

UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA

Facultad de Estudios a Distancia



**UNIVERSIDAD MILITAR
NUEVA GRANADA**

Tesis Opción de Grado

Análisis teórico del uso de micropilotes como recuperadores de carga, mediante la metodología de Poulos & Davis

Presentado por

EMERSON AMADO LEON

D7303716

est.emerson.amado@unimilitar.edu.co

Bogotá D.C.

2023

Análisis teórico del uso de micropilotes como recuperadores de carga, mediante la metodología de Poulos & Davis

Theoretical analysis of the use of micropiles as load recuperators, using the Poulos & Davis methodology.

Emerson Amado León
Estudiante Programa de Ingeniería Civil, Facultad de estudios a Distancia
Villavicencio, Colombia
est.emerson.amado@unimilitar.edu.co

Edgar Rodríguez Rincón
Ingeniero Civil, M. Sc.- Doctor en Geotecnia. Ingeniero Geotecnico en Muniz & Spada Ingenieros Consultores
Rio de Janeiro, Brasil
edgar@munizspada.com.br

ABSTRACT

The use of micropiles as load recoverers has not been directly reported in the literature, therefore it is important to generate knowledge about the possible analysis conditions that should be considered when evaluating the use of micropiles as a replacement element for a defective pile within a group. In this research, the behavior in settlements and load distribution for both piles and micropiles was verified and described for five proposed models. These results are obtained by means of the analytical methodology of Poulos & Davis for settlement in group of piles, where the influence of three variables in the micropiles is analyzed: their positioning in the cap area, the spacing and quantity. It was observed that for the models under study, there was a uniform distribution of the load on the micropiles as the quantity increased, avoiding exceeding their ultimate capacity. Likewise, it is evident that the greater the separation of these elements, the lower the settlements. Finally, the working load on micropiles shows an increase with the reduction of the distance between them and the upper left corner of the cap.

Keywords: Settlements, Load, Strata, Foundation, Friction, Micropiles.

RESUMEN

El uso de micropilotes como recuperadores de carga no se ha reportado de manera directa en la literatura, por eso es importante generar conocimiento sobre las posibles condiciones de análisis que deben ser consideradas al momento de evaluar el uso de micropilotes como elemento que reemplace un pilote defectuoso dentro de un grupo. En esta investigación se verificó y describió el comportamiento en asentamientos y distribución de carga tanto para pilotes como micropilotes, en cinco modelos propuestos. Estos resultados se obtienen por

medio de la metodología analítica de Poulos & Davis para asentamiento en grupo de pilotes, donde se analiza la influencia de tres variables en los micropilotes: su posicionamiento en el área del cabezal, la separación y cantidad. Se observó que para los modelos objeto de estudio hubo una distribución uniforme de la carga en los micropilotes en la medida que se incrementó la cantidad, evitando superar su capacidad última. Así mismo se evidencia que entre mayor es la separación de estos elementos, los asentamientos disminuyen. Finalmente la carga de trabajo en micropilotes muestra un aumento con la reducción de la distancia entre estos y la esquina superior izquierda del cabezal.

Palabras clave: Asentamientos, Carga, Estratos, Fundación, Fricción, Micropilotes.

INTRODUCCIÓN

En el proceso de construcción de una estructura, se hace determinante el diseño de su sistema de cimentación debido a que este se va a encargar de transmitir y distribuir las cargas de la construcción al estrato de suelo, para la cual se deben analizar dos etapas fundamentales las cuales corresponden a la capacidad portante (estado último) y los asentamientos (estado de servicio) [1], estas permiten garantizar la funcionalidad de una cimentación a lo largo de su vida útil.

El proceso de pilotaje se utiliza cuando no es posible realizar una cimentación superficial. Se trata de una solución constructiva que se remonta a los palafitos, siendo una técnica habitual en puertos o en ciudades donde también se han usado los prefabricados de madera como cimentación ya que los estratos de suelo superiores presentan deficiencias en su capacidad portante. En la línea de tiempo de los sistemas de cimentación, se ha logrado evidenciar que con el paso de los años estos llegan a presentar problemas tanto en su capacidad y condiciones de carga como en asentamientos a pesar de tener una normativa técnica para el diseño y construcción de estas estructuras, por lo tanto se hace necesario tomar acciones de tipo correctivo que permitan reparar y asegurar el funcionamiento de las cimentaciones, una de estas medidas que más ha tomado fuerza es el uso de micropilotes para este fin [2].

En cimentaciones profundas se han implementado como recuperadores de carga en grupos de pilotes en los cuales uno de los elementos resulta defectuoso o incompleto [3]. Para cimentaciones superficiales se ha establecido como objetivo de los micropilotes

servir de elemento para recuperación de carga, así mismo se han empleado para refuerzo del suelo y recalce en estructuras de cimentación, esto se ha visto reflejado en los resultados de investigaciones previas [4], [5]. En Colombia el uso de esta técnica está limitado a conceptos propios del geotecnista, quien asocia conocimientos empíricos y experiencias exitosas [3].

En el presente artículo se tiene por objeto analizar el comportamiento de sistemas de cimentación conformadas por grupos de pilotes, cuando uno de estos pierde su funcionalidad y es reemplazado por micropilotes, dicho análisis estará enfocado tanto en asentamientos como distribución de carga para los elementos constitutivos de los grupos. Esta evaluación la integran los asentamientos de los sistemas y la carga que soportan los elementos a partir de variables tales como posicionamiento, separación y cantidad de los micropilotes. Para cumplir con el objetivo de la presente investigación se plantean un total de cinco modelos los cuales utilizarán como referencia un grupo de 4 pilotes, donde uno de ellos se considerará defectuoso, por lo tanto los modelos en análisis estarán constituidos por tres pilotes y grupos de micropilotes en los que irá a variar la cantidad de estos elementos entre dos y cinco, con diferentes configuraciones que cambian de acuerdo a su posicionamiento. Cabe resaltar que los micropilotes propuestos en cada modelo se posicionaron de manera simétrica respecto al eje del pilote a reemplazar.

1. ESTADO DEL CONOCIMIENTO

1.1 ESTADO DEL ARTE

En diversas investigaciones se han utilizado los micropilotes tanto para incrementar

capacidad de carga como para reducir asentamientos, específicamente en cimentaciones superficiales existentes [3], [5], [4], [6].

Fijando la óptica sobre grupos de pilotes es necesario tener en cuenta que el asentamiento de un pilote individual bajo carga de trabajo es usualmente tan pequeño que no presenta problemas y pasa a ser despreciable, pero cuando se cuenta con grupo de pilotes, el efecto combinado de estos puede producir un asentamiento considerable [7].

Los asentamientos diferenciales son usuales en grupo de pilotes con cabezal flexible, no obstante, el aumento de pilotes contrarresta este fenómeno, teniendo en cuenta que si los elementos se sitúan sobre el centro de la sección, la acción reduce su efecto hasta en un 70%, mientras que si los pilotes se aumentan y se distribuyen sobre toda la sección, la reducción de asentamientos diferenciales puede alcanzar valores hasta del 60% [8]. Es importante tener en cuenta que la longitud de los pilotes condiciona la rigidez o flexibilidad de los mismos, todo ello a raíz de la variación que se presenta en la rigidez relativa suelo-pilote [9].

En un caso similar al anterior, se han presentado análisis de la respuesta de una cimentación superficial recalzada con micropilotes, la cual posteriormente se analiza como un sistema tipo placa-pilote. La investigación emplea modelación física en centrifuga geotécnica para dicho análisis; los resultados mostraron que los micropilotes generaron una redistribución de la carga bajo la losa o zapata, modificándose la presión de contacto. Finalmente, se propone un factor de corrección por capacidad portante, debido a que la metodología analítica con la que se

comparan los resultados de la modelación física no considera la flexibilidad de la losa y la rigidez relativa entre los elementos estructurales. En conclusión, se muestra que los micropilotes funcionan también como elementos controladores de asentamientos diferenciales [3].

En cuanto a la eficiencia de grupos de pilotes para suelos granulares los pilotes hincados compactan al suelo granular, aumentando su capacidad portante. Diversos ensayos han demostrado que los factores de eficiencia en grupos de pilotes hincados en arena, pueden alcanzar valores de dos, mientras que en pilotes excavados la acción de excavación tiende a reducir al aumentar la compactación, por lo cual, el factor de eficiencia de grupo es difícil que sea mayor que uno [7].

El sistema de cimentación mediante micropilotes también ha sido estudiado para el análisis de recuperación de capacidad de carga en una zapata, donde dicho estudio mostró que la zapata continua aportó aproximadamente un 23% en la capacidad de carga, por lo cual se recomienda que se incluya el criterio de asentamiento para determinar la carga de trabajo. No obstante, existe una gran desventaja, como lo es la falta de estudios académicos sobre este tipo de micropilotes cuando es usado para la rehabilitación de cimentaciones superficiales con problemas, al no saber cuál es el aporte de cada una de las partes del sistema placa-pilote creado, generando así incertidumbre a la hora de usar este tipo de solución [3].

Otro caso para el uso de micropilotes en la recuperación capacidad de carga en una cimentación existente, es el evidenciado en Maryland, donde se seleccionó la utilización de micropilotes para rehabilitar un sistema de cimentación compuesto por pilotes en

madera, los cuales por efectos de su exposición al agua presentan pérdida de capacidad de carga. Esto en un puente de 75 años de construido sobre el río Pocomoke [5].

El estudio del uso de micropilotes para el control de asentamientos ha sido documentado en una investigación realizada a una unidad residencial compuesta por 88 casas en la ciudad de Taman Tunas Muda, esta unidad se encuentra sobre un estrato de suelo tipo arcilloso/limoso con baja capacidad de carga. Las casas presentaron asentamientos de tal magnitud que ocasionan daños en las estructuras de las viviendas. Las acciones correctivas aplicadas para solucionar esta problemática incluyen la utilización de micropilotes y vigas para apuntalar la cimentación, la cual se encuentra constituida por grupos de micropilotes en concreto reforzado. Como resultado final se obtiene la estabilización de los movimientos en las casas, por lo tanto se considera viable el uso de micropilotes para el control en asentamientos [4].

Partiendo de la literatura existente sobre el uso de micropilotes en la recuperación de carga y control de asentamiento en cimentaciones, y mediante la aplicación del método de Poulos & Davis para asentamientos de grupos de pilotes con elementos de geometrías diferentes en los modelos propuestos en esta investigación, se espera entender el comportamiento de estas estructuras a partir de las variables propuestas para estudio y de esta manera se pueda avanzar hacia la modelación numérica más rigurosa y detallada, en las cuales se pueda llegar a analizar el efecto de interacción suelo estructura y las demás variables involucradas en la descripción del comportamiento de este tipo de

cimentaciones con elementos portantes de diferentes geometrías.

Teniendo en cuenta estas condiciones se plantea la pregunta de investigación, la cual permitirá delimitar el alcance y proponer las hipótesis respectivas: Aplicando la metodología analítica propuesta por Poulos & Davis, ¿en qué proporción se modifica el asentamiento y la carga asumida por los pilotes dentro de un grupo, cuando uno de ellos, al ser defectuoso, es reemplazado por un determinado número de micropilotes?

1.2. MODELO CARGA/ASENTAMIENTO PARA DETERMINAR EL ASENTAMIENTO Y DISTRIBUCIÓN DE CARGA EN GRUPOS DE PILOTES

1.2.1 Capacidad de carga en pilotes

Se ha llegado a establecer que la capacidad de carga de un pilote, equivale a la sumatoria >de la capacidad por fuste y la capacidad de carga por punta; a esto se le resta el peso del pilote [10]. Poulos & Davis [11], plantean la ecuación “(1)” para obtener la capacidad última de un pilote.

$$P_u = \lambda (\sigma'_m 2 c_m) A_s + A_b (C N_c + \sigma'_{vb}) - W \quad (1)$$

Donde λ , es un coeficiente adimensional de capacidad friccional, el cual está en función de la profundidad de penetración del pilote en el suelo; σ'_m , es el esfuerzo efectivo medio entre la superficie del suelo y la punta del pilote; c_m , es la cohesión promedio a lo largo del pilote; N_c , es el factor de capacidad de carga y para este caso se toma como 9, de acuerdo a los estudios realizados por Skempton [12].

1.2.2. Capacidad de carga en grupos de pilotes

En el estudio de capacidad de carga para grupos de pilotes, se ha establecido dos tipos: el primero denominado con cabezal libre, considera que el cabezal del grupo no entra en contacto con el estrato de suelo portante. El segundo, llamado fundación piloteada donde el cabezal entra en contacto con el suelo [11]. Para esta investigación se tendrá presente, grupos de tipo cabezal libre debido a que únicamente se pretende evaluar la carga en los elementos tipo pilote y micropilote, sin tener en cuenta aporte en carga de la cimentación por parte del encepado. Partiendo de esto se obtiene la capacidad de carga del grupo de pilotes, por medio de la metodología establecida por Poulos & Davis [11]. Esta recomienda tomar como capacidad de carga del grupo al valor menor de: la sumatoria de la capacidad individual de los pilotes que integran el grupo, aplicando un factor de eficiencia; la capacidad portante del grupo por falla en bloque; análisis de capacidad de carga del grupo, evaluando la transición entre la falla de un pilote individual y la falla en bloque del grupo.

• Capacidad de carga del grupo, aplicando eficiencia.

El concepto de eficiencia se entiende como la relación entre la capacidad última del grupo y la sumatoria de las capacidades individuales de los pilotes que conforman un grupo [13], esta se puede determinar a partir de algunas aproximaciones teóricas como:

Por Converse-Labarre:

$$\eta = 1 - \tan^{-1} \frac{d}{s} * \left[\frac{(n-1)m + (m-1)n}{90mn} \right] \quad (2)$$

Dónde: m es el número de filas; n el número de columnas; d es el diámetro de los pilotes; s es el espaciamiento entre los pilotes.

Por Regla de Feld:

$$\varepsilon = 1 - \frac{1}{16} * n \quad (4)$$

Dónde: n es el número de pilotes que conforman el grupo.

Por el factor de influencia:

$$\varepsilon = \frac{d}{8s} \quad (5)$$

• Bloque de falla equivalente al grupo.

Therzagui & Peck [14], establecen la ecuación “(6)”, para el cálculo de capacidad de carga última para grupos de pilotes en estratos de suelo cohesivos.

$$P_B = B_r L_r c N_c + 2(B_r + L_r) L \bar{c} \quad (6)$$

Dónde: B_r es el ancho del grupo; L_r es la longitud del grupo; c es la cohesión no drenada en la base del grupo; N_c es el factor de capacidad de carga en la profundidad L; L es la longitud de los pilotes; $\bar{c}$ es la cohesión promedio entre la superficie y la profundidad L.

• Transición entre la falla individual o en bloque del grupo

Poulos & Davis [11] evalúan la transición de capacidad de carga obtenida a partir de la de falla en bloque y la obtenida por falla individual. Dicha relación se establece mediante la ecuación “(7)”:

$$\frac{1}{P_u^2} = \frac{1}{n^2 P_1^2} + \frac{1}{P_B^2} \quad (7)$$

Dónde: P_1 es la capacidad de carga última de un pilote; P_B es la capacidad de carga del grupo por falla en bloque.

1.2.3. Asentamiento pilotes individuales

Para el cálculo de asentamiento en la cabeza de un pilote, Poulos & Davis [11], realizan una evaluación a partir de un pilote incompresible en un semiespacio, proponen la ecuación “(8)” para calcular el asentamiento unitario en pilotes flotantes:

$$\rho = \frac{PI}{E_s d} \quad (8)$$

Dónde: P es la carga sobre el pilote; E_s es el módulo de elasticidad promedio del suelo; I es el factor de influencia para asentamientos y se calcula por medio de la ecuación “(9)”:

$$I = I_o R_k R_h R_v \quad (9)$$

Donde: I_o es el factor de influencia para un pilote incompresible apoyado en un espacio semi-infinito con una relación de Poisson de 0.5; R_k es el factor de corrección por la compresibilidad del pilote; R_h es el factor de corrección por profundidad finita del estrato donde se apoya la base; R_v es el factor de corrección por relación de Poisson.

Poulos & Davis [11], construyen una serie de ábacos para obtener estos factores de influencia y de corrección, en función de parámetros adimensionales del pilote tales como relación de esbeltez (L/d), rigidez relativa (K), relación del diámetro fuste-base y la relación de Poisson del estrato de suelo portante.

1.2.4. Asentamiento en grupos de pilotes

Se ha establecido que el efecto de grupo tiene incidencia tanto en cálculo de asentamientos como en capacidad de grupos de pilotes [15]. Poulos [16], Poulos & Mattes [17], proponen una metodología para el

cálculo de asentamiento en grupo de pilotes. Poulos & Davis [11], adicionan el cálculo de asentamiento en grupos con pilotes de características geométricas diferentes. Este método se caracteriza por la inclusión de un término denominado factor de interacción (α), el cual permite calcular el asentamiento de un pilote teniendo en cuenta la influencia de pilotes adyacente. El factor de interacción se define en la ecuación “(10)”:

$$\alpha = \frac{\rho \text{ adicional causado por pilote adyacente}}{\rho \text{ del pilote bajo su propia carga}} \quad (10)$$

Poulos & Mattes [17], establecen la metodología para calcular los factores de interacción, en función del espaciamiento adimensional de pilotes (s/d), relación de esbeltez (L/d) y rigidez relativa (K). Esta metodología está basada en el análisis de dos pilotes similares, tanto geométricamente como en carga de trabajo [16]. Poulos & Davis [11], extienden dicho análisis para grupos constituidos por pilotes de características geométricas diferentes, definiendo el asentamiento para un pilote en un grupo con esta particularidad a partir de la ecuación “(11)”:

$$\rho_k = \sum_{j=1, j \neq k}^n (\rho_{1j} \cdot P_j \cdot \alpha_{kj}) + \rho_{1k} P_k \quad (11)$$

Donde: ρ_{1j} es el asentamiento unitario para el pilote j; P_j es la carga de trabajo del pilote j; α_{kj} es el factor de interacción para espaciamiento entre los pilotes k y j, con parámetros geométricos del pilote j.

Para llegar a una solución matemática de las ecuaciones de asentamiento, Poulos & Davis [11], incluyen el equilibrio en cargas verticales, expresada en la ecuación “(12)”:

$$P_G = \sum_{j=1}^n P_j \quad (12)$$

Donde P_G es la carga total del grupo.

El método plantea 2 condiciones de frontera para calcular asentamientos y carga de trabajo de los pilotes dentro del grupo. La primera considera una distribución de carga uniforme en todos los pilotes, para representar un cabezal flexible. La segunda considera asentamientos iguales en los pilotes, representando un cabezal rígido [11].

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. MATERIALES

Los materiales y modelos utilizados en la presente investigación toman como referencia el estudio realizado en centrifuga geotécnica de grupos de pilotes con varias separaciones, realizado por Rodríguez [18]. El trabajo de referencia también delimita el tipo de suelo que fue estudiado, como se describe en este capítulo.

2.1.1. Modelos de estructura de cimentación.

El modelo base de esta investigación está compuesto por un arreglo de pilotes de 2x2, su separación equivale a tres veces su diámetro, estos cuentan características geométricas similares, las cuales se encuentran descritas en la Tabla 1. La distribución de estos pilotes sobre un cabezal tipo rígido se observa en la figura 1.

Para este trabajo investigativo, se toma la siguiente consideración: el pilote 1 llega a presentar defectos los cuales afectan su capacidad estructural, por lo tanto, se hace necesario el uso de micropilotes para reemplazar dicho elemento, de esta manera

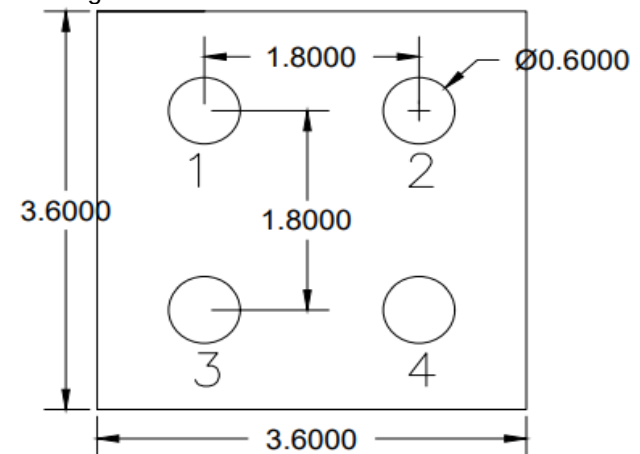
se garantiza la integridad y funcionalidad de la cimentación. Con el objetivo de realizar una descripción del comportamiento de los elementos constitutivos en grupos de pilotes, los cuales incluyen elementos portantes de diferente geometría, se establecieron unos modelos a estudiar, los cuales serán evaluados por medio de la metodología analítica de Poulos & Davis para asentamientos de grupos de pilotes.

Tabla 1. Propiedades Pilotes

CARACTERÍSTICA	UNIDAD	MAGNITUD
Diámetro	m	0.6
Longitud	m	20
Perimetro	m	18.849
Area Superficial	m ²	37.699
Peso Especifico	KN/m ³	24
Resistencia a la Compresión	Mpa	28
Modulo Elástico	MN/m ²	20636.8
Volumen	m ³	56.548
Area Base	m ²	0.2827

Fuente: elaboración propia

Figura 1. Dimensiones en metros modelo inicial investigación



Fuente: elaboración propia

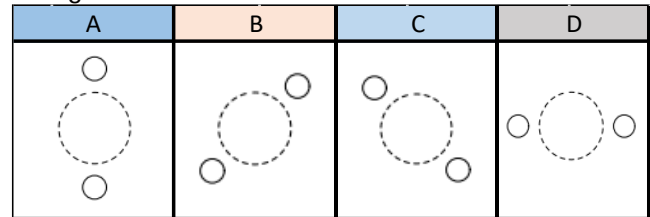
Estos modelos van a estar constituidos por pilotes, micropilotes y un cabezal rígido que no entra en contacto con la superficie del

suelo. Dentro de cada modelo se busca evaluar algunas configuraciones, las cuales establecen un posicionamiento específico de los micropilotes dentro del área del cabezal, de tal manera que estos mantengan simetría con el eje del pilote a reemplazar, adicionalmente cada configuración evaluara 3 separaciones de los micropilotes con respecto al eje del pilote defectuoso, estas equivalen a 2.5, 3 y 3.5 veces el diámetro de los micropilotes. Los modelos propuestos para estudio, con sus respectivas configuraciones son los siguientes:

- 3 Pilotes - 2 Micropilotes (3P-2M): para este modelo se tiene en cuenta 4 configuraciones (A, B, C, D).
- 3 Pilotes - 3 Micropilotes (3P-3M): en este modelo se evaluaron 2 configuraciones (A, B).
- 3 Pilotes - 4 Micropilotes (3P-4M): se evalúan 2 configuraciones (A, B).
- 3 Pilotes - 5 Micropilotes (3P-5M): se evalúan 3 configuraciones (A, B, C).

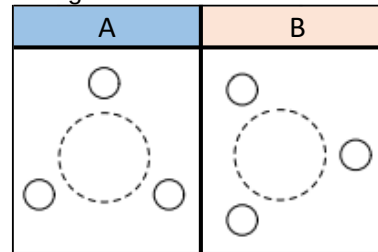
Las figuras 2, 3, 4 y 5 permiten observar los posicionamientos de los micropilotes en las diferentes configuraciones propuestas en cada modelo específico, estos elementos se posicionaron con simetría respecto al eje del pilote 1, el cual es considerado elemento a reemplazar por los micropilotes dentro de la cimentación, adicionalmente cada configuración se evaluará con 3 separaciones, las cuales equivalen a 2.5d, 3d y 3.5d. En la tabla 1, 2, y 3 se describen las características estructurales y geométricas de los elementos que constituyen los modelos propuestos para estudiar: pilotes, micropilotes y cabezal.

Figura 2. Posicionamiento micropilotes para las configuraciones del modelo 3P-2M



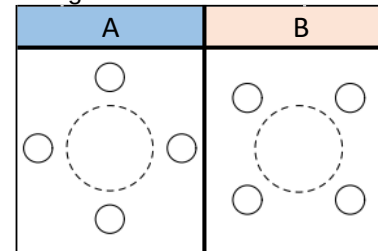
Fuente: elaboración propia

Figura 3. Posicionamiento micropilotes para las configuraciones del modelo 3P-3M



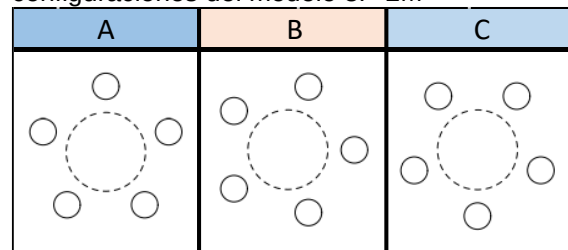
Fuente: elaboración propia

Figura 4. Posicionamiento micropilotes para las configuraciones del modelo 3P-4M



Fuente: elaboración propia

Figura 5. Posicionamiento micropilotes para las configuraciones del modelo 3P-5M



Fuente: elaboración propia

Tabla 2. Propiedades Cabezal

CARACTERISTICA	UNIDAD	MAGNITUD
Ancho	m	3.6
Largo	m	3.6
Separacion Pilotes	m	1.8
Sobre Ancho	m	0.3

Fuente: elaboración propia

Tabla 3. Propiedades Micropilotes

CARACTERISTICA	UNIDAD	MAGNITUD
Diámetro	m	0.2
Longitud	m	10
Perimetro	m	0.6283
Area Superficial	m ²	62.831
Peso Especifico	KN/m ³	24
Resistencia a la Compresión	Mpa	28
Modulo Elástico	MN/m ²	20636.8
Volumen	m ³	0.31415
Area Base	m ²	0.03141

Fuente: elaboración propia

2.1.2. Estrato portante de suelo

Esta investigación tendrá en cuenta un perfil de suelo de tipo arcilla blanda, con característica mecánicas que se asemejan a las arcillas presentes en la ciudad de Bogotá, dicho perfil es presentado en investigaciones previas por Rodríguez [18], [19]; para estudiar el fenómeno de consolidación en sistemas de cimentación de tipo Placa- pilote. Su valor de cohesión está en el rango de 10 KN/m² en superficie a 40 KN/m² en profundidad. El método de Poulos & Davis establece su aplicación para una masa de suelo homogénea semi-infinita [11], por lo tanto se toma un valor 25 KN/m² constantes para Cohesión en esta arcilla. Por medio de esta propiedad del suelo y a través de correlaciones establecidas en investigaciones de geotecnia previamente [20], [10], podemos obtener parámetros

característicos de este estrato de suelo propuesto para la investigación, los cuales se observan en la tabla 4.

Tabla 4. Propiedades estrato portante de suelo

PROPIEDAD	UNIDAD	MAGNITUD
Cohesión	Kpa	3.6
Resistencia qu	KPa	3.6
Nivel Freático	m	1.8
Modulo Elástico	KN/m ²	0.3
Relación Poisson	-----	3.6
Peso Especifico	KN/m ³	3.6

Fuente: adaptado de Rodríguez [18]

2.2. METODOLOGÍA

2.2.1 Capacidad de Carga en Pilotes

Con el propósito de evaluar la capacidad de carga de la cimentación propuesta en la Figura 1 se utiliza la metodología de Poulos & Davis para capacidad de carga en pilotes individuales. Por medio de la ecuación “(1)” se obtiene una capacidad de carga ultima para un pilote con características geométricas descritas en la tabla 1 de 1129.16 KN. Los modelos también incluyen elementos tipo micropilote, por lo tanto, utilizando la ecuación “(1)” se obtiene la capacidad ultima de estos elementos estructurales cuyo valor equivale a 141.70 KN.

2.2.2 Capacidad de Carga en Grupos de Pilotes

Para obtener la capacidad de carga del arreglo de pilotes de 2×2 con características geométricas iguales que constituyen el modelo inicial, ilustrado en la figura 1, se tiene en cuenta la recomendación de Poulos & Davis [11] para capacidad de carga en grupos de pilotes con cabezal libre, de esta evaluación se obtienen los resultados plasmados en la tabla 5.

Tabla 5. Capacidad carga grupo pilotes de 2x2 con características geométricas similares

METODOLOGIA	Pgrupo (KN)
Bloque falla equivalente al grupo	6096
Transición falla individual o bloque	3629.08
Converse-Labarre	3591.49
Regla de Feld	3669.78
Factor de Influencia	4328.46

Fuente: elaboración propia

Finalmente, se obtiene la capacidad del sistema de cimentación en el modelo inicial equivale a 3591.49 KN. Para el cálculo de asentamiento en los modelos a estudiar, se toma una carga de trabajo de 1796 KN. Lo cual garantiza un factor de seguridad de 2, con respecto a la capacidad del modelo inicial.

2.2.3. Asentamiento en grupos de pilotes

Por medio de la ecuación “(11)” se pueden plantear ecuaciones de asentamiento para todos los elementos tipo pilote y micropilote dentro de los modelos propuestos en la investigación, se adiciona una ecuación que describe el equilibrio de cargas verticales para cada modelo por medio de la ecuación “(12)”. Previamente se había establecido que en esta investigación los sistemas de cimentación propuestos son de cabezal libre y rígido, por lo tanto, se aplica la segunda condición de frontera de la metodología de Poulos & Davis, la cual considera asentamientos iguales en los pilotes caracterizando un encepado rígido [11]. De esta manera se genera un sistema de ecuaciones posible de solucionar, por la condición de frontera establecida para un cabezal rígido, se condiciona que todos los asentamientos tienen igual magnitud y que la sumatoria de carga de trabajo en pilotes y micropilotes equivaldrá a 1796 KN. Con estas consideraciones es posible obtener la

distribución de carga de trabajo en pilotes y micropilotes propio de cada modelo, junto a su asentamiento.

1.2.4. Asentamiento pilotes individuales

Para el cálculo de asentamiento en grupos de pilotes se hace necesario obtener el asentamiento unitario para los elementos portantes que constituyen los modelos de la investigación. Aplicando la ecuación “(8)”, propuesta por Poulos & Davis para el asentamiento de un pilote flotante en una masa de suelo homogéneo y a partir de los parámetros adimensionales para pilotes y micropilotes expuestos en la tabla 6, se obtiene los factores de influencia y corrección para pilotes y micropilotes, cuyas características geométricas se describen en la tabla 1 y 3 respectivamente.

Tabla 6. Parámetros adimensionales para pilotes y micropilotes

PARÁMETRO	PILOTE	MICROPILOTE
L/D	33.33	50
K	1650.94	1650.94
d_b/d	1	1

Fuente: elaboración propia

Estos se plasman en la tabla 7, Luego se evalúan en la ecuación 9 estos factores y se obtiene el factor de influencia para asentamientos (I) para pilotes y micropilotes.

Tabla 7. Factores de influencia y corrección para pilotes y micropilotes

FACTOR	PILOTE	MICROPILOTE
I_0	0.06	0.04
R_k	1.18	1.25
R_h	1	1
R_v	0.96	0.96
I	0.067	0.054

Fuente: elaboración propia

El asentamiento unitario para los elementos portantes tipo pilote y micropilotes se obtiene por medio de la ecuación “(8)”, los resultados se ilustran en la tabla 8.

Tabla 8. Asentamiento unitario para pilotes y micropilotes

ASENTAMIENTO	PILOTE	MICROPILOTE
ρ_1 (CM/KN)	0.00091	0.00216

Fuente: elaboración propia

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Una vez aplicado el método planteado por Poulos & Davis en 1980 para asentamientos en grupos de pilotes con elementos de diferentes geometrías a los modelos propuestos, se obtienen los resultados que se presentarán en este capítulo, cuyo análisis se enfoca en el objetivo de esta investigación: Analizar el comportamiento de los elementos constitutivos tipo pilote y micropilotes dentro de los modelos con respecto a carga y asentamiento en la medida que se incrementa la separación de los micropilotes con respecto al eje del pilote a reemplazar.

Para una mejor comprensión de resultados cada elemento tipo pilote y micropilote se encuentra representado por la letra P y M respectivamente.

En el anexo 1 se muestran los resultados de carga para cada elemento tipo pilote y micropilote, así como el asentamiento en cada modelo y configuración propuesta para estudiar. Esto aplicando las variables propuestas a tener en cuenta en la presente investigación. Partiendo de esto se hace necesario la organización de este producto en tres ejes principales: asentamientos y carga tanto en pilotes como micropilotes.

3.1. Asentamiento promedio en los modelos

Para discutir los resultados obtenidos con respecto a asentamientos en los modelos propuestos para estudio, en primera medida se opta por la utilización de un parámetro denominado factor de forma (FF) el cual se ha implementado con investigaciones en sistemas placa-pilote, donde se ha observado una variación de asentamiento en función de este [21]. Dicho parámetro caracteriza los sistemas placa-pilote y se ha llegado a relacionar con la distribución de la carga asumida por los elementos constitutivos de estas cimentaciones, así como su control de asentamientos [21]. El factor de forma relaciona características geométricas, tanto de la placa como del grupo de pilotes, fue propuesto por Mandolini *et al.* [22], mediante la siguiente expresión:

$$FF = \frac{A_G d}{A_R S} \quad (14)$$

Donde:

A_G : área formada por el grupo de pilotes

A_R : área de la placa

S: espaciamiento entre pilotes

d: diámetro de los pilotes

El factor de forma utilizado en esta investigación fue modificado (FF'), y se calcula a partir del área formada por el grupo de micropilotes en cada modelo y una cuarta parte del cabezal que se ha tenido en cuenta en los sistemas de cimentación para estudio. Con el incremento en cantidad de micropilotes en los modelos, estos no mantienen un patrón de forma geométrica similar en los grupos, por lo tanto en la tabla 9 se establece las formulas aplicadas para el cálculo del área de grupo en los micropilotes

y posteriormente el FF' modificado utilizado en la investigación.

Tabla 9. Ecuaciones aplicadas en área de grupo

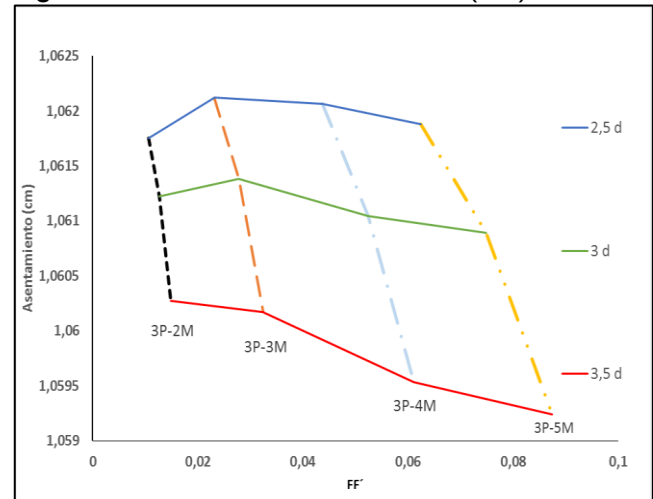
MODELO	ECUACIÓN
3P-2M	$A_G = \left[\left(\sqrt{N_p} - 1 \right) s \right]^2$
3P-3M	$A_G = \frac{\sqrt{3} * s^2}{4}$
3P-4M	$A_G = \left[\left(\sqrt{N_p} - 1 \right) s \right]^2$
3P-5M	$A_G = 1,72 * s^2$

Fuente: elaboración Propia

Las expresiones matemáticas usadas en los modelos 3P-3M y 3P-5M, están establecidas para calcular el área de un triángulo equilátero y un pentágono respectivamente. Para los modelos 3P-2M y 3P-3M se utiliza una expresión definida por De Sanctis *et al.* [23].

Los resultados plasmados en la figura 6, muestran una reducción en asentamientos a partir de dos de las tres variables a tener en cuenta en esta investigación, una es el aumento en la separación de los micropilotes y la otra el aumento en la cantidad de dichos elementos en los modelos establecidos previamente. Sin embargo, se observa que en la medida que se mantiene la variable de separación equivalente a 2.5d y se aumenta la cantidad de micropilotes de 2 a 3 se observa un aumento en el asentamiento en dichas estructuras de cimentación.

Figura 6. Asentamiento en función de (FF')



Fuente: elaboración propia

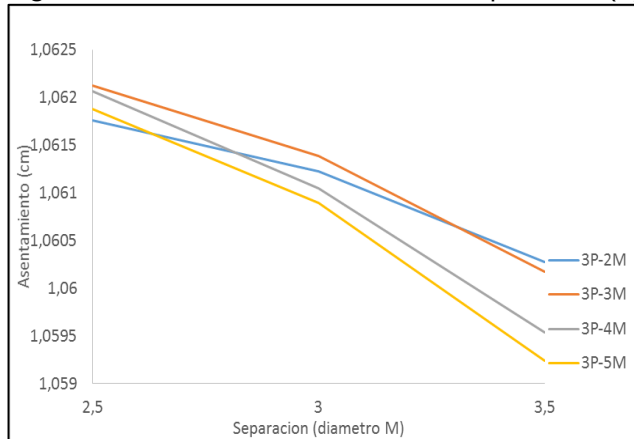
Se puede evidenciar que manteniendo la separación para micropilotes en un equivalente a 3.5d y aplicando aumento en la cantidad de estos, se obtiene la mejor tendencia en reducción de asentamiento comparando con las otras separaciones propuestas las cuales corresponden a 2.5d y 3d. Por lo tanto, se podría llegar a establecer un comportamiento similar en el manejo de asentamientos entre grupo de pilotes cuyo cabezal sea rígido y se encuentre libre del contacto con el suelo y un sistema placa-pilote, debido a que se ha documentado previamente que en estos sistemas de cimentación se presenta una reducción en el asentamiento por medio del aumento en la separación entre sus pilotes, lo cual ocasiona una mejor distribución de estos en el área de la placa [21].

El Factor de Forma modificado (FF') es utilizado en la Figura 6 para analizar los asentamientos en todos los modelos propuestos. Se observa un incremento de dicho parámetro en la medida que se aumenta en cantidad y espaciamiento los micropilotes. Se obtiene que el mejor control de asentamientos promedio esta con la

implementación de 5 micropilotes y una separación de estos con una magnitud equivalente a 3.5 veces su diámetro en la estructura de cimentación. Un estudio previo para sistemas placa-pilote estableció que en la medida que aumenta el Factor de Forma en estos, la reducción en asentamiento de la cimentación es mayor [24], comportamiento similar al observado en los modelos propuestos en esta investigación por medio de los resultados obtenidos e ilustrados en la figura 6.

En una segunda medida para analizar los resultados obtenidos en asentamiento, se parte desde la variable de incremento en la separación de los micropilotes con respecto al eje del pilote a reemplazar, dicho producto se expone en la figura 7 y se observa una reducción para los asentamientos en los modelos propuestos en la medida que se incrementó la separación, esta condición también se puede relacionar una mejor distribución de los micropilotes en el área del cabezal de la cimentación, lo cual se ha documenta únicamente para sistemas placa-pilote [21]. Dicho comportamiento se presenta en todos los modelos propuestos en esta investigación.

Figura 7. Asentamiento en función de separación (S)



Fuente: elaboración propia

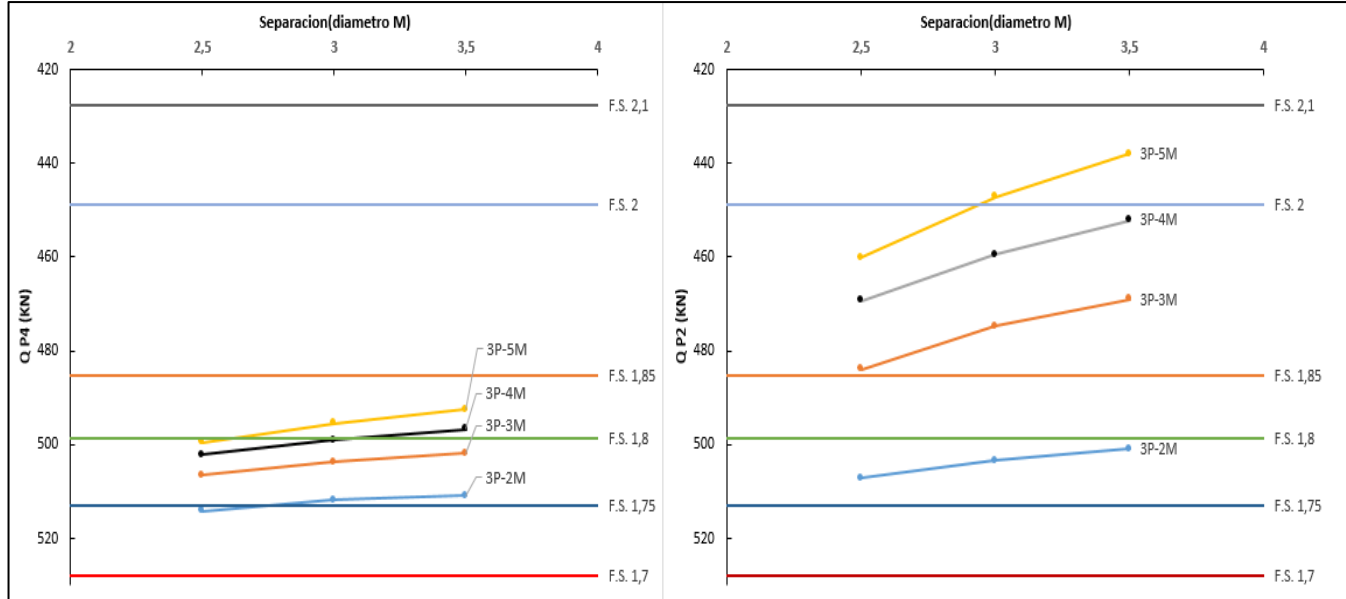
La figura 7 permite observar la tendencia predominante en reducción de asentamientos en la medida que se incrementa la cantidad de micropilotes en los modelos, se presenta una excepción en el 3P-2M cuya magnitud en asentamiento fue menor que el 3P-3M, 3P-4M y 3P-5M cuando la separación de sus micropilotes equivale a 2.5 veces su diámetro. Pero al evaluar todos los modelos con el aumento en la separación a valores equivalentes de 3d y 3.5d, se observa que el 3P-2M es el que presenta menor reducción en asentamientos a comparación con los demás modelos propuestos.

3.2. Carga en Pilotes

Con los modelos propuestos para estudio se observa un cambio en la carga (Q) que asumen los pilotes con respecto a la configuración inicial de 2x2 con características geométricas similares y un cabezal rígido. El elemento que más presenta aumento en su carga es el P_4 . La carga seleccionada a trabajar en el modelo inicial garantizaba un F.S. de 2 con respecto a la capacidad última del grupo de pilotes, una vez se reemplaza el P_1 por micropilotes en los distintos modelos, se puede observar que dicho factor en este pilote llega a ser menor de 1.75 para grupos que consideran la instalación de 2 micropilotes. La figura 8 realiza una comparación del comportamiento en carga de trabajo para P_4 y P_2 , una vez se reemplaza el P_1 por micropilotes y aplicando el incremento tanto en cantidad como en separación (s) de estos elementos.

Los resultados expuestos en la figura 8, evidencian que la carga en P_4 y P_2 tiende a disminuir en la medida que se incrementa tanto la separación como el número de micropilotes, de esta manera aumenta el F.S.

Figura 8. Variación de Carga en P_2 y P_4 , en función de cantidad y espaciado de micropilotes



Fuente: elaboración propia

en dichos elementos de la estructura. Dentro de los modelos utilizados en la investigación en el 3P-5M evaluado con separación equivalente a $3.5d$, tanto P_2 como P_4 presentan el factor de seguridad más alto de la investigación, el cual supera un valor de 2 y 1.8 respectivamente, de tal manera que se podría establecer una relación entre el F.S. en pilotes con respecto al incremento o disminución de asentamiento en los modelos estudiados, la cual demuestra una tendencia de reducción en asentamientos, con el aumento de factor de seguridad para pilotes.

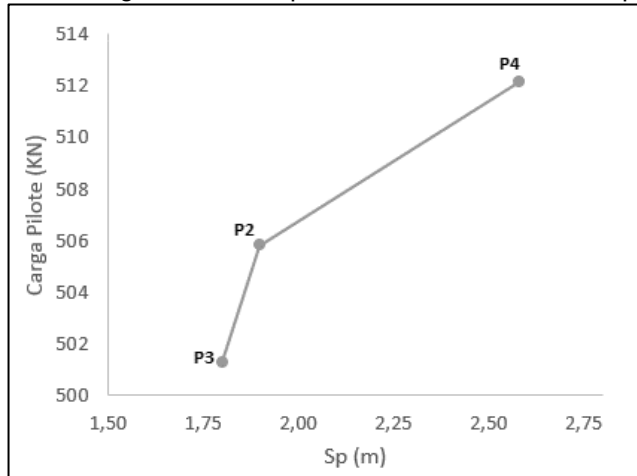
Comparando la variación en carga de trabajo que sufren los pilotes P_4 y P_2 en la figura 8, se evidencia que en la medida que se efectúan cambios en cantidad y separación entre micropilotes, se puede observar que el elemento P_2 presenta una reducción mayor en carga de trabajo con respecto al P_4 , así mismo dicho elemento presenta el factor de seguridad más alto, dentro de todos los elementos portantes en los modelos incluidos en la presente investigación.

La figura 8 permite percibir que el cambio más considerable en carga de trabajo en los pilotes P_2 y P_4 se da en el momento que se pasa de trabajar el modelo que incluye 2 micropilotes al que incluye 3 elementos de este tipo, este efecto se podría relacionar con una distribución más uniforme en la carga de trabajo de los micropilotes, debido a que el modelo 3P-2M es donde se presenta mayor diferencia en carga para este tipo de elemento constitutivo en las cimentaciones. Las cargas de trabajo obtenidas para el P_2 y P_3 son de magnitudes similares por lo tanto el análisis de resultados se realizó entre P_2 y P_4 , cabe resaltar que en algunas estructuras de cimentación propuesta los pilotes P_2 y P_3 presentaron la misma separación con los micropilotes, por consiguiente en dichos casos su carga de trabajo fue de igual magnitud.

La distribución de carga en pilotes para el modelo 3P-2M evaluado con una separación específica, se puede relacionar con la separación promedio de cada uno con respecto a los micropilotes propuestos en el

grupo. La carga aumentará en la medida que la separación promedio “Sp” entre dicho elemento y los micropilotes sea mayor, esto aplica únicamente en los grupos de pilotes propuestos en el modelo 3P-2M. En la figura 9 se observa esta distribución de carga al aplicar una separación equivalente a 3d en la configuración A.

Figura 9. Distribución de carga pilotes modelo 3P-2M, Configuración A, separación 3d en función de Sp



Fuente: elaboración propia

Se define la separación promedio para un pilote por medio de la siguiente expresión:

$$Sp = \frac{\sum s_n}{n} \quad (13)$$

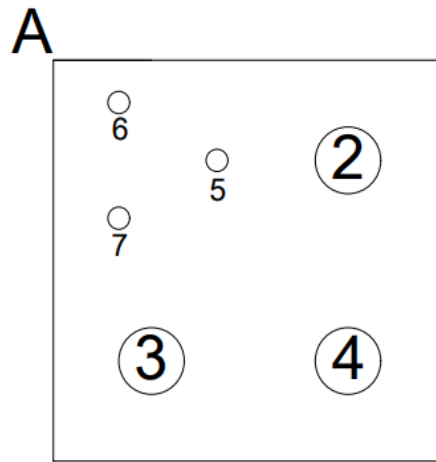
Dónde: Sn, parámetro variable, es la separación entre el centro de un pilote y el de un micropilote para modelo 3P-2M; n es el número de micropilotes dentro del modelo.

3.3. Carga en Micropilotes

Con respecto a la carga que soporta cada elemento tipo micropilotes dentro de los modelos propuestos, se puede establecer que está depende del distanciamiento de cada elemento dentro del grupo con respecto

a la esquina superior izquierda del cabezal, la cual para esta investigación se llamara “A” y se ilustra en la figura 10. Esto implica un aumento en la carga que soporta un micropilote dentro la estructura propuesta, en la medida que dicho elemento estructural presente menor separación respecto a la esquina del cabezal “A”.

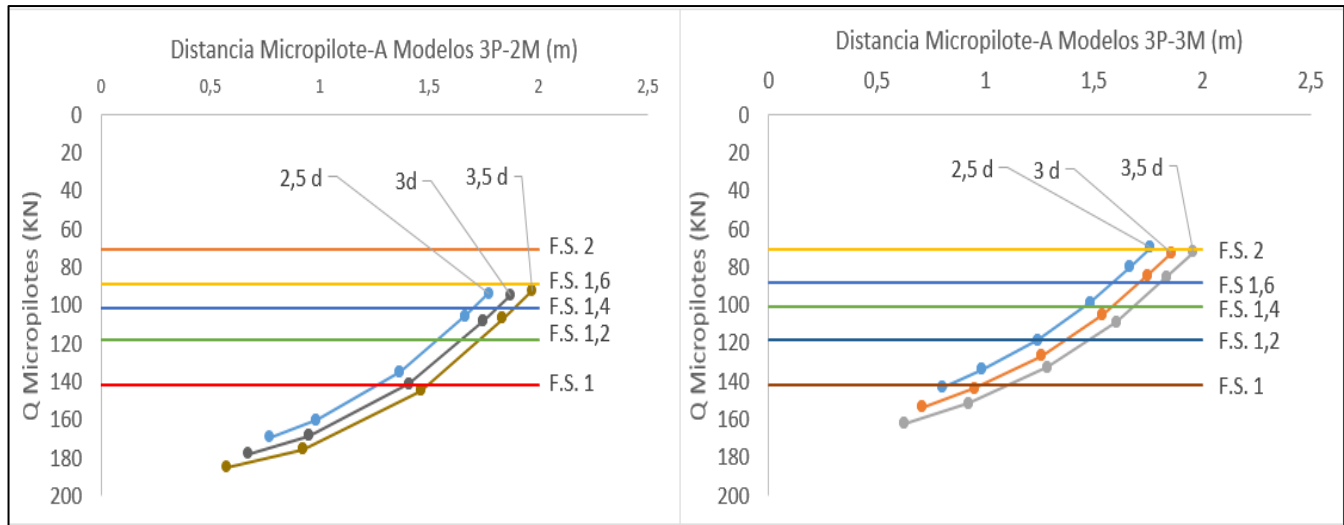
Figura 10. Posicionamiento esquina “A”, en área del cabezal en modelo 3P-3M



Fuente: elaboración propia

Esta relación se plasma en la figura 11 para el modelo 3P-2M, 3P-3M y en la figura 12 para los modelos 3P-4M, 3P-5M; su comportamiento está caracterizado por un aumento en la carga de trabajo en micropilotes en función a la reducción de esta distancia a la esquina “A”. Por medio de investigaciones anteriores en grupos de pilotes rectangulares con cabezal rígido, se ha establecido que los elementos portantes que se encuentran posicionados en borde asumen mayor carga con respecto a los que se posicionan en el centro [25], esto se podría explicar debido a distribución de presiones que se presentan a lo largo del cabezal rígido, donde se ha llegado a establecer que presentan mayor magnitud en los bordes para este tipo de cabezal [26].

Figura 11. Carga micropilotes modelos 3P-2M y 3P-3M en función de su separación con esquina del cabezal “A”



Fuente: elaboración propia

Otro comportamiento característico en todos los modelos estudiados, fue que con el aumento en la separación de los micropilotes con respecto al centro del pilote reemplazado se presenta un aumento en la carga a trabajar por dichos elementos, así como una distribución más uniforme en esta para todos los elementos que constituyen la cimentación.

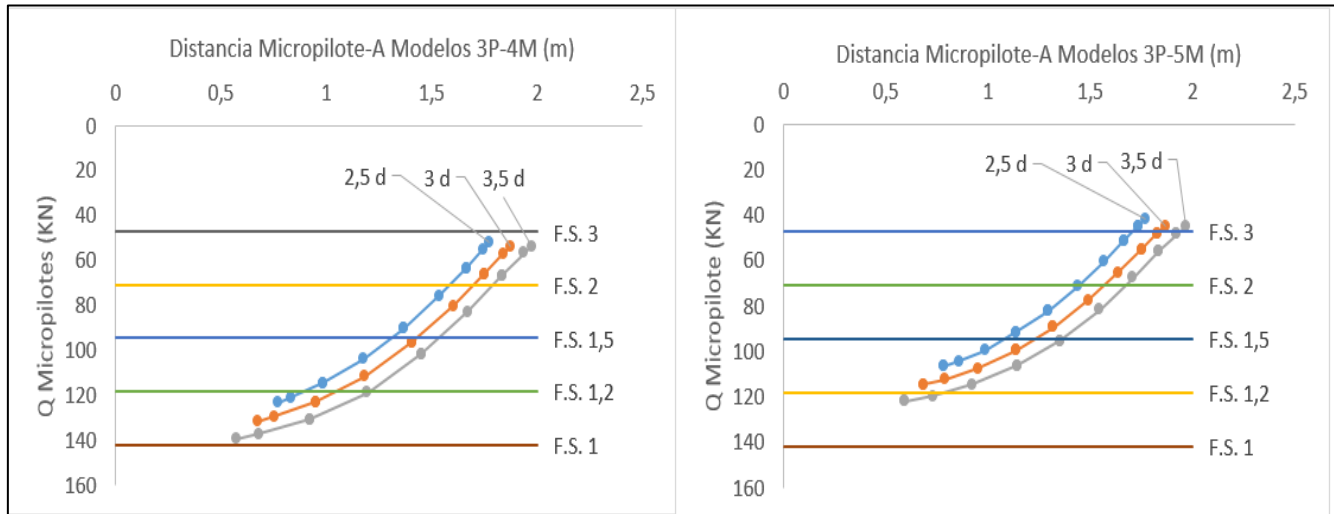
Un comportamiento particular se presenta en todos los modelos cuando un micropilote tiene una separación superior a 1.5 metros con respecto a la esquina “A” del cabezal y cuya separación sea equivalente a 2.5d, al aumentar su separación con respecto al centro del pilote reemplazado de 2.5d a 3d, su carga aumenta; luego al aumentar la separación a 3.5d, la carga de trabajo de este elemento estructural tiende a disminuir, esto se puede observar en la figura 11 y 12.

Al realizar una evaluación del estado último para micropilotes con los resultados observados en la figura 11 y 12, se establecen que en el modelo 3P-2M los micropilotes con una separación entre su

centro y la esquina A del cabezal, inferior a 1.5 m superan su capacidad de carga, mientras que para el modelo 3P-3M presentan esta condición los que presenten menos de 1 m de distancia. En la medida que se aumenta la cantidad de estos elementos la carga de trabajo disminuye, llegando a que ningún micropilotes supere su capacidad de carga en los modelos 3P-4M y 3P-5M.

Una investigación previa con grupos de pilotes de geometría similar, los cuales constan de un cabezal de tipo libre y rígido, en un estrato portante de arcilla, logró identificar que la distribución de carga es menos uniforme a medida que se incrementa la cantidad de pilotes en el grupo [25]. Los resultados mostrados en esta investigación arrojan una tendencia contraria, en la medida que se aumentó la cantidad de micropilotes, se observó una distribución más uniforme de carga en los elementos portantes de la cimentación. Cabe resaltar que la inclusión y aumento de estos elementos se presentó únicamente alrededor del pilote 1, también que estos mantuvieron una distribución simétrica con respecto al pilote a reemplazar.

Figura 12. Carga micropilotes modelos 3P-4M y 3P-5M en función de su separación con esquina del cabezal “A”



Fuente: elaboración propia

4. CONCLUSIONES

El comportamiento observado en los modelos propuestos en la investigación, muestra una reducción en los asentamientos del sistema de cimentación en la medida que configura una mayor distribución de los micropilotes en el área del cabezal, debido al aumento en la separación de estos elementos con respecto al eje del pilote a reemplazar. Así mismo, se verificó la incidencia del número de micropilotes en la reducción de asentamiento, obteniendo una disminución de estos en la medida que se incrementó el número de micropilotes, sin embargo no se alcanza a llegar a la magnitud obtenida en el modelo inicial de estudio con el modelo 3P-5M evaluado con una separación de 3.5d, el cual proporciona el mejor control de asentamientos en la investigación.

La distribución de carga para los elementos tipo micropilote está influenciada principalmente por el posicionamiento de los elementos en el área del cabezal y la separación que se configura con respecto a

la esquina superior izquierda de este. El aumento en número de micropilotes además de influir en la disminución de carga, también permite estructurar una distribución más uniforme de la carga sobre estos elementos, esto permite garantizar un factor de seguridad mayor y de esta manera garantizar la integridad estructural en las cimentaciones.

En materia de carga para pilotes, al momento de evaluar el incremento en separación y cantidad en micropilotes se establece una disminución en dicha carga para estos elementos estructurales, llegando en el mejor de los casos a disminuir su magnitud a un valor menor al obtenido en el modelo inicial el cual equivale a 449 KN, esto se presenta en el modelo 3P-5M cuyos micropilotes se posicionan con una separación equivalente a 3.5d.

Los asentamientos obtenidos para los sistemas de cimentación, permiten establecer un desempeño óptimo de estas estructuras con respecto a su estado límite de servicio. Evaluando el estado último de los elementos tipo pilote y micropilotes en los

modelos, se encuentra que para estos últimos en las estructuras que incluyen una cantidad de dos y tres elementos de este tipo, la carga de trabajo llega a superar su capacidad última, por lo tanto, se hace necesario un análisis más detallado tanto en el posicionamiento y cantidad de los micropilotes, ya que son las variables con mayor incidencia en la distribución de carga al momento de incluir micropilotes como recuperadores, de carga esto con el fin de garantizar el funcionamiento óptimo en un sistema de cimentación a lo largo de su vida útil.

REFERENCIAS

- [1] R. Lorenzo, R. P. d. Cunha, E. Hernandez y W. Cobelo, «Aplicación de la teoría de seguridad al diseño geotécnico de losas sobre pilotes,» *Revista Ingeniería de Construcción RIC*, vol. 28, nº 3, pp. 251-265, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732013000300003>
- [2] J. Han y S.-L. Ye, «A field study on the behavior of micropiles in clay under compression or tension,» *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 43, nº 1, pp. 19-29, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1139/t05-089>
- [3] W. C. Guerrero y E. R. Rodríguez, «Inclusión de micropilotes como elementos recuperadores de carga en cimentaciones: revisión del estado del conocimiento,» *Revista Ingeniería*, vol. 27, nº 2, p. e16984, 2021. DOI: <https://doi.org/10.14483/23448393.16984>
- [4] I. Y. Salena, «A Case Study of Foundation Failure in The Existing Residential Building,» *Jurnal Teknik Sipil Fakultas Teknik*, vol. 2, nº 1, pp. 91-103, 2016. DOI: 10.35308/jts-utu.v2i1.340
- [5] Federal Highway Administration - National Highway Institute, *Micropile Design and Construction. Reference Manual*, 2005.
- [6] K. Sternik y T. Blejarski, «Application of Micropiles to the Stabilization of a Deflected Old Tenement House,» de *12th International Workshop on Micropiles*, Kraków, 2014.
- [7] J. A. Hurtado, *Diseño de Cimentaciones*, Lima: ICG, 2007.
- [8] Y. Tan, C. Chow y S. S. Gue, «Piled raft with different pile length for medium-rise buildings on very soft clay,» *16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Osaka, 2005. DOI:10.3233/978-1-61499-656-9-2045
- [9] C. V. Sainea, «Análisis de grupos de pilotes sometidos a cargas de sismo,» *Facultad de Ingeniería UPTC*, vol. 20, nº 31, pp. 9-21, 2011.
- [10] M. D. Braja, «Fundamentos de ingeniería de cimentaciones,» Cengage Learning, 2011, p. 417.
- [11] H. G. Poulos y E. H. Davis, *Pile foundation analysis and design*, Canada, 1980.
- [12] A. Skempton, «The Bearing Capacity of Clays,» de *Building Research*

- Congress , London, 1951. DOI: <https://doi.org/10.4224/40000389>
- [13] A. A. Fuentes, «Confección de la Propuesta de Norma de Diseño Geotécnico de Cimentaciones sobre Pilotes,» de *Tesis de doctorado*, Villa Clara, 2008, p. 113.
- [14] K. Terzagui y R. B. Peck, *Soil mechanics in engineering practice*, New York: John Wiley & Sons, 1967.
- [15] V. Fernandes, A. Sampaio y G. Llanque, «Estudio experimental del efecto de grupo de pilotes cortos excavados en un perfil de suelo granular,» *INGENIARE*, vol. 28, n° 2, pp. 323-334, 2020. DOI: <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052020000200323>
- [16] H. G. Poulos, «Analysis of the Settlement of pile Groups,» *Geotechnique*, vol. 18, n° 4, pp. 449-471, 1968. DOI: [10.1680/geot.1968.18.4.449](https://doi.org/10.1680/geot.1968.18.4.449)
- [17] H. G. Poulos y N. S. Mattes, «Settlement and Load Distribution Analysis of Pile Groups,» *Geomechanics Journal*, pp. 18-28, 1971.
- [18] E. R. Rodriguez, «Análise experimental do comportamento de sistemas radier estaqueado em solos moles em processos de adensamento,» de *Tesis de doctorado*, Brasilia, 2016, p. 237.
- [19] C. L. Rincón y E. R. Rodriguez, «Centrifuge Physical Modeling of a Wall without Anchors,» de *Tesis de Maestría en Geotecnia*, Bogota, 2001, p. 129.
- [20] R. B. Peck, W. E. Hanson y T. H. Thornburn, *Foundation Engineering*, 1974, p. 487.
- [21] R. P. Cunha, B. Caicedo y E. R. Rodriguez, «Analysis of settlements in Piled Raft Systems founded in soft soil» *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 57, n° 1, p. 537–548, 2019. DOI: [dx.doi.org/10.1139/cgj-2018-0702](https://doi.org/10.1139/cgj-2018-0702)
- [22] A. Mandolini, R. Di Laora y Y. Mascarucci, «Rational Design of Piled Raft,» *Procedia Engineering*, vol. 57, pp. 45-52, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.04.008>
- [23] L. de Sanctis, A. Mandolini, G. Russo y C. Viggiani, «Some remarks on the optimum design of piled raft,» *International Deep Foundations Congress 2002*, pp. 405-425, 2002. DOI: [10.1061/40601\(256\)30](https://doi.org/10.1061/40601(256)30)
- [24] E. Rodríguez, B. Caicedo y J. F. Rodríguez, «Comparative analysis of Piled Raft Foundation System (PRFS),» *Soils and Rocks*, vol. 44, n° 2, 2021. DOI: <https://doi.org/10.28927/SR.2021.062321>
- [25] T. Whitaker, «Experiments with Model Piles in Groups,» *Géotechnique*, vol. 7, n° 4, pp. 147-167, 1957. DOI: <https://doi.org/10.1680/geot.1957.7.4.147>
- [26] M. Vargas, *Ingenieria de Cimentaciones, Fundamento e*

Introducción al Análisis Geotécnico,
Bogotá: Alfaomega, 1999.

<https://docplayer.es/8938490-Analisis-de-la-interaccion-cabecal-suelo-en-cimentaciones-sobre-pilotes.html>

- [27] CivilTech, «Los Micropilotes en las Cimentaciones,» Bogotá, 2021. En: <https://civiltechic.com/2021/12/13/los-micropilotes-en-las-cimentaciones/>
- [28] A. P. Delgado, «FALLAS EN FUNDACIONES,» Montevideo, S.f.
- [29] R. P. Cunha, G. Q. Sotolongo y L. I. Mora, «Análisis de interacción Cabecal/Suelo en cimentaciones sobre Pilotes,» 2019. En:

ANEXOS

Anexo 1. Resultados carga-asentamiento modelos propuestos para estudio.

Modelo 3P-2M	PROPIEDAD	Configuracion A			Configuracion B			Configuracion C			Configuracion D		
	CARGA-ρ	S= 2,5d	S=3d	S=3,5d	S= 2,5d	S=3d	S=3,5d	S= 2,5d	S=3d	S=3,5d	S= 2,5d	S=3d	S=3,5d
	$P_2(KN) =$	509,1455	505,7943	504,7183	505,2996	499,4059	495,6205	510,7140	507,2765	506,2795	503,3512	501,2606	497,2245
	$P_3(KN) =$	507,2050	501,2606	497,2245	505,2996	499,4059	495,6205	510,7140	507,2765	506,2795	506,0907	505,7943	504,7183
	$P_4(KN) =$	513,6210	512,1601	511,5041	515,5526	514,8178	514,7596	511,3059	508,5342	506,2475	516,1477	512,1601	511,5041
	$M_5(KN) =$	105,9462	108,0890	106,8102	134,9242	141,1852	144,9997	93,9714	94,8267	92,2473	109,7930	108,0890	106,8102
	$M_6(KN) =$	160,0823	168,6960	175,7429	134,9242	141,1852	144,9997	169,2948	178,0861	184,9462	160,6175	168,6960	175,7429
	$\rho(cm)=$	1,0619	1,0613	1,0604	1,0638	1,0637	1,0633	1,0599	1,0587	1,0570	1,0615	1,0613	1,0604
	Modelo 3P-3M	PROPIEDAD	Configuracion A			Configuracion B							
CARGA-ρ		S= 2,5d	S=3d	S=3,5d	S= 2,5d	S=3d	S=3,5d						
$P_2(KN) =$		484,4187	475,5964	470,1828	484,1014	474,9745	469,1120						
$P_3(KN) =$		483,4059	474,2844	468,5781	483,1347	473,7599	467,7706						
$P_4(KN) =$		506,1698	502,8327	500,2998	506,7325	504,1347	502,7687						
$M_5(KN) =$		69,8450	72,7643	72,3015	80,2429	84,2959	85,1096						
$M_6(KN) =$		133,8750	143,6804	151,6806	143,1782	153,6854	162,2119						
$M_7(KN) =$		118,2855	126,8418	132,9573	98,6104	105,1496	109,0272						
$\rho(cm)=$		1,0618	1,0609	1,0593	1,0624	1,0619	1,0610						
Modelo 3P-4M	PROPIEDAD	Configuracion A			Configuracion B								
	CARGA-ρ	S= 2,5d	S=3d	S=3,5d	S= 2,5d	S=3d	S=3,5d						
	$P_2(KN) =$	469,439252	459,801814	452,414663	469,128184	459,383399	452,0976						
	$P_3(KN) =$	469,439252	459,801814	452,414663	469,128184	459,383399	452,0976						
	$P_4(KN) =$	502,315843	499,306401	497,168693	502,206309	498,918697	496,232197						
	$M_5(KN) =$	63,1849301	65,907191	66,4413395	52,1583363	53,8566103	53,504689						
	$M_6(KN) =$	63,1849301	65,907191	66,4413395	90,1823938	96,499773	101,461328						
	$M_7(KN) =$	114,217896	122,637795	130,559651	123,0142	131,458349	139,14526						
	$M_8(KN) =$	114,217896	122,637795	130,559651	90,1823938	96,499773	101,461328						
$\rho(cm)=$	1,06205914	1,06105313	1,05956591	1,06207989	1,06105087	1,05951266							
Modelo 3P-4M	PROPIEDAD	Configuracion A			Configuracion B			Configuracion C					
	CARGA-ρ	S= 2,5d	S=3d	S=3,5d	S= 2,5d	S=3d	S=3,5d	S= 2,5d	S=3d	S=3,5d			
	$P_2(KN) =$	460,035286	446,938571	437,715666	460,026904	447,164158	437,999075	460,002854	447,168984	438,148454			
	$P_3(KN) =$	460,014247	446,99112	437,894436	460,002854	447,168984	438,148454	460,026904	447,164158	437,999075			
	$P_4(KN) =$	499,598467	495,420402	492,381247	499,57963	495,494937	492,5719	499,57963	495,494937	492,5719			
	$M_5(KN) =$	41,7181389	44,5857712	44,8349685	44,850755	47,9020207	48,1977645	44,850755	47,9020207	48,1977645			
	$M_6(KN) =$	60,5645929	65,0425686	67,4367662	51,2690278	54,8178808	55,7013577	82,0938386	89,3336303	95,1389119			
	$M_7(KN) =$	98,9153053	107,512697	114,669361	91,5180581	99,4660101	106,269674	106,658932	114,652379	121,972863			
	$M_8(KN) =$	103,744552	112,220614	119,524686	106,658932	114,652379	121,972863	91,5180581	99,4660101	106,269674			
$M_9(KN) =$	71,4094106	77,2882573	81,5428686	82,0938386	89,3336303	95,1389119	51,2690278	54,8178808	55,7013577				
$\rho(cm)=$	1,06192945	1,06093268	1,05932298	1,06185718	1,06086902	1,05919897	1,06185718	1,06086902	1,05919897				