

Análisis de la Interacción Cabezal/Suelo en Cimentaciones sobre Pilotes

Ing. Luis Orlando Ibañez Mora , Ph. D. y Prof. Ing. Gilberto Quevedo Sotolongo, Ph. D.
*Dpto. Ingeniería Civil. Facultad de Construcciones. Universidad Central de Las Villas,
Centro de Investigación y Desarrollo de las Estructuras y los Materiales. Cuba*

Prof. Ing. Renato Pinto da Cunha, Ph.D.

*Dpto. Ingeniería Civil y Ambiental. Facultad de Tecnología. Universidad de Brasilia,
Brasil*

Resumen

En este trabajo se analiza el comportamiento de las cimentaciones sobre pilotes, considerándolas como un todo, es decir, compuesto por el cabezal - pilote - suelo. En las normativas vigentes no se considera el aporte del terreno bajo el cabezal, razón por la cual en el trabajo se realiza la determinación de las solicitaciones a nivel de pilote teniendo en cuenta este aspecto y se compara con los resultados tradicionales. Para arribar a las conclusiones respecto al trabajo cabezal - terreno se procede a la modelación física del fenómeno utilizando un modelo de interacción suelo estructura (Discreto), el método de los elementos finitos y los resultados de pruebas de cargas en pilotes realizados en la Universidad de Brasilia. Se obtienen resultados avalados por la modelación física y los ensayos reales para el cálculo de las solicitaciones a nivel de pilotes considerando la interacción cabezal terreno.

Palabras claves: Cimentación, Pilotes, Modelación, Interacción Suelo - Estructura
Foundation, Piles, Numerical Modeling, Soil-Structure interaction.

1. Introducción

Si aceptamos que las cimentaciones sobre pilotes constituyen el conjunto pilote - cabezal - terreno, no es absurdo analizar la interacción que se genera entre el cabezal y el terreno de apoyo, siempre que el primero apoye directamente sobre este. Jiménez (1995), y Sowers (1977), entre otros, plantean que tradicionalmente se ha considerado la cimentación sobre pilotes, como aquella que mejores resultados ofrece a la hora de cimentar en terrenos débiles o muy consolidables, es decir que en ellas además de resistir las solicitaciones actuantes, se debe lograr que las deformaciones que se generen no pongan en peligro la vida útil de la estructura. Ejemplos reales analizados por Jiménez (1980,1995) en la ciudad de México evidencian que los pilotes "cosen" los asentamientos; y el encepado funciona como una cimentación. Por otra parte ensayos de cargas realizados por Cunha y Sales (1998) a grupos de pilotes de pequeño diámetro evidencian el trabajo conjunto cabezal –

suelo – pilote, demostrando el beneficio de la inclusión de pilotes bajo bloques superficiales.

La posibilidad de colaboración entre los pilotes y su encepado para soportar las cargas, que era antes totalmente despreciada, se acepta hoy como normal en aquellos casos en los que el segundo se hormigona sobre el suelo. El grado de esta colaboración varía mucho, según las características del pilotaje, y todavía más, de las capas superiores del sustrato, además de la tecnología de hormigonado y construcción. Por ejemplo, Jiménez (1995) menciona los trabajos de Cooke, donde se plantea que un estudio sobre grandes edificios londinenses, cimentados sobre pilotes encepados en una losa general, demuestra que alrededor del 30 % de la carga esta siendo transmitida por la losa, aun cuando en el proyecto se había supuesto que la carga iba a ser recogida tan solo por los pilotes. Y añadía que, aunque esta aporte puede parecer modesto, es mayor si lo enfocamos desde el punto de vista de la carga de falla. En efecto, de forma parecida ocurre con la resistencia de los pilotes por la punta, la losa de encepado necesita unos asientos relativamente grandes para desarrollar su colaboración, pero su aporte a la resistencia final es muy importante. De tal modo, que, recalculando los coeficientes de seguridad respecto al hundimiento de los citados edificios, resultan ser claramente excesivos en este aspecto. De esta manera, puede pensarse que podría disminuirse el número de pilotes, o bien que, si se conservan, su utilidad podría ser únicamente la de disminuir los asientos.

En Londres, la estadística demuestra que el asiento de una losa de cimentación, sin pilotar viene a ser de 0.35 B, con lo que los grandes edificios, sin pilotaje, tendrían asientos que pueden considerarse excesivos. El pilote funciona así como un suplemento que tiene como misión el disminuir los asientos. Un paso más propugnado por varios autores es servir para igualarlos. Una cimentación flexible sobre un suelo arcilloso asienta más por el centro; un cierto número de pilotes colocadas en una región puede conseguir una anulación de la diferencia, por lo cual se ha llevado a cabo análisis muy refinados mediante el método de los elementos finitos (o de contorno) para determinar la distribución óptima de los pilotes.

Estos estudios que ya pueden ser realizados preliminarmente de forma manual (como por ejemplo los citados por Sales, 2000), sin embargo para su solución definitiva requieren de un complejo análisis por computadora. En trabajos realizados por Ibañez (1997) se procede a una modelación del suelo y las estructuras, enfocado al trabajo cabezal - suelo, analizando los casos de cabezal rígido o flexible y suelo deformable o indeformable en la punta de los pilotes llegando a resultados similares a los anteriormente expuestos.

2. Desarrollo

A continuación se ejemplifica a través de resultados, el comportamiento cabezal - suelo de apoyo, realizando una modelación por interacción suelo estructura según el Anteproyecto de Norma Cubana de Cimentaciones sobre Pilotes (1987) y por el Método de los Elementos Finitos. Solo se tiene en cuenta la cimentación sometida a carga vertical centrada (carga axial diferente de 0, momento y cortante igual a 0) y cabezal rígido.

Hipótesis:

Cabezal rígido - articulado a los pilotes.

Cabezal apoyado directamente sobre el terreno.

Pilote apoyado en suelo (trabajando a fricción y en punta).

Parámetro deformacional que caracteriza el suelo: Módulo de Young (E_0), variable en función del modelo).

3. Modelación a través de la Interacción Suelo – Estructura

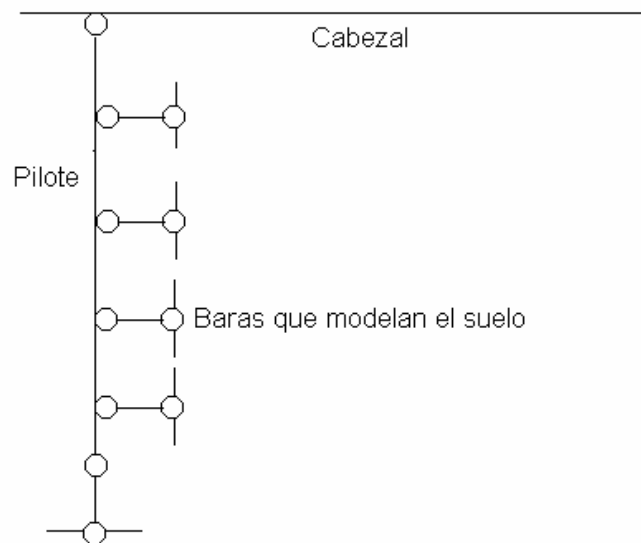


Figura 1. Modelación del pilotaje según el Anteproyecto de Norma Cubana (1987)

El anteproyecto de Norma Cubana de Cimentaciones sobre Pilotes (1987) establece para determinar las solicitaciones sobre los pilotes un modelo de interacción suelo estructura según la Figura 1, resolviendo el problema igual que el caso de un pórtico plano, utilizando para ello el método de las deformaciones de análisis estructural. El suelo se modela como bielas [modelo discreto(-tipo Winkler-)] de longitud unitaria, con un determinado coeficiente de balasto (K) en función del módulo general de deformación (E_0).

El elemento de mayor complejidad para su modelación es precisamente la biela para la cual se establece:

$$E_b = L_b \cdot K,$$

Ec. 1

donde:

L_b - longitud de la biela.

K - Coeficiente de balasto del suelo.

Para la determinación del coeficiente de balasto, el Anteproyecto de Norma, establece además:

$$K = 1.3 \cdot 12 \sqrt{\frac{b^4 \cdot E_o}{E_p \cdot I_p}} \cdot \left(\frac{E_o}{(1-\mu)^2} \right) \cdot \frac{1}{b},$$

Ec. 2

donde:

E_p - módulo de deformación del material del pilote.

I_p - inercia del pilote.

b - ancho o diámetro del pilote.

μ - módulo de Poisson del suelo.

E_o - Módulo General de deformación del suelo (Módulo de Young)

El espaciamiento entre bielas se propone sea igual a la unidad, de la forma más uniforme posible y que represente le la mejor forma posible el comportamiento del suelo.

Para modelar el trabajo conjunto cabezal terreno, de forma similar colocamos bielas bajo el cabezal que representan el terreno (Figura 2). Para la determinación del coeficiente balasto de las bielas, se propone utilizar la expresión 2, reduciendo el valor de K por el espaciamiento entre bielas o la metodología utilizada por Dilla (1978) basada el método de Wölfer (1971), que ha sido aplicado con satisfacción par el caso de losas de cimentación y vigas sobre apoyos elásticos, en la cual:

$$K = \frac{E_s}{B \cdot f} \tag{Ec. 3}$$

$$E_s = \frac{E_o}{\left(1 - \frac{2 \cdot \mu^2}{1 - \mu^2} \right)} \tag{Ec. 4}$$

donde:

B - ancho del elemento (para este caso ancho del cabezal)

f - coeficiente que depende de la razón de las dimensiones del elemento (viga o encepado) y del espesor de la capa de suelo compresible. (oscila entre 0.2 y 0.9).

E_s - Módulo edométrico.

Eo- Módulo de Young.

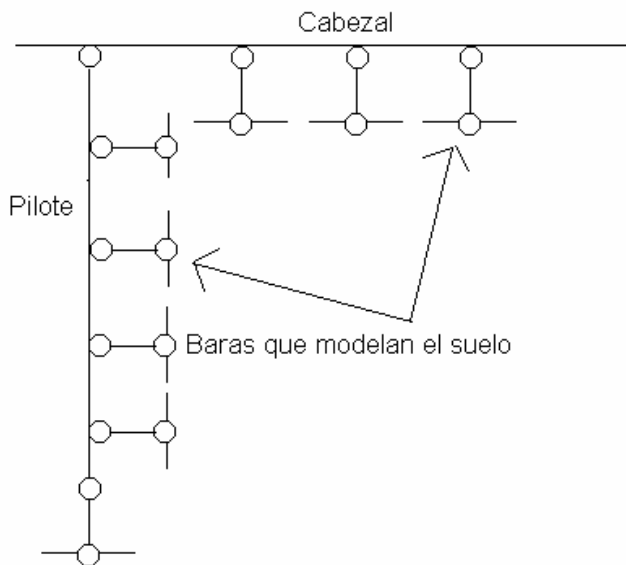


Figura. 2. Modelación del trabajo conjunto cabezal terreno.

El siguiente ejemplo ilustrativo demuestra la influencia del aporte del terreno bajo el cabezal. Para ello se modela una cimentación conformada por 9 pilotes (3 filas), diámetro 0.4m, longitud 10m, considerando el cabezal rígido (2.4 x 2.4 metros) y variando el módulo de Young (E_o) del terreno bajo el cabezal.

Suelo en la punta del pilote		Módulo general deformación (E_o) del terreno bajo el cabezal (kPa)				
ϕ°	E_o (kPa)	5000	7500	10000	15000	20000
25	12500	428	408	390	-	-
27	15000	762	738	715	672	-
35	20000	1912	1866	1822	1737	1657

Tabla 1. Carga a nivel del pilote en kN.

El primer resultado que arroja la anterior tabla es la disminución de la carga actuante a nivel del pilote aislado en la mediada en que aumenta el módulo de Young (E_o) del terreno bajo el cabezal. Esto se traducirá posteriormente en una mayor capacidad de carga de la cimentación en su conjunto, o de otra manera en una mayor seguridad al fallo, al considerar el aporte del terreno bajo el cabezal. De aquí la importancia de considerar el aporte del terreno bajo el cabezal en el proyecto de cimentaciones sobre pilotes siempre que se tenga certeza de que el cabezal o encepado apoyará directamente sobre el suelo.

4. Resultados de Pruebas de Carga en Pilotes de Pequeño Diámetro

Pruebas de carga realizadas en Brasil por Cunha y Sales (1998) a pilotes aislados y en grupo rebelan resultados similares. Estos ensayos se realizan en suelos tropicales arcillosos porosos cuyas características son descritas en este mismo artículo y por Sales (2000). En este caso se realizan varias pruebas de carga a una cimentación formada por 4 pilotes de diámetro 0.15 m y 5 metros de longitud sobre un encepado de 1x1 metro. Primeramente se determinan los valores para el grupo de pilotes aislados (sin tener en cuenta el cabezal) obteniendo una carga de rotura de 310 kN y posteriormente se determina la carga de rotura para el grupo de pilotes trabajando en bloque (con el cabezal), elevándose la carga de rotura a 420 kN, en ambos casos los asentamientos son del orden de los 3 cm. En dicho trabajo finalmente, los autores, analizan que la transferencia de carga en la cimentación durante la prueba de carga para la cimentación estudiada, es tomada un 70% de la carga total actuante por el pilote y por el cabezal un 30%. Todo lo anterior evidencia el aporte que ofrece el terreno bajo el cabezal en la cimentación sobre pilotes.

Conforme a lo citado anteriormente, el modelo propuesto al inicio de este trabajo permite estimar la carga actuante a nivel del pilote en función del aporte del terreno bajo el cabezal. Como puede apreciarse dicho modelo se basa fundamentalmente en el análisis del estado deformacional presente en el sistema, al tener como variable de modelaje el coeficiente de balasto del terreno bajo el cabezal y el adyacente al pilote, en función del módulo general de deformación o módulo de Young (E_0). A continuación se realiza una modelación de los resultados de las pruebas de carga comentadas anteriormente, variando para ello la forma de determinación del coeficiente de balasto bajo el cabezal (K), que tiene gran influencia en los resultados. En ambos casos se considera que el suelo presenta (en estado natural) una cohesión (C) = 34 kPa, un ángulo de fricción interna (ϕ) = 34° y Módulo de Young=8000 kPa, según Cunha et al. (1999).

Los resultados de esta análisis se expresan en la tabla 2, donde se observa una óptima aproximación y concordancia entre los resultados experimentales de Cunha y Sales (1998) y las expresiones teóricas del modelo aquí propuesto. Por lo tanto, los resultados de este ejercicio demuestran la aplicabilidad de los modelos simplificados para simular el complejo comportamiento cabezal – suelo, indicando el potencial beneficio de considerar la interacción entre estos elementos en el proyecto de cimentaciones.

	Pruebas de Carga	Anteproyecto de Norma Cubana	Método de Wölfer
Coeficiente de balasto (K) (kN/m^3)	-	7274	7462
Carga de rotura total(kN)	420	420	419
Carga que toman los pilotes(kN)	294	314	312
Carga toma el cabezal (kN)	126	109	107

Tabla 2. Transferencia de carga según el modelo propuesto.

Si de manera independiente se calculará el encepado o cabezal como un cimiento superficial, obtendríamos que la capacidad de carga del terreno esta en un rango de 250 a 300 kN para un cimiento de 1x1 y los asentamientos para dicha carga es aproximadamente de 5 cm. Estos resultados se corresponden con lo expuesto por Jiménez (1995), donde se plantea que en este tipo de cimentación, los pilotes vienen a coser los asentamientos del encepado.

Analizando estos resultados, se puede describir el proceso de transferencia de carga en cimentaciones sobre pilotes, cuando el cabezal apoya sobre el terreno, de la siguiente manera:

- Etapa1. Para pequeñas deformaciones, el terreno bajo el cabezal, comienza a trabajar y en la medida que estas deformaciones aumentan se desarrolla el aporte a fricción y en punta en el pilote;
- Etapa 2. En el momento de la falla, el aporte del pilote (a fricción y en punta) se desarrolla a plenitud, no siendo así el del terreno bajo el cabezal, porque como ya vimos, las deformaciones que se generan están lejos de la carga de rotura, fallando primero el terreno en la punta y en las caras del pilote y después el que se encuentra bajo el cabezal.

Conclusiones

Después de realizadas las diferentes modelaciones y con los resultados experimentales de las pruebas de carga se arriban a las siguientes conclusiones:

1. Como se aprecia puede llegarse a una disminución de la carga actuante a nivel del pilote en la medida en que aumenta la diferencia entre los módulos de deformación del suelo bajo la punta del pilote y bajo el cabezal;
2. En la medida en que mayor sea al módulo general de deformación del suelo en la punta del cimiento, menor será el aporte del terreno bajo el cabezal, como es lógico, ya que los desplazamientos que se generan serán menores, lo que imposibilitara al material bajo el encepado desarrollar toda su capacidad portante;
3. Con la colaboración o interacción existente entre el cabezal y el suelo disminuyen las tensiones en la masa de suelo bajo la punta del pilote;
4. Con la utilización de pilotes bajo bloques superficiales, en “bloques pilotados” existirá una interacción beneficiosa bloque – pilote – suelo, que elevará la capacidad de carga de rotura de la cimentación y reducirá el asentamiento para la condición de carga de trabajo (en comparación con el bloque aislado).

Sobre la base de las anteriores conclusiones, recomendamos en los casos de que se considere el trabajo conjunto cabezal terreno realizar, en la etapa de proyecto, una modelación del problema para determinar la carga que llega a cada pilote y la deformación

del conjunto. Además, recomendamos realizar un mayor número de modelaciones donde se varíen otras de las invariantes que influyen el diseño de cimentaciones sobre pilotes.

Referencias Bibliográficas

Anteproyecto de Norma Cubana. 1987. Cimentaciones sobre pilotes. Métodos de cálculo para el dimensionamiento geotécnico. 56p.

Cunha, R.P. y Sales, M.M. 1998. Field Load Tests of Piled Footings Founded on a Tropical Porous Clay. Proc. 3rd Inter. Geot. Seminar Deep Foundation on Bored and Auger Piles. Ghent. p. 433-438.

Cunha, R.P., Jardim, N.A. y Pereira, J.H.F. 1999. Characterization of a tropical clay via dilatometer tests. GeoCongress'99 on Behavioral Characteristics of Residual Soils. ASCE Geot. Special Pub. 92, Charlotte, pp. 113-122.

Dilla S, F. 1978. Algunas consideraciones sobre el modelo de reacción del suelo. Revista Ingeniería Civil. 6 – 7.p 409-499.

Ibañez M, L. 1997. Modelación del suelo y las estructuras. Aplicaciones. / Luis Ibañez Mora. Tesis de Maestría. Departamento de Ingeniería Civil. Universidad Central de Las Villas. Cuba. 92 p.

Jiménez S., J. A. 1980. Geotécnia y Cimientos III. Segunda Parte. Editorial Rueda. Madrid. p 145.

Jiménez S., J. A. 1995. Curso de Cimentaciones Especiales y Pilotaje. CEDEX. España. Tomo I.

Oteo, C. 1980. Cimentaciones por pilotajes. Capítulo 3 en Geotecnia y Cimientos. Madrid. Editora Rueda.

Sales, M.M. 2000. Análise de Sapatas Estaqueadas. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília.

Sowers, G. B. 1977: Introducción a la mecánica de suelo y cimentaciones. La Habana. Editorial Pueblo y Educación. . 677p.

Wölfer, K.I. (1971). Elastically Supported Beams. Beauverlag Gmbh, Wiesbaden. Berlín.