

Análisis de grupos de pilotes sometidos a cargas de sismo

Pile Group Analysis Placed Under Seismic Loading

Fecha de recepción: 2 de julio de 2011
Fecha de aprobación: 8 de noviembre de 2011

Carlos Javier Sainea Vargas*

Resumen

Se presentan 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-Multiplier, 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 a su diseño.

Palabras clave: Cimentaciones profundas, Pilotes, Interacción suelo-estructura, Análisis Winkler no lineal, Módulo de reacción, Curvas p-y, Diseño sísmico de pilotes.

Abstract

It presents the results' analysis obtained in the p-y method's application in a wide number of pile group models' analysis, on which modifications to the p-y curves were set in place for the group and seismic loading effects' inclusion. The models made, include several geometrical configurations for the groups and foundation soil types. The pile group models analysis was run in the specialized software FB-Multiplier, which besides the selected methodology inclusion, allows the real seismic loads' application, sent by the acceleration graphic signals. Based on the deflections and moments results obtained in the pile group models' analysis, observations about the pile group behavior under seismic loads and considerations about the piles' design are included.

Key words: Deep foundations, piles, soil-structure interaction, nonlinear Winkler analysis, subgrade reaction modulus, p-y curves, piles' seismic design.

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

I. INTRODUCCIÓN

El diseño de cimentaciones con pilotes sometidas a cargas laterales debe satisfacer los criterios de carga admisible en el suelo y en los pilotes, y de deflexión tolerable de la estructura que soportan. Debido a que la respuesta del sistema suelo-pilotes es no lineal, incluso en el rango de cargas admisibles de trabajo, es importante que el diseño de pilotes sometidos a carga lateral se base en métodos de análisis que modelen el comportamiento no lineal del sistema. En este trabajo [1] se ha empleado el método no lineal $p-y$ para el análisis de pilotes sometidos a carga lateral; la aplicación de este método de análisis requiere de herramientas numéricas, debido a la forma iterativa en que se obtienen las soluciones, razón por la cual se ha seleccionado el *software* de análisis FB-Multipier.

Cuando los pilotes que componen un grupo están poco espaciados, su respuesta ante carga lateral difiere de la de pilotes aislados, debido a los efectos de interacción pilote-suelo-pilote, que hacen que el terreno sea más severamente cargado y las deflexiones y momentos en los pilotes del grupo sean mayores. Además de la inclusión de los efectos de grupo en los modelos analíticos, al analizar los grupos de pilotes bajo carga sísmica se deben incluir modificaciones a los modelos, dependiendo de la frecuencia de la carga sísmica y de las características del suelo de cimentación. En este artículo se presentan los resultados obtenidos después de haber llevado a cabo la construcción y el análisis de modelos de grupos de pilotes en el *software* de análisis seleccionado, incluyendo la modelación no lineal por carga axial y lateral del suelo de cimentación, y las modificaciones a las curvas $p-y$, debido a los efectos de grupo y aplicación de carga sísmica. Para pilotes en arcillas, la rigidez del suelo se supuso constante, y para pilotes en arenas, variando linealmente con la profundidad.

II. PROPIEDADES DE LOS MODELOS Y DEL SOFTWARE DE ANÁLISIS

A. *Software de análisis*

El *software* de análisis especializado en 3D elegido es FB-Multipier [2], de la Universidad de la Florida; este

software es un programa no lineal de elementos finitos desarrollado para llevar a cabo el análisis dinámico de estructuras de puentes. Para la interacción axial y lateral, los suelos se modelan mediante resortes de tendencia no lineal cuyas rigideces axial y lateral son obtenidas de las curvas $q-w$, $f-w$ y $p-y$, a las que se hará referencia posteriormente; la interacción pilote-suelo-pilote se caracteriza por el uso de p -multiplicadores definidos por el usuario. Las cargas aplicadas al sistema pueden ser cargas nodales concentradas o cargas dinámicas; el análisis puede llevarse a cabo usando el método de la integración paso a paso, usando el método de Newmark y el amortiguamiento de Raleigh en la solución para la respuesta dinámica resultante de una carga variable en el tiempo. La carga dinámica aplicada puede constar de fuerzas o aceleraciones del terreno.

En vista de que los modelos para el suelo y los pilotes son no lineales, FB-Multipier lleva a cabo un proceso de solución iterativa, a través de un método secante para la solución de las ecuaciones no lineales. FB-Multipier usa un esquema de iteración de Newton-Raphson, en cada iteración se encuentran las rigideces del suelo y de los pilotes dadas las aproximaciones actuales de desplazamientos, se ensambla la matriz de rigidez y se resuelve para los nuevos valores de desplazamiento; estos desplazamientos se usan posteriormente para encontrar las cargas internas en los elementos de los pilotes.

B. *Características de los modelos de análisis*

En este trabajo se consideraron arreglos típicos de grupos de pilotes flotantes de concreto de sección transversal circular, en condiciones de restricción nula y total al giro en la conexión con el cabezal. Se considera la construcción de los modelos teniendo en cuenta el método de análisis $p-y$ no lineal, incluyendo modificaciones a las curvas para tener en cuenta los efectos de grupo y carga sísmica. Se supone el suelo homogéneo, con rigidez constante con la profundidad en arcillas, y creciendo linealmente con la profundidad en arenas.

1) *Materiales estructurales y suelos de cimentación:* Como material estructural de los pilotes se ha

considerado concreto reforzado con densidad $\rho_c = 24 \text{ kN/m}^3$, resistencia a la compresión $f'_c = 28.1 \text{ MPa}$ y módulo

de elasticidad $E_c = 20670 \text{ MPa}$. Las propiedades de los suelos de cimentación se presentan en la Tabla 1.

TABLA 1
PROPIEDADES DE LOS SUELOS DE CIMENTACIÓN

Tipo de suelo	$\gamma_{sat} \text{ (kN/m}^3\text{)}$	$\phi \text{ (}^\circ\text{)}$	$q_u \text{ (kPa)}$	$V_s \text{ (m/s)}$	$n_h \text{ (kN/m}^3\text{)}$	$k_h \text{ (kN/m}^3\text{)}$
Arena suelta	18.86	32		125	5429	
Arena densa	21.04	40		200	33930	
Arcilla blanda	18.35		36	125		10860
Arcilla firme	20.68		144	200		48762

Para la elección de los coeficientes de reacción horizontal, k_h , se tiene que en arenas, según Poulos y Davis (1980) [3]:

$$k_h = n_h \left(\frac{z}{D} \right) \quad (2)$$

Los valores de la constante del módulo de reacción, n_h , asumidos para los suelos granulares se tomaron a partir de los recomendados por Reese, Cox y Koop (1974) [4].

En suelos arcillosos, $n=0$, y según Vesic (1961) [3]:

$$k_{Vesic} = \frac{0.65}{D} \sqrt[12]{\frac{E_s D^4}{E_p I_p}} \left(\frac{E_s}{(1+\nu_s)^2} \right) \quad (3)$$

Donde E_s y ν_s son el módulo elástico y la relación de Poisson del suelo, y $E_p I_p$, la rigidez del pilote para

carga lateral. Además, de acuerdo con Kishida y Nakai (1977) [3]:

$$k_h = 2 * k_{Vesic} E_s = 170 q_u \quad (4)$$

2) Configuración geométrica de los modelos: Se presenta en la Tabla 2.

La longitud de los pilotes condiciona su comportamiento rígido o flexible, en vista de la variación que se presenta en la rigidez relativa suelo-pilote. En la determinación del comportamiento rígido o flexible de los pilotes se consideran pilotes cortos (rígidos), aquellos con $L/T \leq 2$ o $L/R \leq 2$, y pilotes largos (flexibles), aquellos con $L/T \geq 4$ o $L/R \geq 3.5$, donde L es la longitud del pilote, y R y T , los factores de rigidez relativa, dados por:

$$T = \sqrt[5]{\frac{E_p I_p}{n_h}} \quad R = \sqrt[4]{\frac{E_p I_p}{k_h D}} \quad (5)$$

TABLA 2
GEOMETRÍA DE LOS GRUPOS DE PILOTES

Propiedad	Valor
Diámetro de los pilotes	0.60m
Longitud de los pilotes	Cortos, Largos
Separación	3D, 5D, 7D
Tipos de grupos	2x2, 3x3, 4x4, 2x4, 3x5
Condiciones de fijación en la cabeza	Fijos, articulados

3) Condiciones de carga: La carga vertical a que se someten los pilotes del grupo se determinó mediante un análisis de capacidad portante para cada suelo de cimentación y longitud de pilotes, considerando los correspondientes factores de eficiencia por carga axial; dicha carga se aplica como una masa concentrada en el cabezal. Se determinó, además, la capacidad última y admisible por carga lateral de los grupos de acuerdo con el método de Broms (1965) [5]. La carga sísmica empleada corresponde a tres señales acelerográficas seleccionadas, listadas a continuación:

- Sismo S1: Mammoth Lake 26/05/1980, escalado a 0.16 g, 4000 datos cada 0.005 s.
- Sismo S2: Northridge 17/01/1994, escalado a 0.14 g, 4000 datos cada 0.01 s.
- Sismo S3: México 19/09/1985, escalado a 0.038 g, 4096 datos cada 0.02 s.

Lo que se busca con la selección de las tres distintas señales es considerar eventos sísmicos de diferentes contenidos frecuenciales, como los generados por diferentes fuentes sismogénicas: una cercana, para el sismo S1; una intermedia, para el S2, y una lejana, para el sismo S3. La selección de las señales y los valores a las que fueron escaladas se hizo a partir de las recomendaciones dadas por Díaz y Ávila (DPAE, 2006) [6], las cuales resultaban consistentes con la amenaza sísmica en la ciudad de Bogotá, de acuerdo con la zonificación de la respuesta sísmica establecida por FOPAE (2010).

III. MODELO PARA CARGA AXIAL

Se asume que el pilote está en contacto con el suelo en toda su longitud, que posee un eje centroidal (el eje z , positivo hacia abajo) y es sujeto a una carga P_0 en la cabeza. Los desplazamientos paralelos al eje del pilote se denominan w y se consideran positivos en la dirección z positiva. En este enfoque unidimensional el suelo de cimentación se reemplaza por una serie de resortes distribuidos a lo largo del pilote y un resorte concentrado en la punta, que resisten los desplazamientos axiales del pilote. Las características de estos resortes se presentan en forma de curvas que proveen la magnitud de la resistencia

por fricción f (curvas $f-w$), y la reacción en la punta q (curvas $q-w$), en función del desplazamiento axial w del pilote.

Las curvas $f-w$ y $q-w$ han sido desarrolladas usando los principios del continuo y mecánica de suelos o por correlaciones con los resultados de ensayos de campo hechos sobre pilotes instrumentados sometidos a carga axial, por lo que se tienen diversos criterios en torno a la construcción de las curvas. En la elaboración de los modelos analizados en este proyecto se emplearon las curvas $f-w$ y $q-w$ propuestas por Mosher (1984) [4] para pilotes en arenas, mientras que para pilotes en arcillas se usaron las curvas $f-w$ de Heydinger y O'Neill (1986) y las curvas $q-w$ de Mc Vay (1989) [4].

IV. MODELO PARA CARGA LATERAL

En el modelo de pilote sometido a carga lateral se supone que el pilote tiene un eje centroidal vertical, y sección transversal circular. Debido al cortante y momento aplicados en la cabeza del pilote, el suelo circundante desarrolla esfuerzos, denotados p , los cuales resisten el desplazamiento lateral del pilote. La relación entre la resistencia del suelo y el desplazamiento lateral y a diferentes profundidades a lo largo del pilote se presenta como una serie de curvas no lineales, llamadas las curvas $p-y$.

Para determinar la resistencia última se considera que en puntos cercanos a la superficie del terreno la condición última es producida por un tipo de falla en cuña, mientras que a mayores profundidades la falla se asocia a flujo plástico alrededor del pilote a medida que el desplazamiento se incrementa. Las curvas $p-y$ se derivan a partir de la suposición de que la resistencia lateral p en cualquier punto en el pilote es función solamente del desplazamiento lateral y en ese punto. La ecuación diferencial que gobierna la flexión en el plano $x-z$ de un pilote prismático, elástico lineal es:

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

Donde E_p es el módulo elástico del material del pilote, I_p es el momento de inercia de la sección transversal del pilote con respecto a un eje perpendicular al plano $x-z$, $P(z)$ es la fuerza axial compresiva en el pilote en z y $p(z, y)$ es la resistencia lateral, que es función de la posición z en el pilote y del desplazamiento lateral y en z . A causa de que el desplazamiento lateral y debe conocerse antes de que se pueda determinar la resistencia lateral, se requieren soluciones numéricas iterativas de la ecuación diferencial presentada. En la elaboración de los modelos analizados en este proyecto se emplearon las curvas $p-y$ propuestas por Murchinson y O'Neill (1984) [4] para pilotes en arenas, mientras que para pilotes en arcillas se usaron las curvas de O'Neill y Gazioglu (1984) [4].

Este método tiene algunas limitaciones, como las presentadas por su naturaleza semiempírica, así como que las curvas $p-y$ son independientes una de otra, por lo que la naturaleza continua del suelo a lo largo del pilote no se modela en forma explícita; además, en la selección de las curvas $p-y$ adecuadas se puede optar por el uso de curvas estándar, que no son universales, o llevar a cabo pruebas a escala natural de pilotes cargados lateralmente, lo cual no se justifica en todos los proyectos. Finalmente, se destaca que las presiones de poros generadas por las cargas sísmicas no son tenidas en cuenta.

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

Con base en el análisis de modelos computacionales,

Brown, O'Neill y otros (NCHRP, 2001) [7] obtuvieron curvas $p-y$ dinámicas representativas de diferentes tipos de suelos; la relación global entre la resistencia dinámica del suelo y la frecuencia de carga encontrada se presenta en forma de una ecuación genérica, relacionando la curva $p-y$ estática, la frecuencia y la velocidad aparente:

$$p_d = p_s \left[\alpha + \beta a_o^2 + \kappa a_o \left(\frac{\omega y}{D} \right)^n \right]$$

$$p_d \leq p_u \text{ a una profundidad } z \quad (7)$$

En donde p_d es el valor dinámico de p en la curva $p-y$ a la profundidad z , p_s es la correspondiente reacción estática del suelo (obtenida de la curva $p-y$ estática) a la profundidad z , a_o es la frecuencia adimensional $a_o = \omega r_o / V_s$, ω es la frecuencia de carga –en este caso la frecuencia dominante del sismo considerado (rad/s)–, D es el diámetro del pilote, y es la deflexión lateral a la profundidad z cuando el suelo y el pilote están en contacto durante la carga (m), y, finalmente, α , β , κ y n son constantes de ajuste de las curvas.

En la Tabla 3 se hace un compendio de los mejores valores para las constantes de ajuste encontrados por los autores mencionados en suelos típicos. Para grandes frecuencias o desplazamientos, la resistencia dinámica máxima se limita a la resistencia última estática del suelo, p_u .

TABLA 3
CONSTANTES PARA LAS CURVAS P-Y DINÁMICAS EN DIVERSOS SUELOS TÍPICOS (NCHRP, 2001)

Tipo de suelo	Descripción	α	β		κ	n
			$a_o < 0.025$	$a_o > 0.025$		
Arcilla blanda	$C_u < 50 \text{ kPa}$ $V_s < 125 \text{ m/s}$	1	-180	200	80	0.18
Arcilla media	$50 < C_u < 100 \text{ kPa}$ $125 < V_s < 175 \text{ m/s}$	1	-120	-360	84	0.19
Arena media (saturada)	$50 < D_r < 85\%$ $125 < V_s < 175 \text{ m/s}$	1	3320	1640	-100	0.1
Arena densa (saturada)	$D_r > 85\%$ $V_s > 175 \text{ m/s}$	1	6000	1876	-100	0.15

B. P-multiplicadores

El concepto del *p*-multiplicador fue formalizado por Brown, Morrison y Reese (1988), y Brown y Bollman (1996) [1]; este concepto expresa que la acción lateral de un grupo reduce el valor *p* en cada punto en cada curva *p-y* para un pilote dado, con base en su posición geométrica en el grupo, por una misma cantidad, sin importar la deflexión del pilote. Debido a que la carga sísmica es multidireccional, un enfoque aceptable puede ser calcular el valor promedio de los *p*-multiplicadores entre todos los pilotes del grupo y usar dicho valor promedio para cada pilote en el grupo cuando se emplee FB-Multipier o un modelo numérico

similar. En el desarrollo de este trabajo se emplearon los mostrados en la Tabla 4.

C. Análisis de pilotes sometidos a carga lateral estática

1) Capacidad última por carga lateral: Para calcular la capacidad última en pilotes cargados lateralmente, Broms (1965) [8] desarrolló una solución simplificada, suponiendo la falla por cortante del suelo en pilotes cortos, y falla gobernada por la resistencia a la fluencia de la sección del pilote en pilotes largos. Esta solución se presenta para pilotes con cabeza libre o empotrada en arenas y arcillas, y las ecuaciones respectivas se presentan en la Tabla 5.

TABLA 4
P-MULTIPLICADORES EMPLEADOS EN LOS MODELOS DE ANÁLISIS

S/D	p-Multiplicadores				
	2x2	3x3	4x4	2x4	3x5
3	0.60	0.50	0.43	0.43	0.40
5	0.93	0.85	0.81	0.81	0.79
7	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

TABLA 5
ECUACIONES PARA Q_u , X_o Y M_{max} SEGÚN BROMS (1965)

Suelo	Articulado		Empotrado	
	Corto	Largo	Corto	Largo
Arena	$Q_u = \frac{0.5\gamma \cdot L^3 BK_p}{e + L}$ $X_o = 0.82 \sqrt{\frac{Q_u}{\gamma \cdot BK_p}}$ $M_{max} = Q_u (e + 1.5X_o)$	$Q_u = \frac{M_u}{e + 0.54 \sqrt{\frac{Q_u}{\gamma \cdot BK_p}}}$ $X_o = 0.82 \sqrt{\frac{Q_u}{\gamma \cdot BK_p}}$ $M_{max} = Q_u (e + 0.67X_o)$	$Q_u = 1.5\gamma \cdot L^2 BK_p$ $M_{max} = \gamma \cdot L^3 BK_p$	$Q_u = \frac{2M_u}{e + 0.67X_o}$ $X_o = 0.82 \sqrt{\frac{Q_u}{\gamma \cdot BK_p}}$ $M_{max} = Q_u (e + 0.67X_o)$
Arcilla	$M_{max} = Q_u (e + 1.5B + 0.5X_o)$ $M_{max} = 2.25Bc_u (L - X_o)^2$ $X_o = \frac{Q_u}{9c_u B}$	$M_{max} = Q_u (e + 1.5B + 0.5X_o)$ $X_o = \frac{Q_u}{9c_u B}$	$Q_u = 9c_u B (L - 1.5B)$ $M_{max} = 4.5c_u B (L^2 - 2.25B^2)$	$Q_u = \frac{2M_u}{1.5B + 0.5X_o}$ $X_o = \frac{Q_u}{9c_u B}$

Las ecuaciones de la Tabla 5 están dadas para el cálculo de la carga lateral última Q_u , el momento máximo M_{max} y la profundidad a que este se produce X_o , en donde γ' es el peso unitario efectivo del suelo; K_p , el coeficiente de presión pasiva de Rankine; B , el diámetro del pilote; e , la excentricidad de la carga horizontal; c_u , la cohesión no drenada, y M_u , el momento último soportado por la sección del pilote. En cada caso se verifica que $M_{maxcalculado} < M_u$, donde $M_u = ZF_b$, con $Z = I_p / (D/2)$ y el esfuerzo admisible en el pilote $F_b = 0.6 f_y$.

2) *Método del módulo de reacción:* Con el fin de comparar los resultados obtenidos con FB-Multiplier, se emplearon soluciones basadas en el método del módulo de reacción para cimentaciones con pilotes sobre arenas y arcillas, incluyendo los efectos de grupo

y carga cíclica mediante factores de reducción de k_h . Para el análisis de pilotes en suelos con k_h variando linealmente con la profundidad se empleó el método de Matlock y Reese (1960) [8], y en el análisis de pilotes en suelos con k_h constante con la profundidad se usó el método de Reese (1984) [3]; las respectivas ecuaciones se presentan en la Tabla 6.

Para contar con los efectos de grupo en este método se pueden emplear los factores de eficiencia G_e presentados en la Tabla 7 según Oteo (1972) y Prakash (1990) [8].

Para contar con los efectos de grupo y carga cíclica en este método se pueden emplear los valores de la relación k_{ef}/k_h para efectos combinados presentados en la Tabla 8 según Prakash (1990) y Davisson (1970) [8].

TABLA 6
ECUACIONES PARA EL CÁLCULO DE DEFLEXIONES Y MOMENTOS

Método	Cabeza fija	Cabeza articulada
Matlock y Reese (1960)	$y_z(z) = A_y \frac{Q_g T^3}{E_p I_p} + B_y \frac{M_g T^2}{E_p I_p}$ $M_z(z) = A_m Q_g T + B_m M_g$	$y_z(z) = A_y \frac{Q_g T^3}{E_p I_p} + B_y \frac{M_g T^2}{E_p I_p}$ $M_z(z) = A_m Q_g T + B_m M_g$
Reese (1984)	$A_y, B_y, C_y, A_m, B_m, C_m$, son suministrados en tablas y gráficos por los autores	
	$y_z(z) = A_1 \frac{Q_g \beta}{k_h D}$ $M_z(z) = -B_1 \frac{Q_g}{2\beta}$	$y_z(z) = C_1 \frac{2Q_g \beta}{k_h D} + B_1 \frac{M_g}{2E_p I_p \beta^2}$ $M_z(z) = D_1 \frac{Q_g}{\beta} + A_1 M_g$
	$A_1 = e^{-\beta z}(\cos \beta z + \text{sen } \beta z)$ $B_1 = e^{-\beta z}(\cos \beta z - \text{sen } \beta z)$ $C_1 = e^{-\beta z} \cos \beta z$ $D_1 = e^{-\beta z} \text{sen } \beta z$ $\beta = [(k_h D)/(4E_p I_p)]^{0.25}$	

TABLA 7
FACTORES DE EFICIENCIA PARA EFECTOS DE GRUPO EN PILOTES BAJO CARGA LATERAL

S/D	G_e arenas	G_e arcillas
6	0.70	0.65
5	0.68	0.55
4	0.60	0.50
3	0.50	0.40

TABLA 8
FACTORES DE REDUCCIÓN DE k_h PARA EFECTOS COMBINADOS DE GRUPO Y CARGA CÍCLICA

S/D	k_{ef}/k_h	$k_{ef}/(n_h^* z/D)$
≥ 8	0.40	0.30
6	0.28	0.21
4	0.16	0.12
3	0.10	0.075

V. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE MOMENTOS Y DEFLEXIONES

Los modelos creados fueron analizados con FB-Multiplier. Se obtuvieron los datos de deflexiones y momentos a lo largo de los pilotes de cada grupo, y a partir de la comparación de los diagramas de deflexión y momento obtenidos con el software de análisis y con los métodos aproximados de Matlock y Reese (1960) y Reese (1984), se presentan algunas observaciones.

- En los diagramas de deflexiones y momentos obtenidos en los modelos analizados con FB-Multiplier se observa la influencia del espaciamiento entre los pilotes del grupo, pues las deflexiones encontradas son mayores en tanto los pilotes están menos espaciados, mientras que los momentos son mayores al aumentar la distancia entre pilotes, para grupos con la misma carga por pilote.
- En cuanto a la influencia de la geometría de los grupos de pilotes, en general se puede decir que el comportamiento de las deflexiones encontradas obedece tanto al número de pilotes en la dirección de aplicación de la carga como al número de pilotes en el grupo, mientras que los momentos no muestran tendencias claras en este sentido.
- Sin embargo, al tratarse de cargas aleatorias y de un modelo de respuesta no lineal, no es conveniente pensar que la respuesta en términos de deflexiones y momentos encontrados para los grupos analizados pueda generalizarse, puesto que en cada caso el comportamiento obedece a las condiciones específicas de los modelos y al nivel de deflexión alcanzado.
- Las formas de los diagramas de momentos y deflexiones encontrados con FB-Multiplier mostraban en ocasiones diferencias importantes con respecto a las encontradas mediante las soluciones aproximadas que incluían los efectos de grupo y carga cíclica mediante la reducción del módulo de reacción del suelo; esto obedece a que en las soluciones aproximadas se asume una distribución ideal de la rigidez, mientras que en el enfoque p - y se obtiene una distribución de la rigidez que obedece a la variación con la profundidad del tipo de falla asumida para la cimentación; además, la reducción del módulo de

reacción que fue hecha para contar con los efectos combinados no es la misma en ambos casos.

- Las diferencias apreciables observadas en las magnitudes de los momentos y deflexiones máximas obtenidas con FB-Multiplier, y en las soluciones aproximadas en las que se reducía el módulo de reacción del suelo para incluir efectos combinados obedecen también a que la reducción del módulo de reacción aplicada en las soluciones aproximadas no tuvo en cuenta el efecto de la deflexión del pilote.

VI. MÓDULO DE REACCIÓN DE LOS GRUPOS ANALIZADOS

Para definir la rigidez del suelo para carga lateral se usa el concepto de módulo de reacción del modelo de Winkler, reemplazando la masa de suelo por una serie de resortes equivalentes con una constante k_h de resorte por unidad de área, facilitando los cálculos de esfuerzos y deformaciones en la interfase estructura-suelo, ya que las deflexiones en los pilotes se hacen directamente proporcionales a los esfuerzos aplicados. k_h está dado por:

$$k_h = p/y \quad (8)$$

Donde p es la reacción del suelo en un punto del pilote por unidad de longitud a lo largo del pilote, resultante para un ancho B de la cara cargada, mientras que y es la deflexión en el pilote en el mismo punto considerado. De acuerdo con Terzaghi (1953) [8], para arcillas se puede asumir que el módulo de reacción horizontal k_h sea constante con la profundidad, mientras que para suelos granulares puede considerarse variando linealmente con la profundidad, $k_h = n_h \cdot z$, donde n_h es denominada la constante del módulo de reacción horizontal.

Para un suelo en que k_h varía linealmente con la profundidad, se obtiene la deformada del pilote para las condiciones de carga y restricción impuestas, resolviendo mediante procedimientos numéricos la ecuación (6); luego, se usan los valores de deflexión a cada profundidad para hallar los correspondientes valores de p en las curvas p - y , y a partir de los p , y encontrados se calculan los valores de k_h y se grafican con la profundidad; la pendiente de la recta encontrada corresponde a n_h . En suelos con k_h

constante se sigue un procedimiento similar, graficando k_h con la profundidad. Mediante el procedimiento descrito, se halló para cada uno de los grupos analizados el correspondiente valor de k_h o n_h , según fuera el caso, a partir de las deflexiones arrojadas por FB-Multiplier y de las curvas p - y modificadas para incluir los efectos de grupo y carga sísmica.

- Las magnitudes de k_h y n_h encontradas a partir de los datos arrojados por FB-Multiplier dependen del espaciamiento entre pilotes y de la configuración geométrica de los grupos; para relaciones de espaciamiento $S/D=7$, los valores de k_h y n_h son independientes de la geometría de los grupos. Las magnitudes de k_h y n_h también se ven afectadas dependiendo de la frecuencia predominante del sismo con el que se analicen los modelos, y dichas magnitudes son superiores en tanto la frecuencia dominante del sismo de análisis es mayor, presentando diferencias importantes al analizar los modelos con diferentes señales sísmicas. Lo anterior es consistente con los efectos de grupo y carga sísmica que fueron introducidos en los modelos de análisis mediante la inclusión de p -multiplicadores y curvas p - y dinámicas.
- Al aplicar los criterios de reducción de k_h y n_h para contar con los efectos combinados de grupo y carga cíclica de acuerdo con Davisson (1970) y Prakash (1990), se obtuvieron valores de k_h y n_h que eran mucho menores a los encontrados con FB-Multiplier y el modelo de análisis p - y modificado para carga dinámica; a raíz de estas discrepancias se encontraron a lo largo de los pilotes de los grupos analizados valores de momentos y deflexiones que diferían apreciablemente según cada una de las soluciones empleadas.

- Es necesario que en la aplicación de los diferentes procedimientos aplicables para el análisis y diseño de grupos de pilotes sometidos a carga sísmica se incluyan de manera razonable tanto los efectos de grupo como los de aplicación de carga dinámica, y el efecto de la deflexión de los pilotes en vista de los errores en que se puede incurrir al considerar el análisis de un solo pilote y rigidez del suelo tangente inicial en condiciones estáticas.
- Las diferencias apreciadas en los valores de k_h y n_h encontrados por medio de FB-Multiplier, y para efectos combinados de acuerdo con los valores de la Tabla 7, obedecen a que los efectos de grupo y carga dinámica eran considerados de manera diferente en cada enfoque, y a que la reducción para efectos combinados de Davisson (1970) y Prakash (1990) consideraba los factores de reducción de k_h y n_h para grandes niveles de deflexión en los pilotes.

VII. FACTORES DE REDUCCIÓN DEL MÓDULO DE REACCIÓN

En vista de las grandes variaciones que pueden obtenerse en los valores de n_h y k_h para diferentes niveles de deflexión de los pilotes, se decidió que era más acertado entregar factores de reducción de n_h y k_h que dependieran de la deflexión de los pilotes, incluyendo la no linealidad del comportamiento del sistema, así como los efectos de grupo y de aplicación de carga sísmica.

A. Efecto de la deflexión de los pilotes

En las Figuras 1 y 2 se presentan las gráficas de las relaciones k_{hef}/k_{ho} y n_{hef}/n_{ho} derivadas a partir de las familias de curvas p - y elaboradas para pilotes en arenas y arcillas, considerando condiciones estáticas.

Análisis de grupos de pilotes sometidos a cargas de sismo

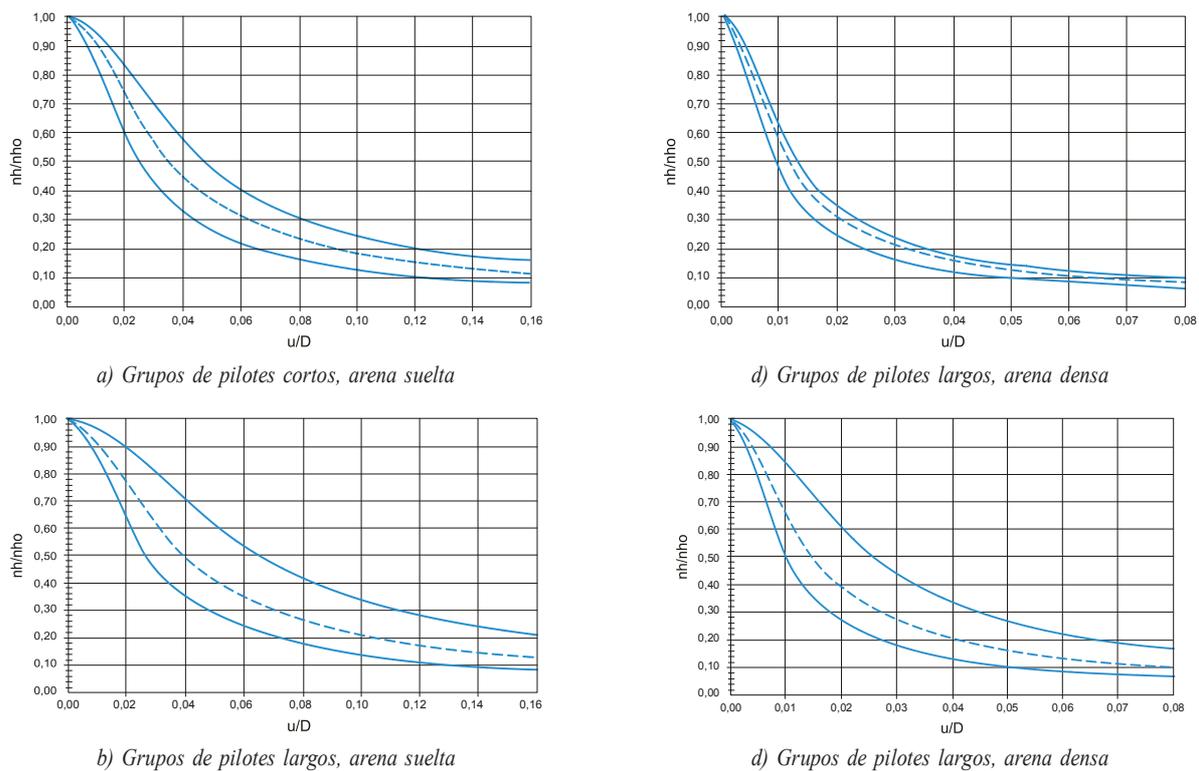


Fig. 1. Relación n_{hef}/n_{ho} en función de la deflexión para pilotes en arena, condición estática

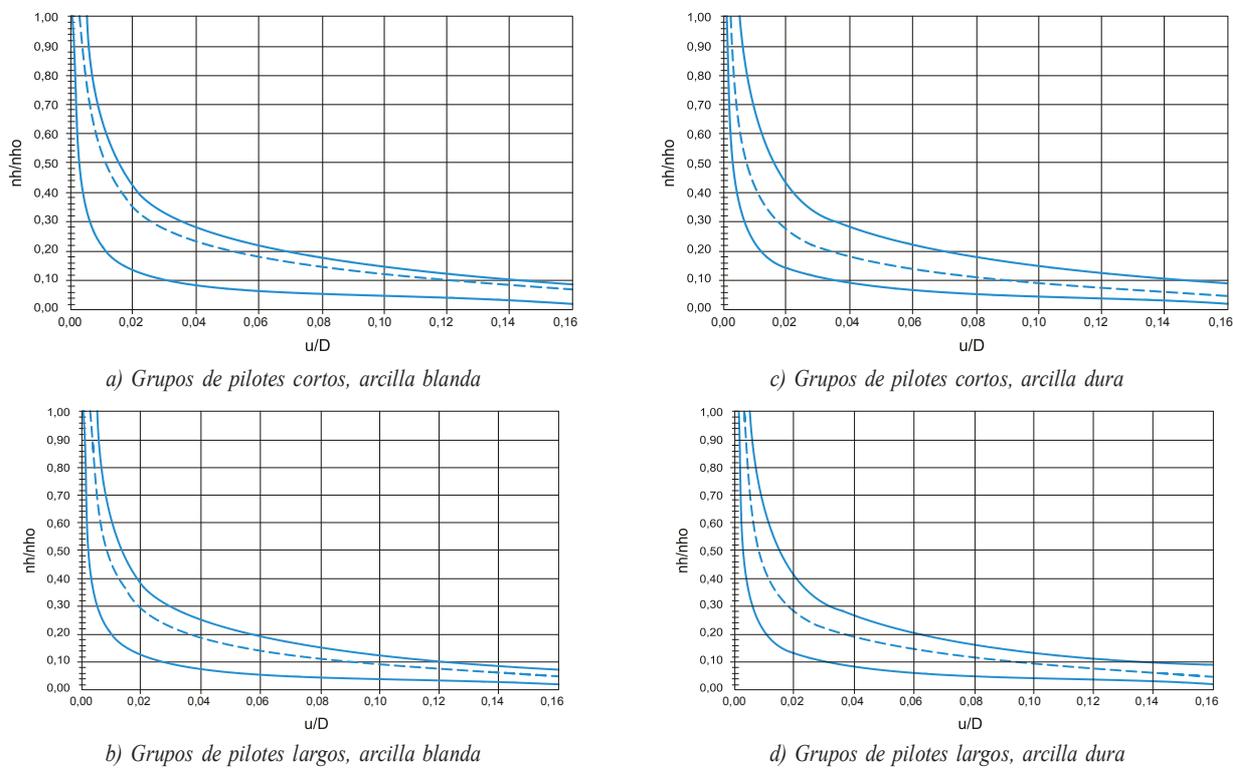


Fig. 2. Relación k_{hef}/k_{ho} en función de la deflexión para pilotes en arcilla, condición estática

En las Figuras 1 y 2, n_{ho} corresponde al valor hallado de acuerdo con Reese, Cox y Koop (1974), y k_{ho} , a los hallados a partir de Kishida y Nakai (1977) y Vesic(1961), de las ecuaciones (3) y (4). Se presentan los rangos de reducción de n_h y k_h obtenidos para condiciones estáticas, así como los valores medios encontrados para dichos rangos, en función de la deflexión adimensional y/D . Para pilotes largos, teniendo en cuenta que el suelo de la zona cercana a la cabeza del pilote es más importante en relación con su respuesta ante carga lateral, se restringió el rango considerando una profundidad bajo la superficie del terreno de hasta 8 veces el diámetro de los pilotes.

B. Efecto de grupo

Algunos valores medios de p -multiplicadores de acuerdo con la geometría y espaciamento entre pilotes de los grupos se presentaron en la Tabla 4, para su aplicación a cada uno de los pilotes del grupo. Estos valores pueden tomarse como valores de reducción de k_h o n_h para la inclusión de efectos de grupo en vista de que la aplicación de los p -multiplicadores reducen las ordenadas de las curvas p - y sin alterar los valores de deflexión. Aparte de las limitantes mencionadas para este método de análisis, debe reconocerse que los p -multiplicadores no reflejan los efectos de la instalación de los pilotes del grupo.

C. Efecto de la aplicación de carga sísmica

Para incluir en el modelo de análisis la influencia de la aplicación de carga sísmica, a través de la modificación del módulo de reacción horizontal, se puede usar lo presentado en 4.1. Teniendo en cuenta que se hace referencia a un valor de k_h para un valor de deflexión dado y , a partir de la ecuación (7) se tiene el módulo de reacción dinámico k_{hd} indicado en la ecuación (9).

$$\frac{k_{hd}}{k_{ho}} = \left[\alpha + \beta a_o^2 + \kappa a_o \left(\frac{\omega y}{D} \right)^n \right] \quad (9)$$

Los valores de las constantes, α , β , κ y n fueron presentados en la Tabla 3. Para aplicar la ecuación (9) para grandes frecuencias o desplazamientos se debe tener en cuenta que la resistencia dinámica máxima se limita a la resistencia última estática del suelo, p_u . Los valores de p_u a diversas profundidades a lo largo de los pilotes pueden

hallarse de acuerdo con los criterios de diferentes autores dentro de los pasos para la construcción de las respectivas curvas p - y .

VIII. PROCEDIMIENTO DE DISEÑO

Para llevar a cabo el análisis de grupos de pilotes ante la aplicación de cargas sísmicas, se puede seguir el procedimiento descrito en las secciones siguientes.

A. Procedimiento de diseño en condición pseudoestática

- En arenas determinar n_{ho} , según la Tabla 2, y en arcillas determinar k_{ho} a partir de las Ecuaciones (3) y (4). Con el valor de deflexión admisible para la estructura se halla el factor de reducción del módulo de reacción k_{hef}/k_{ho} o n_{hef}/n_{ho} para condición estática, a partir del rango de valores presentado en las Figuras 1 y 2.
- Calcular con la Ecuación (5) los factores T o R , y encontrar las relaciones L/T o L/R para definir si el comportamiento de los pilotes es el de pilotes cortos o largos.
- Calcular Q_u y la carga lateral admisible Q_{adm} a partir de un factor de seguridad asumido y el momento flector máximo, de acuerdo con el método de Broms (1965). Para grupos de pilotes, con base en la relación de espaciamento S/D , se determina la capacidad última y admisible del grupo de pilotes sujetos a carga lateral, empleando un factor de eficiencia de grupo, G_e , cuyos valores para arenas y arcillas se presentaron en la Tabla 7.
- Calcular la carga lateral admisible para la deflexión lateral especificada y momento máximo para las condiciones de carga de diseño. Para los procedimientos enunciados a continuación, la carga lateral admisible es la menor de las encontradas en los pasos c y d , y el momento máximo es el correspondiente a la carga admisible.

- A través del método del módulo de reacción, los valores de n_h o k_h , reducidos por efecto de la deflexión admisible, se reducen nuevamente para contar con los efectos de grupo, usando los p -multiplicadores presentados en la Tabla 8, y para carga sísmica

mediante la Ecuación (9). Luego se calculan los factores T o R , y la capacidad admisible por carga lateral Q_g y momento máximo en los pilotes M_{max} , mediante las ecuaciones de la Tabla 6. La capacidad admisible del grupo se halla multiplicando Q_g por el número de pilotes que componen el grupo.

- Mediante el enfoque $p-y$ se pueden usar curvas $p-y$ estáticas para suelos no cohesivos o cohesivos, modificadas para efectos de grupo por medio de los p -multiplicadores de la Tabla 8, y para carga dinámica con la ecuación (7). Para emplear el enfoque $p-y$, y evitar los procedimientos manuales que puedan conllevar un tiempo de análisis tan prolongado que haga ineficiente su aplicación, es necesario desarrollar un procedimiento numérico para tal fin o usar un software de análisis disponible. La carga admisible es la correspondiente a la deflexión lateral admisible y se debe verificar que a lo largo de los pilotes no se sobrepase la resistencia máxima del suelo p_u .
- e. Con los cortantes y momentos hallados a lo largo de los pilotes se puede llevar a cabo su diseño estructural detallado.

Este procedimiento considera la reducción de k_h o n_h de acuerdo con el nivel de deflexión a que se vean sometidos los pilotes. A menos que se tengan criterios de deflexiones admisibles que deban cumplirse por las características de la estructura soportada por los pilotes, el valor de deflexión tolerable no se conoce desde el inicio de los cálculos y se debe recurrir a un procedimiento iterativo en donde se calcule la deflexión sufrida por los pilotes para un nivel de carga dado, aplicar la reducción de k_h o n_h para ese nivel de deflexión, y luego calcular la deflexión máxima para el valor reducido de k_h o n_h .

B. Diseño de grupos de pilotes sometidos a carga sísmica

Para el análisis y el diseño de grupos de pilotes sometidos a carga sísmica, el procedimiento más recomendable de los considerados en este trabajo consiste en construir los modelos analíticos en un software que, como FB-Multipier, modele tanto el comportamiento no lineal del suelo de cimentación para carga axial como para carga lateral, analizando la estructura de cimentación por procedimientos de elementos finitos y, además,

permitiendo la aplicación de cargas dinámicas dadas por señales acelerográficas o espectros de diseño en las direcciones principales. Las curvas no lineales de comportamiento del suelo para cargas axial y lateral $q-w$, $f-w$, $p-y$, pueden ser elaboradas mediante procedimientos estándar, y modificadas para efectos de grupo y aplicación de carga de sismo, como se indicaba en 7.2 y 4.1, respectivamente.

IX. CONCLUSIONES

- El análisis de grupos de pilotes sometidos a cargas sísmicas es un problema complejo de interacción suelo-estructura, en el que deben tenerse en cuenta tanto los efectos de superposición de esfuerzos en la masa de suelo entre pilotes, como las afectaciones sufridas en el suelo debidas a la aplicación de una carga dinámica aleatoria.
- El método de análisis $p-y$ derivado a partir del modelo de Winkler es uno de los más eficientes, debido a que considera el comportamiento no lineal del sistema suelo-pilote y puede ser adaptado de manera sencilla para incluir los efectos de grupo y aplicación de cargas sísmicas. De manera similar al modelo para carga lateral, para carga axial pueden ser empleadas curvas no lineales $f-w$ y $q-w$ que sirven para modelar las respuestas de los pilotes por fricción y por la punta.
- La inclusión de los efectos de grupo y carga sísmica para el análisis de los grupos de pilotes puede realizarse a través de la modificación de las curvas $p-y$ estáticas o del módulo de reacción mediante la inclusión de p -multiplicadores y de una formulación que incluye la frecuencia de aplicación de la carga y la velocidad de onda cortante en el suelo.
- En los diagramas de deflexiones y momentos se observaron algunas particularidades del comportamiento de los grupos analizados con el software de análisis, pero al tratarse de cargas aleatorias y un modelo de respuesta no lineal, no es conveniente pensar que dichas características puedan generalizarse, puesto que el comportamiento obedece a las condiciones específicas de los modelos y al nivel de deflexión alcanzado.

- Las magnitudes de k_h y n_h encontradas a partir de los datos arrojados por FB-Multiplier dependen del espaciamiento entre pilotes y de la configuración geométrica de los grupos, excepto para grupos con relaciones de espaciamiento $S/D=7$.
- En el modelo empleado, las magnitudes de k_h y n_h también se ven afectadas, dependiendo de la frecuencia predominante del sismo con el que se analicen los modelos, y dichas magnitudes son superiores en tanto la frecuencia dominante del sismo de análisis es mayor.
- Los criterios de reducción de k_h y n_h para contar con los efectos combinados de grupo y carga cíclica de acuerdo con Davisson (1970) y Prakash (1990) arrojan valores de k_h y n_h mucho menores a los encontrados con FB-Multiplier y el modelo de análisis p -y modificado para carga dinámica, en vista de que consideran los efectos combinados para grandes niveles de deformaciones.
- De acuerdo con lo anterior, en la aplicación de los diferentes procedimientos aplicables para el análisis y diseño de grupos de pilotes sometidos a carga sísmica se deben incluir tanto los efectos de grupo y aplicación de carga dinámica como el efecto de la deflexión de los pilotes. De esta forma, a través de la correcta aplicación de los métodos de análisis para pilotes sometidos a carga sísmica, se puede llevar a cabo un diseño estructural satisfactorio de los pilotes a partir de las solicitaciones calculadas a lo largo de ellos.

REFERENCIAS

- [1] C. J. Sainea. *Grupos de pilotes sometidos a cargas de sismo*. Informe final proyecto de investigación SGI-870. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Bogotá, 2011.
- [2] M. Hoit, M. Mc Vay, C. Hays, M. Williams. *FB Multiplier Help Manual*. University of Florida, Department of Civil Engineering. 2000.
- [3] A. González. *Anotaciones sobre el diseño de pilotes con carga sísmica*. Segundo Encuentro de Ingenieros de Suelos y Estructuras, Escuela Colombiana de Ingeniería, Bogotá, septiembre 1993.
- [4] R. Mosher and W. Dawkins W. *Theoretical Manual for Pile Foundations, Final Report*. U.S. Army Corps of Engineers. Washington DC, 2000.
- [5] V.N.S. Murthy. *Geotechnical Engineering: Principles and practices of Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Marcel Drekker Inc, New York, 2003.
- [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] D.A. Brown, M.W. O'Neill, M. Hoit y otros. *Static and Dynamic Lateral Loading of Pile Groups*. NCHRP Report 461. Transportation Research Board, National Research Council. Washington DC, 2001.
- [8] S. Prakash and H. Sharma H. *Pile Foundations in Engineering Practice*. John Wiley & Sons. New York, 1990.

