

## Modelación por elementos finitos de pilotes en suelos cohesivos

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 sometidos a carga axial en suelos cohesivos con el objetivo de evaluar el coeficiente de capacidad de carga ( $N_c$ ) y el coeficiente de adherencia. 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 adherence coefficient. 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 se obtiene como la suma de la resistencia por la punta y por la fricción lateral en el instante de carga máxima:

$$Q_{\text{total}} = Q_{\text{punta}} + Q_{\text{fricción}} \quad \text{Exp. 1}$$

Ambos valores están basados en el estado de esfuerzos alrededor del pilote y en la forma de distribución del esfuerzo cortante que se desarrolla en la falla. La determinación del aporte en punta ( $Q_{\text{punta}}$ ) ha permitido el desarrollo de interesantes teorías, pero en la práctica se resuelven de forma sencilla.

En los suelos cohesivos se aceptan valores de nueve veces la resistencia a cortante sin drenaje, como aporte en punta. Para pilotes instalados en arcillas, un método tradicionalmente utilizado (Delgado, 1999) para el cálculo de la fricción unitaria ha sido durante muchos años el de definir un factor de adherencia  $\alpha$ , como la relación entre la adherencia ( $C_a$ ) y la resistencia al corte no drenado ( $C_u$ ), es decir:

$$\alpha = \frac{C_a}{C_u} \quad \text{Exp. 2}$$

y correlacionarlo empíricamente con  $C_u$  a partir de resultados de pruebas de carga sobre pilotes. Debido a la propensión general observada en este coeficiente de adherencia  $\alpha$  a disminuir con el crecimiento de la resistencia al corte, se han realizado varias tentativas para identificar esta dependencia por medio de la correlación entre  $\alpha$  y  $C_u$ .

### Descriptorios:

Pilotes sometidos a carga axial; Suelos cohesivos; Modelación

TECNOLOGÍA Y CONSTRUCCIÓN. Vol. 19-III, 2003, pp. 15-19.  
Recibido el 20/10/03 - Aceptado el 26/01/04

### Determinación del aporte en punta en suelos cohesivos

Para la determinación del coeficiente de capacidad de carga (**Nc**) y el factor de adherencia ( $\alpha$ ) en el trabajo se emplea un programa de elementos finitos (**MEF**) que utiliza malla axial - simétrica (ver figura 1) 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 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. Determinación de la carga de rotura (**Q<sub>u</sub>**):
  - 2.1. Determinación del aporte en punta (**Q<sub>p</sub>**). 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,
  - 2.2. Determinación del aporte a fricción (**Q<sub>f</sub>**). Se coloca un material nulo en la punta del pilote permitiendo que se genere a plenitud el aporte a fricción.
3. Validación de los resultados anteriores a través del cálculo de la carga de rotura (**Q<sub>u</sub>**). 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  $Q_u = Q_p + Q_f$ .

Se realizan 24 ejemplos, para pilotes de 5m y 10m de longitud, con diámetros de 0,4m, 0,8m y 1,2 m cada uno, en un suelo cohesivo con cohesión de 40kPa, 80kPa, 120kPa y 160kPa.

Las normativas consultadas concuerdan con expresar el aporte en punta en función de la cohesión y el diámetro del pilote:

$$q_p = C \cdot N_c \cdot d_{sc} \tag{Exp. 3}$$

donde el coeficiente **Nc** toma valores entre 6 y 12 (cf. Jiménez, 1994).

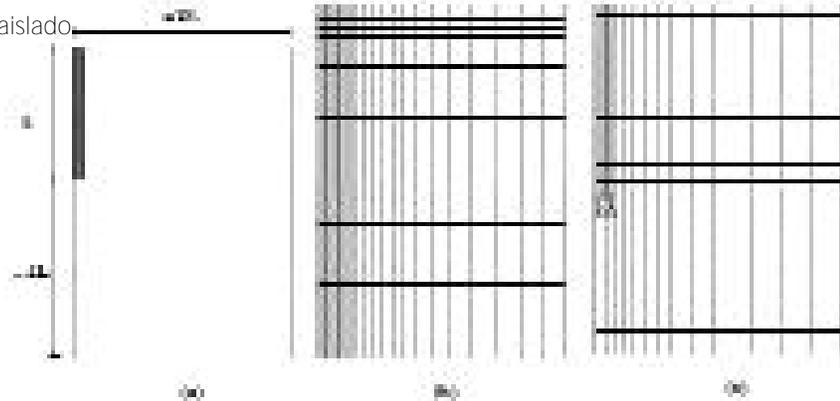
En el cuadro 1 se muestran los valores de aporte en punta obtenidos.

Despejando de la expresión 3 se obtienen los siguientes valores de **Nc** (cuadro 2).

Estos valores están en coincidencia con los propuestos en la literatura consultada (Resse, 1984; Jiménez, 1994) donde se establece que:

- Nc** = 9 para D < 0,5 metros
- Nc** = 7 para 0,5 < D < 1,0 metros
- Nc** = 6 para D > 1,0 metros

Figura 1 Malla axialsimétrica para el pilote aislado.



Cuadro 1 Aporte en punta (**Q<sub>p</sub>**) en kN

C (kPa)	Diámetro (m)	Longitud 5 metros			Longitud 10 metros		
		0,4	0,8	1,2	0,4	0,8	1,2
40		52	150	302	58	158	304
80		75	228	480	96	230	465
120		118	409	943	103	400	947
160		147	703	1149	151	700	1153

### Determinación del aporte a fricción en suelos cohesivos

Sin duda alguna el valor de fricción unitaria (**foi**) es el de mayor interés para el caso de los suelos cohesivos. Como se analizó anteriormente, por lo general este valor se obtiene de multiplicar la cohesión por un coeficiente a (**foi =  $\alpha \cdot C_u$ , método** ). En el cuadro 3 aparecen los valores de aporte a fricción obtenidos.

Despejando de la expresión: **foi =  $\alpha \cdot C_u$** , se obtienen los valores de  $\alpha$  que recoge el cuadro 4.

Estos resultados se corresponden con los encontrados en la literatura consultada (cuadro 5) y con cierto grado de aproximación a los propuestos por Reese (1984).

Se puede entonces determinar el valor de  $\alpha$  como sigue:

$\alpha = 0,90$	para $C < 40$ kPa
$\alpha = 0,58$	para $40 < C < 80$ kPa
$\alpha = 0,49$	para $80 < C < 120$ kPa
$\alpha = 0,40$	para $120 < C < 100$ kPa

Como se aprecia para valores pequeños de cohesión ( $C < 50$  kPa) todos los autores proponen  $\alpha = 0,9$ . Para el caso de suelos con cohesión superior a 50 kPa, los valores propuestos por Sowers (1977) son los mayores, notándose cierta similitud entre los valores propuestos por Reese (1984) y los obtenidos a través de la modelación lo que demuestra una vez más la validez del modelo propuesto.

**Cuadro 2**  
Coeficiente de capacidad de carga  $N_c$ .

C (kPa)	Diámetro del pilote					
	0,4		0,8		1,2	
40	10,35	11,54	7,46	7,86	6,68	6,72
80	74,6	9,55	5,67	5,72	5,31	5,14
120	7,83	6,83	6,78	6,63	6,95	6,98
160	7,31	7,51	8,74	8,70	6,35	6,37
$N_{c \text{ medio}}$	8,55		7,2		6,35	

**Cuadro 3**  
Aporte a fricción ( $Q_f$ ) en kN.

C (kPa)	Diámetro (m)	Longitud 5 metros			Longitud 10 metros		
		0,4	0,8	1,2	0,4	0,8	1,2
40	40	230	445	660	456	909	1373
80	80	282	567	918	569	1225	1799
120	120	369	736	1107	740	1503	2283
160	160	393	746	1221	850	1674	2381

**Cuadro 4**  
Coeficiente de fricción

C (kPa)	Diámetro (m)	Longitud 5 metros			Longitud 10 metros			$\alpha_{\text{medio}}$
		0,4	0,8	1,2	0,4	0,8	1,2	
40	40	0,916	0,908	0,886	0,090	0,875	0,911	0,90
80	80	0,562	0,566	0,564	0,609	0,609	0,596	0,58
120	120	0,490	0,491	0,488	0,498	0,498	0,505	0,49
160	160	0,391	0,423	0,371	0,461	0,504	0,395	0,40

### Comparación con resultados de Pruebas de carga

Para la comparación del modelo con resultados de pruebas de cargas en suelos cohesivos se comparan los resultados de 3 pruebas de cargas consultadas en la literatura (Rocha, 1998):

P-1: Pilote de 14 metros de longitud y 0,18 metros de diámetro que atraviesa dos estratos de suelos

P-2: Pilote de 6 metros de longitud y 0,3 metros de diámetro que atraviesa dos estratos arcillo limosos de baja compresibilidad.

P-3: Pilotes de 0,30 metros de diámetro que atraviesan 3 estratos de suelo.

En el cuadro 6 se presentan los valores de carga última de trabajo aplicando diferentes formulaciones.

Para el caso de los suelos cohesivos las diferencias entre la carga estimada y la de rotura son pequeñas fundamentalmente debido a la similitud en los coeficientes de capacidad de carga ( $N_c$ ) y de adherencia ( ) utilizados en los cálculos. Para el caso de la formulación propuesta

por Caquot – Kerisel (1964) se sobrestima la carga de rotura para los pilotes ensayados, debido a los altos coeficientes de capacidad de carga que utiliza. Con base en estos resultados queda demostrada la validez del modelo.

### 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. Los coeficientes de capacidad de carga ( $N_c$ ) obtenidos para el caso de suelos cohesivos se corresponden con los encontrados en la literatura consultada lo que demuestra la validez del modelo utilizado.
3. Se proponen nuevas expresiones para el cálculo del factor de adherencia ( ) en suelos cohesivos.

**Cuadro 5**  
Coeficiente

Autor	Expresión		
Sowers (1977)	$a = 0,9$	$C_u < 50 \text{ kPa}$	$C = 40 \text{ kPa} = 0,91$
Simons (1977)	$= \frac{0.3}{C_u} + 0.294$	$C_u > 50 \text{ kPa}$	$C = 80 \text{ kPa} = 0,66$ $C = 120 \text{ kPa} = 0,54$ $C = 160 \text{ kPa} = 0,48$
Reese (1984)	$a = 0,9$	$C_u < 50 \text{ kPa}$	$C = 40 \text{ kPa} = 0,90$
	$= 0,9 \cdot C_u - \frac{0,35 \cdot C_u}{(2 \cdot C_u - 1)}$	50 150kPa	$C = 80 \text{ kPa} = 0,60$ $C = 120 \text{ kPa} = 0,52$
	$a = 0,2$	$C_u > 150 \text{ kPa}$	$C = 160 \text{ kPa} = 0,42$
Modelo	$= \frac{1250 - 8,5 \cdot C_u}{1000}$	$C_u < 50 \text{ kPa}$	$C = 40 \text{ kPa} = 0,91$ $C = 80 \text{ kPa} = 0,58$
	$= \frac{768 - 2,3 \cdot C_u}{1000}$	$50 < C_u < 160 \text{ kPa}$	$C = 120 \text{ kPa} = 0,49$ $C = 160 \text{ kPa} = 0,40$

**Cuadro 6**  
Resultados de las pruebas de cargas y otras formulaciones

Ensayo	Qu (kN)	Modelo (kN)	% Dif.	Sowers (kN)	% Dif.	Caquot (kN)	% Dif.	Reese (kN)	% Dif.
P-1	262	256	-3	250	-4	341	23	291	12
P-2	240	225	-7	260	5	290	17	240	0
P-3	320	311	-3	330	2	466	32	330	-4

## Referencias bibliográficas

- Caquot, A and Kerisel, J. (1964) *Tratado de mecánica de suelos*. 1ª edición en castellano. Gauthier-Villars, Paris.
- 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.
- Reese, L. C. (1984) *Handbook on Design of piles and Drilled Shafts Under Lateral Loads*. US Department of Transp., Washington, D.C.
- Rocha, P. y Carvalho, D.(1998) Estimación de la capacidad de carga de pilotes pre moldeados a través de pruebas de carga dinámicas. Procceding XI Congreso Brasileño de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica.
- Simons, N. E. (1977) *A short course in foundation engeneering*. N. Simsoms and Menzies. Butterworths. 1997.
- Sowers, G y Sowers, F. (1977) *Introducción a la mecánica de suelos y cimentaciones*. Editorial Pueblo y Educación. La Habana.