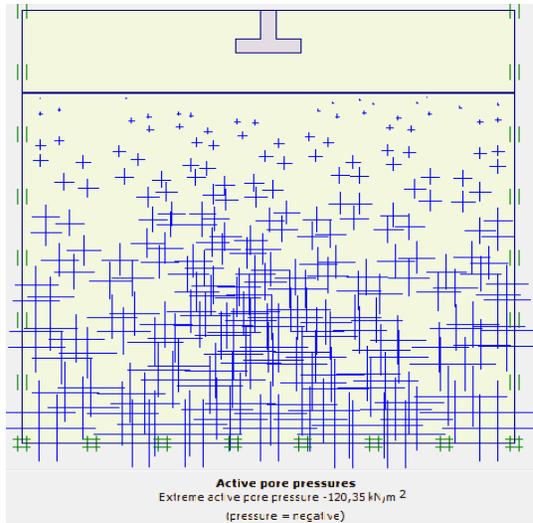


Figura 5. Imagen de Plaxis. Presión de poros inicial.

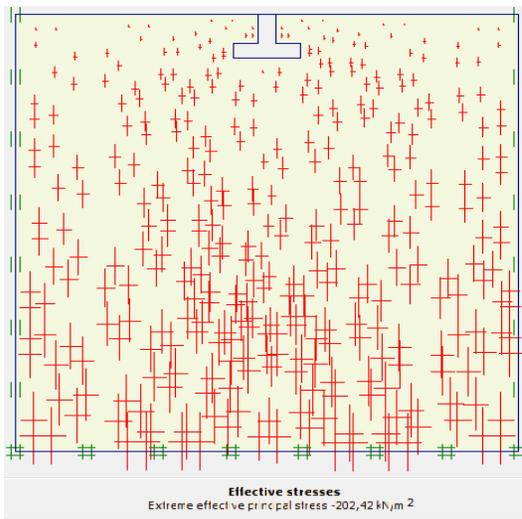


Figura 6. Imagen de Plaxis. Presión efectiva.

Análisis por etapas

Antes de iniciar el proceso de cálculo del modelo, se establece un análisis por etapas mostrado en la figura 7.

- Etapa I, fundación, vaciado del concreto de la fundación.
- Etapa II, posicionamiento de la carga vertical que soportará la fundación.
- Etapa III, FS, factor de seguridad asociado a la carga vertical.
- Etapa IV, análisis sísmico.
- Etapa V, FS, factor de seguridad asociado a la carga vertical con análisis sísmico.

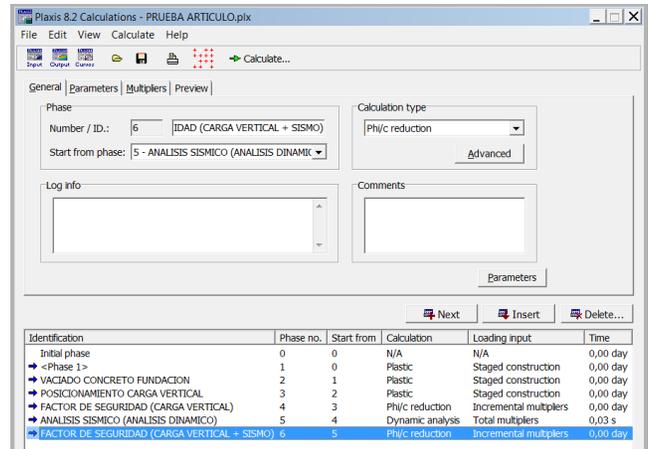


Figura 7. Imagen de Plaxis. Análisis por etapas.

Las etapas III y V corresponden al factor de seguridad asociado a la carga vertical y al análisis sísmico, respectivamente, para ello, el FS se calculó utilizando el método que se conoce como reducción de resistencia al cortante, basado en el criterio de Mohr-Coulomb se reduce gradualmente los parámetros de resistencia al corte (cohesión (C) y ángulo de fricción interna del suelo (ϕ)) provocando la falla inicial y finalmente la falla global.

En la etapa IV, análisis sísmico, se realizó en análisis dinámico en dos dimensiones y se utilizó la teoría de la elasticidad para la estimación de los asentamientos. En el estudio dinámico es importante los parámetros de amortiguamiento o disipación de la energía sísmica, en el software Plaxis para esta disipación se tienen como opciones tres maneras: amortiguamiento de los materiales, disipación por modelos de integración y condiciones de contorno (fronteras absorbentes). En esta investigación se utilizó para disipar las ondas de tensión la opción de condiciones de contorno con el criterio de falla Mohr-Coulomb, los valores de coeficientes de relajación para absorción de ondas se tomaron de las recomendaciones del programa, C1=1 y C2=0,25.

Con el fin de reducir la influencia de las condiciones de contorno al mínimo, se establecieron límites geométricos suficientemente grandes o lejanos al modelo de fundación, con la finalidad de disipar los componentes normal y cortante de las ondas y evitar que se produzca rebote de las mismas.

La velocidad de onda primaria o de presión (V_p) y secundaria o de corte (V_s) son determinadas y establecidas por el programa, utilizando los parámetros del suelo (E, ν y γ) de cada perfil.

La carga dinámica oscilatoria (cíclica) se introdujo al programa de forma pseudo-estática, como componentes de aceleración "x" y "y" expresados en términos de la aceleración normal de la gravedad "g", controlada por los multiplicadores de carga del programa, en intervalos de aplicación de 0.1s. Para el caso de los perfiles en estudio y la zona geográfica de ubicación, estos componentes pseudo-estáticos tienen un coeficiente de aceleración horizontal de 0,30g y un coeficiente

de aceleración vertical de 0,21g, de acuerdo a la Comisión Venezolana de Normas Industriales - Edificaciones Sismorresistentes (2001) y la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS).

En la figura 8 se muestra el resultado del análisis de deformación del modelo (etapa II), Figura que es similar a la generada con análisis sísmico (etapa IV), 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.

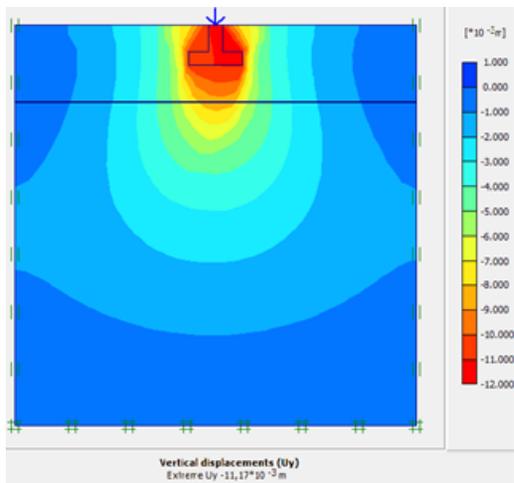


Figura 8. Imagen de Plaxis. Desplazamiento vertical. Etapa II

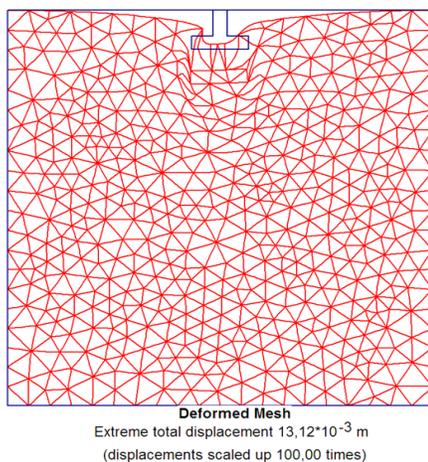


Figura 9. Imagen de Plaxis. Deformación de la malla. Etapa II.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

Luego de aplicar la metodología y, tras haber finalizado el proceso de cálculo por el método analítico tradicional comprobado, así como el procesamiento de la simulación por el método de elementos finitos, se presentan para su análisis, en la tabla 4, los resultados de asentamiento y factor de seguridad de los quince (15) perfiles de suelo.

Asentamientos

Además de la tabla 4, En la figura 10 se muestran los resultados del asentamiento de forma analítica por el método tradicional comprobado y por modelos numéricos.

En la figura 10 se puede notar que los resultados de asentamiento elástico obtenidos por el método tradicional comprobado (Schmertmann1970) y por el modelo numérico, son muy similares en el orden de magnitud, con diferencias menores al 10%. Del mismo modo, si se compara el análisis convencional con el análisis sísmico, es evidente que se incrementa la magnitud en la estimación del asentamiento hasta en un promedio del 9% aproximadamente.

Factor de seguridad

De igual forma, además de la tabla 4, en la figura 11 se muestran los resultados de factor de seguridad de forma analítica por el método tradicional comprobado (fijado en 2,00) y por modelos numéricos.

En la figura 11 se puede notar que los resultados de factor de seguridad obtenidos por el modelo numérico, son muy similares en el orden de magnitud al fijado (FS=2,00) del método tradicional, con diferencias del 10% en promedio. Del mismo modo, si se compara el análisis convencional con el análisis sísmico, los resultados entre el modelo numérico convencional y el modelo numérico con análisis sísmico el factor de seguridad disminuye hasta en un promedio del 10%.

En los casos presentados en esta investigación, los perfiles son del tipo suelo granular donde los asentamientos estimados son de poca magnitud, tanto para el FS fijado como para los FS calculados se puede notar asentamientos menores a 25mm (exceptuando al caso 13). Considerando como referencia una recomendación comúnmente utilizada sobre el FS (FS=3) para capacidad portante, los resultados obtenidos indican que para FS<3 aún se pueden obtener estimaciones de asentamientos elásticos menores a los máximos permitidos, según (Skempton y McDonald 1956) y (Polshin y Tokar 1957)

Tabla 4. Resultados para Asentamiento Elástico (Se) y Factor de Seguridad (FS). Método analítico tradicional comprobado, (Schmertmann1970) y modelos numéricos.

Ubicación perforación	Asentamiento Elástico Se(m)			Factor de Seguridad (FS)		
	Schmertmann 1970	Plaxis	Plaxis con Análisis Sísmico	Método Analítico (Fijo)	Plaxis	Plaxis con Análisis Sísmico
1	8,44E-03	8,56E-03	9,41E-03	2,00	1,90	1,71
2	8,75E-03	8,77E-03	9,65E-03	2,00	2,00	1,80
3	7,30E-03	7,41E-03	8,15E-03	2,00	1,74	1,57
4	4,96E-03	6,71E-03	7,38E-03	2,00	2,36	2,12
5	5,21E-03	8,77E-03	9,65E-03	2,00	1,80	1,62
6	1,59E-02	1,64E-02	1,81E-02	2,00	2,21	1,99
7	2,22E-02	2,27E-02	2,49E-02	2,00	1,60	1,44
8	6,74E-03	7,79E-03	8,57E-03	2,00	2,01	1,81
9	1,10E-02	1,38E-02	1,52E-02	2,00	2,00	1,80
10	4,04E-03	5,27E-03	5,80E-03	2,00	2,40	2,16
11	1,13E-02	1,50E-02	1,65E-02	2,00	2,34	2,11
12	1,00E-02	1,43E-02	1,57E-02	2,00	1,92	1,73
13	3,17E-02	3,50E-02	3,85E-02	2,00	1,43	1,29
14	6,94E-03	6,81E-03	7,49E-03	2,00	2,35	2,12
15	2,17E-03	8,14E-03	8,95E-03	2,00	2,00	1,80

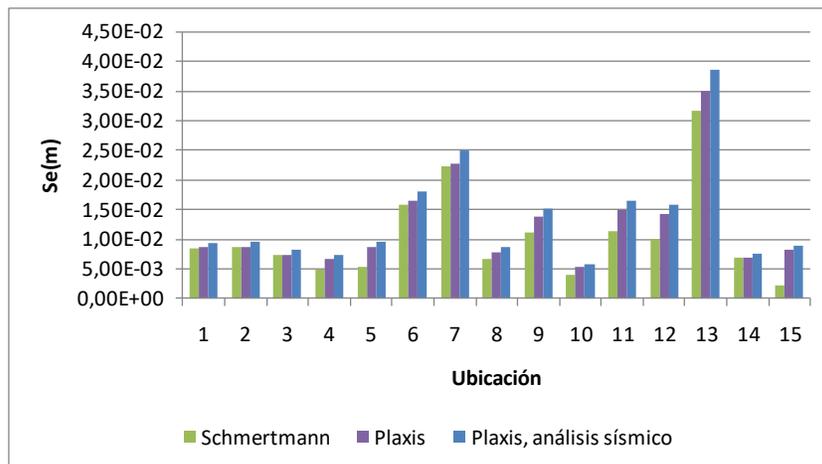


Figura 10. Asentamiento elástico. Método analítico tradicional comprobado y por modelos numéricos.

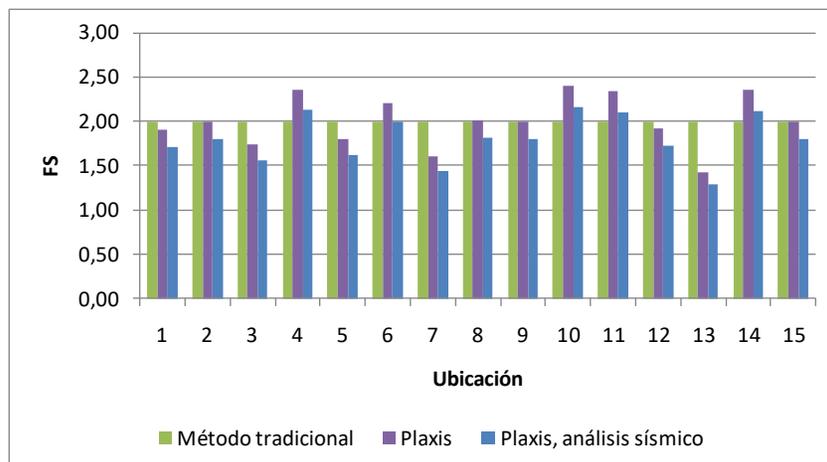


Figura 11. Factor de seguridad. Método analítico tradicional comprobado y por modelos numéricos.

CONCLUSIONES

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

Asentamientos:

A la hora de analizar el asentamiento elástico en fundaciones continuas, sometidas a sismo o no, es factible utilizar el modelo numérico planteado al igual que el tradicional, teniendo en cuenta que con ambos métodos no se superan los asentamientos máximos permitidos para el tipo de suelo y tipo de fundación estudiada, según (Skempton y McDonald 1956) y (Polshin y Tokar 1957).

Factor de Seguridad:

Por otra parte, al analizar el factor de seguridad en fundaciones continuas sometidas a sismo o no, es factible utilizar el modelo numérico planteado dado que arroja valores que garantizan la seguridad y el buen funcionamiento de las fundaciones.

Tanto en la estimación de asentamiento elástico como el cálculo de factor de seguridad, considerando la acción sísmica, es recomendable tomar en cuenta esta condición a la hora de diseñar las fundaciones, ya que los resultados demuestran la afectación sufrida.

Para finalizar, es recomendable el uso de los modelos numéricos con análisis de elementos finitos para la estimación de asentamiento elástico en fundaciones continuas, tanto como método complementario al método tradicional como sustitutivo con la prudencia que esto implica, con tanta seguridad como con el tradicional comprobado ya que los resultados son similares y con mucha precisión para el diseño, permitiendo estudiar de manera rápida varios aspectos como son asentamientos, deformaciones laterales y distribución de esfuerzos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Berrocal J. 2013. Métodos analíticos y numéricos aplicados al diseño de cimentaciones superficiales considerando su interacción con el suelo. Lima, Perú: Universidad Nacional de Ingeniería Tesis de Maestría. p. 145. <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/1395>.
- Bjerrum L. 1963. Allowable Settlement of Structures. Proceedings, European Conference on Soil Mechanics and Foundations Engineering, Wiesbaden, Alemania, vol. III, pp. 135-137.
- Bowles J. 1977. Foundation Analysis and Design. New York. 2ª. ed., McGraw-Hill.
- Briceño J, Villa J, Gómez C, Blandria N, León F, Verjel V y Maldonado M. 2020. Análisis comparativo de estabilidad en taludes utilizando métodos comprobados y modelos numéricos de simulación. Revista Ciencias, Vol. 42, No 1. Universidad de Los Andes, Venezuela, 63-70, ISSN 1316-7081, ISSN Elect. 2244-8780.
- Briceño J, Uzategui A, Blandria N, León F y Verjel V. 2020. Asentamientos en fundaciones continuas con modelos numéricos de simulación con elementos finitos. Revista Ciencias e Ingeniería, Vol. 41, No 2. Universidad de Los Andes, Venezuela, 157-166, ISSN 1316-7081, ISSN Elect. 2244-8780.
- Burland J. B. y Burbidge M. C. 1985. Settlement of Foundations on Sand and Gravel. Proceedings, Institute of Civil Engineers, parte I, vol. 7, pp. 1325-1381.
- D'Appolonia, D.J., D'Appolonia E. y Brissettee R.F. 1970. Settlement of Spread Footings on Sand: Closure. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Engineering Division, ASCE, vol. 96, no. 2, pp. 754-762.
- Delgado M. 2013. Ingeniería de Fundaciones. Fundamentos e introducción al análisis geotécnico. Santa Fe de Bogotá, Colombia. Escuela Colombiana de Ingeniería. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería. <https://libreria-del-ingeniero.myshopify.com/products/ingenieria-de-fundaciones-fundamentos-e-introduccion-al-analisis-geotecnico>.
- Fox E. N. 1948. The Mean Elastic Settlement of a Uniformly Loaded Area at a Depth below the Ground Surface. Proceedings, 2nd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Rotterdam, vol. 1, pp. 129-132.
- Juárez L. 2002. Aplicación de la mecánica de fractura a problemas de la geotecnia. México D.F, México: Instituto Politécnico Nacional. Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura. Sección de Estudios de Postgrado e Investigación. Tesis de Maestría. p. 69. https://www.researchgate.net/profile/Gelacio_Juarez-Luna/publication/260712374_APLICACION_DE_LA_MECANICA_DE_FRACTURA_A_PROBLEMAS_DE_LA_GEOTECNIA/links/02e7e5320b5ad35409000000/APLICACION-DE-LA-MECANICA-DE-FRACTURA-A-PROBLEMAS-DE-LA-GEOTECNIA.pdf
- Kardgar H. 2018. Investigation of the Bearing Capacity of Foundations on Encased Stone Columns Using Finite Element Method. International Journal of Integrated Engineering, Vol. 10 No. 1 (2018) p. 103-108. DOI: <https://doi.org/10.30880/ijie.2018.10.01.016>
- Mayne P. W. y Poulos H.G. 1999. Approximate Displacement Influence Factors for Elastic Shallow Foundations Division. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, vol. 125, no. 6, pp. 453-460.
- Mitchell J. K. y Gardner W.S. 1975. In Situ Measurement of Volume Change Characteristics. Proceedings, Specialty Conference, American Society of Civil Engineers, vol. 2, pp. 279-345.
- Nápoles J. 2016. Diseño automatizado de cimentaciones superficiales con matlab. Santa Clara, Cuba: Universidad Central Marta Abreu de las Villas. Facultad de Construcciones. Departamento de Ingeniería Civil. Tesis de Grado. p. 108. <http://dspace.uclv.edu.cu/handle/123456789/7304>.
- Peck, R.B., Hanson W.E. y Thornburn T.H. 1974. Foundation Engineering. New York, 2a edición, John Wiley & Sons.
- Polshin D.E. y Tokar R.A. 1957. Maximum Allowable Nonuniform Settlement of Structures. Londres, Proceedings, Fourth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineers, vol. 1, pp.402-405.
- Programa computacional Plaxis V.8.2. 2004. Bidimensional, editado por R.B.J Brinkgreve Delft University of Technology & PLAXIS b.v. The Netherlands.
- Richards R., Elms D.G. y Budhu M. 1993. Seismic Bearing Capacity and Settlement of Foundations. Journal of Geotechnical Engineering, American Society of Civil Engineers, vol. 119, no. 4, pp. 662-674.
- 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.
- Skempton A.W. y McDonald D.M. 1956. The Allowable Settlement of Buildings. Proceedings of Institute of Civil Engineers, vol. 5, parte III, p. 727.
- Steinbrenner W. 1934. Tafeln zur Setzungsberechnung. Die Strasse, vol. 1, pp. 121-124.
- Terzaghi K. y Peck R.B. 1967. Soil Mechanics in Engineering Practice. New York, 2a. ed., Wiley.
- Zumaquero W. 2012. Análisis de cimentaciones balsas combinadas con pilotes. Santa Clara, Cuba: Universidad Central Marta Abreu de las Villas. Facultad de Construcciones. Departamento de Ingeniería Civil. Tesis de Grado. p. 128. <http://dspace.uclv.edu.cu/handle/123456789/6307>.

..