

Módulo de reacción horizontal en grupos de pilotes en arcillas blandas

Horizontal reaction module of pile groups in soft clays

Holman Alberto Arias Camacho*
John Allison Mendoza Jimenez **
Carlos Javier Sainea Vargas***

Resumen

En este artículo se presentan los resultados del módulo de reacción horizontal k_h obtenidos en una serie de modelos computacionales elaborados con la ayuda del software FB-Multiplier; en el desarrollo del proyecto se contemplaron grupos de pilotes largos en arcillas blandas, con diferentes configuraciones geométricas y restricciones al giro, mediante el uso de la metodología p-y no lineal basada en el modelo de Winkler, buscando caracterizar el comportamiento de los grupos de pilotes ante cargas laterales. Con el fin de emplear en los análisis un modelo más completo se tuvo en cuenta el comportamiento axial a través de curvas f-w y q-w para el aporte por fricción y punta respectivamente.

Además se utilizó una modificación dinámica teniendo en cuenta las recomendaciones dadas por NCHRP (2001), se usaron dieciséis señales acelerográficas de diferentes fuentes sísmicas, en búsqueda de contar con un amplio número de parámetros, que eventualmente pueden afectar la respuesta lateral del suelo y por ende el comportamiento del k_h bajo la aplicación de las variables mencionadas.

Palabras clave: Módulo de reacción horizontal, Curvas p-y, Análisis Winkler no lineal, Modificación dinámica, Diseño sísmico, Grupos de pilotes, Fuente sísmica.

Abstract

This research work presents the corresponding results to the computational models which were elaborated with the FB-Multiplier software for long pile groups in soft clays with different geometric configurations and turn restrictions. Using nonlinear p-y methodology based on Winkler's model, the performance of the pile's groups to lateral loads was characterized as well. The axial performance was necessary to make the model more useful through the f-w and q-w curves according to the input for friction and end respectively.

Besides, a dynamic modification was used considering the recommendations given by the NCHRP (2001); as well as the use of sixteen accelerographic signs from different sources in order to have a large number of parameters that eventually can affect the lateral soil response and therefore the behavior of horizontal reaction module under the application of the study variables.

Key words: Horizontal reaction module, p-y curves, Nonlinear Winkler analysis, Dynamic modification, Seismic design, Pile groups seismic source.

* Estudiante de pregrado de Ingeniería Civil, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. maick180@hotmail.com

** Estudiante de pregrado de Ingeniería Civil, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. john.mendoza@uptc.edu.co

*** Ingeniero Civil, M.Sc. Ingeniería-Geotecnia. Docente Asistente Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. carlos.sainea@uptc.edu.co

I. INTRODUCCIÓN

Dado el avance tecnológico y el uso extendido de herramientas computacionales, en la actualidad es más fácil llevar a cabo análisis completos, que involucren teorías integras que anteriormente implicaban alto gasto de tiempo. Métodos como el de las curvas p-y no lineales, que corresponde a una modificación no lineal del modelo de Winkler, sirven para caracterizar la respuesta del suelo ante la aplicación de cargas laterales. Con esto se facilita la comprensión del comportamiento de la interacción pilote-suelo-pilote, y se permite mejorar las metodologías de diseño existentes, en pro de diseños óptimos que se acoplen a las necesidades de cada proyecto.

Dado que la metodología p-y permite analizar el comportamiento del suelo ante cargas laterales, para obtener soluciones se requiere de un esquema iterativo, lo cual hace necesario el uso de una herramienta computacional que facilite el desarrollo y solución de esta, por lo cual se optó por el software FB-Multiplier [1].

II. PROPIEDADES DE LOS MODELOS Y DEL SOFTWARE DE ANÁLISIS

A. Modelo de análisis.

Winkler propuso que la resistencia horizontal del terreno frente a fuerzas externas se puede suponer proporcional a la deflexión del suelo [3]. Al entender esta idea, los investigadores representaron el suelo con una serie de resortes elásticos, de modo que los esfuerzos de compresión en la masa de suelo sean proporcionales a la deflexión en cualquier punto del pilote, la cual a su vez es proporcional a la carga aplicada. La constante del resorte representa la rigidez del suelo como se indica en (1).

$$p = K_h * y \quad (1)$$

Donde y es el desplazamiento lateral en cualquier punto del pilote, p la presión en la masa de suelo y kh el módulo de reacción horizontal del suelo. En este método, el pilote y el suelo circundante se dividen en un número de capas discretas; el pilote está representado por una serie de elementos viga, que se caracterizan por la resistencia al momento de flexión y la rigidez, mientras que el suelo que rodea la pilote se sustituye por un conjunto de mecanismos que indican simplemente que la resistencia del suelo p es una función no lineal de

De igual manera, para hacer el estudio más completo [2] se tuvieron en cuenta los efectos de grupo, debido a que generalmente las cimentaciones de este tipo se diseñan en grupos de pilotes, los cuales al estar poco espaciados, presentan un comportamiento diferente al que presenta un pilote aislado. Los efectos de grupo pueden ser tanto axiales como laterales; los efectos axiales, fueron tenidos en cuenta a través del factor de eficiencia de grupo, mientras que para los efectos laterales, se aplicó una modificación a las curvas p-y a través de un factor llamado p-multiplicador. Así mismo, se usaron dieciséis señales sísmicas, con diferentes contenidos de frecuencias correspondientes a eventos sísmicos de fuentes cercanas, intermedias y lejanas, con el objetivo de que los resultados tengan una mayor utilidad, y tengan un mayor ámbito de aplicación.

En este artículo se presentan los resultados del módulo de reacción horizontal para diferentes fuentes sísmicas, obtenidos para los diferentes casos evaluados, tras realizar la construcción y análisis de los diferentes modelos de grupos de pilotes mediante el uso del software FB-Multiplier.

la deflexión y del pilote. Los mecanismos y las correspondientes curvas p-y que representan su comportamiento, se considera que varían continuamente con la profundidad.

B. El software de análisis

El FB-Multiplier es un modelo computacional para el análisis no lineal dinámico de superestructuras de puentes compuestas por columnas, estribos y grupos de pilotes; fue producido por M. Hoit, et al, prestando especial atención a la modelación no lineal de los miembros del sistema estructurales [4]. El software incluye la respuesta no lineal del suelo en las direcciones axial y lateral a lo largo de los pilotes en el sistema, usando curvas p-y, q-w y f-w así como el uso de p-multiplicadores, con los cuales se incluye en el modelo los efectos de grupo dados por la interacción pilote-suelo-pilote.

Una de sus potenciales ventajas, es la capacidad de modelar los efectos que se producen en cualquier componente del sistema, como es el caso de un impacto o un evento sísmico, además permite la especificación de las diferentes propiedades de cada pilote o grupo como: geometría del pilote, tamaño del cabezal del grupo, cargas axiales entre otras.

FB-Multipier lleva a cabo un proceso de solución iterativa, a través del método de integración paso a paso, usando el método de Newmark y el amortiguamiento de Rayleigh en la solución para la respuesta dinámica variable en el tiempo. Dado que los modelos para el suelo y los pilotes son no lineales, el esquema de iteración que usa el software es el de Newton-Rapson, llevándose a cabo el análisis del problema y la obtención de las rigideces y desplazamientos del suelo.

C. Características de los modelos de análisis

Para la elaboración de los modelos se definieron las propiedades físicas y mecánicas de los materiales usados como: los materiales estructurales y las del suelo de cimentación.

Para la modelación del suelo de cimentación se realizó como una serie de apoyos de tipo no lineales, cuyas propiedades esfuerzo-deformación se definen de acuerdo a la ubicación y tipo de apoyo. La construcción de los modelos se basó en la metodología p-y no lineal, teniendo en cuenta modificaciones dinámicas y efectos de grupo, así como la inclusión de la variable carga axial en el cabezal.

1) Materiales estructurales y suelos de cimentación: Las propiedades de los materiales estructurales a trabajar durante la modelación se encuentran en la Tabla 1. Además las propiedades del suelo de cimentación, se trabajaron con propiedades ponderadas, como se presentan en la Tabla 2.

Tabla 1. Propiedades de los materiales estructurales

Propiedades	Símbolo	Unidad	Valor
Densidad del concreto reforzado	ρ_c	kN/m ³	24
Resistencia nominal del concreto a la compresión	f'_c	MPa	28
Módulo de elasticidad del concreto reforzado	E_c	MPa	24870

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 2. Propiedades físicas y elásticas, del suelo de cimentación.

c_u (kPa)	q_u (kPa)	γ (kN/m ³)	μ_s	V_s (m/s)	E_s (MPa)	G_s (MPa)	kh (kN/m ³)
44,24	88,48	17,39	0,4	125	15,04	5,37	34433

Fuente: Elaboración propia.

Para la elección de los coeficientes de reacción horizontal Según Kishida y Nakai (1977) [5] tenemos (2):

$$k_h = 2 k_{vesic} \quad (2)$$

Donde según Vesic, se tiene para suelos arcillosos el k_{vesic} se calcula según (3):

$$K_{vesic} = \frac{0.65}{D} \sqrt[1.2]{E_s * D^4} * \frac{E_s}{1 - \mu_s^2} \quad (3)$$

En la Ecuación (2) tenemos que: μ_s y la relación de Poisson del suelo respectivamente, E_p es el módulo elástico del material del pilote, I_p el momento de inercia del pilote y E_s el módulo elástico del suelo dado por (4).

$$E_s = 170 q_u \quad (4)$$

2) Configuración geométrica de los modelos.

La geometría a emplear para la configuración de los modelos, corresponde arreglos típicos de grupos de pilotes en concreto, los cuales no cuentan con restricción en la punta. Las variables a considerar para cada grupo a modelar se presentan en la Tabla 3.

Dadas las condiciones propias del pilote, su comportamiento ante cargas laterales está condicionado por la relación de rigidez. Así pues, para pilotes largos que la respuesta ante cargas laterales, está dada por un comportamiento flexible, presentándose en una parte fluencia del material y en otra parte la falla del suelo de cimentación. Para pilotes en arcilla se presenta un comportamiento flexible según Prakash (1990) [5], si la relación $L/R \geq 3,5$. Donde R es el factor de rigidez relativa para pilotes largos (flexibles) obtenido de (5) y L la longitud del pilote.

$$R = \sqrt[4]{\frac{E_p * I_p}{K_h * D}} \quad (5)$$

Tabla 3. Definición de la geometría de los grupos de pilotes

Propiedad	Valor
Diámetro de los pilotes (m)	0,5
Longitud de los pilotes	Largos
Separación (S)	3D, 5D, 7D
Tipos de grupos	2X2, 3X2, 3X3, 4X2
Condiciones de fijación en la cabeza	Fijos, Articulados
Espesor del cabezal	1 (m)
Lado del cabezal	$(n_{pilotes} - 1)S + 2D$

Fuente: Elaboración Propia.

3) Condiciones de carga.

Para determinar las condiciones de carga a la cual se verán sometidos los pilotes, se realizó un análisis de capacidad portante, considerando factores de

eficiencia por carga axial; además se determinó la capacidad lateral última y admisible de los grupos de acuerdo con el método de Broms [6]. Para el análisis dinámico, la carga sísmica empleada en los modelos de análisis corresponde a dieciséis señales acelerográficas seleccionadas, de acuerdo a la fuente de aplicación del sismo, indicadas en la Tabla 4.

Tabla 4. Propiedades de las señales acelerográficas

Fuentes	Sismos	Escalado (g)	$f_0 < 10\text{Hz}$ (Hz)	$T_0 = 1/f_0$	$\omega = 2\pi f_0$
Cercana	Coyote Lake	0.160	5.615	0.18	35.28
	Mammoth	0.160	2.185	0.46	13.73
	Umbria	0.160	5.176	0.19	32.52
	La Uribe	0.160	2.661	0.38	16.72
	Coalinga	0.160	5.225	0.19	32.83
	Oroville	0.160	5.566	0.18	34.97
Intermedia	Loma Prieta - Yerbabuena	0.140	2.124	0.47	13.35
	Northridge Mt. Baldy	0.140	2.075	0.48	13.04
	Northridge Newport	0.140	2.405	0.42	15.11
	Northridge - Deer Canyon	0.140	2.441	0.41	15.34
	Kobe Okayama	0.140	2.100	0.48	13.19
Lejana	Mexico CUIP	0.038	0.500	2.00	3.14
	Mexico CUMV	0.038	0.500	2.00	3.14
	Xaltinguis	0.038	2.246	0.45	14.11
	Mexico Cerro Depi	0.038	2.222	0.45	13.96
	Mexico CU01	0.038	0.488	2.05	3.07

Fuente:Elaboración Propia.

En la Tabla 4 tenemos: f_0 la frecuencia, T el periodo y ω la frecuencia circular de la carga. Las señales seleccionadas y los valores a las que fueron escaladas se hizo a partir de las recomendaciones dadas por DPAAE (2006) [6], de acuerdo con la zonificación de la respuesta sísmica establecida por FOPAAE (2010), siendo esto realizado con el fin de tener eventos sísmicos de diferentes contenidos frecuenciales y su incidencia en el comportamiento de kh.

III. MODELO PARA CARGA AXIAL

Para el análisis de carga axial se supone que el pilote tiene en eje centroidal recto (el eje z, positivo hacia abajo) y se somete a una carga centrada en la cabeza (parte superior de la pilote) P_0 . Los desplazamientos se suponen paralelos al eje del pilote, se denotan como w y son positivos en la dirección z positiva. Un enfoque usado para reducir el complejo problema tridimensional a un modelo cuasi unidimensional es sustituir el suelo que rodea el pilote por una distribución de resortes a lo largo de la longitud del pilote y por un resorte concentrado en la punta del pilote que resiste los desplazamientos axiales del mismo [7]; para el modelo se estableció el uso de las curvas f-w de Heydinger y O'Neill (1986) y las curvas q-w de Mc Vay (1989).

IV. MODELO PARA CARGA LATERAL

Para el modelo se considera el suelo que rodea al eje, como un conjunto de resortes elásticos no lineales gobernados por la Ecuación diferencial (6). Esta suposición es atribuida a Winkler (1967) y se afirma que cada resorte actúa de manera independiente, es decir, el comportamiento de un resorte no tiene ningún efecto sobre cualquiera de los resortes adyacentes [8], siendo esto una limitación puesto que la naturaleza continúa del suelo no se modela en forma explícita.

$$\frac{d^2}{dz^2} \left(E_p I_p \frac{d^2 y}{dz^2} \right) + \frac{d}{dz} \left[P(z) + \frac{dy}{dz} \right] - p(z, y) = 0 \quad (6)$$

Donde E_p el módulo elástico del material del pilote, I_p la inercia del pilote, $P(z)$ la fuerza axial de compresión en el eje z del pilote y $p(z, y)$ la resistencia lateral como función de la posición z en el pilote y del desplazamiento y a la profundidad z. La solución de la ecuación diferencial presentada puede obtenerse si el módulo del suelo k puede expresarse en función de z, y, lo cual se logra de una mejor manera mediante una familia de curvas que muestren la reacción del suelo p como función de la deflexión y. Dichas curvas son no lineales y dependen de diversos parámetros, como la profundidad, resistencia al corte del suelo y el número de ciclos de carga (Reese, 1977).

A. Modificación de las curvas p-y para carga dinámica.

Para el proceso de modificación de las curvas p-y para cargas dinámicas se realizó en base al análisis de modelos computacionales hechos por Brown, O'Neill, y otros (NCHRP, 2001), y mediante la aplicación de (7), la cual fue desarrollada a partir de análisis de regresión, relacionando la curva p-y estática, la frecuencia y la velocidad aparente:

$$p_d = p_s \left[\alpha + \beta a_0^2 + k a_0 \left(\frac{\omega y}{D} \right)^n \right] \quad (7)$$

con $p_d \leq p_y$

Donde P_d es el valor dinámico de p en la curva p-y a la profundidad z (N/m), P_s es la correspondiente reacción estática del suelo (obtenida de la curva p-y estática) a la profundidad z (N/m), a_0 es la frecuencia adimensional $a_0 = \omega r_0 / V_s$, a frecuencia circular de carga (rad/s) dada como $\omega = 2\pi f_0$, siendo f_0 la frecuencia dominante del sismo para el que se diseña la cimentación ($f_0 < 10\text{Hz}$), D el diámetro del pilote, r_0 el radio del pilote, y la

deflexión lateral a la profundidad z cuando el suelo y el pilote están en contacto durante la carga (m); α , β , κ y n son constantes de ajuste de las curvas. A continuación en la Tabla 5 se presentan los valores de las constantes de ajuste para las curvas, los cuales fueron tomados de los resultados y recomendaciones obtenidos por NCHRP (2001).

Tabla 5. Parámetros constantes de ajuste de las curvas p-y dinámicas

Tipo de Suelo	Descripción	α	β		K	η
			$a_o < 0,025$	$a_o > 0,025$		
Arcilla Blanda	$C_u < 50 \text{KPa}$ $V_s < 125$	1	-180	200	80	0,18

Fuente: BROWN, D.A, O'NEILL, M.W, HOIT, M, y otros: Static and Dynamic Lateral Loading of Pile Groups. NCHRP Report 461. Transportation Research Board, National Research Council. Washington DC, 2001.

B. Los P-multiplicadores.

El concepto de p-multiplicadores (también llamados f_m) fue descrito por Brown et al. (1988) como una manera de dar cuenta de los efectos del grupo de pilotes mediante ajustes a las curvas de p-y. Los valores usados como p-multiplicadores son factores empíricos de reducción experimentales, derivados de las pruebas de carga en grupos de pilotes. Debido a que son determinados experimentalmente, los p-multiplicadores incluyen tanto la elasticidad como el efecto "sombra". El procedimiento sigue el mismo método utilizado en el método de análisis p-y, excepto que se aplica un multiplicador, con un valor menor a uno, a los valores de p de la curva p-y afectada.

Para el desarrollo de esta investigación los valores de los p-multiplicadores usados de acuerdo con la geometría de los grupos de pilotes analizados se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6. P-multiplicadores usados para los grupos de análisis

S/D	P-multiplicadores			
	2x2	3x2	3x3	4x2
3	0.60	0.5	0.50	0.43
5	0.73	0.85	0.85	0.81
7	1.00	1.00	1.00	1.00

Fuente: MOKWA, Robert. Investigation of the resistance of pile caps to lateral loading. Dissertation submitted to the Virginia Polytechnic Institute and State University for the degree of Doctor in Philosophy in Civil Engineering. Blacksburg, Virginia, 1999.

C. Análisis de pilotes sometidos a carga lateral estática y deflexión máxima.

Para el cálculo de la capacidad última en pilotes cargados lateralmente, Broms (1965) [9] desarrollo una solución simplificada para pilotes largos cargados lateralmente, suponiendo una falla del pilote gobernada por la resistencia a la fluencia de la sección del pilote. Esta solución simplificada se presenta para pilotes con cabeza libre o empotrada en suelos finos ($c_u = \text{cte}$, $\Phi = 0$). Las ecuaciones para el cálculo de la carga última Q_u , el momento máximo M_{\max} y la profundidad a que este se produce x_o , para cada tipo de restricción se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7. Ecuaciones para Q_u , X_o y M_{\max}

Tipo de pilote	Articulado	Empotrado
Largo	$M_{\max} = Q_u (e + 1.5B + 0.5x_o)$ $M_{\max} = 2.25Bc_u (L - X_o)^2$ $X_o = Q_u / (9c_u B)$	$Q_u = 2M_u / (1.5B + 0.5x_o)$ $X_o = Q_u / (9c_u B)$

Fuente: BROMS, Bengt: Precast Piling Practice. Thomas Telford LTD, London, 1981

En las ecuaciones de la Tabla 6 tenemos que: B es el ancho o diámetro del pilote, e la excentricidad a que se aplica la carga horizontal, c_u la cohesión no drenada y M_u el momento último soportado por la sección del piloten verificando que $M_{\max(\text{calculado})} < M_u$ donde el momento último para la sección del pilote se calcula como $M_u = ZF_b$, con $Z = I_p / (D/2)$ y $F_b = 0.6f'c$.

Para el cálculo de la deflexión máxima se optó por usar el método de gráficos adimensionales elaboradas por Davisson y Gill las cuales brindan soluciones sencillas, desarrolladas para medios elásticos con $E_s = \text{cte}$. Las ecuaciones para el cálculo se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8. Ecuaciones para cálculo de la Deflexión máxima

Solicitud en la cabeza	Cabeza libre	Cabeza empotrada
Fuerza H_{adm}	$y = H_{adm} y_{lq}^* [R^3 / (E_p^* I_p)]$	$y = H_{adm} y_{lf}^* [R^3 / (E_p^* I_p)]$

Fuente: PRAKASH, Shamsheer y SHARMA, Hari: Pile Foundations in Engineering Practice. John Wiley & Sons. New York, 1990.

En las ecuaciones de la Tabla 8 tenemos que: H_{adm} es la carga lateral admisible, y la deflexión calculada, y_{lq} factor obtenido de las gráficas adimensionales para pilotes con cabeza libre, y_{lf} factor obtenido de las gráficas adimensionales para

pilotes con cabeza empotrada, R la rigidez del pilote, E_p el modulo elástico del pilote e I_p la inercia del pilote.

D. Capacidad última por carga lateral en grupos de pilotes.

Para determinar la capacidad última de grupos sujetos a carga lateral se emplea (8).

$$(Q_u)_G = G_e n Q_u \quad (8)$$

Donde $(Q_u)_G$ es la capacidad lateral última del grupo de pilotes, n el número de pilotes en el grupo, Q_u la capacidad lateral última para un solo pilote y G_e el factor de eficiencia de grupo. En la Tabla 9 se presentan los factores de eficiencia lateral de grupo basados en una serie de ensayos adelantados por Prakash y Saran (1967)[10].

V. ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL MÓDULO DE REACCIÓN HORIZONTAL

Posteriormente, tras definir las propiedades de los modelos analíticos y de presentar las soluciones aproximadas correspondientes, para tener un punto de comparación, se llevó a cabo la fase de modelación. En esta se realizó la generación de los modelos de los grupos de pilotes, en las configuraciones establecidas y aplicando las diferentes cargas planteadas en el desarrollo de la investigación; los modelos fueron analizados mediante la ayuda del software FB-Multiplier, permitiendo obtener los resultados de deflexiones y presiones horizontales en los diferentes puntos determinados a lo largo del pilote.

A partir de los valores de las deflexiones y presiones horizontales en la masa de suelo obtenidas con el FB-Multiplier, se calculó el kh a las diferentes profundidades, el cual fue comparado con el valor de kh propuesto por Kishida y Nakai (1977) para pilotes aislados, para lo cual se dividieron los valores de kh obtenidos con FB-Multiplier entre el valor de kh_{pond} .

Tabla 9. Valores de G_e en suelos finos

Ge			
S/D	Grupo 2x2	Grupo 3x3	Recomendado
3	0,42	0,39	0,4
3,5	0,5	0,42	0,45
4	0,57	0,44	0,5
4,5	0,61	0,47	0,55
5	0,63	0,48	0,55
6	-	-	0,65
8	-	-	1,00

Fuente: PRAKASH, Shamsheer y SHARMA, Hari: Pile Foundations in Engineering Practice. John Wiley & Sons. New York, 1990.

Con el fin de identificar el efecto de la variable carga axial, se decidió hacer un análisis con diferentes aplicaciones de este tipo de carga, teniendo como base el 100% de la carga axial admisible, la cual fue disminuida en intervalos del 25%; Por otra parte se analizó qué probable comportamiento tendría el kh ante un evento de naturaleza sísmica, teniendo en cuenta la afectación sobre la interacción pilote-suelo-pilote de las variables de estudio como diferentes configuraciones de grupos, espaciamientos y fuente sísmica.

A. Resultados del módulo de reacción horizontal

En esta sección se presentan los resultados obtenidos para kh, de manera resumida y tras un proceso estadístico, de acuerdo a la condición de restricción al giro. A continuación se presentan algunas observaciones generales sobre el comportamiento encontrado.

- En grupos de pilotes fijos articulados evaluados bajo la aplicación de fuentes cercanas, intermedias y lejanas para las diferentes aplicaciones de cargas axiales, se observó una tendencia marcada en la cual el módulo de reacción horizontal presentó un aumento en la medida en que se incrementó el espaciamiento; esto debido a que en la proporción que se amplía este, los efectos de grupo disminuyen, puesto que los pilotes, al contar con mayores separaciones buscan comportarse de manera aislada, y la resistencia del suelo tiende a mejorar su comportamiento.
- El comportamiento de kh de acuerdo a las diferentes fuentes de aplicación sísmica teniendo en cuenta las variaciones de carga axial, indicó que los valores de kh obtenidos para grupos 3X2 y 3X3 tienden a presentar el mismo comportamiento, lo cual se ve reflejado en las Figuras 1 a la 6, notándose los mismos valores de kh en todos los modelos de pilotes fijos y articulados.
- De manera general se puede decir que todos grupos de pilotes articulados con sus diferentes configuraciones geométricas presentaron variaciones en el comportamiento de kh de acuerdo a la aplicación de la carga axial,

notándose que en la medida que disminuye la aplicación de la carga axial, el valor de kh aumenta. Por otra parte al aumentar el valor del espaciamiento el comportamiento de kh tiende a un incremento.

- Se puede decir, que las frecuencias utilizadas tienen una alta influencia sobre el comportamiento del módulo de reacción horizontal, dado que desde la concepción del modelo de análisis, esta se involucra de manera directa en el comportamiento de la respuesta del suelo a través de la modificación dinámica en las curvas p - y ; siendo esto un factor determinante, sobre el comportamiento y respuesta de los modelos evaluados.
- Al analizar gran parte de los modelos de pilotes fijos de manera estricta, se dedujo que los grupos con espaciamientos de 3D, sufren de manera notoria los efectos de grupo al igual que los efectos de sismo en todas las fuentes sísmicas evaluadas; en espaciamiento de 5D el comportamiento es as variado, puesto que para fuentes sísmicas cercanas los efectos de grupo no tienen incidencia, por el contrario en fuentes lejanas, los efectos de grupo presentan una alta influencia; finalmente para fuentes intermedias se encuentra en una transición entre el comportamiento de kh para la fuentes sísmicas descritas anteriormente.
- Todos grupos de pilotes fijos con sus diferentes configuraciones geométricas presentaron variaciones en el comportamiento de kh de acuerdo a la aplicación de la carga axial, pero no se encontró una tendencia notable en relación al aumento o disminución de la carga axial que su vez modifiquen el comportamiento del kh .

B. Resultados de la deflexión

- El comportamiento de la deflexión tanto para pilotes fijos como para pilotes articulados, indicó que en la medida que aumento la frecuencia sísmica, el valor de la deflexión también aumentó. Además se identificó que la carga axial no tiene altas implicaciones en la variación de la carga axial, puesto que las variaciones eran relativamente pequeñas.
- Por otra parte para los grupos con espaciamientos de 7D, se encontró que el

comportamiento de los diferentes grupos evaluados para cada fuente, tendieron a presentar un comportamiento similar, dado que en esta configuración geométrica los pilotes tienden a comportarse como aislados

VI. PROCEDIMIENTO DE DISEÑO

a) Obtener los valores ponderados del peso unitario del suelo γ , así como de la cohesión no drenada c_{upond} y la relación de Poisson μ .

b) Calcular la resistencia a la compresión simple $q_u = 2c_{upond}$.

c) Determinar el módulo elástico del suelo con la ecuación 6-3 de la sección 6.

d) Definir las características del pilote como diámetro, longitud y propiedades de momento de inercia y módulo elástico; basados en las recomendaciones de NSR-10.

e) Calcular el k_{vesic} , de acuerdo con la ecuación 6-2 de la sección 6. Seguidamente calcular el kh según Kishida y Nakai, de acuerdo a la ecuación 6-1.

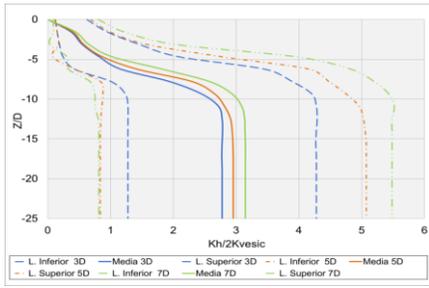
f) Ubicar la zona de amenaza sísmica de acuerdo con el reglamento colombiano de construcción sismoresistente, título A.2 para definir las figuras de diseño, teniendo en cuenta que: para zonas de amenaza sísmica alta se utilizarán los resultados correspondientes a la fuente cercana, para amenaza intermedia los resultados de las figuras de fuentes intermedias y para amenazas sísmicas bajas, los correspondientes a la fuente lejana.

g) Definir la configuración del grupo de pilotes a trabajar en el modelo de análisis, así como el espaciamiento y tipo de restricción al giro en el cabezal. Seguidamente ir a las Figuras 1 y 2, y de acuerdo con el problema de estudio y zona de amenaza sísmica para determinar la modificación del kh .

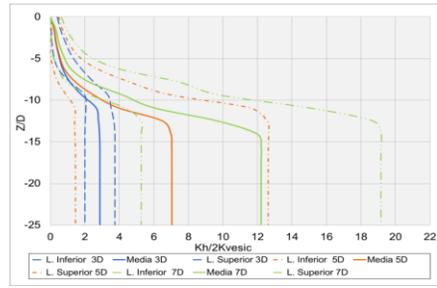
h) Con el valor de $kh_{modificado}$, se calcular la rigidez del pilote de acuerdo a la ecuación 6-4. La metodología solo aplica para pilotes con comportamiento flexible.

i) Teniendo el valor de $kh_{modificado}$, para el cálculo de la carga lateral admisible se sigue el mismo procedimiento establecido por Broms (1964). Por otra parte para el cálculo de la deflexión se usa la metodología dada por Davisson y Gill (1963).

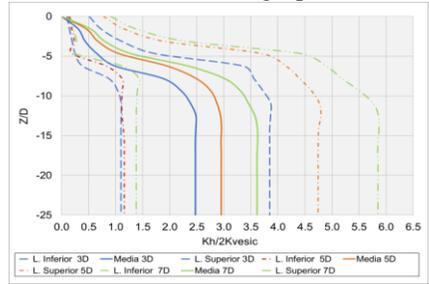
Figura 1. Modificación de kh para pilotes fijos



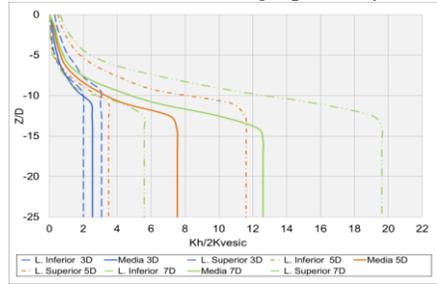
a) Fuente cercana grupo 2x2



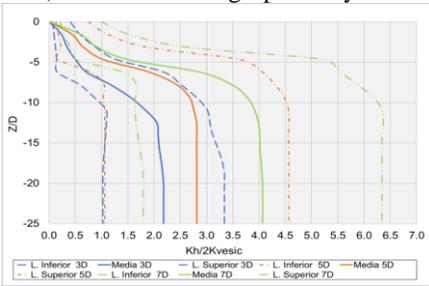
e) Fuente intermedia grupo 3x2 y 3x3.



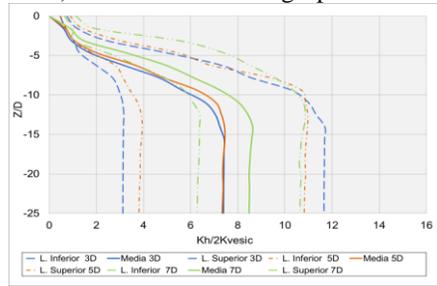
b) Fuente cercana grupo 3x2 y 3x3



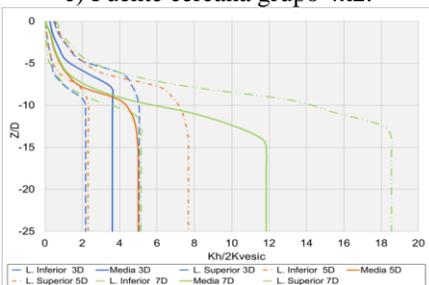
f) Fuente intermedia grupo 4x2.



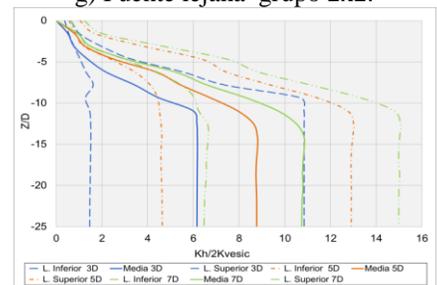
c) Fuente cercana grupo 4x2.



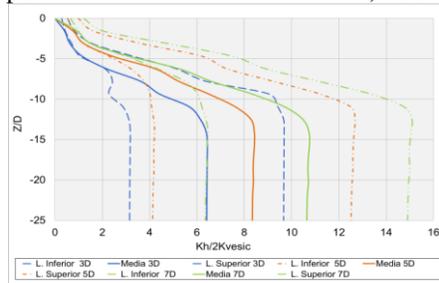
g) Fuente lejana grupo 2x2.



d) Fuente intermedia grupo 2x2



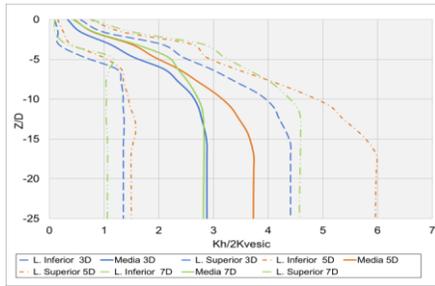
h) Fuente lejana grupo 3x2 y 3x3.



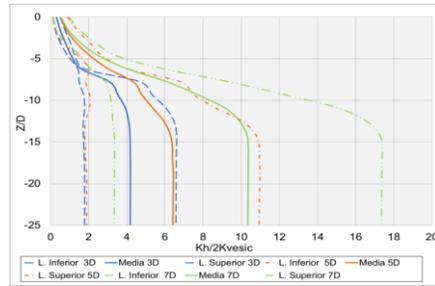
i) Fuente lejana grupo 4x2

Fuente: Elaboración Propia.

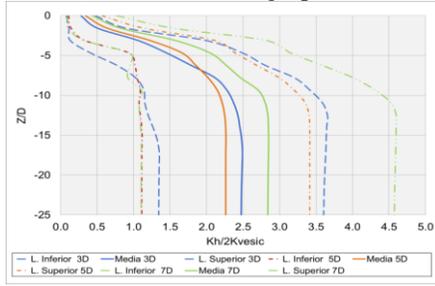
Figura 2. Modificación de kh para pilotes articulados



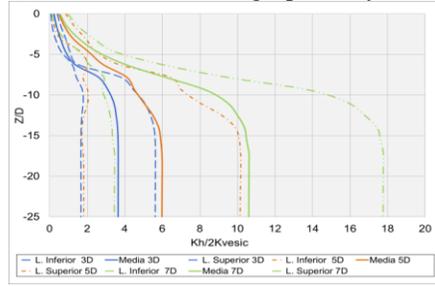
a) Fuente cercana grupo 2x2



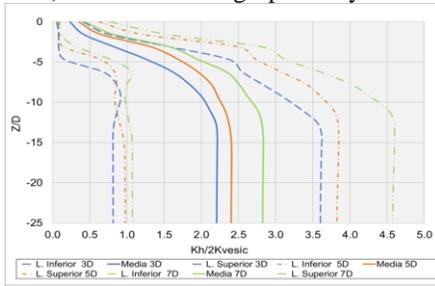
e) Fuente intermedia grupo 3x2 y 3x3.



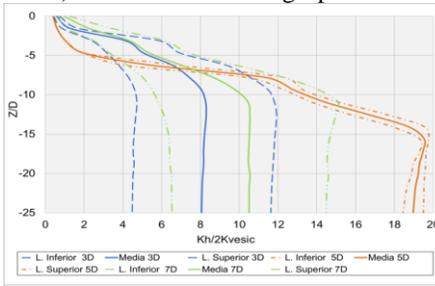
b) Fuente cercana grupo 3x2 y 3x3



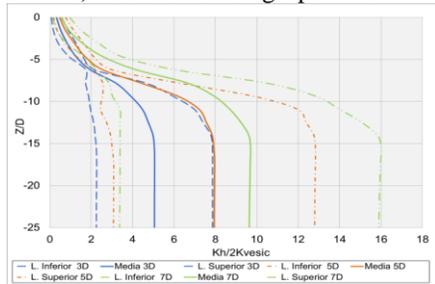
f) Fuente intermedia grupo 4x2.



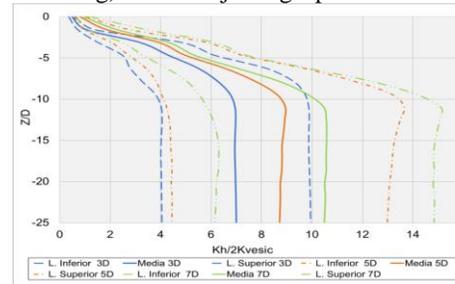
c) Fuente cercana grupo 4x2.



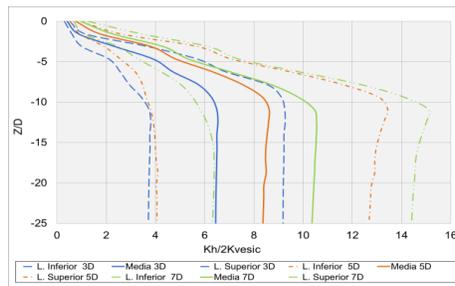
g) Fuente lejana grupo 2x2.



d) Fuente intermedia grupo 2x2



h) Fuente lejana grupo 3x2 y 3x3.



i) Fuente lejana grupo 4x2

Fuente: Elaboración Propia.

VII. CONCLUSIONES

- Se encontró alguna dispersión en parte los resultados obtenidos, debida al uso de diferentes acelerogramas, los cuales poseen frecuencias y aceleraciones escaladas con diferentes valores, además de que los pilotes se llevaron a diferentes valores de deflexión según las cargas aplicadas, y las curvas p-y fueron modificadas de acuerdo con la frecuencia de las señales sísmicas y las características del suelo. A pesar de esto se identificó que tanto para pilotes fijos, como para pilotes aislados, el comportamiento del módulo de reacción horizontal kh, se vio influenciado de manera directa por la frecuencia sísmica, haciendo que se presentaran resultados variados de acuerdo con los acelerogramas utilizados por cada fuente, puesto que esta fue involucrada de manera directa en el modelo a través de las curvas p-y dinámicas.
- De otro lado, puesto que para tener los efectos de grupos se usó el método del p-multiplicador a través de las recomendaciones dadas por Mokwa y Duncan (2001), se observó que para grupos con el mismo número de pilotes en la dirección de aplicación de la carga lateral, como los 3X2 y los 3X3, el comportamiento del kh y la deflexión en el cabezal fueron iguales.
- Es apropiado trabajar con modelos homogéneos en investigaciones de este tipo o similares, puesto que facilitan la realización de los diferentes procedimientos y la generalización de resultados, que terminan siendo aplicables a las metodologías tradicionales de análisis. De otro lado modelos como el estratificado suelen ser más complejos y difíciles de trabajar dadas sus propiedades específicas y los resultados en comparación al modelo homogéneo, no son tan dispersos.
- En los grupos de pilotes fijos se observó que para frecuencias altas, los efectos de grupo no presentaban incidencia en el comportamiento del kh, mientras que para frecuencias bajas, la variable que presentaba más incidencia en el comportamiento de los modelos evaluados estaba relacionada con los efectos de grupo. Sin embargo en los grupos evaluados con frecuencias intermedias, no se identificó la incidencia marcada por la frecuencia o los efectos de grupo, puesto que en estos modelos se notó una transición entre los efectos presentados en la fuente cercana y los de la fuente lejana.
- Por otra parte en los grupos de pilotes articulados se observó que la variable de mayor incidencia fue la frecuencia sísmica, puesto que para todos los grupos evaluados en la medida que aumentó la frecuencia sísmica disminuyó el valor de kh.
- Al analizar las gráficas de variación de kh con la profundidad, se observó que el valor del módulo de reacción horizontal en arcillas blandas, tiende a ser constante a profundidades Z/D mayores a la profundidad crítica, en la cual la falla por cuña deja de ser la falla predominante para darle paso a la falla por flujo; este comportamiento concuerda con el descrito por Terzaghi para arcillas preconsolidadas
- Los métodos aproximados para el cálculo de deflexiones tienen en cuenta variables como la aplicación de carga dinámica a través de un factor de reducción basado en pruebas cíclicas; reducciones que terminan por ser exageradas, puesto que pueden llegar a generar una disminución del valor de kh hasta del 60% al 70% según Prakash (1990) para efectos cíclicos y hasta del 90% cuando se tienen efectos combinados según Poulos y Davis (1990). Lo anterior no considera la zona de amenaza sísmica y en esta investigación se encontró que en modelos como el trabajado, los resultados obtenidos dependen de la fuente de aplicación
- En los modelos analizados, tanto para pilotes fijos como para articulados, se encontró que en la medida que aumenta el espaciamiento, hay un incremento gradual de los rangos de variación del módulo de reacción horizontal. Esto resulta razonable puesto que en la medida que aumenta el espaciamiento los efectos de grupo disminuyen, dado que los pilotes al contar con mayores separaciones buscan comportarse como pilotes aislados.
- Para todos los modelos evaluados, el comportamiento del módulo de reacción horizontal presenta mayor afectación por las variables de estudio de mayor a menor incidencia como se indica a continuación: 1) la frecuencia sísmica, 2) el espaciamiento, 3) el grupo, 4) la restricción al giro en la cabeza del pilote y 5) la carga axial aplicada. Es de resaltar que la incidencia de esta última variable no es relevante

para cargas del 25%, 50% y 75% en el comportamiento de kh, puesto que los valores más críticos se presentan para la carga axial del 100%.

- De manera general para pilotes fijos y articulados, en la medida que disminuyó la frecuencia de la fuente de aplicación sísmica, los valores de las deflexiones presentaron reducciones, siendo estas considerablemente altas para las fuentes cercanas e intermedias. Por otro lado, las deflexiones para los grupos con espaciamiento de 7D, tendieron a ser las mismas, puesto que en estos grupos los pilotes presentan comportamientos similares al de los pilotes aislados.
- Al analizar la deflexión en el cabezal en relación a las diferentes aplicaciones de carga axial, para pilotes fijos y articulados se encontró que se presentaron variaciones en relación a dicha aplicación, pero estas no eran significativas, por lo cual se estableció que la aplicación de diferentes cargas axiales en el cabezal, no tienen una alta incidencia en el comportamiento de la deflexión que se presenta.

REFERENCIAS

- [1]. M. Hoit, M. Mc Vay, C. Hays, M. Williams. FB Multipier Help Manual. University of Florida, Department of Civil Engineering. 2000.
- [2] H. Arias y J. Mendoza. “Módulo de reacción horizontal en grupos de pilotes en arcillas blandas”. Tesis como requisito parcial para obtener el título de Ingeniero Civil. Tunja, 2013.

[3]. HUANG Jin-wei: “Development of modified p-y curves for Winkler Analysis to characterize the lateral load behavior of a single pile embedded in improved soft clay” (2011). GraduateTheses and Dissertations. Paper 12114.

[4] BROWN, D.A, O’NEILL, M.W, HOIT, M, y otros: Static and Dynamic Lateral Loading of Pile Groups. NCHRP Report 461. Transportation Research Board, National Research Council. Washington DC, 2001.

[5] S. Prakash and H. Sharma H. Pile Foundations in Engineering Practice. John Wiley & Sons. New York, 1990.

[6] F. Díaz y G. Ávila. Revisión de la amenaza sísmica y señales sísmicas para la actualización de la microzonificación de Bogotá y estudios de efectos locales. Dirección de Prevención y Atención de Emergencias DPAAE, Bogotá, 2006.

[7] R. Mosher and W. Dawkins W. Theoretical Manual for Pile Foundations, Final Report. U.S. Army Corps of Engineers. Washington DC, 2000

[8] REESE, Lymon C. Laterally Loaded Piles and Computer Program COM 624G. Automatic Data Processing Center U.S Army Engineer Waterways Experiment Station. Año 1984. Pág 14-15

[9] BROMS, Bengt: Precast Piling Practice. Thomas Telford LTD, London, 1981.

[10] PRAKASH, Shamsher y SHARMA, Hari: Pile Foundations in Engineering Practice. John Wiley y Sons. New York, 1990. Pág. 392-393.