

Consideraciones acerca del cálculo de asentamientos en pilotes.

Autor: Dr. Ing. Luis Orlando Ibañez Mora.

Facultad de Construcciones. Universidad Central de Las Villas.

Email: ibanez@uclv.edu.cu

Resumen.

Se hace una valoración de los diferentes métodos utilizados para el cálculo de asentamientos en cimentaciones sobre pilotes, incluyendo las expresiones teóricas, los enfoques de algunas normativas y la utilización del Método de los Elementos Finitos. Se realiza un breve análisis teórico de cada uno de ellos, como se procede y se comparan los resultados que con ellos se obtiene, para finalmente llegar a conclusiones de cuál es más recomendable para utilizar.

Summary

A valuation of the different methods is made used for the calculation of establishments in foundations on piles, including the theoretical expressions, the focuses of some normative one and the use of the Method of the Finite Elements. He/she is carried out a brief theoretical analysis of each one of them, like you proceeds and the results are compared that with them it is obtained, for finally to reach conclusions of which it is more advisable to use.

Introducción.

Al diseñar una cimentación indirecta mediante pilotes se hace necesario el chequeo de su capacidad soportante, a partir de las deformaciones del medio. Es decir, los asentamientos que ocurren tanto para un pilote aislado como para un grupo de pilotes deben estar dentro de los valores admisibles para la estructura de que se trate: $S < S_{\text{limite}}$.

Con la utilización creciente de pilotes de gran diámetro, no es a menudo la capacidad soportante última, sino el asentamiento de pilotes o grupos de pilotes bajo la carga de trabajo, el factor decisivo para la determinación de la carga permisible. Este criterio presenta las mismas dificultades que las fórmulas estáticas y dinámicas para el cálculo de la capacidad de carga. El problema básico consiste en determinar la distribución de tensiones en el subsuelo debido a la carga del pilote.^[4]

Este problema es teóricamente bastante complejo ya que la transferencia de carga, debido al rozamiento superficial, depende de varios factores que son difícil de establecer analíticamente con exactitud.

Análisis teórico.

Parece ser aceptable determinar los asentamientos solo bajo la carga de la punta, ya que el rozamiento superficial se moviliza a plenitud bajo deformaciones mucho menores que la resistencia en punta. Además la proporción del rozamiento superficial es despreciable para pilotes de gran diámetro, para los cuales resulta decisivo el criterio de asentamiento.^[4]

Debe advertirse que las tensiones bajo una cimentación profunda son más pequeñas que para un área cargada que descansa en la superficie del espacio semi infinito.

A continuación se verán algunas soluciones teóricas para la determinación del asentamiento en los pilotes aislados, con base matemática en la teoría de la elasticidad considerando que todo el pilote penetra en la masa de suelo.

MIDLIN (1936)^[3] plantea que la deformación W en un punto cualquiera del espacio semi infinito elástico e isotrópico debido a una fuerza interior P se calcula como:

$$W = \frac{P}{16 \cdot \pi \cdot (1 - \mu) \cdot G} \cdot \left[\frac{3 - 4 \cdot \mu}{R_1} + 8 \cdot \frac{(1 - \mu^2) - (3 - 4 \cdot \mu)}{R_2} + \frac{Z - a}{R_1^3} + \frac{(3 - 4 \cdot \mu) \cdot (Z + a)^2}{R_2^3} + \frac{6 \cdot a \cdot (Z + a)}{R_2^5} \right]$$

W - Deformación.

P - Carga

G - Módulo de segundo orden.

μ - Coeficiente de Poisson

a - distancia vertical desde la superficie del terreno al punto a analizar.

Z - distancia desde la superficie del terreno al punto a analizar.

Para la carga puntual aplicada en el interior de un espacio elástico infinito, KELVIN (1948)^[3] plantea que:

$$W = \frac{P \cdot (1 - \mu)}{8 \cdot \pi \cdot (1 - \mu) \cdot E \cdot R} \cdot \left[3 - 4 \cdot \mu + \frac{Z^2}{R^2} \right]$$

E - Módulo general de deformación.

R - distancia inclinada desde la superficie del terreno al punto a analizar.

Debe advertirse que la presión vertical pasa a ser una tracción para Z negativos, es decir, por encima del nivel de aplicación de la fuerza.

Otros autores plantean que para carga aislada vertical en el interior del semiespacio de Boussinesq:

$$W = \frac{P}{16 \cdot \pi \cdot G \cdot (1-\mu)} \cdot \left[\frac{3-4 \cdot \mu}{R1} + \frac{8 \cdot (1-\mu)^2 - (3-\mu)}{R2} + \frac{(z-a)^2}{R1^3} + \frac{(3-4 \cdot \mu) \cdot (Z+a)^2 - 2 \cdot a \cdot Z}{R2^3} + \frac{6 \cdot a \cdot Z \cdot (Z+a)^2}{R2^5} \right]$$

HEAFELI y BUCHER (1966)^[3] tienen en cuenta la distribución de presiones de carga debido al rozamiento superficial y obtienen un parámetro $\phi_c = Bc/d$ donde Bc es el diámetro equivalente de una losa circular a una profundidad Z que produce el mismo asentamiento S bajo la tensión en la punta del pilote.

Al determinar los asentamientos solo bajo la carga en punta pudiera parecer algo conservador ya que si el método de diseño geotécnico tiene en cuenta el efecto de VESIC entonces a partir de cierta profundidad (Zc) independientemente de la longitud del pilote, el aporte en punta o carga resistente en punta permanece constante, lo que haría pensar que al asentamiento le ocurriera lo mismo, lo que veremos posteriormente no es cierto debido a la distribución de presiones en función de la profundidad.

KEZDI (1964)^[4] determino que para el eje de un área circular cimentada a cierta profundidad empleando la ecuación para la tensión bajo una carga puntual el asentamiento se calcula como:

$$S = \frac{db \cdot qb}{2 \cdot Es} \cdot [I1 + 4 \cdot I2 + I3]$$

S - Asentamiento.

db - Diámetro de la base.

qb - Carga actuante.

Es - Módulo edométrico.

I1, I2, I3 : factores de influencia para la determinación de las tensiones en el eje, debajo de una cimentación profunda, circular, cargada uniformemente. Es función de la relación longitud de la cimentación (L) y diámetro de la base y la razón profundidad 2Z db

VESIC (1975)^[1] establece que el asentamiento de la cabeza de un pilote puede separarse, en el asiento debido a la compresión axial del propio pilote, asiento de la punta causado por la carga que dicha punta aplica sobre el suelo y el asiento de la punta causado por las distintas cargas transmitidas al terreno a lo largo del fuste.

$$W = W_s + W_{pp} + W_{ps}$$

W_s - asentamiento debido a la compresión axial del propio pilote en punta.

W_{pp} - asiento de la punta causado por la carga que dicha punta aplica sobre el suelo.

W_{ps} - asiento de la punta causado por las distintas cargas transmitidas al terreno a lo largo del fuste.

Constituye sin duda alguna esta expresión la mas completa e integral al analizar todos los factores que influyen en los asentamientos.

El anteproyecto de Norma ^[6] propone convertir la cimentación sobre pilote a una cimentación ficticia (cimiento equivalente) con un ancho en función del tipo de suelo y seguir la misma metodología que para una cimentación superficial ^[5] donde los asentamientos se calculan por la expresión de sumatoria de capas.

$$S = \frac{\sum H}{6} (E_{is} + 4E_{ic} + E_{ii})$$

S - Asentamiento.

H - Espesor del estrato que se analiza.

E_{is} , E_{ic} , E_{ii} - variación de deformación unitaria vertical en la parte superior, centro e inferior del estrato analizado.

$$E_i = \sigma_{zp} / E_o$$

Teniendo en cuenta los elementos planteados anteriormente se procede a realizar la modelación de un pilote aislado por el método de los elementos finitos considerando que toda la carga actuante a nivel de la cabeza del pilote, distribuyendose en las caras y punta del pilote; y un segundo caso donde se considera que solo actúa la carga en punta y esta se coloca en dicha posición.

Para la modelación por el MEF la malla de un pilote aislado, situado en un suelo homogéneo semi-infinito debe ser realizada teniendo en cuenta las recomendaciones siguientes:

- 1 Los límites verticales de la malla deben ser fijados al menos dos veces la altura o el largo (L) del pilote y el límite vertical inferior al menos dos veces el lado L debajo del punto ($3L$ desde la superficie), para que las condiciones límites de los desplazamientos no influyan sobre el comportamiento del pilote.
- 2 La interacción entre el pilote y el suelo (cara y el punto) son representados por los elementos finitos de interacción compatibles con los elementos más utilizados para describir el suelo (Elementos de interfase).
- 3 La malla de un pilote aislado debe ser relativamente estrecha cuando se acerca a las interacciones, quiere decir, a la punta del pilote y a lo largo de la cara del mismo.
- 4 La relación entre la forma (relación de la menor dimensión de un elemento con la mayor dimensión) de los elementos cerca del pilote deberá estar limitado a $1/5$.
- 5 El lado B (según la dirección horizontal) del primer elemento directamente adyacente al pilote debe ser al menos tal que $B=0.1D$ donde D es el diámetro del pilote. En la figura 1 se puede apreciar lo anteriormente expuesto.

A continuación se describen los aspectos más importantes del modelo utilizado. Los modelos o criterio de comportamiento de los materiales utilizados son para el pilote un modelo elástico, para el suelo un modelo plástico (Morh-Coulomb) y para el suelo en contacto con el pilote un modelo de superficie de deslizamiento o interface.

Las características del modelo son:

- Condiciones de contorno: En las fronteras laterales está limitado el deslizamiento horizontal y en la frontera inferior se limita el deslizamiento vertical.
- Malla utilizada: Se utiliza la malla descrita en la figura 2
- Carga aplicada: Se calcula la carga concentrada (Ver tabla 1) y esta se distribuye sobre el pilote y se aumenta progresivamente hasta alcanzar el fallo.

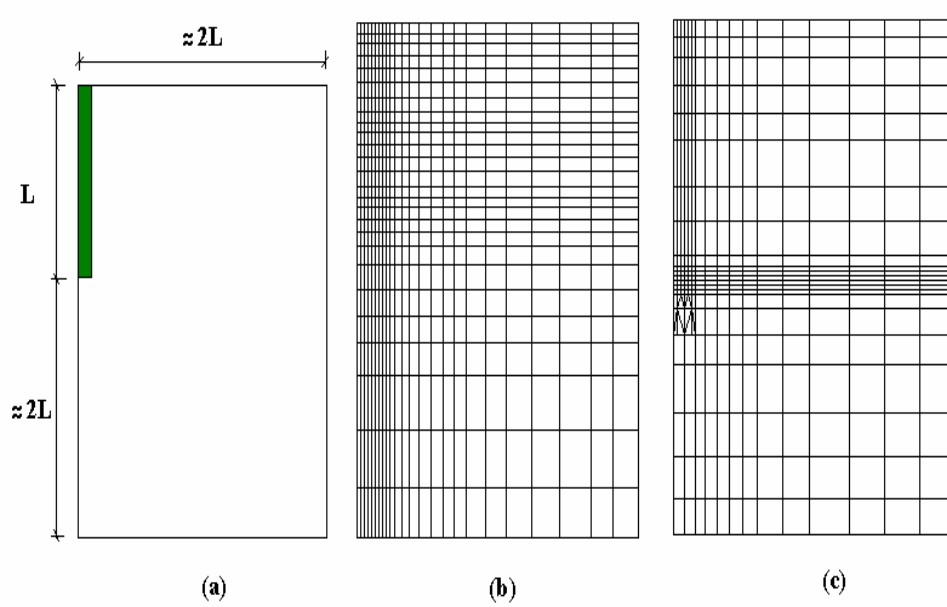


Figura 1 Malla de Elementos Finitos recomendada

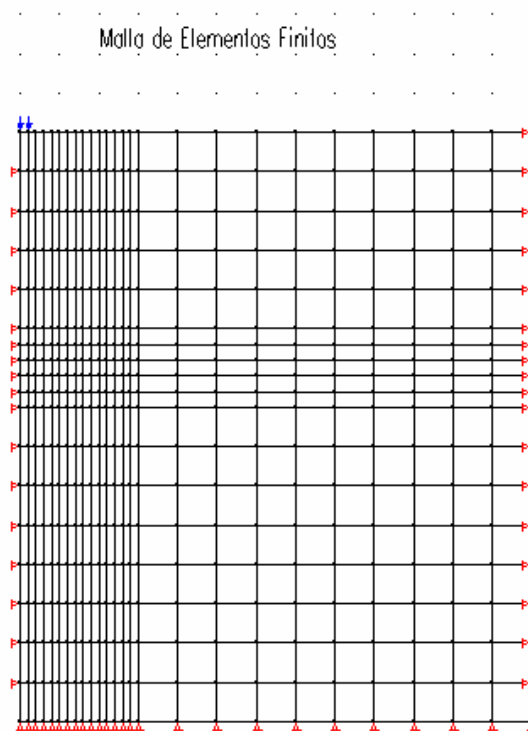


Figura 2 Malla utilizada

Cálculos.

Se realiza el diseño geotécnico de pilotes en suelo C y ϕ .

Densidad del suelo $\gamma=18.5 \text{ Kn/m}^3$

Diámetro del pilote $D = 0.8 \text{ m}$

Longitud del pilote $L = 10 \text{ m}$.

Tabla 1. Casos modelados

	Caso 1 C = 20 kPa	Caso 2 C = 25kPa	Caso 3 C = 30kPa	Caso 4 $\phi = 20^\circ$	Caso 5 $\phi = 25^\circ$
Qp (kN)	90	52	75	428	1194
Qf (kN)	387	465	535	203	356
Qt (kN)	477	517	600	611	1650

Tabla 2. Cálculo de asentamientos según la Propuesta de Norma. Cimiento equivalente(Metros)

	Módulo General de Deformación (kPa).		
Caso	5000	10000	15000
Caso 1	0.012	0.003	0.002
Caso 2	0.017	0.004	0.003
Caso 3	0.022	0.006	0.004
Caso 4	0.055	0.022	0.014
Caso 5	0.155	0.076	0.047

Tabla 3. Cálculo de asentamientos según la expresión teórica de MIDLIN.(Metros)

	Módulo General de Deformación (Kpa).		
Caso	5000	10000	15000
Caso 1	0.001	0.001	0.001
Caso 2	0.001	0.001	0.001
Caso 3	0.001	0.001	0.001
Caso 4	0.003	0.002	0.001
Caso 5	0.023	0.011	0.008

Tabla 4. Cálculo de asentamientos según la expresión teórica de KELVIN. (Metros)

	Módulo General de Deformación (kPa).		
Caso	5000	10000	15000
Caso 1	0.001	0.0001	0.001

Caso 2	0.001	0.001	0.001
Caso 3	0.001	0.001	0.001
Caso 4	0.002	0.002	0.001
Caso 5	0.006	0.003	0.002

Tabla 5. Cálculo de asentamientos según la expresión de VESIC.(Metros)

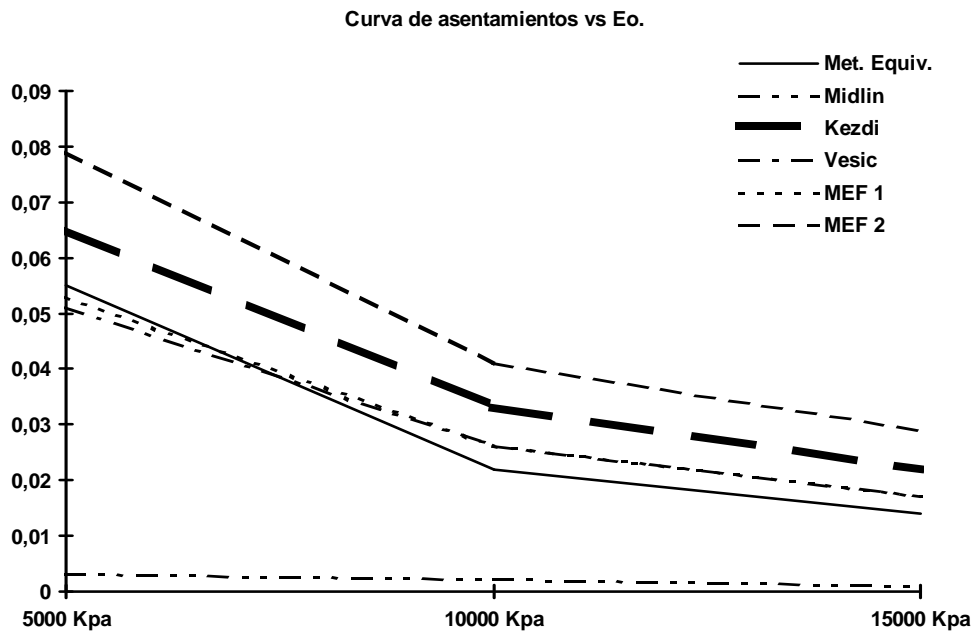
	Módulo General de Deformación (kPa).		
Caso	5000	10000	15000
Caso 1	0.070	0.035	0.023
Caso 2	0.084	0.042	0.028
Caso 3	0.097	0.048	0.032
Caso 4	0.051	0.026	0.017
Caso 5	0.105	0.053	0.036

Tabla 6. Cálculo de asentamientos modelando la carga actuante a nivel de la punta del pilote por el método de los elementos finitos. (MEF 1)(Metros)

	Módulo General de Deformación (kPa).		
Caso	5000	10000	15000
Caso 1	0.001	0.001	0.001
Caso 2	0.020	0.014	0.010
Caso 3	0.049	0.024	0.013
Caso 4	0.053	0.026	0.017
Caso 5	0.150	0.075	0.051

Tabla 7. Cálculo de asentamientos modelando la carga actuante total por el método de los elementos finitos. (MEF 2) (Metros)

	Módulo General de Deformación (kPa).		
Caso	5000	10000	15000
Caso 1	0.059	0.027	0.018
Caso 2	0.066	0.031	0.020
Caso 3	0.078	0.038	0.025
Caso 4	0.079	0.040	0.048
Caso 5	0.14	0.072	0.059



Conclusiones.

Después de analizar la gráfica anterior y los resultados obtenidos podemos llegar a las siguientes conclusiones:

- Los métodos clásicos para el cálculo de los desplazamientos en el interior de un semi espacio no son aplicables para el caso de pilotes.
- Comparando el método de Vesic con el resto, los que más se aproximan a este son el de la Propuesta de Norma y la modelación por Elementos Finitos considerando la acción solo de la carga en punta.
- La transmisión de la carga que produce asentamientos al suelo es similar considerando una cimentación ficticia como lo indica la Propuesta de Norma o modelando el problema por elementos finitos actuando solo la carga en punta.
- A medida que aumenta la capacidad de carga, aumenta el aporte en punta y aumenta los asentamientos, lo que evidencia la dependencia del asentamiento con la carga en punta.

Referencias

- 1 - Jiménez Salas, J. A. Geotécnia y Cimientos III. Segunda Parte. / José Antonio Jiménez Salas. Editorial Rueda. Madrid. 1980.
- 2 - Menzenbach, Ernest. La capacidad de carga de pilotes y grupos de pilotes. / Ernest Menzenbach. La Habana. CICT. Universidad de la Habana. 1968 - 78 pág.
- 3 - _____. La distribución de presiones en el suelo por carga impuesta. / Ernest Menzenbach. La Habana. CITC. Universidad de la Habana. 1968 -107 pág.
- 4 - Moreno, Alfredo. Método para el análisis y diseño de cimentaciones sobre pilotes. Recopilación bibliográfica. TD. Tutor: Rolando Lima. 1987. 102 pág.
- 5 - Quevedo Sotolongo. G. Diseño de Geotécnico de Cimentaciones Superficiales. Manual del Proyectista. Gilberto Quevedo Sotolongo. UCLV. 1994 - 89 pág.
- 6 - Diseño Geotécnico de Cimentaciones Sobre Pilotes. Anteproyecto de Norma.