



Análisis comparativo de asentamientos teóricos para dos alternativas de cimentación en una estructura en la ciudad de Bogotá D. C.

Comparative analysis of theoretical settlements for two foundations alternatives in a structure of Bogotá D.C. city.

Edgar RODRIGUEZ¹, Alberto SANCHEZ² y Renato P. da CUNHA³

¹ Estudiante de Doctorado Universidad de Brasilia, Docente Catedrático Universidad Nacional de Colombia.

e-mail: erodriguezr@unal.edu.co

² Gerente General Equipos y Cimentaciones alberto.sanchez@cimentar.net

³ Docente Investigador Universidad de Brasilia, D.SC. M.Sc. rpcunha@unb.br

RESUMEN: El artículo presenta un análisis comparativo de los asentamientos teóricos, determinados para dos alternativas de cimentación propuestas como solución para el apoyo de una estructura con fines habitacionales a construirse en la zona sur de la Ciudad de Bogotá D.C. Las condiciones de suelo encontradas, corresponden a estratos superiores duros típicos de la zona, los cuales descansan sobre estratos de arcillas más blandas y arenas de compactación media, con algún potencial de licuación. La alternativa implementada corresponde a inclusiones construidas como pilas de agregado compactado, incluyéndose en el artículo algunas descripciones de los procesos constructivos y de las consideraciones de diseño, así como los asentamientos que se han medido una vez construida la obra.

ABSTRACT: The article present a comparative analysis of the theoretical settlements determined for two foundation alternatives proposed as solutions for the support of one structure with residential purposes, to be built at the south zone of Bogotá city. The soil conditions correspond to deposits of hard upper layers typical of the area, superjacent to softer clay layers and sand packages of medium density, with some potential for liquefaction. The implemented alternative corresponds to inclusions made of compacted gravel piles, which will have its process of construction and design considerations described in the article, as well as the settlements that have been measured once was finished work.

1 INTRODUCCION

Dentro del desarrollo geotécnico colombiano, las alternativas de cimentación típicas en la Sabana de Bogotá, comúnmente utilizadas para cimentar proyectos de mediana altura, han consistido en el uso de losas o en muchos casos pilotes o cimentaciones profundas tipo “caisson”.

En la ciudad de Bogotá D.C. a partir de los años 80, cuando se presentan incrementos importantes de la altura de las edificaciones construidas en la ciudad, una de las alternativas más implementada correspondía a la utilización de losas de cimentación, las cuales garantizaban una adecuada capacidad de soporte de cargas, pero que por fenómenos de fluctuación del nivel freático, subsidencia regional o por el mismo perfil blando en profundidad, llegaron a presentar asentamientos diferenciales, y por consiguiente la inclinación de la estructura y la pérdida de su funcionalidad (p.e. en Barrios como El Lago y El Polo).

Para el control de los asentamientos diferenciales, se ha buscado implementar soluciones profundas y más recientemente el uso de sistemas placa pilote que resultan más económicos para construcciones de mediana altura (10 a 12 pisos) y más adecuados, en muchos casos, para el tipo de perfil que se presenta en la ciudad.

Otras técnicas más económicas necesitan ser implementadas para garantizar que las condiciones de carga, control de asentamientos y economía de las fundaciones benefician los proyectos relacionados con la necesidad de vivienda, especialmente de interés social.

En este documento se realiza un corto análisis de las concepciones de diseño de la alternativa típica de cimentación y el uso de inclusiones de agregado para mejorar la capa superior de suelo y garantizar control de asentamientos. Se presentan los resultados de asentamientos teóricos evaluados con base en la metodología de diseño propuesta por Poulos y Davis (1980) y la metodología de diseño propia de las Pilas de Agregado Compactado, siendo seleccionada esta última como alternativa. Se

presentan también los controles de asentamientos realizados con posterioridad a la implementación de dicha solución.

2 METODOS DE DISEÑO

En este capítulo se presenta un resumen de las dos metodologías utilizadas para el cálculo de capacidad de carga y asentamientos en los sistemas de cimentación que se propusieron para la fundación del proyecto.

2.1 Sistemas placa pilote

La metodología de cálculo de asentamientos y determinación del porcentaje de carga que asumen los pilotes y la losa, en el sistema placa-pilotes del proyecto del que trata este artículo, está basado en la propuesta de Poulos y Davis (1980).

La interacción entre dos elementos igualmente cargados, puede ser expresada en términos del factor de interacción α de la ecuación (1).

$$\alpha = \frac{s_{pa}}{s_{ps}} \quad (1)$$

donde:

s_{pa} corresponde al asentamiento adicional generado por un elemento adyacente

s_{ps} corresponde al asentamiento de un pilote

Entonces si un sistema contiene un total de n unidades, el asentamiento de un elemento o unidad estará dado por la ecuación (2).

$$\rho_i = \bar{\rho}_1 \left[\sum_{j=1, j \neq i}^n \left(\bar{P}_j \alpha_{rij} \right) + \bar{P}_i \right] \quad (2)$$

Donde:

α_{rij} corresponde al valor del factor de interacción entre unidades i y j ,

\bar{P}_j es la carga en el elemento j ,

$\bar{\rho}_1$ es el asentamiento de un pilote simple bajo carga unitaria.

Al obtener n ecuaciones, para n pilotes en el grupo, la ecuación de equilibrio límite, ecuación (3) debe ser resuelta para dos casos límite:

1. Igual desplazamiento de cada unidad (losa rígida)
2. Igual carga (o carga conocida) en cada unidad (losa flexible).

$$P_G = \sum_{j=1}^n \bar{P}_j \quad (3)$$

El caso 2 se aproxima de manera más realista al caso de una carga uniforme sobre una losa flexible. La solución de la ecuación debe ser realizada por iteraciones sucesivas para que las deformaciones en cada elemento sean compatibles y para tener en cuenta la influencia de los pilotes adyacentes, por lo que en la medida en que el espaciamiento entre elementos decrece, la aproximación de la solución es mejor.

El resultado de cualquier análisis, puede ser expresado mediante la ecuación (4), con la relación de asentamientos R_G .

$$R_G = \frac{s_{ms}}{s_{psP}} \quad (4)$$

donde:

s_{ms} corresponde al asentamiento promedio del sistema,

s_{psP} corresponde al asentamiento de un pilote simple soportando el total de la carga.

El asentamiento completo del sistema, ρ , estará dado por la ecuación (5), en función del asentamiento unitario, ρ_1 .

$$\rho = R_G P_G \rho_1 \quad (5)$$

2.1.1 Análisis simplificado por medio de la curva carga-asentamiento

A partir de un análisis detenido de la curva carga-asentamiento es posible determinar el asentamiento total del sistema, asumiendo que para un comportamiento no drenado, prevalecerán condiciones elásticas hasta un valor de carga al cual los pilotes deben fallar, si no se cuenta con un cabezal en el sistema.

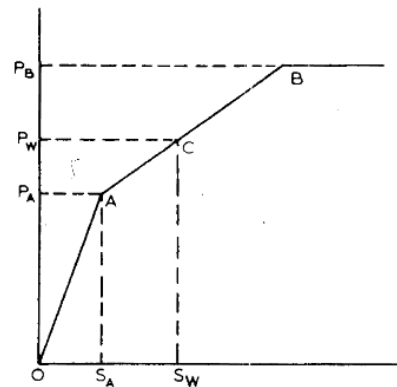


Figura 1. Curva carga-asentamiento para un sistema placa-pilote. (Poulos y Davis, 1980).

Haciendo referencia a la Figura 1, la curva carga-asentamiento en condiciones no drenadas, para un sistema placa-pilotes consiste de dos secciones lineales:

1. La línea OA, del origen hasta la carga última P_A de los pilotes aislados, en donde el asentamiento debe ser calculado para esas condiciones.
2. La línea AB, desde la carga P_A hasta la carga última P_B del sistema completo, siendo calculado el asentamiento para la placa sola. El asentamiento se calcula para un medio elástico, con relación de Poisson de 0,5.

Es importante resaltar que para determinar el valor de P_B deben considerarse las capacidades de carga de los pilotes y la losa, siendo válido solamente cuando se adicionan pocos pilotes a la losa y el espaciamiento es suficiente para que cada pilote desarrolle su capacidad individual, caso contrario se producirá primero una falla en bloque.

Es recomendable tener en cuenta que el número de pilotes adicionado a la losa debe garantizar que la carga de trabajo no exceda la capacidad de los mismos, tal como se presenta de manera esquemática en la Figura 2.

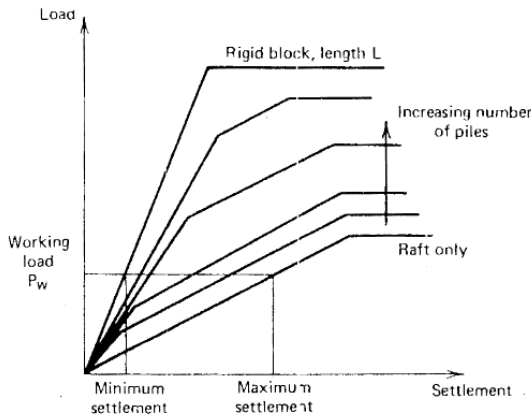


Figura 2. Concepto de trabajo del sistema placa-pilote (Poulos y Davis, 1980).

El asentamiento total del sistema ρ_{TF} , puede ser determinado como la suma del asentamiento inmediato y el asentamiento por consolidación, ecuación (6).

$$\rho_{TF} = P_A R_{G0,5} \rho_{li} + \frac{0,71(P_w - P_A)}{B E_u} + \frac{P_w (R_{Gv} \rho_{1TF} - R_{G0,5} \rho_{li})}{P_w} \quad (6)$$

donde:

$R_{G0,5}$ corresponde al valor elástico de RG para el sistema placa pilote y relación de Poisson de 0,5,

R_{Gv} es el valor elástico de RG para un valor de relación de Poisson dado,

ρ_{1TF} es el asentamiento total final de un pilote simple bajo carga unitaria

ρ_{li} corresponde al asentamiento inmediato de un pilote simple bajo carga unitaria

P_w corresponde a la carga de trabajo del sistema.

2.2 Pilas de agregado compactado (PAC)

La metodología de diseño resumida a continuación, fue suministrada por la firma Equipos y Cimentaciones licenciataria del sistema Geopier® para el centro de Colombia, e incluida en el Estudio de Suelos realizado por la firma Geotecnia y Cimentaciones.

Las Pilas de Agregado Compactado (PAC) se diseñan para controlar asentamientos logrando satisfacer los criterios específicos del proyecto. Los asentamientos totales (s) bajo la cimentación se estiman sumando el asentamiento en la zona del suelo reforzado con PAC (zona superior, s_{uz}) y el asentamiento de la zona bajo el fondo de los elementos PAC (zona inferior, s_{lz}), tal como se observa en la Figura 3.

2.2.1 Zona superior

El procedimiento para calcular los asentamientos en la zona superior se basa en una analogía de resortes.

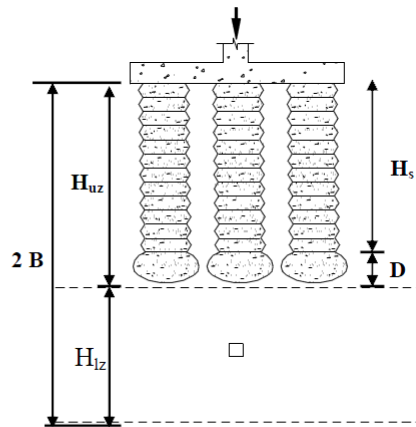


Figura 3. Modelo de PAC de dos capas.

Los elementos actúan como resortes rígidos, mientras que la matriz de suelo entre las PAC actúa como resortes blandos. Los esfuerzos aplicados a los suelos reforzados se distribuyen de acuerdo a la rigidez relativa entre el elemento PAC y el suelo (R_s) y la razón de área de reemplazo o área de cobertura de los PAC (R_a). Una fuerza Q aplicada a una cimentación, la cual se puede expresar como el producto entre el esfuerzo de contacto promedio (q) y el área de la cimentación (A), se resiste mediante los elementos PAC (Q_g) y por la matriz de suelo (Q_m), ecuación (7) y ecuación (8).

$$Q = q A = Q_g + Q_m \quad (7)$$

$$Q = q_g A_g + q_m A_m \quad (8)$$

donde:

q_g es el esfuerzo aplicado en el tope de las PAC,

A_g es el área de los elementos debajo de la cimentación y,

A_m es el área de la matriz de suelo en contacto con el fondo de la cimentación.

El procedimiento incluye la hipótesis de que la cimentación es rígida en relación con el suelo de apoyo, de modo que el asentamiento de la PAC será igual al asentamiento de la matriz de suelo. El asentamiento de la cimentación (s) se puede expresar en términos de la rigidez de la PAC (k_g) y de la matriz de suelo (k_m), ecuación (9).

$$s = \frac{q_g}{k_g} = \frac{q_m}{k_m} \quad (9)$$

El esfuerzo aplicado en el tope de las PAC (q_g) está dado por la ecuación (10) y depende del esfuerzo de contacto promedio de la cimentación (q), la relación de rigidez entre las pilas de agregado y la rigidez del suelo (R_s), y la relación entre el área seccional de las PAC y el área de las zapatas (R_a).

$$q_g = q \frac{R_s}{R_a R_s - R_a + 1} \quad (10)$$

La relación de rigidez R_s , se define como la relación entre el módulo de rigidez de las PAC (k_g) y el módulo de rigidez del suelo (k_m), ecuación (11).

$$R_s = \frac{k_g}{k_m} \quad (11)$$

El módulo de rigidez (k_g) se define como la razón del esfuerzo aplicado al tope de las PAC y la deformación vertical resultante.

El asentamiento en la zona superior (s_{uz}), es la razón entre el esfuerzo aplicado en el tope de la PAC y su módulo de rigidez, ecuación (12).

$$s_{uz} = \frac{q_g}{k_g} \quad (12)$$

El asentamiento total de las cimentaciones apoyadas en elementos tipo PAC se calcula con base en la ecuación (13).

$$s = s_{uz} + s_{lz} \quad (13)$$

donde:

s_{lz} es el asentamiento del estrato inferior o subyacente a aquel mejorado con la inclusión de los elementos PAC.

2.2.2 Zona inferior

Los asentamientos en la zona inferior (s_{lz}) bajo la zona reforzada con elementos tipo PAC se calculan usando las teorías convencionales de elasticidad, con valores de módulo de elasticidad interpretados de pruebas de laboratorio o pruebas *insitu*, o bien, mediante ensayos de consolidación. El método supone que los esfuerzos inducidos en la zona inferior se pueden estimar usando soluciones para una cimentación apoyada en un medio elástico semi-infinito.

3 PROYECTO

3.1 Descripción general

El proyecto del cual se tomaron los datos para el presente documento, corresponde a un conjunto de 14 torres de 12 pisos de apartamentos cada una, ubicado en Localidad de Bosa, al sur de la Ciudad de Bogotá D.C.

La configuración tipo de las torres muestra una distribución simétrica que corresponde especialmente a la necesidad de distribución uniforme de cargas sobre una losa de cimentación. El proyecto fue propuesto con uso de mampostería estructural, la cual en teoría deberá garantizar uniformidad de la distribución de la carga y, de acuerdo con el proceso constructivo, menores asentamientos diferenciales por concentración de carga durante el proceso.

3.2 Perfil estratigráfico del proyecto

Con el objeto de conocer las características físicas y poder obtener muestras de los diferentes estratos que conforman el perfil del subsuelo del área de estudio, se realizaron en total 17 perforaciones entre 6 y 50 m de profundidad, empleando el método de percusión y lavado. Simultáneamente se realizaron Ensayos de Penetración Estándar (SPT) y ensayos tipo Down Hole para caracterización sísmica de la zona.

Para la ubicación de los sondeos, se utilizó la misma denominación dada a los 4 bloques de torres, denominando cada zona como X, Y, Z y A, tal como se presenta en la Figura 4.

En general, en el área de estudio, de acuerdo con la información del Instituto Nacional de Geología y Minería INGEOMINAS, se presentan materiales pertenecientes a Depósitos Aluviales de Llanura de inundación (Qlla), que se describen como depósitos

jóvenes de los Ríos Bogotá, Tunjuelito y sus afluentes, con presencia principalmente de arcillas y limos.

Para todas las muestras recuperadas se realizaron ensayos de caracterización geotécnica básica y dinámicos, con el fin de generar una descripción lo más detallada posible de los estratos presentes en la zona de estudio.

En la zona, el nivel freático se reportó a profundidades variables entre 1,2 y 4,0m. Estas fluctuaciones se ven influenciadas por la época del año en la cual se registraron los sondeos y la posibilidad de recarga de algunos de ellos por la cercanía a zonas de inundación del Río Tunjuelito

De manera general las unidades estratigráficas que se presentan en la zona del proyecto se describen en la Tabla 1.

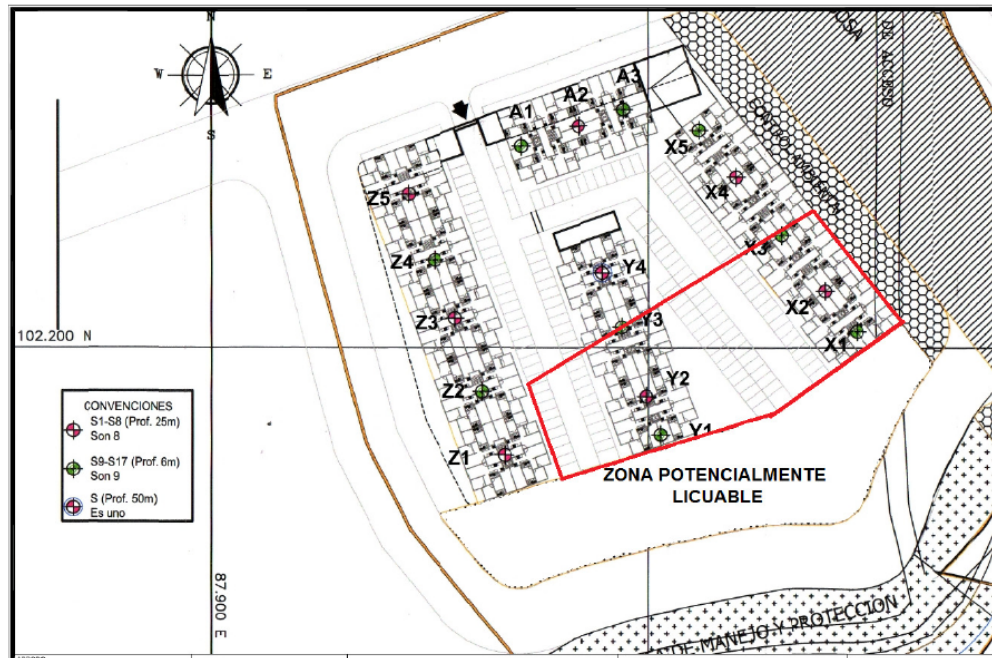


Figura 4. Detalle de la zona del proyecto, ubicación de sondeos y zona de mayor potencial licuable.

3.3 Análisis de licuación

Tomando como base la Microzonificación Sísmica de la Ciudad de Bogotá (MZSB) el proyecto se ubicó en una zona de transición entre Terrazas y Conos Occidentales potencialmente licuables (Zona 5B) y una zona correspondiente a un sector lacustre de los cerros de Bogotá (Zona 1A).

Con base en la descripción obtenida por medio de la MZSB y de la caracterización geomecánica, se realizó un análisis de potencial de licuación a partir de la Metodología propuesta por Idriss *et al* (2001), la cual se basa en una revisión del valor del esfuerzo cortante inducido por un evento sísmico en el suelo, el contenido de finos y la compacidad del material.

Se pudo observar que los materiales arenosos o limosos reportados entre 3.0 y 9.0 o 12.0m de profundidad en los sectores X y Y, efectivamente presentaban potencial de licuación. El potencial de licuación para estos depósitos asociados al Río Tunjuelito fue clasificado como alto, de acuerdo con la metodología mencionada. La zona en donde se

concentra la mayor parte de este potencial se ubicó hacia la zona sureste del proyecto.

4 ALTERNATIVAS DE CIMENTACION

Teniendo en cuenta la magnitud de las cargas y las condiciones del perfil estratigráfico, se presentaron diferentes alternativas de cimentación profunda que permitieran garantizar una distribución uniforme de las cargas en profundidad y un adecuado control de los asentamientos, realizando una sectorización adecuada, pues el perfil estratigráfico se consideró variable para cada bloque de torres.

Como el sistema estructural seleccionado con anterioridad estaba enfocado en el uso de mampostería estructural, era necesario contar con una losa de contrapiso de espesor considerable que garantizara la rigidez suficiente para absorber las cargas impuestas. Con esta condición, se optó por profundizar en una alternativa tipo placa-pilotes.

Tabla 1. Perfil estratigráfico medio para la zona del proyecto.

PROF (m)		Descripción	N _{SPT}	w _n	LL	LP	P ₂₀₀	CMO
de	A		(g/pie)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
0,0	0,2	Capa Vegetal de arcilla limosa de color café con presencia de arena.						
0,2	0,9	Relleno con presencia de material orgánico	4 - 23					
0,9	2,4	Limo arenoso café con presencia de raíces o contaminado	3 - 25	14 - 21	<23	<12	40,75 - 52,18	
2,4	4,8	Arena limosa café o gris con vetas blancas	4 - 12	25	NL	NP	21,57	
4,8	8,1	Arena limosa café o marrón, con presencia de arcillas y limos	4 - 12	13 - 54	<40	<27	23,82 - 33,91	
8,1	15,0	Arena limosa café a gris, con presencia de material fino	2 - 30	13 - 55	<34	<20	9,17 - 47,92	
15,0	19,9	Limo arcilloso de color café a gris, con presencia de turba y vetas de arena	4 - 41	16 - 38	31 - 62	17 - 27	21,77 - 92,00	<4
19,9	22,4	Arcilla limosa de color café oscuro con rastros de madera	6 - 36	17 - 33	28 - 63	17 - 32	90,50 - 99	<7
22,4	24,1	Limo arenoso de color gris con presencia de material orgánico	12 - 29	<34	<47	<21	<83	<5,5
24,1	25,0	Arcilla limo arenosa de color gris con presencia de material orgánico	10 - 45	20 - 23	28 - 31	12 - 20	66 - 95	<6
25,0	31,9	Arcilla limosa de color café	4 - 5	<21	<30	<16	<98	
31,9	44,7	Arena limosa de color gris o habano	<31	<22	NL	NP	11 - 24	
44,7	100,0	Arcilla dura de color gris						

La otra alternativa de cimentación se consideró un función de lograr el mejoramiento del perfil estratigráfico en la zona superior de tal manera que al contar con un estrato superior más rígido se distribuyeran de manera más adecuada los esfuerzos inducidos, se controlara la profundización de bulbos de presión, se pudiesen controlar los asentamientos asociados y se evitara el posible compromiso de cimentaciones profundas en procesos potenciales de licuación..

Las dos soluciones fueron evaluadas desde el punto de vista de control de asentamientos, ya que desde el punto de vista de requerimiento estructural, podía garantizarse la resistencia necesaria para soportar las cargas impuestas.

4.1 Alternativa de cimentación placa-pilotes

Este sistema consiste en la combinación de una placa o losa de cimentación (maciza o aligerada) combinada con pilotes preexcavados y fundidos in situ. Para la determinación del número de pilotes por cada losa y los asentamientos asociados, se procedió a verificar el perfil estratigráfico típico presente en cada zona particular, teniendo en cuenta los espesores reales de los estratos potencialmente licuables.

Para cada zona se determinó mediante la Metodología de Poulos y Davis (1980) el valor de la capacidad portante última de los pilotes, considerando la pérdida posible de capacidad por la presencia del estrato licuable y la posibilidad de fricción negativa. Con esta consideración y de acuerdo al perfil estratigráfico presente en la zona,

se recomendó una longitud efectiva de 35.0m para los pilotes. En la Tabla 2 se presentan de manera general los valores obtenidos para las zonas X y Y.

Tabla 2. Capacidad de carga de pilotes, incluida la consideración de potencial licuable.

Diám (m)	Long. Efect (m)	Qu (ton)	Qu lic. (ton)
0.50	35.00	135.4	108.3
0.60	35.00	170.7	136.5
0.70	35.00	208.8	167.0
0.80	35.00	249.7	199.7
1.00	35.00	339.6	271.6
1.20	35.00	440.5	352.4

Con base en la Metodología de Poulos y Davis (1980), se procedió a estimar el valor de asentamientos y capacidad de carga del sistema combinado, incluyendo los pilotes con un factor de seguridad del orden de 1.5 para que la losa o placa de cimentación aporte en la capacidad de carga del sistema.

Para el análisis numérico de la capacidad de carga del sistema y los asentamientos asociados, se utilizaron los datos correspondientes a pilotes de 60.0 cm de diámetro. Con la aplicación de la metodología de Poulos y Davis (1980), fue posible obtener las recomendaciones necesarias para la determinación de los posibles asentamientos asociados al sistema placa pilotes.

La evaluación técnica y económica de la alternativa llevó a recomendar un sistema de placa pilotes con elementos de 60.0cm de diámetro, trabajando con un coeficiente de fricción lateral de 1.36t/m², con un espesor de losa aproximado de 1.0m y una distribución de carga de 20% para la losa y 80% para los pilotes. El asentamiento total del sistema, teóricamente determinado, corresponde a 7cm, para los elementos propuestos en las zonas X y Y, tal como se presenta en la Tabla 3.

Tabla 3. Asentamientos para diferentes porcentajes de pilotes bajo la losa de cimentación.

Q pil (ton)	ρ_i (m)	R_{Gv}	ρ_{FT} (m)	%Q Pil	Separ (m)
0	0,09	0,6502	0,14	0%	
792	0,09	0,3803	0,11	10%	12,52
1583	0,08	0,3484	0,10	20%	8,86
2375	0,08	0,3371	0,10	30%	7,23
3166	0,07	0,3274	0,09	40%	6,26
3958	0,07	0,3191	0,09	50%	5,60
4749	0,06	0,3139	0,08	60%	5,11
5541	0,05	0,3107	0,08	70%	4,73
6332	0,05	0,3076	0,07	80%	4,43
7124	0,04	0,3044	0,06	90%	4,17
7915	0,04	0,3013	0,06	100%	3,96
8707	0,03	0,2982	0,05	110%	3,78

4.2 Alternativa de cimentación con Pilas de Agregado Compactado PAC

Los parámetros de diseño para determinar la capacidad de carga de las PAC y la masa de suelo, pueden ser estimados, conociendo el número de golpes de acuerdo a la prueba de penetración estándar (Fox y Cowell, 1998), la cual también se puede emplear para determinar el módulo de rigidez del suelo.

Los elementos se diseñaron teniendo en cuenta la sectorización mencionada y el perfil estratigráfico propio para cada una de ellas. El diseño permitió establecer las separaciones recomendadas, el diámetro del elemento y las profundidades necesarias para controlar asentamientos y las condiciones de licuación que se pueden presentar. Las recomendaciones obtenidas de diseño para estos elementos se consignan en la Tabla 4.

Tabla 4. Resultados de diseño para elementos tipo PAC

Zona	Long. Efect (m)	Asentamiento (cm)	Separación (m)
X	9,0	6,1	1,9
Y	12,0	7,5	1,8
Z	12,0	5,3	2,1
A	9,0	5,9	1,9

Como se observa en la Tabla 4, las longitudes de los elementos para las zonas X y Y buscan atravesar el estrato licuable, ya que se instalan con suficiente energía para crear un material altamente densificado, adicionalmente como los elementos se construyen con piedra triturada de tamaño máximo de 5 a 10 cm, sin contenido de material fino, la compactación de este material no se ve afectada si se realiza por debajo del nivel freático.

De acuerdo con Gutierrez et al (2010), el elemento PAC y el suelo alrededor presentan un comportamiento dilatante, y no son susceptibles a licuación. Ante un evento sísmico, debido a que las PAC son más rígidas que el suelo alrededor, absorben un porcentaje mayor de los esfuerzos de corte que ocurren dentro del depósito de suelo durante la carga sísmica. Los esfuerzos de corte inducidos en la masa de suelo y elementos son proporcionales a la rigidez. La razón de rigidez de los elementos con la rigidez del suelo normalmente es mayor de 10. Por esta razón, se produce una reducción de los esfuerzos de corte aplicados a la matriz de suelo por el evento sísmico.

4.3 Alternativa seleccionada

Con base en criterios económicos, de asentamientos, de manejo del potencial de licuación y de disponibilidad de materiales para la ejecución del proyecto, se optó por implementar la alternativa de cimentación con PAC, ya que ofrecían menor costo por volumen de cimentación en función de los asentamientos propuestos.

La alternativa de fundación fue implementada para todas las torres. El proceso constructivo propio de los elementos tipo PAC, consiste de manera general en la ejecución de tres pasos fundamentales:

- 1) Hacer una perforación cuyo diámetro puede variar desde 24 pulgadas (0.61 m) hasta 36 pulgadas (0.91 m), y profundidades típicamente desde 7 ft (2.1 m) hasta 25 ft (7.62 m).
- 2) Compactar una primera capa de agregado libre de finos al fondo de la perforación para formar una base firme.
- 3) Colocar y compactar capas consecutivas de material granular como el que se usa para la construcción de sub-base de carreteras hasta llegar a la superficie.

Posterior a la construcción es importante verificar las condiciones de diseño y construcción, mediante la ejecución de una prueba de carga, la cual también permita verificar la rigidez del elemento.

Para este proyecto en particular, el proceso constructivo fue modificado, se utilizó el método IMPACT, que consiste de manera general, en el uso de un mandril continuo que se vibra en el suelo y a través del mandril y a medida que se va extrayendo, se compacta y vibra la grava. Se optó por este método precisamente porque ante la presencia de

arenas, para la aplicación del método tradicional hubiese sido necesario revestir temporalmente con camisa metálica

5 CONTROLES POSTERIORES EN CAMPO

Se realizaron controles posteriores para verificación de las condiciones de diseño, con medidas de asentamientos de la losa asociada a uno de los bloques de la zona Z, durante el proceso de carga por construcción.

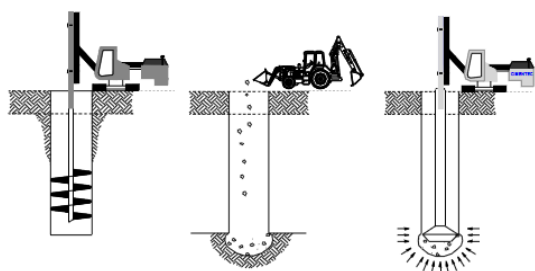


Figura 5. Esquema general del proceso constructivo típico de Pilas de Agregado Compactado.

Los resultados se observan en la Figura 7, en donde se observa que hasta el momento del último reporte los asentamientos (que continúan siendo medidos) se encuentran dentro del rango determinado por medio de la teoría de diseño y son del orden de 4cm.

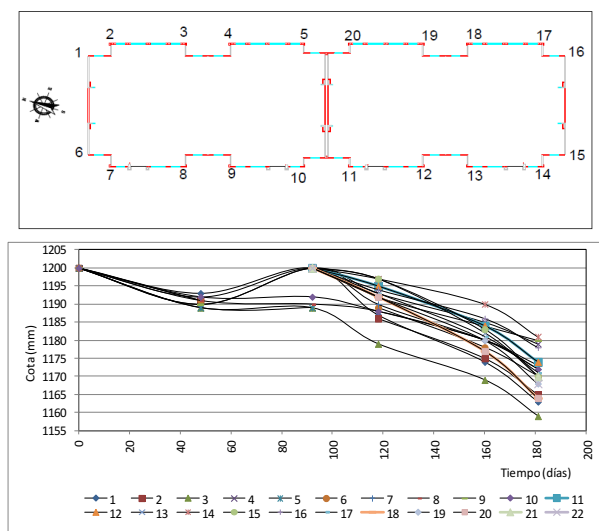


Figura 7. Asentamientos medidos hasta 180 días después de la construcción de elementos tipo PAC.

6 CONCLUSIONES

Se puede observar que las metodologías utilizadas en los procesos de cálculo están basadas en teorías

elásticas y en suposición uniforme de carga sobre los elementos (tanto para el sistema placa - pilotes como para las pilas de agregado compactado PAC) bajo la losa, conservando dos componentes principales de deformación, uno asociado a la deformación propia del elemento y otra asociada a la deformación del estrato inferior que puede consolidarse.

En el caso de las alternativas propuestas para dar solución de cimentación al proyecto presentado, los valores de asentamientos determinados fueron del mismo orden (aproximadamente 7cm) haciendo ver que la selección dependerá del conocimiento del proceso constructivo, de la disponibilidad de equipos y materiales y especialmente de las condiciones estratigráficas generales.

Las metodologías de cálculo de asentamientos necesitan involucrar otros comportamientos de los materiales, especialmente cuando se presentan materiales rígidos o costras de materiales sobreconsolidados sobre suelos más blandos, con el fin de representar de manera más realista los procesos de deformación.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la información suministrada y el permiso de uso de la misma al Grupo Cimentaciones: Equipos y Cimentaciones, Licenciataria del Sistema Geopier® para el centro de Colombia y, Geotecnia y Cimentaciones, Compañía de Diseño y Consultoría.

También al Decanato de Pesquisa e Pós-Graduação de la Universidad de Brasilia por el apoyo para la presentación de este artículo.

REFERENCIAS

- Fox, N.S., y Cowell, M.J. (1998). "Geopier Foundation and Soil Reinforcement Manual," *Geopier Foundation Company, Inc.*, Scottsdale, AZ.
- Geotecnia y Cimentaciones. (2011). "Estudio de Suelos para el Proyecto Lucerna". Bogotá D.C.
- Gutierrez M., Sánchez A., Suarez P. y Ochoa M. (2010) "Uso de Pilas de Agregado Compactado Geopier® para el Patio de Almacenamiento de una Planta de Cemento en Colombia", *Memorias del XIII Congreso - VII Seminario Colombianos de Geotecnia*, Manizales.
- Idriss I. M. (2001) "Liquefaction resistance of soils", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE. University of California, San Diego.
- Poulos H y Davis E (1980). "Pile Foundation Analysis and Design", *Series in Geotechnical Engineering*, Edited by Lambe and Withman, Sidney.