

Artículo: Modelación por Elementos finitos de cimentaciones sobre pilotes en suelos cohesivos.

Autor: Dr. Ing. Luis O. Ibañez Mora.

Departamento de Ing. Civil. Facultad de Construcciones. UCLV. Cuba.

Dr. Ing. Gilberto Quevedo Sotolongo.

Departamento de Ing. Civil. Facultad de Construcciones. UCLV. Cuba.

*Palabras claves: Cimentación, Pilotes, Modelación.*

*Foundation, Piles, modelling.*

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 ( $\alpha$ ). Para ello se exponen criterios de gran uso en la bibliografía internacional y se comparan los resultados obtenidos con otras formulaciones y pruebas de carga a escala real.

Summary:

Presently work is carried out a modelación for Method of the Finite Elements (MEF) of subjected piles to axial load in cohesives soils with the objective of evaluating the coefficient of load capacity ( $N_c$ ) and the coefficient of adherence ( $\alpha$ ). For they are exposed it approaches of great use in the international bibliography and the results are compared obtained with other formulations and load tests to real scale.

## Introducción:

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 por 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  $C_u$ .

## Determinación del aporte en punta en suelos cohesivos.

Para la determinación del coeficiente de capacidad de carga ( $N_c$ ) 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 ( $Q_u$ ):
  - 2.1. 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,
  - 2.2. 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.
3. 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  $Q_u = Q_p + Q_f$ .

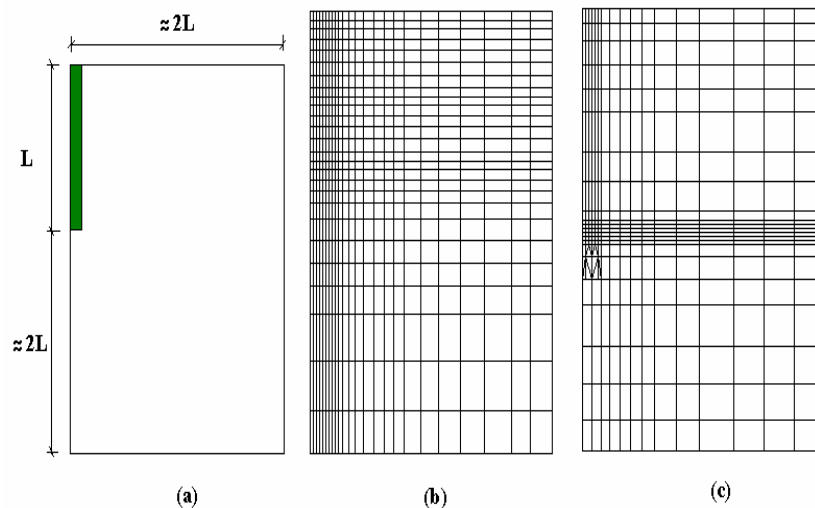


Figura 1. Malla axialsimétrica para el pilote aislado

Se realizan 24 ejemplos, para pilotes de 5 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:

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

donde el coeficiente  $N_c$  toma valores entre 6 y 12 [Jiménez(1994)].

En la tabla 1 se muestran los valores de aporte en punta obtenidos:

		Longitud 5 metros.			Longitud 10 metros.		
C (kPa)	Diámetro (m)	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

Tabla 1. Aporte en punta ( $Q_p$ ) en kN.

Despejando de la expresión 3 se obtiene los siguientes valores de  $N_c$ :

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	7.46	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	

Tabla 2. Coeficiente de capacidad de carga  $N_c$ .

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

$N_c = 9$  para  $D < 0.5$  metros

$N_c = 7$  para  $0.5 < D < 1.0$  metros

$N_c = 6$  para  $D > 1.0$  metros

### Determinación del aporte a fricción en suelos cohesivos.

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

		Longitud 5 metros.			Longitud 10 metros.		
C (kPa)	Diámetro (m)	0.4	0.8	1.2	0.4	0.8	1.2
	40	230	445	660	456	909	1373
	80	282	567	918	569	1225	1799
	120	369	736	1107	740	1503	2283
	160	393	746	1221	850	1674	2381

Tabla 3. Aporte a fricción ( $Q_f$ ) en kN.

Despejando de la expresión  $f_{oi} = \alpha \cdot C_u$  se obtienen los siguientes valores de  $\alpha$ :

C (kPa)	Diámetro (m)	Longitud 5 metros.			Longitud 10 metros.			$\alpha$ medio
		0.4	0.8	1.2	0.4	0.8	1.2	
40		0.916	0.908	0.886	0.090	0.875	0.911	0.90
80		0.562	0.566	0.564	0.609	0.609	0.596	0.58
120		0.490	0.491	0.488	0.498	0.498	0.505	0.49
160		0.391	0.423	0.371	0.461	0.504	0.395	0.40

Tabla 4. Coeficiente de fricción  $\alpha$ .

Estos resultados se corresponden con los consultados en la literatura consultada (Tabla 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  $120 < C < 160$  kPa

Autor.	Expresión.	$\alpha$ .
Sowers(1977), Simons (1977).	$\alpha = 0.9$ $C_u < 50$ kPa	$C = 40$ kPa $\alpha = 0.91$
	$\alpha = \frac{0.3}{C_u} + 0.294$ $C_u > 50$ kPa	$C = 80$ kPa $\alpha = 0.66$ $C = 120$ kPa $\alpha = 0.54$ $C = 160$ kPa $\alpha = 0.48$
Reese (1984)	$\alpha = 0.9$ $C_u < 50$ kPa	$C = 40$ kPa $\alpha = 0.90$
	$\alpha = 0.9 \cdot C_u - \frac{0.35 \cdot C_u}{(2 \cdot C_u - 1)}$ $50 < C_u < 150$ kPa	$C = 80$ kPa $\alpha = 0.60$ $C = 120$ kPa $\alpha = 0.52$
	$\alpha = 0.2$ $C_u > 150$ kPa	$C = 160$ kPa $\alpha = 0.42$
Modelo.	$\alpha = \frac{1250 - 8.5 \cdot C_u}{1000}$ $C_u < 50$ kPa	$C = 40$ kPa $\alpha = 0.91$ $C = 80$ kPa $\alpha = 0.58$
	$\alpha = \frac{768 - 2.3 \cdot C_u}{1000}$ $50 < C_u < 160$ kPa	$C = 120$ kPa $\alpha = 0.49$ $C = 160$ kPa $\alpha = 0.40$

Tabla 5. Coeficiente  $\alpha$ .

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.

### 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 este caso se ensayaron 5 pilotes de entre 8 y 9 metros de longitud (E1, E2, E3, E4 y E5)

En la tabla 6 presentan los valores de carga última de trabajo aplicando diferentes 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

Tabla 6 Resultados de las pruebas de cargas y otras formulaciones.

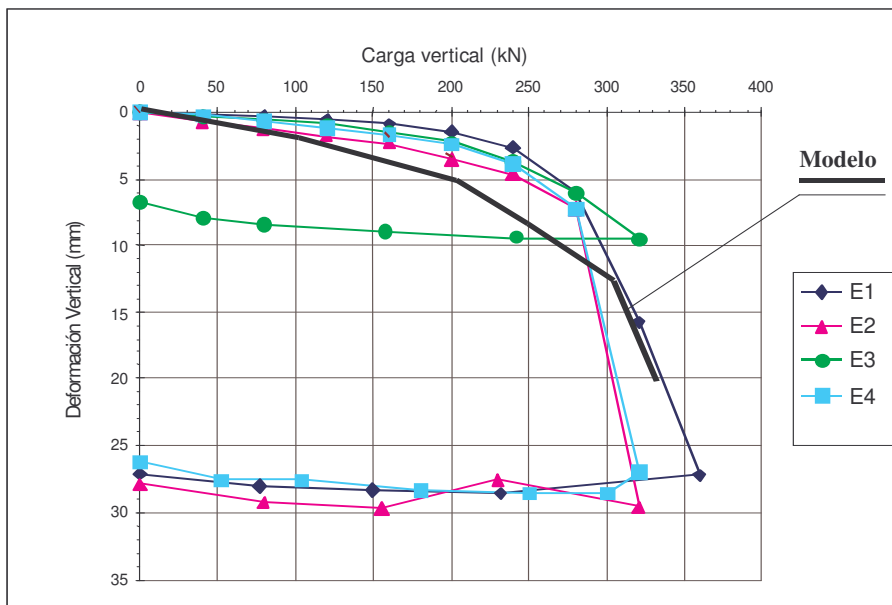


Figura 2. Curva carga vs. deformación (Prueba de carga). E1, E2, E3, E4 representan pilotes de igual diámetro y diferentes longitudes.

Para el caso de los suelos cohesivos las diferencias entre la carga estimada y la de rotura son pequeñas dado fundamentalmente por la similitud en los coeficientes de capacidad de carga ( $N_c$ ) y de adherencia( $\alpha$ ) 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. En base a 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 arriban 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 ( $\alpha$ ) en suelos cohesivos.

### **Bibliografía:**

1. Caquot, A and Kerisel, J. (1964): Tratado de Mecánica de Suelos. 1ed en castellano. Gaunthier-Villars, Paris, France.
2. Delgado M. (1999): Ingeniería de Cimentaciones. Fundamentos e introducción al análisis geotécnico. Manuel Delgado Vargas. Editorial Alfaomega. Colombia 1999. 500 pág.
3. Jiménez S., J. A. (1994): Curso sobre pilotajes y cimentaciones especiales. CEDEX. Madrid. Tomo I y II.
4. Reese, L.C. (1984) Handbook on Design of piles and Drilled Shafts Under Lateral Loads. US Department of Transp., Washington, DC, USA
5. Rocha, P.; Carvalho, D.(1998): Estimación de la capacidad de carga de pilotes pre moldeados a través de pruebas de carga dinámicas.

Proceeding XI Congreso Brasileño de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotecnica, p. 1351-1357.

6. Simons, N.E. (1977): A short course in foundation engineering. N. Simons and Menzies. Butterworths. 1997
7. Sowers, G y Sowers F.(1977): Introducción a la mecánica de suelo y cimentaciones. La Habana. Editorial Pueblo y Educación, 677 p.