

Metodología para el Análisis del Comportamiento Sísmico de Grupos de Pilotes

Methodology for Analysis of Seismic Behavior of Pile Groups

Jeimmy Andrea Ballesteros Granados

Grupo de Investigación en Ingeniería Sísmica y Amenazas Geoambientales “GIISAG”, Facultad de Posgrados de Ingeniería / Maestría en Geotecnia, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia UPTC, Tunja, Colombia.
Jeimmy.ballesteros@uptc.edu.co

Recibido / Received: 22-09-2016 – Aceptado / Accepted: 20-04-2017

Resumen

En el diseño de cimentaciones profundas como en pilotes de grupo, es importante realizar el análisis ante cargas laterales como las impuestas por los sismos, debido a que ante la ocurrencia de un sismo se presentan grandes fuerzas cortantes y momentos flectores a lo largo de los pilotes. Por tal razón, el diseño de grupos de pilotes sometidos a cargas sísmicas, está sujeto a diversas fuentes de incertidumbre, especialmente en lo que respecta al efecto de grupo; por tanto, resulta conveniente el uso de metodologías que tenga en cuenta la interacción suelo-pilote. Para avanzar en este objetivo, se presenta la metodología para el análisis del comportamiento sísmico en grupos de pilotes que se realizará para un sitio típico del Depósito Lacustre de la ciudad de Bogotá. En el presente artículo, se presenta la importancia de la temática mediante la recopilación de estudios previos respecto al análisis de grupos de pilotes sometidos a carga lateral, tanto a nivel internacional como a nivel regional; aspectos generales de la zona de estudio del proyecto; y, finalmente, se describe la metodología propuesta para un sitio típico del Depósito Lacustre de la ciudad de Bogotá.

Palabras clave: Grupos de Pilotes de Fricción, Suelos Lacustres, Sismos, Deflexión, Diagrama de Cortante, Diagrama de Momento, Curvas P-Y.

Abstract

In the design of deep foundations and piles group is important to the analysis to side as those imposed by the seismic loads, because upon the occurrence of an earthquake large shear forces and bending moments along the piles are presented, for that reason the design of pile groups subjected to seismic loads is subject to several sources of uncertainty especially as regards the effect of group, therefore it is convenient to use methodologies that consider the interaction soil - pilote. To advance this objective methodology for the analysis of seismic behavior in groups of piles to be held for a typical site lacustrine deposit of Bogota is

presented in this article the importance of the issue presented by collecting previous studies regarding the analysis of pile groups subjected to lateral both internationally and regionally, general aspects of the study area of the project, load and finally describes the methodology proposed for a typical site lacustrine deposit City Bogotá.

Keywords: Friction Pile Groups, Lacustrine soils, quakes, Flexion, Cutting diagram, Timing diagram, Curves P-Y.

I. INTRODUCCIÓN

La ciudad de Bogotá se encuentra en un estructura geológica formada por estructuras sinclinales amplias y continuas, mientras que sus anticlinales son estrechos y continuos [1] sobre el cual se han venido depositando suelos blandos pertenecientes a depósitos del cuaternario correspondientes a suelos lacustres blandos conformados por arcillas limosas o limos arcillosos, en algunos sectores con intercalaciones de lentes de turba [2], los cuales se encuentran en proceso de consolidación.

Buena parte de la ciudad de Bogotá se encuentra sobre suelos blandos de gran espesor, por lo tanto, sería de esperarse que fuera común que las estructuras que requieren gran capacidad portante estén cimentadas sobre grupos de Pilotes. La ciudad se encuentra en zona de amenaza sísmica intermedia, por lo que es importante tener en cuenta en el diseño el análisis ante cargas laterales como las impuestas por sismos, debido a que si no se tiene en cuenta en los diseños se puede generar subestimación en los diseños estructurales de la cimentación generando fallas estructurales de la misma ante un posible evento sísmico.

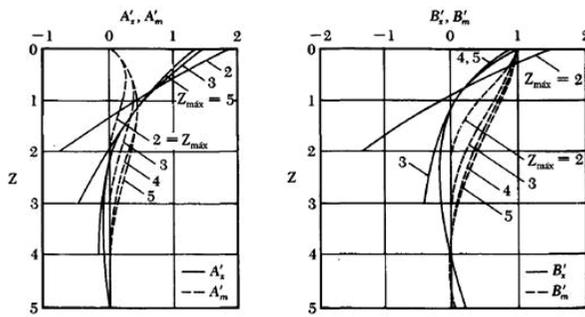
Por las condiciones anteriores, el método de elementos finitos en 3D, es una buena alternativa para representar, de forma adecuada, el comportamiento de los pilotes de un grupo cuando son sometidos a sismos, donde se tiene en cuenta la interacción suelo-pilote. De tal manera que, se puedan determinar las deflexiones, cortantes y momentos que se pueden generar a lo largo de los pilotes de un grupo para diferentes configuraciones, pues dicha información es necesaria para el prediseño estructural de la cimentación.

En este documento se presenta una metodología para el análisis del comportamiento Sísmico de Grupos de Pilotes, que hace parte del proyecto de Investigación Análisis del Comportamiento en Grupos de Pilotes ante Sismos para el Depósito Lacustre de Bogotá, cuya metodología tiene como objetivo analizar el comportamiento en grupos de pilotes para sismos de diferente contenido frecuencial con el fin de conocer el efecto de grupo en cuanto a su configuración; de tal manera que se pueda obtener diferentes gráficas de deflexión, diagrama de cortante y diagrama de momento a lo largo de los pilotes de grupos, que servirán como una herramienta de predimensionamiento para el diseño estructural de los mismos, ante la posible eventualidad de un sismo, la metodología se llevará a cabo para un sitio típico del depósito Lacustre de la Ciudad de Bogotá D.C.

II. CONCEPTUALIZACIÓN

El análisis de pilotes cargados lateralmente, es una parte importante que se debe tener en cuenta en el diseño de los pilotes de grupo. A continuación, se realiza una breve reseña de los diferentes estudios que se han realizado a través de la historia sobre pilotes cargados lateralmente en suelos blandos.

El estudio del análisis de pilotes cargados lateralmente, tiene sus orígenes en 1963 con Davisson y Gill, quienes propusieron soluciones elásticas para pilotes hincados en suelos cohesivos, donde generaron expresiones con sus propias gráficas, como se muestra a continuación en la Fig. 1. [3].



Fuente: Referencia [3].

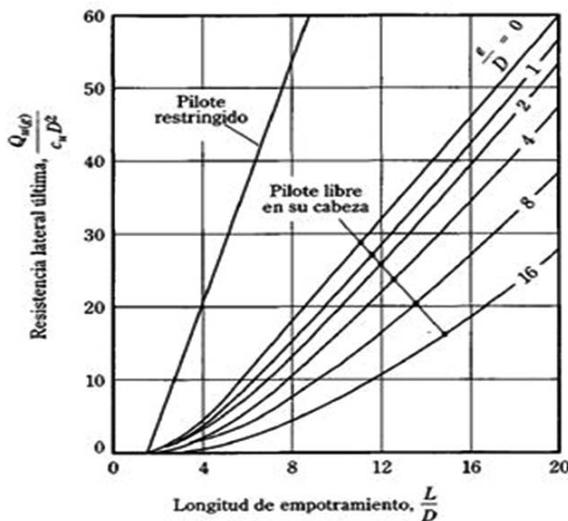
Fig. 1. Variación de \$A'_x, B'_x, A'_m\$ y \$B'_m\$ (Davisson y Gill, 1963).

Con las siguientes expresiones se calcula la Deflexión \$X_z(Z)\$ y Momento \$M_z(Z)\$ del pilote a cualquier profundidad, entre otras.

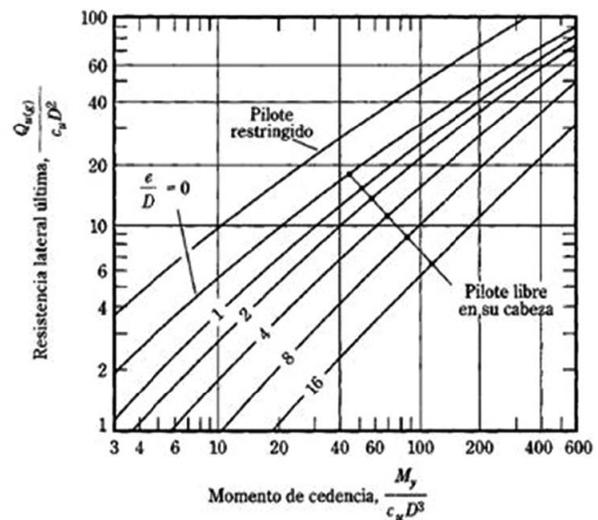
$$x_z(Z) = A'_x \frac{Q_g R^3}{E_p I_p} + B'_x \frac{M_g R^2}{E_p I_p} \quad (1)$$

$$M_z(z) = A'_m Q_g R + B'_m M_g \quad (2)$$

Broms (1965) desarrolló una solución simplificada para pilotes cargados lateralmente, suponiendo (a) una falla cortante del suelo, que es el caso para pilotes cortos; y, (b) una flexión del pilote gobernada por la resistencia de fluencia de la sección del pilote, que es aplicable a los de tipo de largo, como se muestra a continuación mediante el empleo de las siguientes Fig. 2(a) y 2(b), para arcillas [4]:



(a)



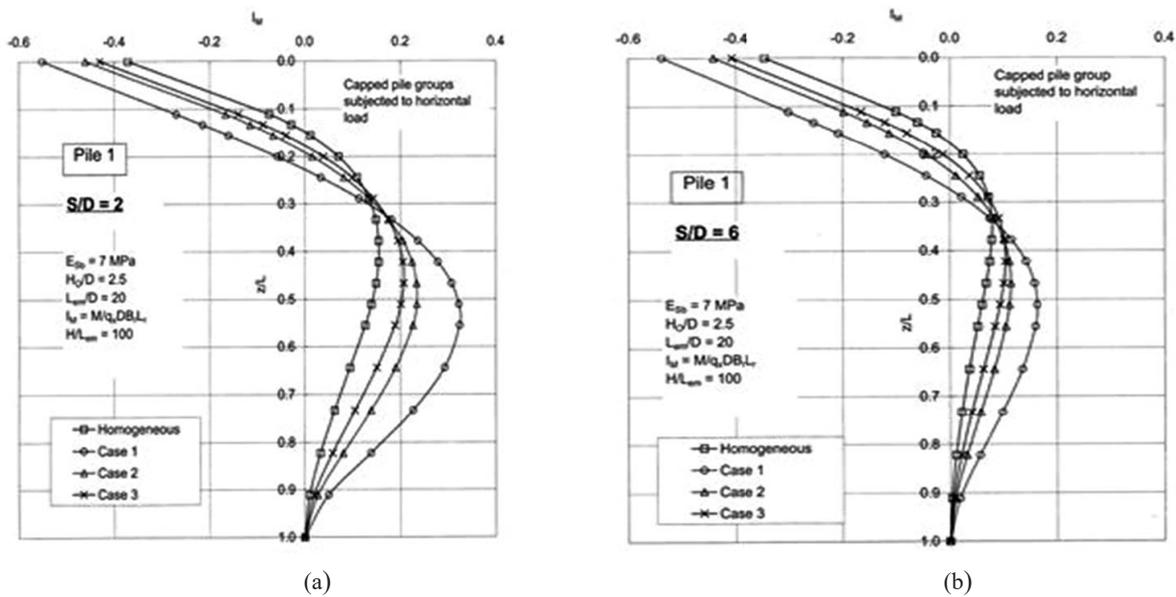
(b)

Fuente: Referencia [4].

Fig. 2. Solución de Broms para la resistencia lateral última en arcillas (a) pilotes cortos (b) de pilotes largos.

En 1999, los ingenieros Zhang y Small, en Australia, realizaron un análisis en pilotes de grupo sometidos a carga horizontal y vertical, donde modelan el capuchón como una placa delgada, los pilotes como vigas elásticas y el suelo como un conjunto de capas horizontales de diferentes materiales, utilizando la teoría de elementos finitos. En el modelo incluyen diferentes tipos de cargas, y la transferencia de la carga la hacen desde el capuchón hacia los pilotes y finalmente al suelo. El software utilizado para el análisis fue APPRAF donde comparan dos grupos

de pilotes sometidos a cargas horizontales, para diferentes relaciones de espaciamiento teniendo para el primer grupo \$S/D=2\$ Fig. 3 (a); y para el segundo grupo, \$S/D=6\$ Fig. 3(b), concluyendo que para el pilote con menor separación se obtiene mayor momento, respecto al pilote con mayor separación como se muestra en la Fig. 3. Lo cual demuestra que para una separación pequeña entre pilotes menor a \$S/D=6\$, se puede dar lugar a un gran momento en el grupo, y de esta manera se obtiene un diseño antieconómico [5].

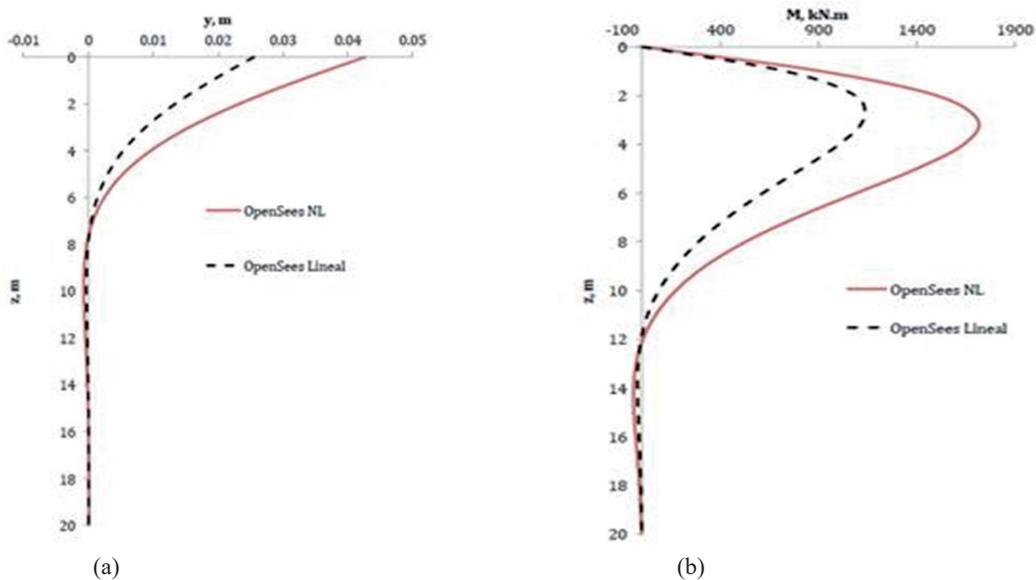


Fuente: Referencia [5].

Fig. 3 . (a) distribución de momentos en un pilote en diferentes suelos con poca separación, (b) distribución de momentos en un solo pilote incrustado en diferentes suelos con grandes espaciamientos.

A nivel nacional, en el año 2012, el ingeniero Andrés Uribe en su trabajo de Tesis de Maestría, presenta los resultados obtenidos a través de un modelo tridimensional en elementos finitos de la respuesta de pilas aisladas sometidas a carga lateral utilizando ensayos triaxiales en suelos residuales del Stock de Altavista, donde utilizó el modelo constitutivo de Drucker-Prager para modelar los ensayos ejecutados

por Betancur (2006). De esta manera, calibró los parámetros de entrada del modelo de elementos finitos. Los resultados permitieron ejecutar un análisis paramétrico de una pila aislada de 20 m de profundidad, y adicionalmente obtener curvas p-y que se recomiendan para futuros análisis de fundaciones en este tipo de suelos, como se muestra a continuación en la Fig. 4 [6].

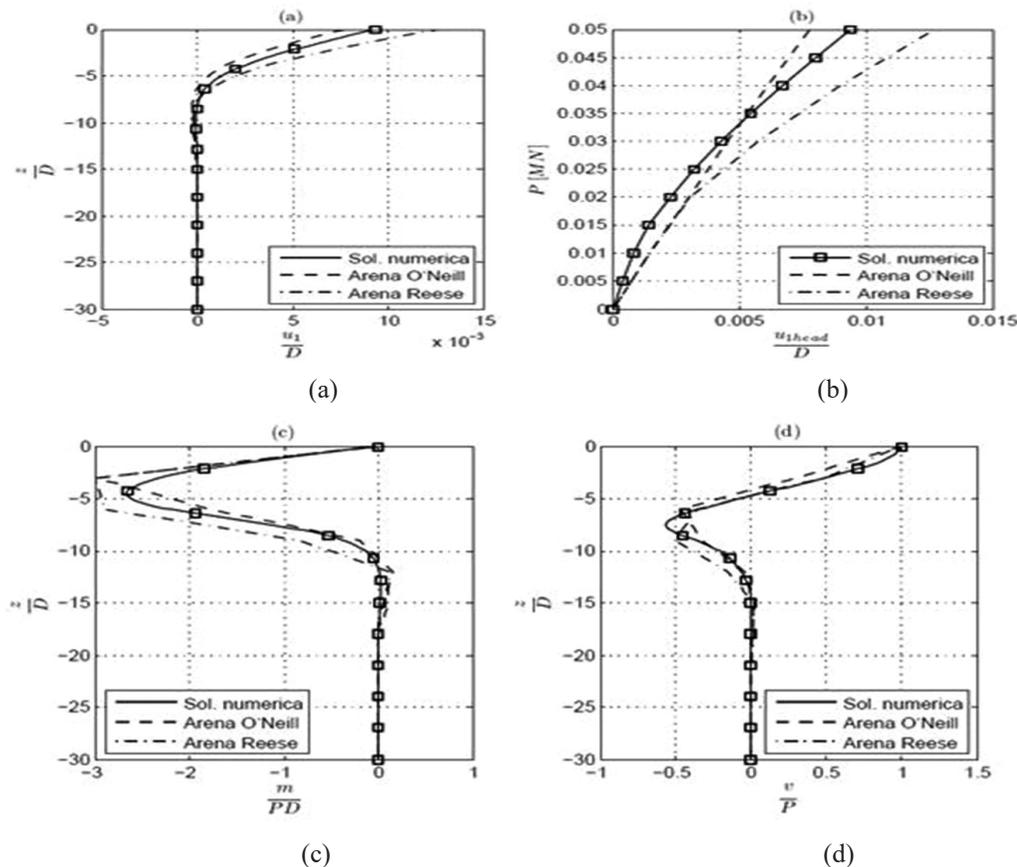


Fuente: Referencia [6].

Fig. 4 (a) Deformada de la Pila para $H=H_{adm}=1400\text{Kn}$ (b) Momento Flector de la Pila para $H=H_{adm}=1400\text{Kn}$

En el año 2012, el ingeniero Carlos Javier Sainea en Colombia, presenta los análisis de los resultados obtenidos al emplear la metodología p-y en el análisis de un amplio número de modelos de grupos de pilotes, en los que se aplicaron modificaciones a las curvas p-y para la inclusión de los efectos de grupo y carga sísmica; dichos modelos han sido elaborados incluyendo diferentes configuraciones geométricas de los grupos y varios tipos de suelos de cimentación. Para el análisis de los modelos, se ha empleado el *software* especializado FB-Multipier que, además de incluir la metodología elegida, permite la aplicación de cargas sísmicas reales como las dadas por señales acelerográficas. A partir de los resultados de deflexiones y momentos obtenidos en el análisis de los modelos, se presentan algunas observaciones sobre el comportamiento de los grupos de pilotes sometidos a carga sísmica y se incluyen consideraciones referentes al diseño de los mismos. [7].

Turello, Pinto y Sanchez (2014) en Argentina, realizan una modelación de la interacción suelo-pilote en pilotes cargados lateralmente mediante elementos de viga, a fin de tener en cuenta el comportamiento plástico en las proximidades del pilote. Para la realización del modelo en 3D, utilizan el *software* Abaqus para un pilote vertical de sección circular, dispuesto en un estrato de suelo homogéneo; para el suelo, utilizan el modelo constitutivo Mohr- Coulomb; mientras que, para el pilote, adoptan un comportamiento elástico lineal. Los resultados obtenidos en un pilote vertical sobre un suelo arenoso, fueron comparados con los obtenidos con el método de las curvas P-y, las curvas para arenas propuestas por O'Neill y las curvas propuestas por Reese. Finalmente, con los resultados obtenidos, generan las curvas de respuesta fuerzas-desplazamientos y momentos-giros, mediante la integración de las tensiones en la superficie de interacción suelo-pilote en el perímetro del pilote, como se muestra en la Fig. 5. [8].



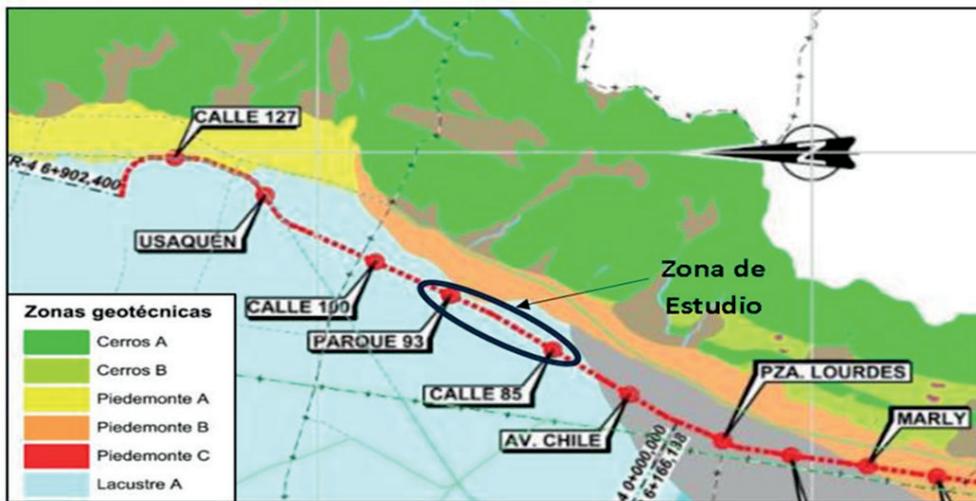
Fuente: Referencia [8].

Fig. 5 . (a) Deformada. (b) Desplazamiento en la cabeza del pilote vs. carga externa aplicada. (c) Diagrama de momentos flectores. (d) Diagrama de corte.

III. GENERALIDADES

Para el desarrollo de esta metodología, se selecciona un sector típico del Depósito Lacustre ubicado al norte de la ciudad de Bogotá, como se presenta en la Fig. 6.

La delimitación se realiza teniendo en cuenta el mapa de Geotécnico de Bogotá (DPAE, 2010), en donde se zonifica de acuerdo con las condiciones geotécnicas, utilizando información para el sector que va desde la calle 83 hasta el parque de la 93. [9].



Fuente: Referencia [9].

Fig. 6 . Localización de la zona de estudio para la investigación.

IV. METODOLOGÍA

A continuación, se expone la metodología a emplear:

A. Recolección de Información Existente

En esta fase, se recopilará la información necesaria para el desarrollo del trabajo, como: la geología regional y local de la zona de estudio; se buscará registros de perforación, ensayos de campo y laboratorio de un estudio de suelos dentro del Depósito Lacustre para el sector que va desde la calle 83 hasta el parque de la 93; se recopilarán varias señales sismográficas con distintas frecuencias.

B. Determinación de Perfil Estratigráficos y Señales Sismográficas

En esta fase, se establece el perfil promedio para las modelaciones con los respectivos parámetros del suelo que se necesitan para utilizar el modelo constitutivo Cam Clay, como: K , λ , e_0 , OCR , c , Φ

, Φ_{CV} , v ; a continuación, se determina la sobrecarga de los pilotes mediante el análisis de capacidad portante; y, finalmente, se definen las 9 señales sismográficas donde son: 3 de fuente cercana, 3 de fuente intermedia y 3 de fuente lejana para las respectivas modelaciones a las cuales se les hará el tratamiento de datos, generando los respectivos acelerogramas escalados y los espectros de Fourier de cada una de las señales.

X. Elaboración de Modelos en el Programa de Elementos Finitos

En esta fase, se introducen los modelos al software, donde se inicia con el perfil estratigráfico colocando los parámetros del perfil promedio de la zona de estudio y la condición de nivel freático del terreno; a continuación, se varían los grupos de pilotes con diferentes configuraciones de espaciamiento y distribución, así como las distintas señales sísmicas que se utilizarán en los respectivos análisis.

De esta manera, se generan los resultados para cada uno de los modelos, donde se obtiene la de flexión, diagrama de cortante y el diagrama de momento flector a lo largo de los pilotes de cada grupo para cada una de las fuentes de sismo.

D. *Análisis de Resultados*

Al obtener los resultados por medio del *software*, se proseguirá con la fase de análisis de resultados, determinando las magnitudes de las deflexiones, fuerza cortante, momento flector y su relación con la configuración de grupos de pilotes en cuanto a su espaciamiento y distribución, para cada una de las fuentes de señales sísmicas. Así mismo, se espera obtener un análisis de los datos que surjan de las modelaciones para entregar recomendaciones del comportamiento para el prediseño estructural de los pilotes.

En esta fase, se realizará el análisis estadístico de los resultados obtenidos en las modelaciones, para dar como resultado la media y la desviación estándar para cada una de las configuraciones de grupos de pilotes de cada una de las tres fuentes de señales sísmicas, como: cercana, intermedia y lejana.

E. *Validación de Resultados*

En esta fase, se tiene en cuenta una pequeña muestra de los modelos que se utilizan en la modelación mediante el *software* de elementos finitos en 3D, donde se realiza una validación de resultados mediante análisis basado en la metodología P-Y con inclusión dinámica para grupos de pilotes mediante el *software* FB-Multipier.

F. *Resultados Finales*

En esta fase, se presentan los resultados obtenidos y las respectivas recomendaciones sobre el análisis del comportamiento en cuanto al efecto de grupo de los resultados obtenidos en la modelación.

V. CONCLUSIONES

Con el desarrollo de esta metodología, se espera poder afianzar el conocimiento sobre el comportamiento en grupos de pilotes al ser sometidos a cargas de sismos; para un sitio típico del Depósito Lacustre de la ciudad de Bogotá D.C., en cuanto a la generación de diferentes variables como las deflexiones, fuerza cortante y momentos flectores que se pueden presentar a lo largo de los grupos de pilotes; donde dichas variables son tenidas en cuenta en el diseño estructural de la cimentación, ya que en la actualidad la mayoría de las cimentaciones que se están realizando en la ciudad son sobre grupos de pilotes. Esto permitirá poder avanzar y tener una mejor idea sobre el comportamiento que se puede presentar, en este tipo de cimentaciones ante la eventualidad de un sismo, mediante el análisis de elementos finitos en 3D.

El análisis de deflexiones, fuerzas cortantes y momentos flectores en un grupo de pilotes sometidos a sismo, mediante elementos finitos en 3D, forma parte de una herramienta que puede promover este tipo de investigaciones a nivel local; donde se tenga en cuenta la interacción suelo-pilote en tres dimensiones, dejando atrás metodologías tradicionales y, de esta manera, mejorar día a día los diseños en las cimentaciones de este tipo; ya que, actualmente, no se cuenta con una metodología a nivel local.

REFERENCIAS

- [1] Instituto Colombiano de Geología y Minería Ingeominas, Geología de la Sabana de Bogotá. Bogotá: Instituto Colombiano de Geología y Minería Ingeominas, 2005, p 75.
- [2] Alcaldía Mayor de Bogotá D.C., Decreto N° 523 por el cual se adopta la Microzonificación Sísmica de Bogotá D.C. Bogotá: Alcaldía Mayor de Bogotá D.C., 2010, p. 7.

- [3] DAS, M. Braja, “Principios de Ingeniería de Cimentaciones”, 4ta ed. México: Thomson Editores, S.A. de C.V, 2001, pp. 628-629.
- [4] DAS, M. Braja, “Principios de Ingeniería de Cimentaciones”, 4ta ed. México: Thomson Editores, S.A. de C.V, 2001, pp. 629-631.
- [5] H.H. Zhang and J.C. Small, “Analysis of capped pile groups subjected to horizontal and vertical loads”, *Computers and Geotechnics*, Vol. 26, pp. 1-21, Sep. 1999.
- [6] A. F. Uribe Santa, “Análisis Tridimensional de Pilas Considerando el Comportamiento No Lineal del Suelo”, M.S. Tesis, Maestría en Ingeniería Geotécnica, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. Medellín, Colombia, 2012.
- [7] C. J. Sainea Vargas, “Grupos de Pilotes sometidos a cargas de sismo”. ResearchGate. Colombia, pp. 1-15, Jun. 2012.
- [8] D. Turello, F. Pinto y P. Sanchez, “Modelación de la Interacción Suelo-Pilote en Pilotes cargados lateralmente mediante elementos de Viga Embebidos en Sólidos”. *Mecánica Computacional*, Vol. 33 pp. 3-25, Sep. 2014.
- [9] Instituto de Desarrollo Urbano IDU [En línea], <https://www.idu.gov.co/documents/412861/413235/Presentaci%C3%B3n+Condiciones+Geot%C3%A9cnicas+del+proyecto+primera+1%C3%ADnea+del+metro.++Autor+Carlos+Oteo+Mazo..pdf/10ed6095-49c7-4b3d-98a2-41d4eaae5b46> [citado el 20 de Julio de 2016].