

Estudio de la Fricción negativa en Pilotes. Aplicación en un problema Real.

Autor: Dr. Ing. Luis O. Ibañez Mora
Departamento de Ing. Civil. Facultad de Construcciones. UCLV. Cuba.
Email: ibanez@uclv.edu.cu

Palabras claves: Cimentación, Pilotes, Modelación, Fricción negativa.

Resumen:

Se presenta una propuesta de modelo numérico para la modelación de la fricción negativa en cimentaciones sobre pilotes. Se verifica dicho modelo en la aplicación a un problema real de la cimentación del estribo de un puente, arrojando resultados satisfactorios desde el punto de vista ingenieril

Introducción.

El fenómeno de la fricción negativa puede describirse como la acción de una nueva carga a lo largo del fuste debido a la consolidación del suelo adyacente a la cara del pilote. Como los pilotes se moverán menos que el terreno circundante, este tenderá a “colgarse” de sus fustes, induciendo en aquellos unas tensiones que pueden considerarse producidas por un cierto rozamiento de signo contrario al resistente.

Para esta situación la condición de diseño será:

$$N_{\text{pilote}} + Q_{\text{fricción negativa}} < Q_{\text{pilote}}$$

Donde:

N_{pilote} : Carga actuante a nivel de pilote

$Q_{\text{fricción negativa}}$: Fricción negativa que se genera en la cara del pilote

Q_{pilote} : Capacidad de carga del pilote aislado

Este efecto se produce cuando el pilote está apoyado en roca y atraviesa un estrato muy compresible. Ramón Barbey, considera que existe fricción negativa cuando se cumplen simultáneamente que la cohesión del suelo (C_u) es de 12.50 a 22.5 kPa y el ángulo de fricción interna (ϕ) menor a 10° .

La Propuesta de Norma Cubana (1989) considera que la fricción negativa se produce en arcillas muy blandas ($C_u < 15\text{Kpa}$), cieno o relleno reciente que se consolida. Para enfocar este problema se han desarrollado dos tendencias, una en que se tiene en cuenta el espesor del estrato consolidable, como las dos vistas anteriormente, y otra tendencia donde se realiza un análisis evaluando el rozamiento ocurrido por la consolidación del suelo y el desplazamiento del pilote [Wong(1995)(1996)]. Oteo (1992) y Jiménez (1994) hacen un detallado estudio sobre las condiciones y forma en que se genera la fricción negativa y que espesor del estrato genera realmente fricción negativa. Evidentemente, siempre que el suelo atravesado por los pilotes sea muy consolidable, la presencia de la fricción negativa ha de tenerse en cuenta. Sin embargo, los métodos vistos anteriormente definen el problema para diferentes condiciones de suelo (características mecánicas) sin tener en cuenta la posible relación entre la consolidación del suelo en el fuste y el desplazamiento del propio pilote, así como la consolidación debida a la disminución del manto freático. En una modelación más detallada, se podrían evaluar los aspectos antes señalados, como también la inclusión del pilote en un

terreno estratificado, donde estratos poco deformables se desplacen también por apoyarse sobre estratos muy consolidables.

Desarrollo.

La fricción negativa, como ya se analizó, no es más que una carga adicional a resistir por la cimentación al “colgarse” el suelo consolidable en las caras del pilote. Sin embargo, la mayoría de los enfoques evalúa la fricción negativa sin tener en cuenta la relación entre la consolidación del suelo y el desplazamiento o acortamiento del pilote, considerando que todo el espesor del estrato compresible genera fricción negativa. El objetivo del modelo presentado estará dirigido entonces a determinar a que profundidad los desplazamientos del pilote y del suelo son iguales, o lo que es lo mismo, a que profundidad es que se comienza a generar la fricción negativa.

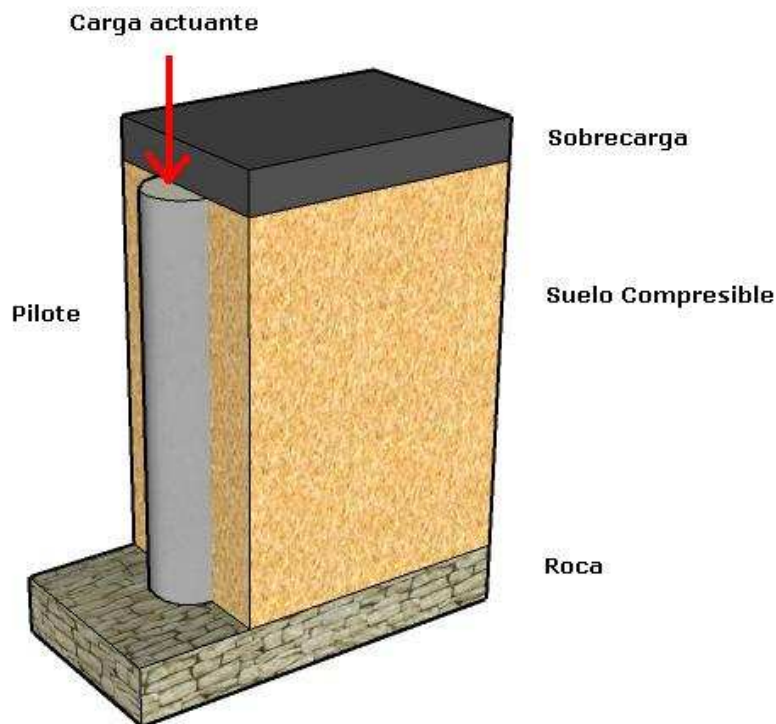


Figura 1. Esquema del modelo utilizado.

Para pequeños valores de deformación del pilote, todo el espesor de suelo genera fricción negativa. En la medida en que aumenta la deformación del pilote por la acción de la carga externa, los desplazamientos de este serán mayores que los del suelo, por lo que el espesor que genera fricción negativa disminuye. Estos resultados demuestran que el valor de fricción negativa que se genera en las caras del pilote depende en gran

medida de la deformación del mismo, del relleno existente (sobre carga) y del suelo consolidable.

Por lo complicado que resulta establecer un criterio práctico para el cálculo de la longitud negativa se propone, para aquellos casos que por su importancia lo requiera, determinar de forma independiente la deformación del pilote y la de los estratos de suelo que lo rodean y obtener posteriormente la profundidad a partir de la cual ambas deformaciones son iguales ($S_{pilote} = S_{suelo}$).

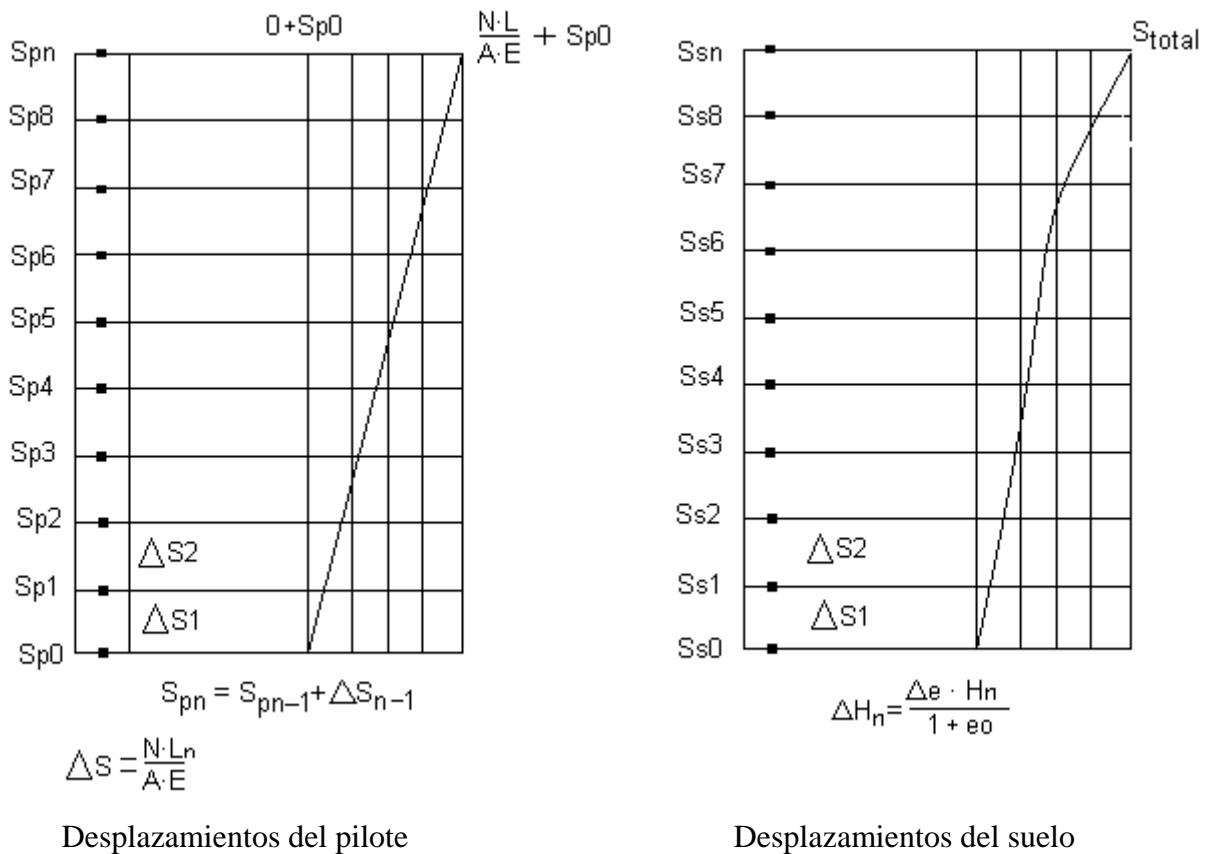


Figura 2. Esquema del proceso de cálculo.

En este caso es recomendable para el análisis dividir el pilote y el suelo en franjas de un metro y determinar los desplazamientos en cada punto (Ver figura 2). Para el caso del pilote el desplazamiento en un punto i viene dado por la expresión:

$$S_{p_i} = S_{p_{i-1}} + \Delta S_n$$

Donde:

- S_{p_i} – desplazamiento del pilote en el tramo i .
- $S_{p_{i-1}}$ - desplazamiento del pilote en el tramo anterior.

$$\Delta S_n - \text{desplazamiento en el tramo analizado } \Delta s_n = \frac{N \cdot L_i}{E \cdot A}$$

Para caso el suelo se sigue un procedimiento similar:

$$S_{si} = S_{S_{i-1}} + \Delta H_i \qquad \Delta H_i = \frac{\Delta e \cdot H_i}{1 + e_o}$$

Finalmente se procede a determinar la profundidad donde se igualan los desplazamientos del pilote y de los estratos de suelo que lo rodean ($S_{p_i} = S_{s_i}$). En el caso de que los desplazamientos del pilote sean mayores que los del suelo ($S_{pilote} > S_{suelo}$) se puede considerar que no se genera la fricción negativa (Figura 3.1), en caso contrario ($S_{pilote} < S_{suelo}$), se determina la profundidad a la que se igualan los desplazamiento (Figura 3.2) y si cumple en la punta del pilote que el desplazamiento es mayor que el del suelo, se puede tomar toda la longitud del pilote para el cálculo de la fricción negativa.

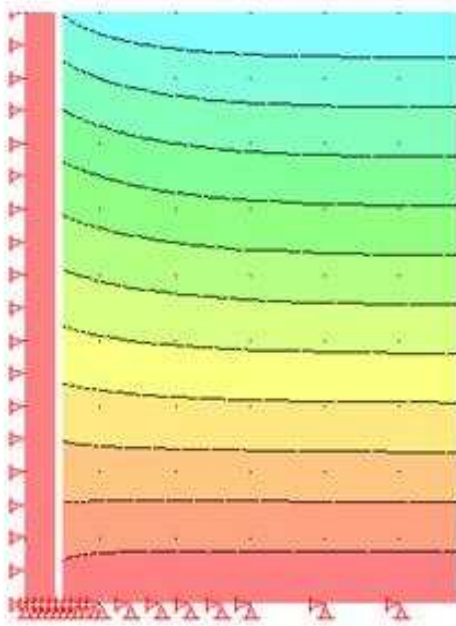


Figura 3.1 Estratos de suelo que se cuelgan del pilote (Presencia de la fricción negativa).

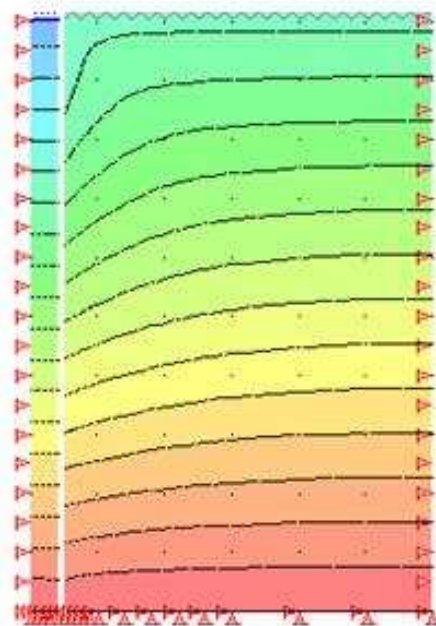


Figura 3.2 Pilote que se desplaza dentro de la masa de suelo (No existe fricción negativa).

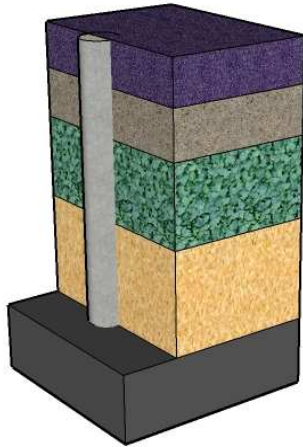


Figura 3.4 Suelo alrededor del pilote

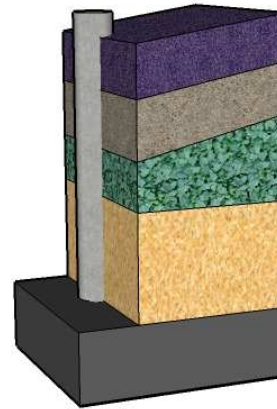


Figura 3.5. Suelo que se cuelga sobre el pilote

Aplicación. Cimentación del Viaducto de Matanzas en su III etapa.

La III etapa del viaducto de Matanzas no es más que un puente sobre la bahía del mismo nombre el cual servirá de enlace entre la Vía Blanca y la Autopista Varadero, mejorando el tráfico entre la capital del país y la ciudad de Varadero. Por las características geológicas de la zona, y la imposibilidad de utilizar otro tipo de cimentación, se decide la utilización de pilotes de acero que serán hincados en los estratos arcillosos de la bahía y para el caso de los estribos, sobre el relleno existente, se propone el uso de pilotes Benoton de hormigón armado.

Por la magnitud de la carga de trabajo (2500 kN por pilote, según proyecto) y la complejidad geológica, el proyecto preliminar de la cimentación trajo como resultados pilotes de 1 a 1.2 metros de diámetro y hasta 50 metros de longitud, no obturados en punta lo que tiene aparejado serios problemas constructivos relacionados con la manipulación e hincado de los pilotes sobre el mar, así como las limitaciones con los equipos de hincado existentes. Con la aplicación del modelo anterior se pretende dar solución al diseño de los pilotes en la zona del estribo, analizando los efectos de la fricción negativa

Las características geológicas de la zona se caracterizan por la presencia de un estrato de cieno de 15 metros de espesor, por debajo del cual yacen estratos de arcillas y arcillas arenosas. (Ver tabla 3)

Zona del estribo.						
No	Suelo	Descripción	Espesor (m)	N _{stp}	C (kPa)	φ°
	Relleno	Relleno existente	0-2	-	-	20
I	Cieno	Cieno gris fluido sin resistencia a cortante	2-17	0	-	-
II	CH	Arcilla de alta plasticidad (CH)	17-19	8-15	86	-
III	SC-CH	Alternancia de arenas arcillosas (SC), arcillas francas y limosas (CH) y arcillas pobres limosas y/o arenosas (CL)	19-33	15- 5	105.3	-
IV	CH	Arcilla de alta plasticidad con limo y arcilla	33- 38	15- 6	184.3	-
VI	SC - CL	Arcillas pobres arenosas y arenas arcillosas (SC y CL)	38-60	30- 39	225	-

Tabla 3. Características geológicas del estribo.

En todos los diseño la eficiencia de grupo es igual a uno ($\xi=1$), por ser pilotes hincados en suelos cohesivos con espaciamientos mayores a 3 diámetros y Cohesión mayor a 100kPa [Sower(1977), Propuesta de Norma Cubana (1989)]. Por proyecto se considera que todo el estrato de cieno se cuelga sobre el pilote, generando una fricción negativa de 700 kN. Modelando el comportamiento de este estrato de cieno bajo la acción de la sobrecarga que genera el relleno existente en el estribo (2 metros de espesor) se determinó que en solo 10 metros el desplazamiento del cieno es mayor que el del pilote por lo que la longitud negativa es $L_{negativa} = 10$ metros que trae como resultado una fricción negativa de 453 kN. Una vez determinada la fricción negativa y rediseñado el pilote se obtiene los siguientes resultados (tabla 4):

Rediseño de los pilotes del estribo (D = 1metro).							
	Modelo Propuesto ^A		Propuesta de Norma ^B		Resse ^A		Proyecto inicial
Longitud (m)	47	50	49	50	48	50	50
Q _{ROTURA} (kN)	6257	6725	6331	6211	6245	6687	6272
Q _{DISEÑO} (kN)	2503	2690	2435	2388	2498	2675	2509

Tabla 4. Diseño de los pilotes a través de diferentes formulaciones.

A-FS=2.5, B- Estados Limites.

Teniendo en cuenta los resultados de la tabla 4 se decide utilizar pilotes de 1 metro de diámetro y 47 metros de longitud lo que representa una disminución de $4.71m^3$ de hormigón por pilote a construir en el estribo del puente.

Conclusiones

Los resultados de la tabla 4 demuestran que existen potencialidades en la racionalización del proyecto, y la factibilidad de la aplicación de la modelación matemática en el cálculo de la fricción negativa. Se comprueba que no todo el suelo alrededor del pilotes genera fricción negativa, sino solo aquel en el cual los desplazamientos son mayores a los que sufre el pilote debida a las cargas externas.

Bibliografía

1. Barbey S., R.: Mecánica de suelos. s.l., s.n., s.a. p. 281-318.
2. Jiménez S., J. A. (1986): Geotecnia y Cimientos. Editorial Rueda. Madrid. Tomos II y III.
3. Ministerio de Educación. Anteproyecto de Norma Cubana (1989): Cimentaciones sobre pilotes. Métodos de cálculo para el dimensionamiento geotécnico. Ministerio de Educación. Cuba. Editorial Pueblo y Educación, 50 p.
4. Oteo, C. (1992): Resistencia y deformación de los grupos de pilotes verticales con especial consideración en los esfuerzos alternativos. Tesis Doctoral. ETS Caminos, Canales y puertos. Universidad Politécnica de Madrid.
5. Sowers, G y Sowers F. (1977): Introducción a la mecánica de suelo y cimentaciones. La Habana. Editorial Pueblo y Educación, 677 p.
6. Wong. K.S and Tech (1995): “Negative skin frictions and piles in layerd soil deposit”, Journal of Geotechnical and goevironmental. Engineering American Society of Civil Engineers, Vol. 121, no 6, pp 475 – 465