

Modelación por elementos finitos de pilotes fundidos *in situ* en suelos friccionales

Ing. Luis O. Ibáñez Mora / Ing. Gilberto Quevedo Sotolongo
Departamento de Ing. Civil. Facultad de Construcciones. UCLV. Cuba

Resumen

En el presente trabajo se realiza una modelación por Método de los Elementos Finitos (MEF) de pilotes fundidos *in situ* sometidos a carga axial en suelos friccionales con el objetivo de evaluar el coeficiente de capacidad de carga (N_q) y el coeficiente de empuje de tierras (k_s) adyacente a las caras del pilote. Para ello se exponen criterios comúnmente usados en la bibliografía internacional y se comparan los resultados obtenidos con otras formulaciones y pruebas de carga a escala real.

Abstract

This paper deals with modeling through the Finite Element Method (FEM) of piles melted in situ that have endured an axial weight in frictional soils. The objective is to evaluate the weight capacity coefficient (N_q) and the soil pushing coefficient (k_s) around the piles sides. Some criteria, argued in the international related literature, will be presented. The results will be compared with some other formulas and weight tests made on real scale.

La capacidad de carga de una cimentación sobre pilotes viene dada por la suma de la resistencia en punta y a fricción. Para el caso del aporte en punta, la expresión que rige el cálculo establece un mecanismo de falla a través de espirales logarítmicas (Meyerhof, 1976) que siempre se cierran y se expresa como:

$$q_0 = q' \cdot N_q \cdot dsq \quad \text{Exp. 1}$$

donde:

q_0 : capacidad de carga en la punta del pilote;

N_q : factor de capacidad de carga;

dsq : factor que tiene en cuenta la profundidad dentro del estrato resistente;

q' : tensión vertical efectiva en la punta del pilote después que el pilote se carga.

Las tendencias actuales (Das, 1999; Delgado, 1999; Tomilson, 1986) coinciden al establecer que la tensión vertical efectiva en la punta del pilote (q') permanece constante a partir de una profundidad de 20 diámetros ($Z_c = 20 \cdot D$) del pilote por lo que a partir de dicha profundidad se puede tomar $q' = \gamma \cdot Z_c$.

Según los diferentes autores consultados el factor de capacidad de carga N_q es el más difícil de precisar. En algunos casos este término se obtiene de un análisis similar a los realizados por Terzaghi (1948), Meyerhof (1976) y Skempton (1951) para cimentaciones superficiales; o se deduce de resultados analíticos como los propuestos por Kay (1999). Por estas razones, en la expresión de capacidad de carga en punta el coeficiente de capacidad de carga N_q tiene en cuenta el efecto de la forma y la profundidad dentro del estrato resistente o simplemente se introduce el término dsq para evaluar dichos factores. La figura 1 muestra los valores de N_q según diferentes autores (ver Kay, 1999).

Descriptorios:

Pilotes fundidos *in situ*; Suelos friccionales; Modelación

TECNOLOGÍA Y CONSTRUCCIÓN. Vol. 19-III, 2003, pp. 09-14.
Recibido el 20/10/03 - Aceptado el 26/01/04

Para la obtención del factor N_q se emplea un programa de elementos finitos (MEF) que utiliza malla axial-simétrica (ver figura 2), con el objetivo de representar el comportamiento espacial del pilote y se considerará el suelo homogéneo. Por estas razones el efecto de forma y la profundidad dentro del estrato resistente (dsq) será evaluado en el proceso de modelación.

Para la determinación de la capacidad de carga se siguen los siguientes pasos:

1. Generación de la geometría, asignación de materiales;
2. Cálculo del estado tensional inicial $\sigma_v = \gamma \cdot Z$;
3. Cálculo del estado deformacional inicial $\sigma_h = 0$;
4. Determinación de la carga de rotura (Q_u):
 - 4.1. Determinación del aporte en punta (Q_p). Se elimina la interacción suelo – pilote en las caras del pilote, sustituyendo el material en la interface por un material nulo y se determina la carga de rotura,
 - 4.2. Determinación del aporte a fricción (Q_f). Se coloca un material nulo en la punta del pilote permitiendo que se genere a plenitud el aporte a fricción.
5. Validación de los resultados anteriores a través del cálculo de la carga de rotura (Q_u). Se calcula la carga total de rotura y se comprueba que dicho valor sea igual a la suma del aporte a fricción y en punta $Q_u = Q_p + Q_f$.

En el trabajo se realizan varios ejemplos donde se varió la longitud (L), el diámetro (D) y el ángulo de fricción interno (ϕ) del suelo obteniendo una serie de resultados que permiten evaluar el aporte en punta y a fricción del pilote aislado. Se analizaron pilotes de 5m y 10m de longitud, con diámetros de 0,4m; 0,8m y 1,2m cada uno, en un suelo friccional con ángulo de fricción interna de 25°; 30°; 55° y 40° para un total de 24 ejemplos. En todos los casos la densidad del suelo es $\gamma_{hum} = 18.5 \text{ kN/m}^3$.

Determinación del aporte en punta en suelos friccionales

Para la obtención del factor de capacidad N_q nos apoyamos en los resultados obtenidos de la modelación en la determinación del aporte en punta (ver cuadro 1).

Con el valor del aporte en punta (Q_p), considerando $Z_c = 20 \cdot D$ y despejando de la expresión 1 el valor del factor de capacidad de carga (N_q) se obtienen los valores del cuadro 2.

Ajustando los resultados anteriores a un polinomio se puede plantear que la ecuación que evalúa el término N_q viene dada por la siguiente expresión:

$$N_q = 10^{0.073 \cdot \phi - 0.575} \quad \text{Exp. 2}$$

Figura 1
Valor de N_q según diferentes autores.

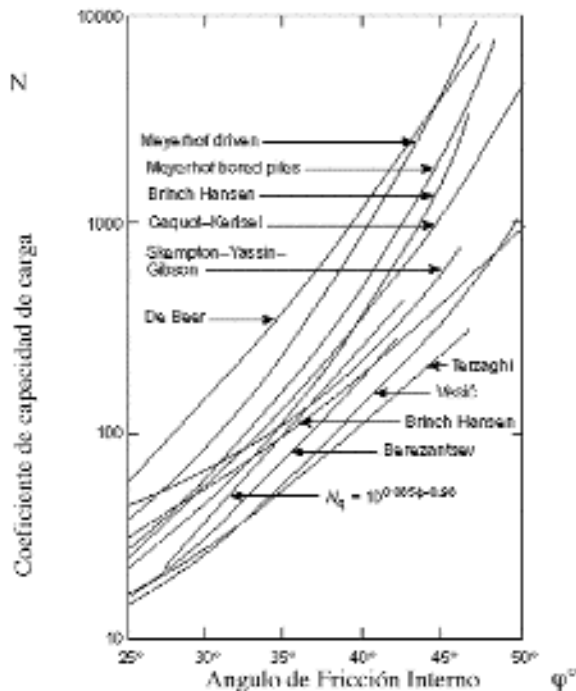
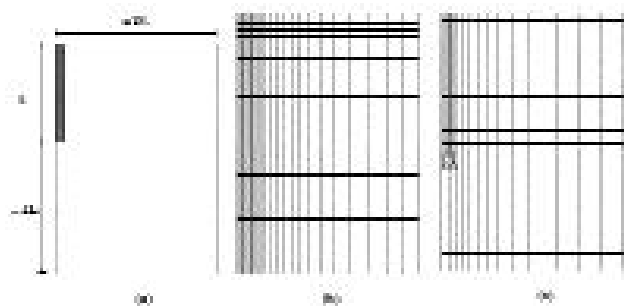


Figura 2
Malla axial-simétrica para el pilote aislado



Como ventajas de esta expresión se pueden señalar los siguientes aspectos:

- considera la dependencia del coeficiente N_q respecto al ángulo de fricción interno del suelo;
- es sencilla y de fácil uso.

Si se compara el valor de N_q con otras normativas, como se muestra en el cuadro 3, se observa que en todos los casos en la expresión propuesta se obtienen valores menores a los propuestos por Caquot-Kerisel (1964) y Meyerhof (1976) y superiores a los de Berezantzev (1961).

Existe, además, cierta similitud entre los valores propuestos por Kay (1999) y los del modelo debido principalmente a que ese autor obtiene los valores de N_q pro-

ducto de modelaciones matemáticas y ajustes a resultados de ensayos a escala real. Con respecto a los valores de Berezantzev (1961), estos se obtienen a partir de ensayos realizados y pruebas de carga que, como se conoce, dependen del lugar de emplazamiento y de dónde se introducen altos valores de seguridad. Meyerhof (1976) obtiene los coeficientes de capacidad de carga a partir de un estudio teórico de la falla del suelo, basado en la envolvente de falla de Mohr – Coulomb, donde la superficie de falla describe espirales logarítmicas que siempre se cierran, sin embargo, el análisis se hace en un estado tensional plano, sin tener en cuenta el comportamiento espacial del fenómeno analizado.

Cuadro 1
Aporte en punta (Q_p) en kN

°	Diámetro (m)	Longitud 5 metros			Longitud 5 metros		
		0,4	0,8	1,2	0,4	0,8	1,2
	25	230	910	2090	340	1850	2446
	30	450	1908	4303	737	3611	8910
	35	1165	4760	10653	1890	9320	21065
	40	2507	10100	22257	3962	20009	40861

Cuadro 2
Coeficiente de capacidad de carga N_q

°	Diámetro (m)	Longitud 5 metros			Longitud 10 metros			Nq medio
		0,4	0,8	1,2	0,4	0,8	1,2	
	25	19,79	19,57	19,98	18,28	19,89	20,29	19,99
	30	38,71	41,04	41,13	39,63	38,83	41,58	40,46
	35	100,22	102,38	101,83	101,62	100,01	100,68	101,42
	40	215,68	217,22	212,75	213,03	215,17	195,29	211,22

Cuadro 3
Comparación entre los valores de N_q

	Modelo propuesto.	Caquot – Kerisel.	Berezantzev.	Meyerhof	Kay
25	19,99	26,2	15	17	14,79
30	39,52	57	30	45	39,8
35	101,47	134	75	100	107,0
40	235,48	356	150	310	288,0

Determinación del aporte a fricción en suelos friccionales

Para la determinación del aporte a fricción en pilotes *in situ*, las bibliografías consultadas (Sowers, 1977; Jiménez, 1994) establecen que ésta depende de la fricción que se genera entre el suelo y las caras del pilote y viene dada por la expresión:

$$f_{oi} = m \cdot k_s \cdot Z \cdot \tan(\delta) \quad \text{Exp. 3}$$

Es precisamente el coeficiente de empuje de tierra (k_s) el término de mayor dificultad para precisar ya que

depende del estado de empuje de tierras que se genera en las caras del pilote.

En el cálculo del aporte a fricción en el proceso de modelación sólo se tiene en cuenta la superficie de deslizamiento y el suelo alrededor de las caras del pilote; no se tiene en cuenta el aporte en punta. Es importante señalar que esta modelación es válida para pilotes fundidos *in situ* ya que para el caso de pilotes hincados el suelo alrededor del mismo puede variar sus propiedades, lo que es muy difícil de evaluar (Shakhirev, 1996). Por otra parte, no se cuantifica la influencia del tipo de material del cual está construido el pilote, por lo que el coeficiente que evalúa el material del pilote es igual a 1 ($m = 1$). El cuadro 4 muestra los valores de aporte a fricción obtenidos.

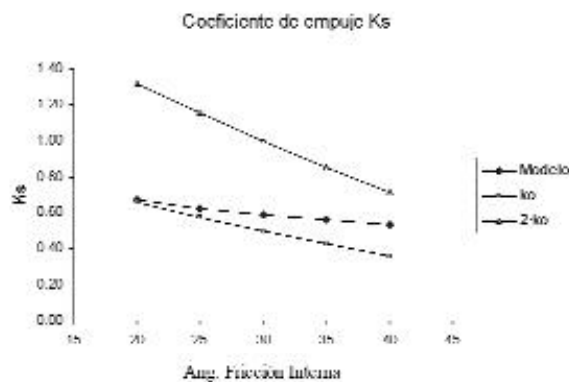
Cuadro 4
Aporte a fricción (Q_f) en kN

Diámetro (m)	Longitud 5 metros			Longitud 10 metros		
	0,4	0,8	1,2	0,4	0,8	1,2
25	85	165	260	311	680	1024
30	100	190	301	482	835	1125
35	115	225	350	671	950	1298
40	137	265	403	918	1025	1489

Cuadro 5
Empuje de tierra (k_s)

Diámetro (m)	Longitud 5 m			Longitud 10 m			k_{medio} k_s	k_{reposo} k_o	$2 \cdot k_o$
	0,4	0,8	1,2	0,4	0,8	1,2			
25	0,63	0,61	0,64	0,62	0,63	0,63	0,63	0,58	1,16
30	0,60	0,57	0,60	0,59	0,62	0,56	0,59	0,50	1,00
35	0,57	0,55	0,57	0,55	0,58	0,53	0,56	0,43	0,86
40	0,56	0,54	0,55	0,53	0,53	0,51	0,54	0,36	0,72

Figura 3
Empuje de tierra k_s versus



Despejando de la expresión 3 [$f_{oi} = m \cdot k_s \cdot Z_c \cdot \tan(\delta)$], y considerando $Z_c = 20 \cdot D$, se obtienen los valores de empuje de tierra k_s que muestra el cuadro 5.

Estos empujes de tierra son siempre superiores a los del estado de reposo (k_o) e inferiores a $2 \cdot k_o$ en coincidencia con lo planteado por Bowels (1984) y Kay (1999) ($k_o < k_s < 2 \cdot k_o$). Estos resultados muestran que el estado tensional en las caras del pilote fundido *in situ* se corresponden a un estado intermedio, algo mayor que el estado de reposo, por lo que considerar en el diseño $K_s = k_o = 1 - \tan(\delta)$ deja cierto rango de seguridad.

Se propone entonces el cálculo del aporte a fricción para pilotes *in situ* mediante la expresión:

$$f_{oi} = m \cdot k_s \cdot q_{fm} \cdot \tan(\delta)$$

donde:

$$q_{fm} = \gamma \cdot Z_c$$

Z_c - Profundidad crítica = 20·diámetros

$$k_s = (1 - \tan(\delta)) \cdot \frac{\tan(\delta)}{\tan(25)} \quad \text{Exp. 4}$$

Comparación con resultados de pruebas de carga

Para la comparación del modelo con resultados de pruebas de carga en suelos friccionales se comparan los resultados de 2 pruebas de carga consultadas en la literatura (Ayres, 1998).

P-1: Pilote de 8 metros de longitud y 0,32 metros de diámetro que atraviesa 3 estratos areno arcillosos.

P-2: Pilote cuadrados de 10 metros de longitud y 0,25 metros de ancho B, que atraviesa dos estratos de suelos arenosos.

En el cuadro 7 se presentan los valores de carga última de trabajo aplicando diferentes formulaciones.

Estos resultados demuestran la validez de la modelación utilizada. Para el caso de la formulación de Caquot-Kerisel, con el uso de elevados coeficientes de capacidad de carga (N_q) se sobrestima la capacidad de carga del pilote, por lo que no se recomienda la aplicación de esta formulación. Los valores obtenidos tanto con el modelo como con la formulación de Berezantzev, de gran aceptación a nivel internacional, se aproximan a los resultados de la prueba de carga, demostrándose la validez del modelo propuesto.

Cuadro 6
Valor del coeficiente de empuje propuesto por diferentes autores

Autor	Expresión	Valor
Das (1999)	$1 - \tan(\delta)$	0,66 ~ 0,36
Mayne y Kulhway (1991)	$(1 - \tan(\delta)) \cdot OCR^{\tan(\delta)}$	0,69 ~ 0,54
American Petroleum Institute - API (1984)	-	1,00 ~ 0,80
Modelo	$k_s = (1 - \tan(\delta)) \cdot \frac{\tan(\delta)}{\tan(25)}$	0,63 ~ 0,54

Cuadro 7
Resultados de las pruebas de carga y otras formulaciones

	Qu (kN)	Modelo (kN)	% Dif.	Berezantzev (kN)	% Dif.	Caquot (kN)	% Dif.
P - 1	423	425	1	439	4	600	30
P - 2	1050	1005	-3	1011	4	1200	50

Conclusiones

Una vez realizadas las diferentes modelaciones y con los resultados obtenidos y su comparación con las pruebas de carga se arriba a una serie de conclusiones entre las cuales se citan:

1. Se demuestra la validez de la modelación por elementos finitos de los problemas de capacidad de carga de cimentaciones sobre pilotes.

2. Se establece una expresión para el cálculo del coeficiente de capacidad N_q , de fácil uso, permitiendo cuantificar, con mayor precisión, el valor de capacidad de carga en punta para suelos friccionales.

3. El empuje de tierras en la cara del pilote (k_s) es ligeramente superior al empuje de reposo (k_o), proponiéndose utilizar la expresión:

$$k_s = (1 - \text{sen}(\varphi)) \cdot \frac{\text{sen}(\varphi)}{\text{sen}(25)}$$

Referencias bibliográficas

- API - American Petroleum Institute (1984) Código del American Petroleum Institute.
- Ayres, A. y Salles, R. (1998) Validación de la adaptabilidad de los métodos de estimación de capacidad de carga en diferentes tipos de pilotes. Procceding XI Congreso Brasileño de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica.
- Berezantzev, V. G. (1961) *Load bearing capacity and deformation of piled foundations*. V ICSMFE, Paris, vol. 2.
- Bowles, J. E. (1984) *Physical and Geotechnical Properties of Soils*. 2ª Edición. New York: Ed. Mac GrawHill Books.
- Caquot, A. and Kerisel, J. (1964) *Tratado de mecánica de suelos*. 1ª en castellano. Gauthier-Villars, Paris.
- Das, Braja M. (1999) *Principios de ingeniería de cimentaciones*. 4ª edición. Editorial Thomson. México.
- Delgado Vargas, Manuel (1999) *Ingeniería de cimentaciones. Fundamentos e introducción al análisis geotécnico*. Editorial Alfaomega. Colombia.
- Jiménez S., J. A. (1994) *Curso sobre pilotajes y cimentaciones especiales*. Tomo I y II. CEDEX. Madrid.
- Juárez B., E.; Rico R., A. (1969) *Mecánica de suelo*. Edición Revolucionaria, Tomo I y II. La Habana.
- Kay, J. N. (1999) "Ultimate capacity of driven piles in sand", *Journal Geotechnical*, pp. 65 –70.
- Kulhaway, F. (1991) *Drilled shat foundations*. 2ª edición. Foundation Engineering Handbook, Van Nostrand Reinholds.
- Meyerhof, G. G. (1976) "Bearing capacity and settlement of pile foundations. Eleventh Terzaghi lecture", *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*. GT 3.
- Shakhirev, V. (1996) "Estudio experimental del suelo durante la hinca de pilotes", *Boletín de Laboratorio de mecánica de suelo*, n° 206, nov. – dic., pp. 95-116, Francia.
- Skempton, A. W. (1951) The bearing capacity of clays. Bldg. Res. Congress 1951, Div. 1, Pt 3.
- Sowers, G y Sowers, F. (1977) *Introducción a la mecánica de suelos y cimentaciones*. Editorial Pueblo y Educación. La Habana.
- Tomilson, M. J. (1986) *Foundation design and construction*. 5ª edición. Longman.