

Evaluación de ensayos de carga en pilotes a tracción y compresión

J. L. JUSTO (*)
E. JUSTO (**)
R. ROMERO (***)
J. CANDELA (****)
P. SOLA (*****)

RESUMEN. Se presenta un método elasto-plástico basado en la aproximación de Steinbrenner para el cálculo de pilotes. Se demuestra que el método puede representar de un modo aceptable un ensayo de carga a compresión con ciclos de carga y de descarga.

EVALUATION OF TENSILE AND COMPRESSION LOADING TESTS IN PILES

ABSTRACT. An elastic-plastic method based on the Steinbrenner approximation for pile calculation is presented here. The method is shown to give suitable representation of a compression loading test with loading and unloading cycles.

Palabras clave: Método de ensayo; Carga; Pilotes; Tracción; Compresión.

1. INTRODUCCION

La aplicación de las ecuaciones de Mindlin en los problemas de transferencia de carga en pilotes fue iniciada por D'Appolonia y Romualdi (1963).

Han realizado importantes avances en esta dirección Salas y Arrechea (1965), Thurman y D'Appolonia (1965), Poulos y Davis (1968), Mattes y Poulos (1969) y Butterfield y Bannerjee (1971).

La mayoría de estos estudios se refieren a pilotes en un medio continuo, homogéneo y elástico. Los estudios realizados por D'Appolonia y Romualdi se refieren a pilotes cuya punta se sitúa en un medio incomprensible, y Thurman y D'Appolonia diferencian distintos módulos de elasticidad para el fuste y la punta. El problema de un pilote resistente por la punta es desarrollado completamente por Poulos y Mattes (1969), con algunas suposiciones demasiado simplificadas.

Bannerjee y Davis (1978) resuelven con un método aproximado el problema de un pilote en un suelo elástico cuyo módulo de elasticidad aumenta linealmente con la profundidad.

Por supuesto, el método de transferencia de cargas se puede usar para suelos estratificados (véase Lee, 1991; Chin y Poulos, 1991), ya que no considera interacción, si bien las limitaciones del método de transferencia de cargas han sido discutidas por Poulos y Davis (1980) y Poulos (1989).

Lee et al. (1987) obtuvieron una solución rigurosa para un sistema de dos estratos, pero sólo en condiciones elásticas. Las tensiones se suponen uniformemente distribuidas sobre la sección transversal del pilote.

Sin duda, el futuro para la solución de un pilote en un suelo estratificado está en la teoría de la capa finita (véase Small y Booker, 1984 y 1986), habiendo sido presentadas soluciones para un pilote por Lee y Small (1991). El método, en su formulación actual, tiene algunas limitaciones en la suposición de una presión uniforme en la base y sólo para condiciones elásticas. Además, su desarrollo matemático puede ser demasiado complicado para algunos.

Finalmente, los métodos de elementos finitos son herramientas poderosas, puesto que permiten, por ejemplo, considerar la no resistencia a tracción de algunos estratos, su comportamiento plástico real, estratificación, así como condiciones especiales en los límites (véase Chow y Smith, 1982; Law, 1982). Sin embargo, todavía estos métodos requieren un considerable tiempo para preparación de datos y cálculo y es importante recordar que son métodos aproximados, que no funcionan en algunas circunstancias especiales o para dimensiones atípicas de los elementos.

Por todo esto, nosotros creemos que hay todavía espacio para un método simple, continuo, elasto-plástico e incremental, basado en la aproximación de Steinbrenner y en las ecuaciones de Mindlin. Esta simplicidad es importante cuando extendemos el análisis a grupos de pilotes.

2. DESCRIPCION DEL NUEVO METODO

El nuevo método se basa en la aproximación de Steinbrenner (Steinbrenner, 1934).

La aproximación de Steinbrenner se ha usado para determinar el asiento de un pilote en un suelo de profundidad finita o el asiento producido en un pilote por estratos infra-yacentes (véase Poulos y Davis, 1980), pero curiosamente

(*) Director del Departamento, Departamento de Mecánica de Medios Continuos, Universidad de Sevilla.

(**) Estudiante colaborador, Departamento de Mecánica de Medios Continuos, Universidad de Sevilla.

(***) Arquitecto, Departamento de Mecánica de Medios Continuos, Universidad de Sevilla.

(****) Ingeniero de Caminos, Terratest.

(*****) Ingeniero de Caminos, Geocisa.

hasta ahora no ha sido utilizado para estudiar la transferencia de cargas a lo largo del pilote.

El método también recoge muchas de las características positivas de los métodos utilizados anteriormente, a excepción del efecto de la heterogeneidad en los esfuerzos. Las hipótesis se pueden resumir como sigue:

1. Se asimila el terreno a un semiespacio estratificado horizontalmente, isótropo y lineal-elástico.
2. El material del pilote se supone lineal-elástico y homogéneo.
3. Se permite la existencia de esfuerzos iniciales, por ejemplo, fuerzas residuales en el fuste y punta producidos por la hincada del pilote.
4. Al contrario de otros métodos elasto-plásticos citados anteriormente (véase Davis y Poulos, 1980), el método es incremental, en el sentido de que en cada paso el sistema se resuelve para un aumento de carga. Esto permite cambios en las constantes elásticas.
5. Se permite la plastificación del contacto pilote-suelo.
6. Se supone que la distribución de las tensiones transmitidas por el pilote al terreno corresponde a las ecuaciones de Mindlin para un semiespacio homogéneo y elástico con el coeficiente de Poisson que corresponde al punto donde aparece el esfuerzo, a pesar de la existencia de estratificación. Por tanto, la plastificación se restringe al contacto pilote-suelo. Esta hipótesis se puede aceptar excepto, quizás, cuando el terreno en la punta es mucho más rígido que el suelo en el fuste. En este caso, se debería seguir la teoría de la capa finita o, alternativamente, el método aproximado de Poulos y Mattes (1969).
7. La omisión de la influencia de esfuerzos radiales en el fuste y cortantes en la punta está justificada, como describen Poulos y Davis (1980). Las hipótesis 3 y 4 permiten considerar diferentes constantes elásticas durante la carga, descarga y recarga.

El método completo será publicado pronto, aunque sólo indicaremos que, como hicieron Butterfield y Bannerjee (1971), el fuste del pilote se divide en segmentos cilíndricos y la base en anillos concéntricos, cuyas circunstancias centrales se unen al terreno hasta el momento en que el suelo se plastifica.

Para el pilote, la matriz de flexibilidad se encuentra directamente, en lugar de obtener la matriz de rigidez como hacen Lee y Small (1991) o Mattes y Poulos (1969). Esto requiere menos subdivisiones en segmentos.

El método de cálculo es directo, sin iteraciones, como requiere el método de Butterfield y Bannerjee (1971) para pilotes a compresión.

El programa halla automáticamente los incrementos de carga necesarios para la plastificación de cada nodo. El cálculo se extiende hasta la plastificación del último nodo o hasta el momento en que se alcanza la carga especificada.

Las tensiones cortantes en el fuste y normales en la punta, la distribución de cargas a lo largo del pilote, y el asiento en cabeza al final de cada incremento se obtienen como salidas normales del programa.

3. ENSAYOS DE CARGA HASTA ROTURA DE UN PILOTE HINCADO

El ensayo ha sido descrito extensamente por Candela (1990).

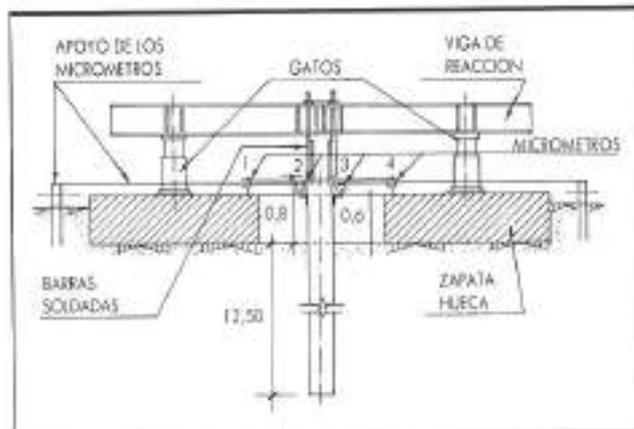


FIGURA 1. Disposición del ensayo de carga a tracción.

La figura 1 muestra la disposición del ensayo.

Una zapata hueca de hormigón armado, con unas dimensiones externas de 5,5 x 5,5 x 0,6 metros y un agujero interior de 1,5 x 1,5 metros para permitir el paso del pilote, recibe la carga de 2 gatos hidráulicos, cada uno con capacidad de 4 MN.

La carga se transmite desde el pilote a una viga de reacción mediante 4 barras de acero Gewi, de diámetro 25 mm, cada una de ellas soldada a la viga y a uno de los cuatro redondos de 20 mm de la armadura del pilote.

Las medidas de desplazamiento en la cabeza del pilote se realizaron con cuatro micrómetros fijados a un sistema de tubos huecos rectangulares soldados a dos tubos huecos de 8 metros de longitud, separados 10 cm de la zapata y apoyados en el terreno a una distancia de 1 metro de límite del hormigón. Dos de los micrómetros (números 2 y 3) miden el desplazamiento en la cabeza del pilote y los otros dos (1 y 4) miden el asiento de la zapata, el cual fue sólo de 0,27 mm para la carga máxima.

El dispositivo completo se cubrió con una lona para protección del sol. Se tomaron lecturas de los micrómetros mediante un teodolito situado a 10 metros de distancia.

La figura 2 muestra el perfil del terreno y sus características.

La curva carga-asiento se muestra en la figura 3.

La carga de rotura estimada es de 650 kN.

La resistencia al arrancamiento se ha calculado según Justo (1990), básicamente calculando la resistencia por fuste en suelos no cohesivos según Meyerhof y en suelos cohesivos según Woodward.

La resistencia a tracción es:

$$Q_u = Q_s + W_p' \quad [1]$$

donde:

Q_s = resistencia por fuste

W_p' = peso del pilote = 29 kN

La resistencia por el fuste medida fue de 622 kN, y la estimada de 400 kN.

Hemos multiplicado la resistencia por el fuste unitaria estimada, q_s , por 622/400 = 1,6 y se ha representado en la figura 2.

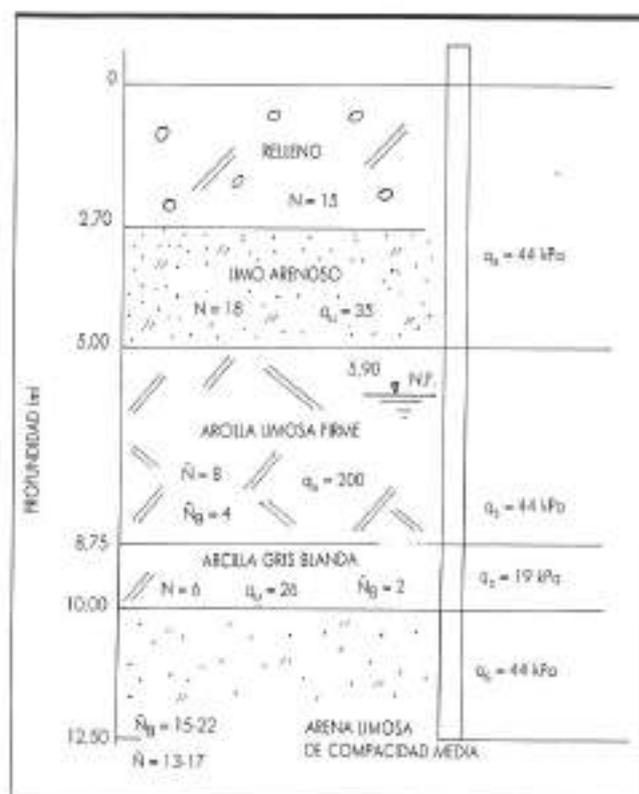


FIGURA 2. Perfil del terreno para ensayo de tracción.

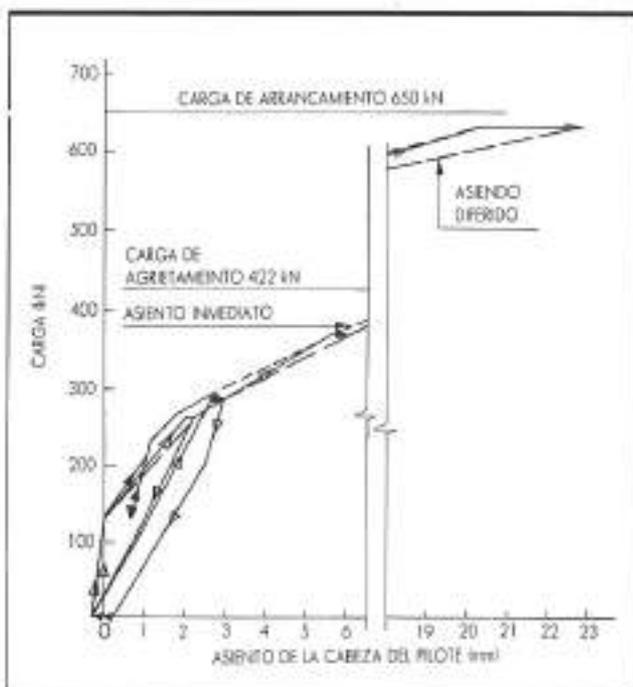


FIGURA 3. Curva carga-desplazamiento a tracción.

El pilote hincado era de tipo Terratest, de 0,3 metros de lado, cuadrado, con las siguientes características:

$$f_{ck} = 45 \text{ MPa}$$

$$f_y = 410 \text{ MPa}$$

La carga de rotura a tracción se calculó según la siguiente ecuación:

$$Q_c = f_{ct,m} A_c (1 + n\rho) \quad [2]$$

siendo:

$f_{ct,m}$ = carga a tracción del hormigón justo antes de la rotura

$$f_{ct,m} = 0,68 \sqrt{f_{ck}} (\text{kp/cm}^2)^2 \text{kp/cm}^2 = 3.865 \text{ kPa}$$

$$Q_c = 3.865 \times 0,0887 (1 + 5,25 \times 0,0142) = 368 \text{ kN}$$

La fisuración comenzó realmente con una tracción de 422 kN.

La figura 3 muestra deformaciones insignificantes hasta una carga de 130 kN, y un comportamiento elástico cuando la descarga se lleva a 0, pero con ciclos de histéresis. El comportamiento no lineal comienza pronto.

Se han realizado varios ciclos de carga-descarga para ver si éstos producen rotura del hormigón, pero como se indicó antes, la rotura aparece por encima de la carga prevista.

Hemos tenido algunas dificultades para reproducir con la teoría elasto-plástica expuesta anteriormente el comportamiento complejo del suelo y hormigón a tracción, a pesar de haber hecho varias hipótesis respecto a los esfuerzos residuales de hincia.

La carga admisible a tracción prevista debería ser $400/3 = 133 \text{ kN}$. Bajo esta carga no se observó fisuración y el desplazamiento fue insignificante. El desplazamiento previsto a partir de la teoría elasto-plástica es 0,3 mm.

La carga admisible correspondiente a la tensión admisible del acero es:

$$Q_a = A_s \cdot f_{yt} = 280 \text{ kN}$$

El correspondiente desplazamiento medido en cabeza es 2,2 mm sin ciclos de carga y 2,9 mm tras éstos.

4. ENSAYOS DE CARGA A COMPRESION

Han sido descritos extensamente por Sola y Rogel (1989).

Se han llevado a cabo sobre un pilote barrenado de 850 mm de diámetro y un grupo de 2 pilotes de 550 mm. Dada la limitación de espacio, sólo se describirá el primer ensayo.

La figura 4 muestra el dispositivo de carga.

La carga se aplicó con un gato de 5 MN. Dos vigas de reacción cruzadas, de 4 metros de longitud, se fijaron mediante anclajes pasivos al bulbo (6 a 8 metros de longitud) en gravas (véase figura 5). La inclinación de los anclajes respecto a la vertical fue de 15°.

La figura 5 muestra el perfil de cálculo.

La figura 6 muestra el resultado del ensayo y la predicción hecha con nuestro método elasto-plástico, usando el módulo de elasticidad para carga (E) y para descarga-recarga (E_{ar}) indicados en la figura.

Es interesante ver cómo el método elasto-plástico puede reproducir los ciclos de histéresis, así como la curva de carga, de una forma aceptable.