



ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE PILOTES CORTOS ANTE CARGAS LATERALES

Leineth Tatiana Cardona Morón

**Pontificia Universidad Javeriana
Cali, Colombia**

Resumen

Es habitual usar cimentación profunda tipo pilote para soportar cargas laterales o una combinación de cargas laterales y axiales en estratos de suelos compresibles y débiles por lo que se pretende analizar dicho comportamiento. En el siguiente artículo se presenta el análisis de pilotes cargados lateralmente con variación en las propiedades del suelo como la saturación, relación profundidad-deformación, comportamiento del momento flector a partir de cargas aplicadas con el fin de comparar los resultados con modelos analíticos propuestos por varios autores, aproximaciones a métodos teóricos como curvas P-Y, CLM y Broms.

Palabras clave: deflexión lateral; pilotes; cargas; momento flector

Abstract

It is common to use pile-type deep foundations to support lateral loads or a combination of lateral and axial loads in compressible and weak floor layers, and this is intended to analyse this behavior. The following article presents the analysis of laterally loaded piles with variation in soil properties such as saturation, depth-to-depth ratiodeformation, bending moment behaviour from applied loads in order to compare results with analytical models proposed by several authors, approximations to theoretical methods such as P-Y curves, CLM and Broms.

Keywords: lateral deflection; piles; loads; bending moment

1. Introducción

Los pilotes son elementos constructivos utilizados para la cimentación de obras en suelos con baja capacidad portante en situaciones donde la respuesta de los estratos superficiales no garantiza la estabilidad de la estructura, permiten trasladar las cargas hasta un estrato resistente del suelo. Usualmente los pilotes se ven sometidos a cargas laterales que son significativas para casos como fundaciones en puentes, estructuras portuarias, torres, estructuras de retención y estructuras sometidas a cargas sísmicas. Los pilotes cargados lateralmente se pueden clasificar en largos y cortos, en un pilote corto la zona empotrada se puede considerar como sólido rígido bajo la acción de las cargas, además los momentos máximos deben ser menores al momento de fluencia de la sección transversal del pilote. Las cargas laterales estudiadas en el siguiente artículo son laterales y dinámicas aplicadas en la superficie. El comportamiento de los pilotes depende principalmente de la falla presentada, al aplicarse una carga lateral en el pilote se genera una rotura que hace que ocurra un desplazamiento significativo en la cabeza del pilote. A través de este artículo se pretende evaluar el comportamiento de los pilotes sometidos a cargas laterales dinámicas y estáticas, específicamente en pilotes cortos a partir de diferentes estudios realizados en suelos cohesivos y no cohesivos, usando la teoría de Broms, CLM y Curvas P-Y, además de la relación existentes suelo-pilote y la deflexión horizontal, en primera instancia se analiza una modelación de un pilote en condiciones de suelos determinados gracias a estudios previos de autores y análisis de la influencia de la saturación y profundidad.

2. Marco teórico

Dependiendo de la ubicación de las cargas laterales, los pilotes se clasifican en pilotes activos y pilotes pasivos. En este artículo se analizan pilotes activos es decir sometidos a cargas aplicadas en la cabeza, estos se usan en cimentaciones para plataformas petrolíferas, muros de contención y pilares de viaductos, etc. La metodología a seguir para valorar el comportamiento de los pilotes sometidos a cargas laterales encierra análisis simple de carga última, deflexiones, esfuerzos, momentos flectores, procedimientos basados en análisis no lineales para la interacción suelo-pilote. La teoría presenta que el valor de los desplazamientos es sensible a los parámetros del suelo en los niveles de la superficie, por lo que es conveniente determinar de forma precisa los parámetros geotécnicos del suelo. Los métodos usados en este estudio para pilotes activos son:

Método de Broms

Para calcular la resistencia última, Broms tradujo la forma como se distribuyen las presiones de reacción del suelo en la longitud del pilote según las condiciones de la cabeza de este; de cabeza libre (pilote no restringido) y cabeza fija o empotrada (pilotes restringidos). Para pilotes cortos se debe tener en cuenta la resistencia del suelo.



$$M_{max} = Q_u (e + 1.5D + 0.5f) \quad (1)$$

$$f = \frac{Q_u}{9 * C_u * L} \quad (2)$$

Donde Q_u es la carga última lateral, D diámetro del pilote y C_u cohesión no drenada. Para determinar Q_u Broms propuso una solución a través de una gráfica que relaciona la resistencia última lateral y la longitud de empotramiento del pilote para suelos cohesivos. Las deflexiones laterales para cargas de trabajo mediante el método pueden ser determinadas solo si la carga de trabajo Q_g está entre 0.3 y 0.5 veces la carga última. En suelos cohesivos, el módulo de reacción horizontal o módulo de balasto se supone aproximadamente constante con la profundidad.

Método de la carga característica CLM

Este método fue desarrollado por Duncan et al., quien consideró una serie de soluciones no lineales de curvas P-Y para un rango de condiciones en la cabeza del pilote y para una condición de suelo. Los resultados son analizados como una simplificación del método Curvas P-Y a través de ello se obtuvieron ecuaciones simples que permiten definir el comportamiento de los pilotes bajo carga lateral, por lo general este método es útil para determinar las deflexiones en la cabeza del pilote producidas por las cargas laterales teniendo en cuenta si es cabeza libre o cabeza empotrada, tratando de manera independiente suelos granulares y suelos cohesivos. CLM es un método práctico, que permite predecir los efectos no lineales carga-deflexión sin necesidad de una caracterización compleja de la deformación no lineal del suelo.

$$P_c = 7.34 * D^2 * (E_p * R_i) * \left(\frac{C_u}{E_p * R_i}\right)^{0.68} \quad (3)$$

La Ecuación 3 representa el cálculo para determinar la fuerza lateral característica P_c para un suelo arcilloso homogéneo, donde D es el diámetro del pilote, E_p el módulo de elasticidad del pilote, C_u es la cohesión no drenada del suelo y R_i relación del momento de inercia entre la sección del pilote interna y la sección externa. Brettmann y Duncan interpolaron los resultados numéricos para la relación P-Y como:

$$\frac{Y}{D} = ah\left(\frac{P}{P_c}\right)^{Bh} \quad (4)$$

Donde Y es la deflexión lateral en la cabeza del pilote, P carga de trabajo según el diseño y ah , Bh corresponden a constantes dependientes de la condición en la cabeza del pilote.

Método Curvas P-Y

Para evaluar rigurosamente el comportamiento de los pilotes sometidos a cargas laterales es necesario resolver una ecuación diferencial no lineal que contenga las reacciones del suelo y del pilote, para ello se deben plantear expresiones no lineales donde la resistencia y la elasticidad del suelo estén en función del pilote. El método de las curvas P-Y ha tenido significativas contribuciones



para el análisis de plataformas petroleras mar adentro que deben ser diseñadas para resistir el efecto de las cargas producidas por el oleaje, los sismos y los vientos. Timoshenko y otros autores plantearon la ecuación lineal del problema que relaciona la distancia medida desde la cabeza del pilote (x), deflexión (y), la rigidez a flexión ($Eplp$) y el módulo de reacción del pilote (Epy).

$$Eplp * \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + Epyy = 0 \quad (5)$$

Para las soluciones numéricas de este método se usan programas de modelación geotécnica usando diferentes tipos de materiales. Las predicciones por el método de las curvas P-Y usadas en los resultados del presente escrito fueron determinadas por el software libre PyPile V.0.2.2, adquirido por los autores mediante consultas técnicas.

3. Resultados

Se somete a carga lateral tres pilotes individuales con dimensiones a escala en un suelo arcilloso, para cada pilote se varió parámetros como la humedad con el fin de obtener diferentes propiedades físicas y mecánicas. En la Tabla 1 se presentan los parámetros geotécnicos y de rigidez de la arcilla, datos tomados del estudio realizado por Salamanca Edgar en el artículo "Modelamiento físico a escala de pilotes individuales", de cabeza libre, sometidos a carga lateral estática en suelos cohesivos. El hincado se efectuó inicialmente en cada caso con presión y luego con golpes de martillo de mano con cuidado para mantener la verticalidad; para aplicar la carga lateral se ató un cable en la cabeza del pilote que llevaba a una base metálica sobre la cual se colocaron las pesas que ejercen las fuerzas del cable, se instaló un deformímetro, para registrar el desplazamiento horizontal.

Tabla 1. Parámetros geotécnicos de la arcilla.

Pilote	Humedad natural (%)	LL (%)	IP (%)	Peso unitario(kN/m ²)	Cu(kPa)
1	33	51	26	17.6	25
2	36	51	26	17.6	25
3	34	51	26	17.6	25

Recuperado de "Physical scale modeling of single free head piles under lateral loading in cohesive soils", de Salamanca, E; Abril, N.2017, Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo, Vol. 17 (2).

A continuación, en la Tabla 2 se presentan las deflexiones laterales para los métodos predictivos del comportamiento no lineal del suelo (curvas P-Y, CLM) junto con la prueba de carga lateral experimental (real), esta deflexión se produce por la carga última obtenida analíticamente por el método de Broms. Se observa que en la prueba del pilote 2 las deflexiones son lejanas a los métodos predictivos y esto como consecuencia de posibles fallas en el sistema. Los resultados de carga última por el método de Broms se acercan en gran parte a la realidad.



Tabla 2. Comparación de las deflexiones laterales en la cabeza del pilote para las cargas ultimas halladas.

Prueba pilote	Longitud pilote(cm)	Longitud libre(cm)	Carga ultima (Broms)(kg)	Deflexiones según la carga ultima(cm)		
				Real	CLM	Curvas P-Y
1	61	10	11.9	0.614	0.681	0.601
2	47	10	11.8	1.12	0.671	0.595
3	54	11.5	11.109	0.507	0.601	0.651

Recuperado de "Physical scale modeling of single free head piles under lateral loading in cohesive soils", de Salamanca, E; Abril, N.2017, Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo, Vol. 17 (2).

En la Tabla 3 se presenta la carga de trabajo normalizada como 0.4 veces la carga última obtenida. En esta tabla se observa los resultados reales y los de las predicciones que por lo general difieren a medida que aumentan las cargas. Además, se evidencia que el método de las curvas P-Y da una mejor aproximación a los resultados reales que los resultados obtenidos por el CLM. Los resultados dados por el método de Broms son un tanto distantes de los experimentales y esto se debe a que este método modela linealmente el suelo y el pilote bajo cargas laterales.

Tabla 3. Comparación de las deflexiones laterales en la cabeza del pilote para las cargas de trabajo.

Prueba pilote	Longitud pilote(cm)	Longitud libre(cm)	Carga ultima (Broms)(kg)	Deflexiones según la carga ultima(cm)		
				Real	CLM	Curvas P-Y
1	61	10	4.76	0.161	0.128	0.416
2	47	10	4.72	0.149	0.126	0.502
3	54	11.5	4.44	0.107	0.113	0.439

Recuperado de "Physical scale modeling of single free head piles under lateral loading in cohesive soils", de Salamanca, E; Abril, N.2017, Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo, Vol. 17 (2).

Para apreciar la variación de la deflexión respecto a una carga aplicada para las condiciones presentada en el pilote 1,2,3 y descritas en las tablas anteriores se elaboraron las figura 1, 2 y 3 ,en donde se observa el comportamiento no lineal y la cercanía que tienen los métodos de curvas P-Y y CLM respecto a la prueba de carga experimental, para los tres casos trabajados es clara la relación directamente proporcional existente entre la carga y la deflexión es decir a medida que aumenta la carga también lo hace la deflexión lateral.



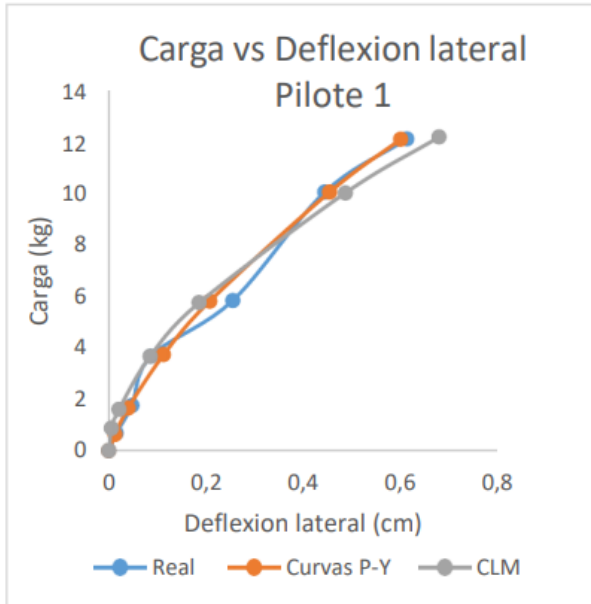


Figura 1. Carga vs Deflexión lateral para el pilote 1 para cargas dinámicas y estáticas.

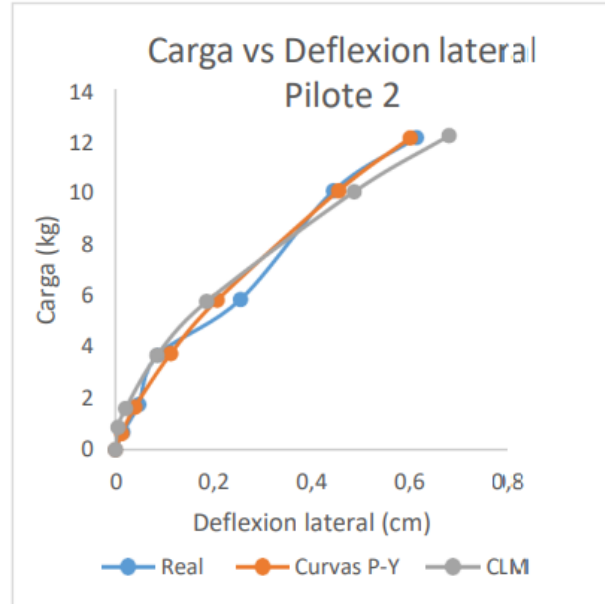


Figura 2. Carga vs Deflexión lateral para el pilote 2 para cargas dinámicas y estáticas.

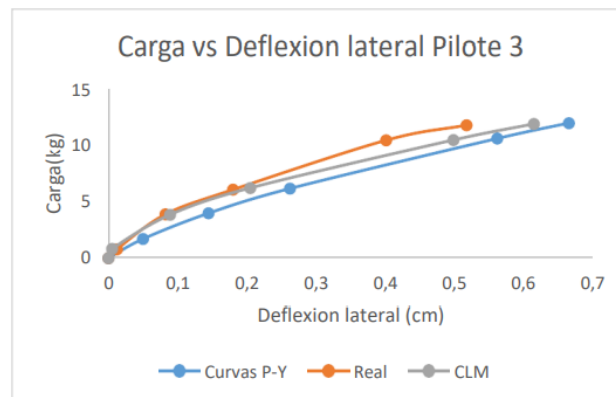


Figura 3. Carga vs Deflexión lateral para el pilote 2 para cargas dinámicas y estáticas.

En la figura 4 se presenta tres situaciones, para la situación 1 se supone un pilote en un estrato de suelo en condiciones de humedad natural; en la situación 2 se incrementa la humedad del suelo que rodea el pilote, estado de saturación aproximadamente a 2,0 m de profundidad; finalmente, la situación 3 representa una extensión de la zona saturada hasta 3,0 m de profundidad, datos tomados del escrito "curvas de transferencia de carga horizontal p-y para suelos limosos loésicos" presentado por Arrúa y Aiassa. En la gráfica se indica la relación entre el momento flector de un pilote y la profundidad para estados de saturación distintos del suelo y una carga aplicada a nivel de la superficie, los resultados indican que el momento flexor se incrementa por el efecto de la saturación de suelo. Si se llega a la saturación en toda la longitud del pilote posiblemente se producirá rotación del elemento a causa de un momento flector alto.



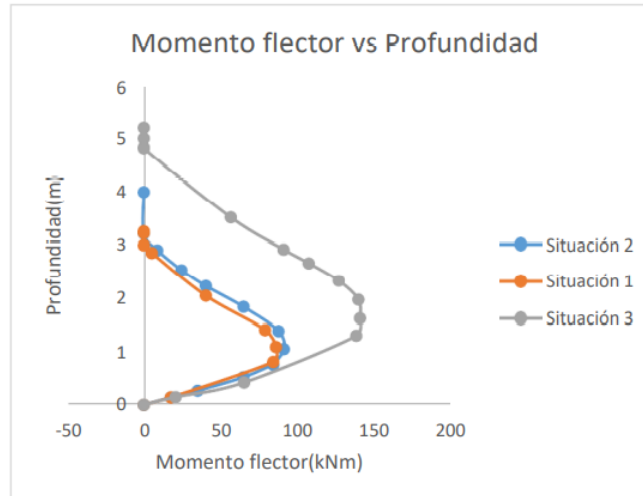


Figura 4. Relación entre el momento flector y la profundidad para distintas condiciones de saturación.

En la figura 5 se presenta la relación entre la profundidad y el desplazamiento que puede provocar una determinada carga (80kN, 40kN y 20kN) en una de longitud 8 metros dividido en secciones datos tomados por el estudio realizado por Hernández R, se observa que los máximos desplazamientos ocurren a una mayor magnitud de carga P (80kN) y que el máximo desplazamiento horizontal ocurre a la altura del cabezal del pilote que corresponde al punto de aplicación de la carga lateral teniendo en cuenta que se toma como referencia la cabeza como profundidad cero.

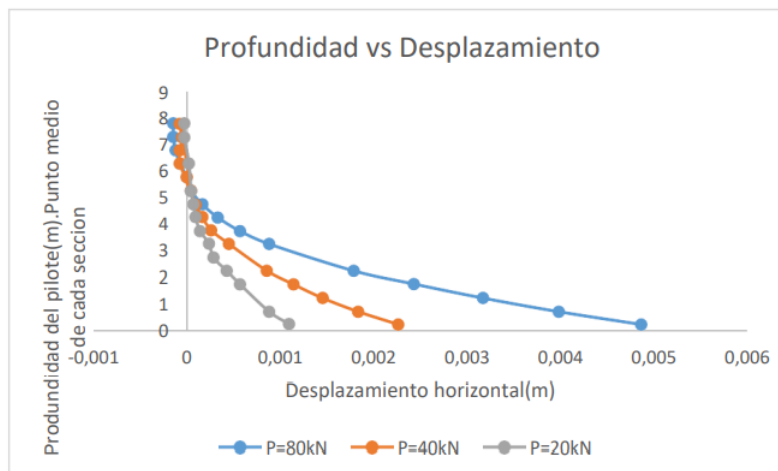


Figura 5. Relación entre la profundidad y el desplazamiento para diferentes cargas.

Y finalmente, en la figura 6 se presenta el comportamiento del momento flector para un pilote de 8 metros de longitud ante cargas dinámicas y estáticas datos tomados del estudio presentado por Candela, H. en "Calculo de pilotes sometidos a cargas laterales. Aplicación cimentación para postes ferroviarios", evidenciando que el momento es mayor para cargas dinámicas, aunque esta situación cambia hacia la base del pilote con diferencias mínimas.



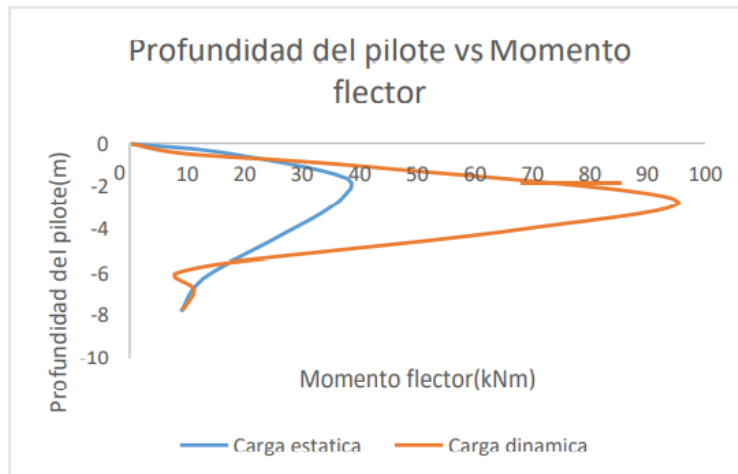


Figura 6. Relación entre la profundidad y el momento flector para cargas estáticas y dinámicas.

4. Conclusiones

El comportamiento de los pilotes sometidos a cargas laterales involucra la deformación y la interacción suelo-estructura, por lo que se han generado múltiples métodos que estudian los pilotes en función de sus características elástica, naturaleza de las cargas laterales y propiedades del suelo. A través de este informe se logró identificar los comportamientos para cargas estáticas en pilotes.

Para el estudio realizado se observó que aunque el factor de escala tiene importancia en los resultados, el análisis experimental se aproxima notablemente a los modelos teóricos (curvas P-Y, Broms y CLM) lo que indica que la modelación aplicada puede optimizarse para llegar a resultados aceptables, los resultados del método de las Curvas P-Y en este estudio son los más moderados para las cargas de trabajo calculadas en los 3 pilotes estudiados, como era de esperarse la deflexión es directamente proporcional a la carga aplicada. El cálculo de carga última por el método de Broms resultó ser una buena aproximación de la carga de falla para un diseño por su coherencia con lo estipulado físicamente.

Según el estudio realizado por Lorena Méndez plasmado en su texto "Pilotes sometidos a carga lateral dinámica: análisis mediante interacción suelo estructura" se determinó que para pilotes cortos los momentos flectores son mayores en situación de carga dinámica en comparación con las cargas estáticas, aunque este comportamiento se revierte hacia la base, pero con diferencias pequeñas, a partir de esto se puede decir que el refuerzo a flexión se debe colocar a lo largo de todo el pilote. El momento flector también se ve influenciado por el grado de saturación del suelo puesto que a mayor grado de saturación el momento flector aumenta para una carga aplicada a nivel de la superficie. Si se llega a la saturación en toda la longitud del pilote se producirá rotación del elemento a causa del alto momento flector.



5. Agradecimientos

Agradezco a la profesora Ana Maria Parra Bastidas y a la Pontificia Universidad Javeriana sede Cali por inspirar y orientar la construcción de este artículo en la materia Diseño de Fundaciones, además agradezco su paciencia, tiempo y dedicación que tuvo al transmitir su conocimiento en el tema.

6. Referencias

- Méndez, L. (2017). Pilotes sometidos a carga lateral dinámica: análisis mediante interacción suelo estructura (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. Consultado en de: <http://bdigital.unal.edu.co/57718/1/PILOTES%20SOMETIDOS%20A%20CARGA%20LA%20TERAL%20DIN%C3%81MICA%202017.pdf>
- Hernández, R. (2011). Análisis de pilotes cargados lateralmente, mediante interacción suelo estructura, empleando una teoría simplificada de empujes (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. Recuperado de: <http://bdigital.unal.edu.co/4142/1/296507.2011.pdf>
- Salamanca, E. Abril, N. (2017). Physicalscale modeling ofsingle free head piles under lateral loading in cohesive soils. Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo, Volumen 17 (2). Recuperado https://revistas.uptc.edu.co/index.php/ingenieria_sogamoso/article/view/7188
- Arrúa, P. Aiassa,G. (2009). Curvas de transferencia de carga horizontal p-y para suelos limosos loéssicos. Revista EIA, ISSN 1794-1237 Numero 11, p. 131-143. Recuperado de <http://www.scielo.org.co/pdf/eia/n11/n11a11.pdf>

Sobre los autores

- **Leineth Tatiana Cardona Morón:** Estudiante de Ingeniería Civil. Leinethcardona20@javerianacali.edu.co

Los puntos de vista expresados en este artículo no reflejan necesariamente la opinión de la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería.

Copyright © 2021 Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI)

