

**DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS Y ASENTAMIENTOS EN  
UNA CIMENTACIÓN DE TIPO LOSA SOBRE PILOTES,  
COMO CIMENTACIÓN POR PILOTES CONVENCIONAL Y  
COMO SISTEMA CPRF.**

**PEDRO ARANGO ARANGO**

**Trabajo de grado para optar al título de  
INGENIERO CIVIL**

**JOSE FERNANDO RAVE ARANGO**

**Profesional – Ingeniero Civil**



**UNIVERSIDAD EIA  
INGENIERIA CIVIL  
ENVIGADO  
2017**

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi familia por su amor y dedicación, a Miguel León Arango por el apoyo para poder realizar este trabajo y facilitar los planos con los que se analizó el modelo, a mi director de trabajo de grado José Fernando Rave por su excelente acompañamiento en el proceso y especialmente a la universidad EIA por haber sido un pilar fundamental en mi formación.

# CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN.....	13
1. PRELIMINARES.....	14
1.1 Planteamiento del problema .....	14
1.2 Justificación.....	15
1.3 Objetivos del proyecto .....	17
1.3.1 Objetivo General.....	17
1.3.2 Objetivos Específicos .....	17
1.4 Marco de referencia.....	18
1.1 Antecedentes .....	18
1.2 Marco teórico.....	21
1.2.1 Cimentaciones.....	21
1.2.2 Esfuerzos inducidos por cimentaciones.....	33
1.2.3 Capacidad de carga en cimentaciones .....	36
1.2.4 Método SPT de toma de muestras y caracterización indirecta de las propiedades del suelo.....	38
1.2.5 Metodología de Cálculo integrada en el software ELPLA para cimentaciones profundas convencionales, de losa rígida y de losa flexible.....	40
2. METODOLOGÍA.....	46
3. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	48
3.1 Caracterización de la estructura y las propiedades mecánicas del suelo sobre el cual se apoya:.....	48

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

3.2	Determinar los asentamientos y los esfuerzos en la cimentación de la estructura suponiendo que esta transfiere las cargas al suelo como una cimentación profunda convencional por pilas.....	63
3.3	Determinar los asentamientos y los esfuerzos en la cimentación de la estructura suponiendo que esta transfiere la carga al suelo como una CPRF.....	71
3.4	Comparar los asentamientos y esfuerzos en la cimentación de la estructura obtenidos a partir del análisis como pilotes y CPRF.....	79
3.5	Comparar los asentamientos y esfuerzos en la cimentación de la estructura disminuyendo la cantidad de pilotes en el sistema. ....	85
4.	CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES .....	91
	REFERENCIAS .....	93

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Comparación de costos en cimentaciones CPRF y pilotes convencionales Katzenbach & Leppla (2017) .....	20
Tabla 2 clasificación de las partículas del suelo según su tamaño (Braja M.Das, 2008) ..	30
Tabla 3 Factores de capacidad de carga según Janbu .....	37
Tabla 4 Reacciones en los Pilotes para el caso D+L .....	56
Tabla 5 perforación 1 .....	61
Tabla 6 perforación 2 .....	62
Tabla 7 perforación 3 .....	62
Tabla 8 perforación 4 .....	62
Tabla 9 perforación 5 .....	62
Tabla 10 Perfil de suelo típico .....	63
Tabla 11 Capacidad de pilotes por correlaciones SPT .....	64
Tabla 12 Capacidad de pilotes por correlación SPT-CPT .....	64
Tabla 13 pilotes a carga máxima y mínima con su respectivo asentamiento .....	68
Tabla 14 Leyendas para el mapa de calor de las reacciones en los pilotes del sistema como cimentación profunda convencional. ....	70
Tabla 15 Asentamientos diferenciales según NSR-10 .....	70
Tabla 16 Leyendas para el mapa de calor de las reacciones en los pilotes del sistema como CPRF con losa rígida .....	73
Tabla 17 Leyendas para el mapa de calor de las reacciones en los pilotes del sistema como CPRF con losa flexible .....	76
Tabla 18 Asentamientos máximo y mínimo en el sistema de losa flexible y rígida .....	79

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Tabla 19 Resumen general de los 3 sistemas (pilas y CPRF)..... 81

## LISTA DE FIGURAS

Ilustración 1 Metodologías de cálculo para pilotes, grupos de pilotes y sistemas CPRF según EI-Mossallamy (1996) .....	18
Ilustración 2 Tipos de zapatas .....	22
Ilustración 3 Losa de cimentación .....	23
Ilustración 4 Pilotes según mecanismo de transferencia de carga .....	25
Ilustración 5 Mecanismo de transferencia de carga en cimentaciones CPRF .....	26
Ilustración 6 Relaciones volumétricas y de peso (Braja M.Das, 2008) .....	28
Ilustración 7 representación gráfica de los límites de Atterberg (Braja M.Das, 2008) .....	31
Ilustración 8 esfuerzos inducidos en el suelo por una carga puntual en un área circular según Boussinesq (Bowles, 1997) .....	33
Ilustración 9 Problema general de Boussinesq (Braja M.Das, 2008).....	34
Ilustración 10 Correlaciones SPT y CPT para módulos elásticos según Bowles (1997)...	39
Ilustración 11 Esquema general de los componentes de la ecuación de Mindlin (El Gendy, 2017) .....	42
Ilustración 12 CPRF combinada de losa Rígida (El Gendy et al, 2006).....	44
Ilustración 13 CPRF combinada de losa Flexible (El Gendy et al, 2006).....	45
Ilustración 14 Planta de sistema de cimentación de la estructura seleccionada.....	49
Ilustración 15 Planta estructural de parqueaderos .....	51
Ilustración 16 Planta de parqueaderos en SAP2000.....	51
Ilustración 17 Planta estructural zona de Piscina .....	52
Ilustración 18 planta de zona de piscina en SAP2000 .....	52
Ilustración 19 Planta estructural zona de apartamentos.....	53
Ilustración 20 planta zona de apartamentos en SAP2000.....	53

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Ilustración 21 planta estructural zona de gimnasio y helipuerto .....	54
Ilustración 22 planta zona de gimnasio y helipuerto en SAP2000 .....	54
Ilustración 23 Edificación analizada en SAP2000 .....	55
Ilustración 24 Clasificación del suelo para cada perforación S.U.SC .....	58
Ilustración 25 N60 calculado a partir de los ensayos SPT entregados por el constructor .	61
Ilustración 26 carga asentamiento para el pilote característico según ELPLA, por metodología hiperbólica, CPT y pruebas de carga Insitu. ....	66
Ilustración 27 Mapa de asentamientos para el sistema calculado con ELPLA donde sólo las pilas transfieren la carga al suelo.....	67
Ilustración 28 Carga deformación pilote individual Vs carga del pilote en el sistema .....	68
Ilustración 29 Mapa de calor de las reacciones en los pilotes como cimentación profunda convencional.....	69
Ilustración 30 Mapa de calor de asentamientos para el sistema calculado con ELPLA donde la carga se transfiere al suelo por medio de una losa rígida y las pilas. ....	72
Ilustración 31 Mapa de calor de las reacciones en los pilotes como cimentación CPRF con losa rígida.....	73
Ilustración 32 esfuerzos sobre la losa de cimentación rígida por acción del contacto con el suelo.....	74
Ilustración 33 Mapa de calor de asentamientos para el sistema calculado con ELPLA donde la carga se transfiere al suelo por medio de una losa flexible y las pilas.....	75
Ilustración 34 Mapa de calor de las reacciones en los pilotes como cimentación CPRF con losa flexible.....	76
Ilustración 35 esfuerzos sobre la losa de cimentación flexible por acción del contacto con el suelo.....	77
Ilustración 36 Definición de ejes para comparación de asentamientos .....	80
Ilustración 37 deformaciones a lo largo del eje Y en el centro para los 3 análisis .....	80
Ilustración 38 deformaciones a lo largo del eje X en el centro para los 3 análisis .....	81

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



Ilustración 39 Carga deformación como CPRF, como grupo de pilotes, y curva de pilote individual .....	82
Ilustración 40 Ubicación de grupos de pilotes para el sistema rígido apoyado según su comportamiento.....	83
Ilustración 41 Ubicación de grupos de pilotes para el sistema rígido sin apoyar según su comportamiento.....	84
Ilustración 42 Sistema con cantidad de pilotes reducida.....	86
Ilustración 43 asentamientos para el sistema reducido en pilotes de losa rígida, con una relación carga asentamiento en los pilotes de carga ultima 5000kN .....	87
Ilustración 44 presión de contacto sobre la losa rígida para el sistema reducido en pilotes .....	88
Ilustración 45 asentamientos para el sistema reducido en pilotes de losa flexible, con una relación carga asentamiento en los pilotes de carga ultima 5000kN .....	89
Ilustración 46 presión de contacto sobre la losa flexible para el sistema reducido en pilotes .....	90

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

## **LISTA DE ANEXOS**

Anexo 1 Planta de pilotaje y alzado de pilotes

Anexo 2 planta de parqueaderos

Anexo 3 planta de apartamentos

Anexo 4 Planta de piscinas

Anexo 5 Planta de Helipuerto y Gimnasio

## RESUMEN

En este trabajo de grado se analizó una cimentación de tipo losa sobre pilotes por tres métodos diferentes. El primero supone que la carga de la edificación es transferida al suelo únicamente por acción de los pilotes, el segundo y el tercero suponen que la carga se transfiere al suelo por acción conjunta de la losa y los pilotes, estos últimos se conocen como CPRF o *combined piled raft foundation* por sus siglas en inglés. Los análisis como sistema CPRF realizados, suponen, el primero, que la losa es completamente rígida y se deforma como un plano en el espacio, el segundo que la losa es flexible y sus deformaciones son proporcionales a la carga impuesta.

Se seleccionó una estructura apoyada en una losa sobre pilotes que permitiera realizar los tres análisis anteriormente mencionados, se modeló en SAP2000 y se determinaron las cargas impuestas por la estructura sobre la losa. El análisis de la cimentación se hizo con el programa ELPLA 10 el cual es comercializado por GEOTEC.

Para realizar los análisis de la cimentación, se caracterizó el suelo con base en ensayos SPT entregados por el constructor de la edificación tratada en este trabajo, la cual está siendo construida en la zona de Boca Grande en Cartagena. A partir de esta información se determinó también la carga última de los pilotes y se validó con la reportada en el informe geotécnico.

Con base en los análisis realizados, se determinaron los asentamientos, las cargas sobre los pilotes, los asentamientos y la presión de contacto sobre la losa para los análisis CPRF.

Se concluyó que para determinar de manera confiable la capacidad de carga de un pilote, se deben utilizar ensayos diferentes al SPT. También que suponer que, en un sistema de losa con pilotes, la carga es disipada únicamente por los pilotes, arroja resultados de asentamiento mayores que suponerlo como un sistema CPRF.

Se llegó también a la conclusión que, para un entramado homogéneo de losa con pilotes, suponer que los pilotes disipan entre el 60% y 80% de la carga de la edificación es un buen punto de partida para afinar el diseño. Se presenta además resultados que permiten deducir, que el comportamiento carga-deformación de un grupo de pilotes ante una carga impuesta, produce asentamientos mucho mayores que los de un pilote individual ante la misma carga. Se probó que el  $\alpha$ CPRF que es el factor que determina la porción de la carga disipada en los pilotes para sistemas CPRF, no es un factor que se pueda conocer a priori y debe ser determinado por medio del análisis del sistema.

## ABSTRACT

A foundation system, which consisted on a raft laying on piles, was analyzed in three different ways. The first one assumes that all the structure loads are carried by the pile group, the second and the third one, consider that the loads are carried, a part by the piles and another part by the raft, these two last methods, are known as *combined piled raft foundation* or CPRF. When considering that the system works as a CPRF, there are two ways of considering the raft, as a stiff raft, in which the deformations conform a plane in space, or as a flexible raft, in which the deformations are proportional to the loads acting on the system.

A structure laying on a raft laying on piles was selected to be able to perform the three types of analysis mentioned. The structure was modeled in SAP2000 to determine the loads acting on the raft, and then using the program ELPLA which is sold by GEOTEC, the analysis of the foundation system was carried on.

To be able to perform the analysis the soil was characterized based on the SPT given by the constructor of the project, which is being built in Boca Grande in Cartagena. The bearing capacity of the piles was calculated using this information, and the soil profile was validated with the one reported by the geotechnical report.

Based on the analysis that were made, the settlements of the system and the loads on the raft and the piles were determined, so as the contact pressure on the raft for the CPRF analysis.

It was concluded that to determine a trustable bearing capacity of the piles, different test as the SPT should be performed. Settlements determined by supposing that only the piles carry the load of the structure are greater than those determined by the analysis as CPRF.

It was also concluded that for an almost homogeneous system of a raft laying on piles, it could be supposed for a pre-design, that the piles are going to be carrying between 60% and 80% of the entire load. It is also shown that for a group of piles carrying a load, the settlement is greater as the settlement of a single pile carrying the same load. It was also shown that the  $\alpha$ CPRF which is the factor that relates the portion of the structure load carried by the piles, is not a factor that one could assume before performing the system, but a result of the analysis itself.

## INTRODUCCIÓN

En los años 70 se comenzó a implementar un tipo de cimentación conocida como CPRF, o *combined piled raft*, por sus siglas en inglés, la cual consiste en una losa de cimentación, apoyada sobre unos pilotes. Este tipo de cimentación, aunque hoy es ampliamente utilizada en el mundo, supone un reto, en cuanto a su análisis e implementación. Por esta razón, el análisis en la mayoría de los casos sigue suponiendo que el sistema se comporta como un grupo de pilotes, al cual, dependiendo de la cercanía entre los elementos, se les disminuye su capacidad de carga en cierta proporción, este supuesto no es el más representativo de la realidad, debido a que no se tienen en cuenta todas las interacciones presentes en el sistema.

En este trabajo de grado se va a analizar una estructura cimentada sobre una losa apoyada sobre pilotes. la cual se modela en SAP2000 para determinar las cargas en los apoyos y posteriormente trasladarlos a la losa de cimentación. Utilizando el software ELPLA 10 se determinan los asentamientos en el sistema y las cargas en diferentes puntos del mismo.

Inicialmente se parte del supuesto de que la carga de la estructura se disipa en el suelo únicamente por acción de los pilotes, es decir funciona como un grupo de pilotes convencional. Se contrastan los resultados obtenidos, con otro dos análisis, que tienen en cuenta las demás interacciones entre los componentes del sistema, es decir, en vez de suponerlo como un grupo de pilotes convencional supone que su funcionamiento corresponde a una CPRF.

# 1. PRELIMINARES

## 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Todas las estructuras que se apoyan sobre el suelo requieren de un mecanismo de soporte. Las estructuras por medio de las cuales las cargas se transfieren a éste se conocen como cimentaciones o fundaciones, las cuales se pueden clasificar en dos grupos principales: cimentaciones superficiales y cimentaciones profundas (Braja M.Das, 2002).

El criterio más importante para la selección y el diseño de las cimentaciones de las edificaciones es la rentabilidad económica (Lutz, 2002). Las cimentaciones que por regla general cumplen con esta condición son las superficiales, pero estas no siempre son la solución posible debido a las condiciones del terreno o las solicitaciones de las estructuras. Braja M.Das (2002) menciona, que en terrenos donde las condiciones de estabilidad, o las condiciones de asentamientos permitidos no admiten la implementación de cimentaciones superficiales se utilizan cimentaciones profundas, las cuales transfieren la carga a estratos inferiores con mejores condiciones mecánicas. Pero Long (2010) hace énfasis en que la mayoría de estándares y normativas exigen un factor de seguridad entre 2 y 3 para el diseño de pilotes de cimentación, lo cual las hace considerablemente más costosas debido a sus dimensiones, la cantidad de trabajo que requieren para su construcción y el hecho de que los asentamientos son en muchos casos innecesariamente más pequeños que los permitidos.

En los años 70 se comenzó a implementar un nuevo tipo de cimentación la cual es la combinación de estos dos grupos principales (Long, 2010). Esta estructura consiste en una losa de cimentación con pilotes reductores de asentamientos, en donde los pilotes corresponden a una cimentación profunda y la losa de cimentación corresponde a una cimentación superficial. En las cimentaciones combinadas de losa con pilotes reductores de asentamiento o CPRF por sus siglas en inglés, se pretende distribuir la carga entre la losa y los pilotes de manera tal que los asentamientos y los asentamientos diferenciales sean compatibles con los requerimientos de la estructura. Poulos, Small, & Chow (2011) mencionan diferentes ventajas de este tipo de cimentación con respecto a las cimentaciones profundas que consisten sólo en grupos de pilotes, entre ellas la reducción del número de pilotes, dada la reducción en la carga sobre los mismos por acción de la losa y la capacidad de redistribuir las cargas en caso de daños estructurales en alguno de los pilotes. Además Tan & Chow (2004) aseguran que, dadas las características de este sistema de cimentación, el costo de su implementación es mucho menor que el de un sistema de cimentación clásico que conste solamente de pilotes debido a la posibilidad de reducir la cantidad y la longitud de los mismos.

Aunque las ventajas de las CPRF ya se han evidenciado y comprobado (véase, por ejemplo, El-Mossallamy, 1996; Poulos et al., 2011), el diseño y concepción de estos sistemas es muy complejo y requiere de un gasto de tiempo mucho mayor al de sistemas de cimentación convencionales. Lutz (2002) menciona que los datos arrojados a través de los años por sistemas de monitoreo de asentamientos y comportamiento en cimentaciones CPRF siguen

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

mostrando que no existe aún una metodología de diseño por excelencia y que los puntos por estudiar para seguir mejorando las metodologías son:

- Distribución de los esfuerzos sobre la losa de cimentación y el grupo de pilas.
- Comportamiento de las pilas ante la carga.
- Distribución de la carga sobre las pilas como función de la posición, el tamaño y la separación de las mismas.

Estos son sólo algunos de los problemas que debe afrontar el diseñador a la hora de cimentar una edificación utilizando una CPRF. Pero la ausencia de un método unificado, la complejidad del sistema de cimentación, el desconocimiento de la distribución real de los esfuerzos sobre el sistema y la cantidad de variables que afectan el sistema representan problemas y retos que hasta el día de hoy únicamente por métodos aproximados y datos experimentales brindan soluciones adecuadas. Lee & Moon (2016) mencionan algunos códigos comerciales que permiten solucionar estos sistemas por el método de los elementos finitos, pero hacen énfasis en que estos son demasiado costos y demandan demasiado tiempo, por lo que le dan importancia a la experimentación y modelación con otros métodos para lograr resultados comparables con un menor consumo de recursos.

Existen muchas metodologías para diseñar las CPRF. Pero aun así, debido la complejidad de la mayoría, se sigue partiendo del supuesto de que únicamente los pilotes cargan la estructura (El-Mossallamy, 1996). Lutz (2002) hace especial énfasis en que el pilar fundamental para seguir desarrollando y mejorando métodos que representen con precisión estos sistemas, consiste en instrumentar estas cimentaciones para recolectar datos y poder calibrar las metodologías ya existentes compararlas y desarrollar nuevas.

Así pues, se hace evidente la necesidad de comparar los resultados obtenidos por diferentes métodos de cálculo para la distribución de esfuerzos y asentamientos en una CPRF y determinar si efectivamente vale la pena adentrarse a diseñar las cimentaciones combinadas suponiendo que tanto la losa como las pilas cargan la estructura, o si definitivamente la suposición clásica de que funciona como una cimentación profunda convencional sigue siendo viable.

## **1.2 JUSTIFICACIÓN**

No siempre es necesario recurrir a métodos demasiado complejos para el diseño de algunas de las características de la CPRF, por esto se vienen demandando metodologías más sencillas que permitan abordar el problema de manera más rápida, pero determinando resultados que sean comparables con las metodologías complejas (Lutz, 2002).

Desde que se comenzaron a implementar este tipo de cimentaciones se vienen desarrollando métodos para su análisis y diseño, pero como menciona Silva (2009) estos métodos deben poder simular las interacciones relevantes que ocurren dentro del sistema.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

El-Mossallamy (1996) menciona que hasta 1976 para el cálculo de una CPRF había que partir del supuesto de que toda la carga se iba a transmitir al suelo por acción de los pilotes, lo cual no hacía realmente ninguna diferencia entre el análisis de este sistema y un sistema convencional de pilotes, pero a medida que se fueron desarrollando nuevos métodos y ampliando la base de conocimiento sobre este tema se hizo posible abordar el problema por medio de otras metodologías que permitieron ahorrar tiempo y costos. Eso teniendo en cuenta que aplicar estas metodologías es más complejo que suponer que la CPRF funciona como una cimentación profunda convencional.

En el marco de un Workshop desarrollado en la universidad EAFIT en febrero del 2017 Katzenbach & Leppla (2017) presentaron algunos proyectos que fueron cimentados utilizando la metodología CPRF y compararon la diferencia entre los costos ambientales y monetarios reales de estos proyectos y el costo que estos hubieran tenido si se hubieran cimentado sobre pilotes, como convencionalmente se viene haciendo en Colombia. Los resultados fueron positivos, en la medida en que se reafirmó que la utilización de las CPRF como alternativa económica de cimentación.

Ahora, tomando como referencias las ventajas económicas de los sistemas de cimentación CPRF y lo mencionado por Long (2010) de que al cimentar por pilotes generalmente se obtienen asentamientos menores de los requeridos y costos superiores, se justifica seguir estudiando el comportamiento de estas y determinar si son aplicables y viables en Colombia, comparando la respuesta de éstas cuando se diseñan como cimentaciones profundas convencionales y cuando se diseñan como CPRF. Para determinar si efectivamente, la suposición clásica representa precisamente el comportamiento del sistema, o si es necesario reevaluar la forma como se analizan estas cimentaciones y poder tomar decisión más acertadas con respecto al diseño y selección de las estructuras de cimentación.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



## **1.3 OBJETIVOS DEL PROYECTO**

### **1.3.1 Objetivo General**

Comparar la distribución de esfuerzos y asentamientos en una cimentación de tipo losa sobre pilotes, cuando se supone que solo los pilotes transmiten la carga al suelo y cuando se considera la contribución conjunta de la losa y los pilotes.

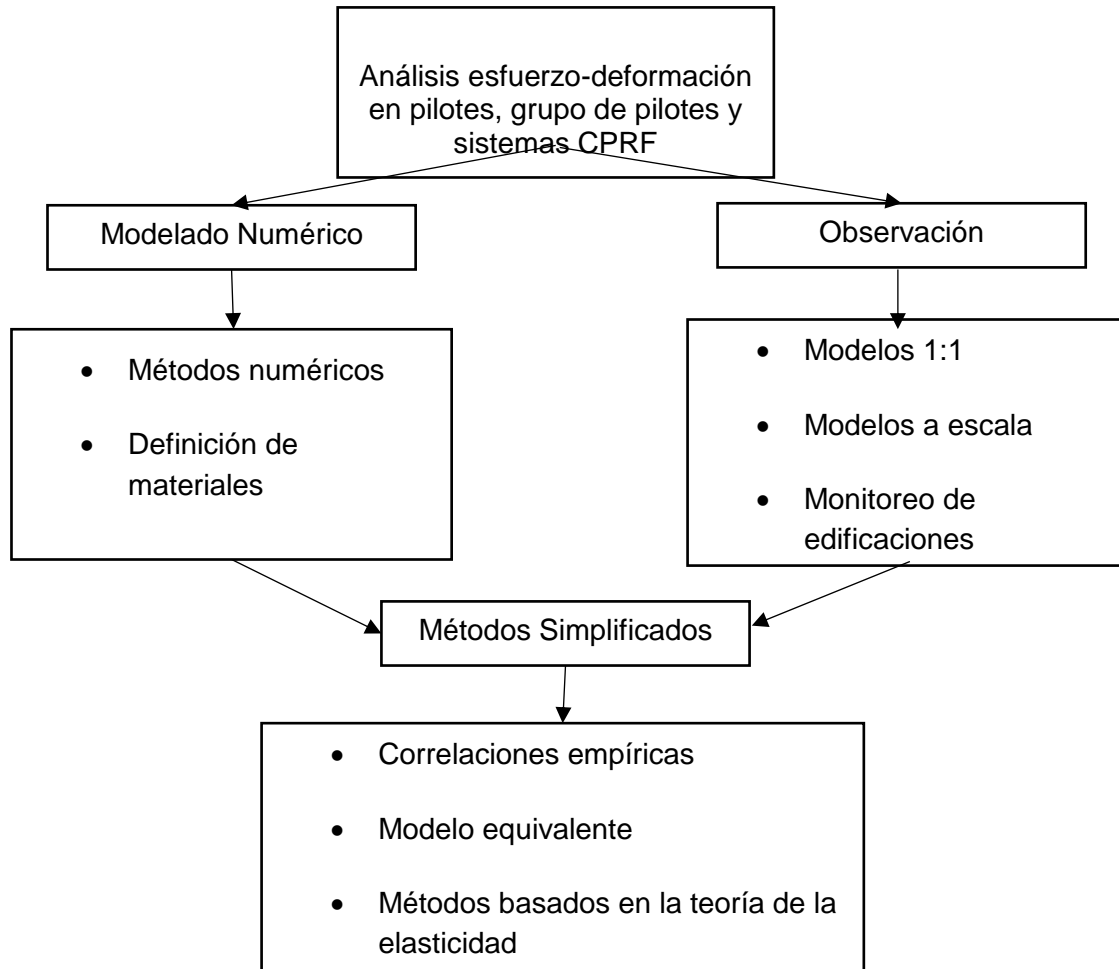
### **1.3.2 Objetivos Específicos**

- Caracterizar una estructura cimentada sobre una losa apoyada sobre pilotes y las propiedades mecánicas del suelo sobre el cual está apoyada.
- Determinar los asentamientos y los esfuerzos en la cimentación de la estructura suponiendo que ésta transfiere las cargas al suelo como una cimentación profunda convencional por pilas.
- Determinar los asentamientos y los esfuerzos en la cimentación de la estructura suponiendo que ésta transfiere la carga al suelo como una CPRF.
- Comparar los asentamientos y los esfuerzos en la cimentación de la estructura obtenidos a partir del análisis como pilotes y como CPRF.

## 1.4 MARCO DE REFERENCIA

### 1.1 ANTECEDENTES

El siguiente esquema presenta a grandes rasgos las metodologías de diseño para pilotes, grupos de pilotes y sistemas CPRF.



*Ilustración 1 Metodologías de cálculo para pilotes, grupos de pilotes y sistemas CPRF según El-Mossallamy (1996)*

En la Ilustración 1 se presentan esquemáticamente las maneras como generalmente se afronta el análisis de cimentación CPRF, estas metodologías vienen evolucionando gracias a el avance en tecnología y la posibilidad de acceder a mejores procesadores de datos.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

En Burland (1977 citado en Lutz, 2002) se hace un planteamiento inicial del problema en donde los pilotes se consideran un medio para disminuir los asentamientos, esto partiendo del supuesto de que la carga de la edificación es transmitida al suelo como una carga uniformemente distribuida en la losa, la cual puede ser disminuida en magnitud si se colocan pilotes que transmitan una parte de la carga a estratos más profundos. Esta suposición se considera una de las primeras en haber aceptado el supuesto de que el área de la losa también transmite una parte de la carga al suelo y el sistema no funciona como una cimentación convencional profunda por pilotes. afirma que fue gracias a este primer supuesto que se comenzó a investigar desde el principio de los años 90 a mayor profundidad la forma de transferencia de la carga de las cimentaciones CPRF al suelo.

Más adelante en 1991, se propuso utilizar el método de los elementos finitos para el diseño de una cimentación CPRF para la “Messeturm” en Frankfurt, donde se planteó utilizar modelos de materiales no lineales, tarea que fue realizada por el Instituto de Geotecnia de la Universidad de Darmstadt, la cual ha sido uno de los principales institutos de desarrollo y evaluación del comportamiento de las cimentaciones CPRF.

Luego Katzenbach (1993 citado en El-Mossallamy, 1996) presentó un diagrama de flujo que permite determinar si es posible utilizar una cimentación CPRF o no, el cual es de gran utilidad para determinar las posibles metodologías de cálculo.

El-Mossallamy (1996) utilizó un método mixto para determinar los asentamientos y los esfuerzos sobre una cimentación CPRF por medio del método de los elementos de frontera (BEM) y el método de los elementos finitos (FEM), donde reafirma como la principal ventaja de las CPRF su capacidad de soportar las estructuras de manera más eficiente y por lo tanto menos costosa que una cimentación por pilotes convencional.

Lutz, (2002) realizó mediciones de asentamientos en el edificio “Westend 1” en Frankfurt, a partir de las cuales pretendía validar la aplicabilidad de los métodos actuales y determinar las cargas y su distribución dentro del sistema de cimentación.

Liang & Chen (2004) presentaron un método en el cual la deflexión de la losa se modela por medio de una función de coeficientes indeterminados y la interacción de los pilotes se evalúa de manera analítica, los resultados que obtuvieron probaron ser compatibles con resultados obtenidos por medio de métodos más costosos, siendo de todas maneras computacionalmente eficiente.

El Gendy, Hanisch, & Kany (2006) desarrollaron un método basado en la curva de esfuerzo asentamiento de un pilote característico del sistema por medio del cual pueden modelar el comportamiento no lineal del sistema de cimentación CPRF, al realizar cálculos comparativos con otros métodos que se han utilizado, determinaron los esfuerzos y asentamientos de la “Messeturm” en Frankfurt y obtuvieron resultados con diferencias porcentuales relativamente bajas, lo cual indica que es una buena alternativa de cálculo.

El-Garhy, Galil, Youssef, & Raia (2013) condujeron una serie de experimentos de modelos a escala de un sistema CPRF donde variaron la cantidad, la disposición y los diámetros de

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

los pilotes para determinar así qué disposiciones de los pilotes bajo la losa entregan los mejores resultados.

Elwakil & Azzam (2016) llevaron a cabo también una serie de experimentos con modelos a escala de cimentaciones CPRF por medio de los cuales reafirman varios de los puntos que ya han tratado otros autores, entre ellos disposición de los pilotes para obtener buenos rendimientos y relaciones diámetro/longitud de pilote para reducir asentamientos.

En la universidad EAFIT Katzenbach & Leppla (2017) presentaron el siguiente cuadro, donde se evidencia el ahorro en términos de dinero y emisiones de CO2 cuando se utilizan cimentaciones de tipo CPRF en vez de cimentaciones convencionales por pilotes.

*Tabla 1 Comparación de costos en cimentaciones CPRF y pilotes convencionales  
Katzenbach & Leppla (2017)*

<b>Edificación</b>	<b>Numero de pilas por cimentación convencional</b>	<b>Numero de pilas por CPRF</b>	<b>Ahorro en Toneladas de CO2</b>	<b>Ahorro en Millones de Euros</b>
City Tower en Offenbach Alemania	113 de 30 metros de longitud	36 de 30 metros de longitud	1900	1,4
Skyper en Frankfurt Alemania	246 de 30 metros de longitud	46 de 30 metros de longitud	2250	4,8
European Central Bank en Frankfurt	490 de 30 metros de longitud	97 de 30 metros de longitud	3300	4,4
Mirax Plaza Tower en Ucrania	120 de 40 metros de longitud	97 de 30 metros de longitud	1550	7,1

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

## **1.2 MARCO TEÓRICO**

### **1.2.1 Cimentaciones**

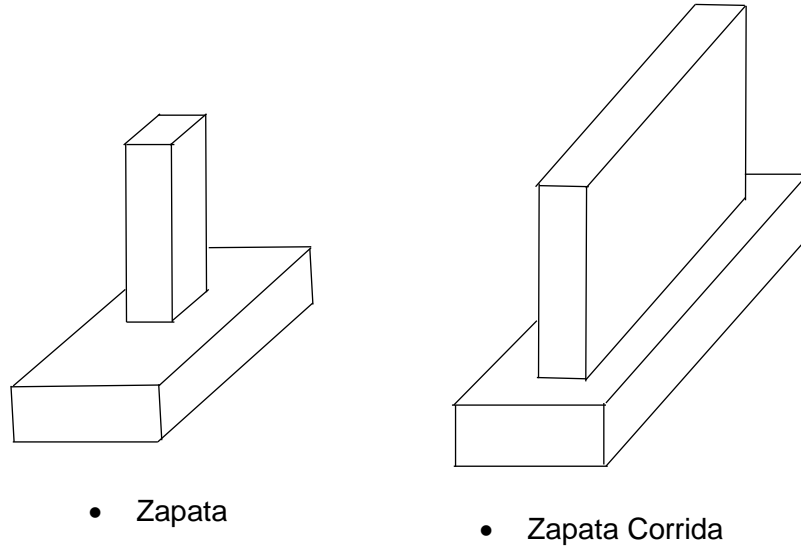
Las cimentaciones son elementos sobre los cuales se apoyan las estructuras, su función es transmitir las cargas de la superestructura al suelo, de manera que este no falle ni se deforme por fuera de los límites de seguridad (Braja M.Das, 2002). De manera general, las cimentaciones se dividen en tres grupos, dos clásicos y uno más nuevo que implica la combinación de estos dos. Según el tipo de cimentación, se determinan las metodologías de cálculo y los métodos para su construcción. Todas las cimentaciones independientemente del tipo deben cumplir los siguientes criterios (González de Vallejo, Ferrer, Ortuño, & Oteo, 2002).

- Que sean estables.
- Que sus deformaciones estén dentro de los rangos admisibles para la estructura.
- Que las construcciones cercanas no se vean afectadas por los esfuerzos inducidos en el terreno debido a la transferencia de la carga de la edificación al suelo.
- Que se mantenga la cimentación a lo largo de la vida útil de la estructura.

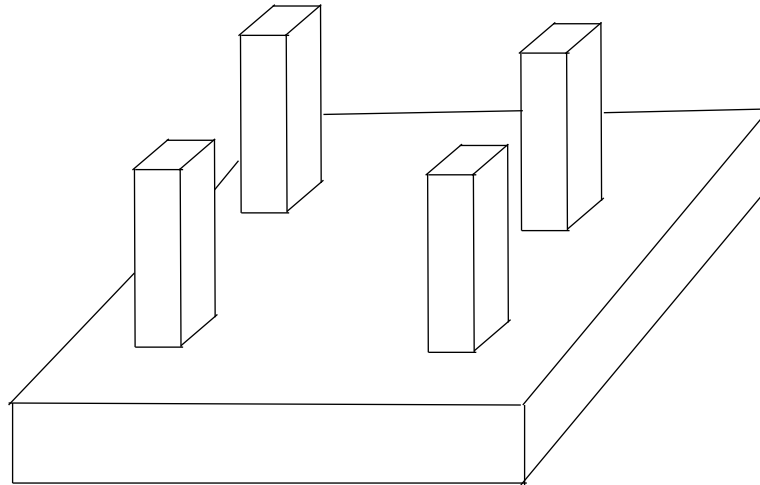
#### ○ **Cimentaciones superficiales**

La definición de cimentación superficial varía según diferentes autores, pero una de las definiciones que se consideran aceptables es la presentada en González de Vallejo et al.(2002) donde una cimentación superficial se define como aquella que es construida a no más de 5 veces su dimensión menor en planta a partir de la superficie del terreno.

Dentro del grupo de las cimentaciones superficiales se encuentran las zapatas, las losas de cimentación y las zapatas corridas (Braja M.Das, 2002). estas se presentan en la Ilustración 2 yllustración 3



*Ilustración 2 Tipos de zapatas*



- Losa de Cimentación

*Ilustración 3 Losa de cimentación*

Generalmente las zapatas son elementos individuales sobre los cuales se apoya una columna, pero cuando sobre éstas se apoya más de una columna o un muro, dependiendo de sus dimensiones será una zapata combinada o una zapata corrida, esta última cuando su dimensión menor es mucho menor que su dimensión mayor, como aquellas que generalmente cargan muros.

De la misma forma cómo funcionan las zapatas funcionan las losas de cimentación, la principal característica de estos elementos es que la estructura completa se apoya sobre una losa maciza donde se recogen todas las columnas de la edificación para transmitir la carga al suelo.

- **Cimentaciones profundas**

Cuando las cimentaciones superficiales no pueden cumplir con los criterios generales necesarios para que una estructura de cimentación sea viable y segura se utilizan las cimentaciones profundas (Braja M.Das, 2002).

El propósito de las cimentaciones profundas es transmitir la carga de la edificación a estratos inferiores del suelo con mejores características mecánicas que permitan que los asentamientos estén dentro de los rangos permitidos para la edificación y que la estructura pueda ser efectivamente apoyada sobre la cimentación sin que esta falle.

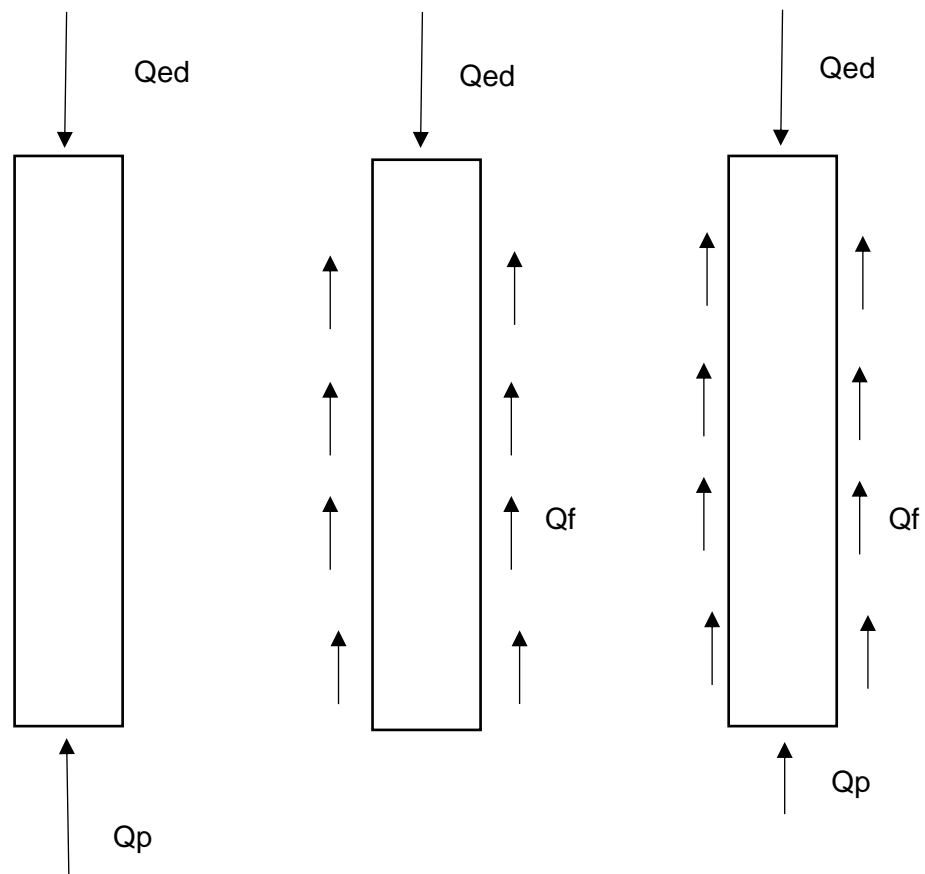
La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Aunque los autores generalmente dividen las cimentaciones profundas en dos grupos, pilas y pilotes, diámetro mayor a 30cm y diámetro menor a 30cm respectivamente, no existe un acuerdo general para la definición de las mismas, por lo que en este trabajo se tratarán indistintamente debido a que las metodologías de cálculo de capacidad y asentamientos son las mismas.

Las pilas o pilotes preexcavados son elementos generalmente cilíndricos que se colocan mediante la excavación de un hueco, en el cual luego es colocada la armadura de acero para posteriormente vaciar el concreto en sitio.

Braja M.Das (2002) define los pilotes como pilotes de fricción, punta o mixtos, esta terminología hace referencia a la forma como la carga es transmitida a los estratos inferiores, como se muestra en la Ilustración 4, donde  $Q_{ed}$  representa la carga de la edificación sobre el pilote,  $Q_f$  la carga por fuste en el pilote y  $Q_p$  la carga en la punta del pilote.





- Pilotes por punta
- Pilotes por fricción
- Pilotes por mixtos

*Ilustración 4 Pilotes según mecanismo de transferencia de carga*

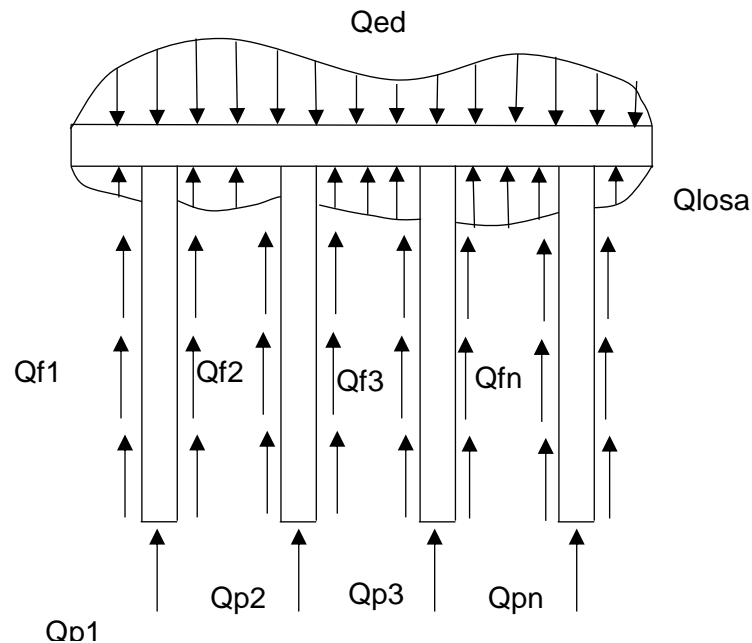
En los pilotes por punta la carga de la edificación es igual a la carga en la punta del elemento, en los pilotes por fricción la carga de la edificación se transfiere a los estratos del suelo a través del fuste del elemento, y en los pilotes mixtos la carga total de la edificación es transmitida por medio del fuste y la punta, siendo estos últimos los más eficientes, pero no siempre es posible su selección debido a las características del suelo.

#### ○ **Cimentación combinada CPRF**

Las cimentaciones CPRF son cimentaciones relativamente nuevas (El-Mossallamy, 1996). El mecanismo de transferencia de carga a los estratos del suelo consiste en aprovechar el área de la losa de cimentación y los pilotes de manera conjunta., A continuación, se

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

presenta el esquema de transferencia de carga de los sistemas CPRF al suponer que el área de la losa en contacto con el suelo también transfiere una porción de la carga, se pueden lograr cimentaciones más eficientes y menos costosas que aquellas profundas convencionales.



- Cimentación CPRF

*Ilustración 5 Mecanismo de transferencia de carga en cimentaciones CPRF*

En la Ilustración 5  $Q_{ed}$  representa la carga impuesta por la edificación sobre la losa,  $Q_{losa}$  representa la carga de contacto sobre la losa,  $Q_{fi}$  la carga por fuste en los pilotes y  $P_i$  la carga en la punta de los pilotes.

En las cimentaciones combinadas CPRF la losa ofrece capacidad suficiente para soportar la estructura, pero debido a que por sí sola no permite que los asentamientos estén dentro de los rangos permitidos, se colocan pilotes para reducir estos asentamientos hasta que se encuentren en los límites seguros. Los pilotes pueden ser pilotes por punta, fricción o mixtos, eso dependerá de las características del suelo. Ahora debido a que se está suponiendo que la losa también contribuye para disipar la carga en el suelo, los pilotes pueden ser de menor diámetro y menor longitud, esta es la razón por lo cual generalmente estas cimentaciones son una alternativa más rentable frente a las cimentaciones profundas convencionales.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Para caracterizar los sistemas de cimentación CPRF no basta únicamente con la carga de las pilas y los asentamientos. Comúnmente se les calcula un factor conocido como  $\alpha$ CPRF el cual resulta de la relación entre la carga transferida al suelo por las pilas y la carga total de la edificación que se va a transferir al suelo.

- **Propiedades mecánicas del suelo**

- Relaciones Volumétricas y de peso:

El suelo es un material que consiste en tres fases, líquida, sólida y gaseosa. Éste se forma por la meteorización de la roca madre, la cual se va descomponiendo y da origen al suelo. la interacción del suelo con el medio ambiente da origen a dos tipos diferentes de suelos, transportados y residuales, los residuales son aquellos que luego de la meteorización de la roca madre se mantienen en su lugar de origen, mientras que los transportados son aquellos que se forman por acción generalmente de fenómenos naturales los cuales lo transportan a lugares diferentes a los de su lugar de origen. En Ilustración 6, se presenta un esquema general de las fases que componen el suelo.

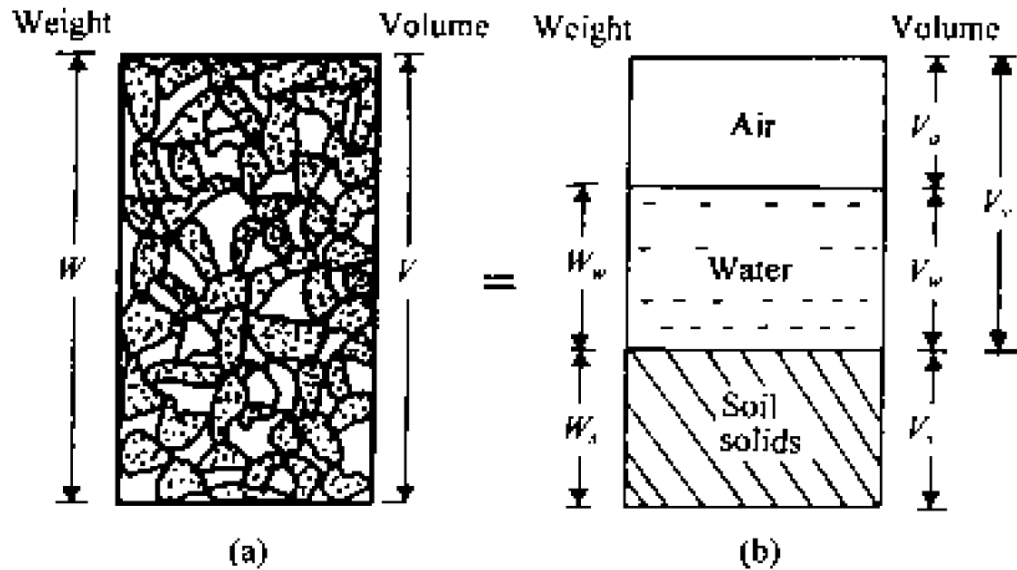


Ilustración 6 Relaciones volumétricas y de peso (Brajá M.Das, 2008)

A partir del esquema general del suelo se plantean las siguientes relaciones, presentadas en Bowles (1997), las cuales se pueden determinar a través de ensayos de laboratorio para la posterior caracterización de la mismas, estas son:

Peso y volumen total:

$$W = W_w + W_s$$

$$V = V_w + V_s + V_a$$

$W$ : Peso total de la muestra

$W_w$ : Peso del agua en la muestra

$W_s$ : Peso de sólidos en la muestra

$V$ : Volumen total de la muestra

$V_w$ : Volumen de agua en la muestra

$V_s$ : Volumen de sólidos en la muestra

$V_a$ : Volumen de aire en la muestra

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

A partir de las relaciones anteriores se deducen las siguientes propiedades:

- Relación de vacíos: se define como la relación entre el volumen de vacíos (agua y aire) con respecto al volumen de sólidos

$$e = \frac{V_w + V_a}{V_s}$$

- Porosidad: se define como la relación del volumen de vacíos sobre el volumen total de la muestra.

$$n = \frac{V_w + V_a}{V}$$

- Grado de saturación: es la relación entre el volumen de agua con respecto al volumen total de vacíos.

$$Sr\% = \frac{V_w}{V_w + V_a} * 100$$

- Contenido de humedad: es la relación entre el peso de agua contenido en la muestra con respecto al peso de los sólidos de la muestra:

$$W\% = \frac{W_w}{W_s} * 100$$

- Peso unitario: es la relación entre el peso total de la muestra y el volumen total de la misma. Si el volumen de vacíos se encuentra ocupado completamente por agua, el suelo estará saturado y por lo tanto el peso unitario se conocerá como peso unitario saturado.

$$\gamma = \frac{W}{V}$$

- Peso unitario seco: es la relación entre el peso de los sólidos en la muestra y el volumen total de la misma.

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V}$$

- Densidad relativa: relaciona las posibles relaciones de vacíos dentro de la muestra, sirve para determinar el grado de compactación de muestras con contenidos importantes de partículas gruesas.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

$$Dr\% = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}}$$

*e*: relación de vacíos de la muestra

*e<sub>max</sub>*: relación de vacíos máxima posible de la muestra

*e<sub>min</sub>*: relación de vacíos mínima posible de la muestra

- Tamaño de grano:

al estar el suelo compuesto por un matriz de partículas sólidas, estas se pueden separar por tamaños para la posterior caracterización del "esqueleto" que conforma cada muestra particular de suelo, este proceso se hace por medio de una separación mecánica utilizando una serie de tamices los cuales van reteniendo las partículas de mayor tamaño que sus aberturas. La serie de tamices que se utilicen depende del tipo de análisis que se requiere, para propósitos generales se utilizan tamices que van hasta el número 200, el cual tiene aberturas de 0.075mm.

Según el diámetro de las partículas estas se clasifican, de acuerdo con la Sociedad Internacional de Mecánica de Suelos como:

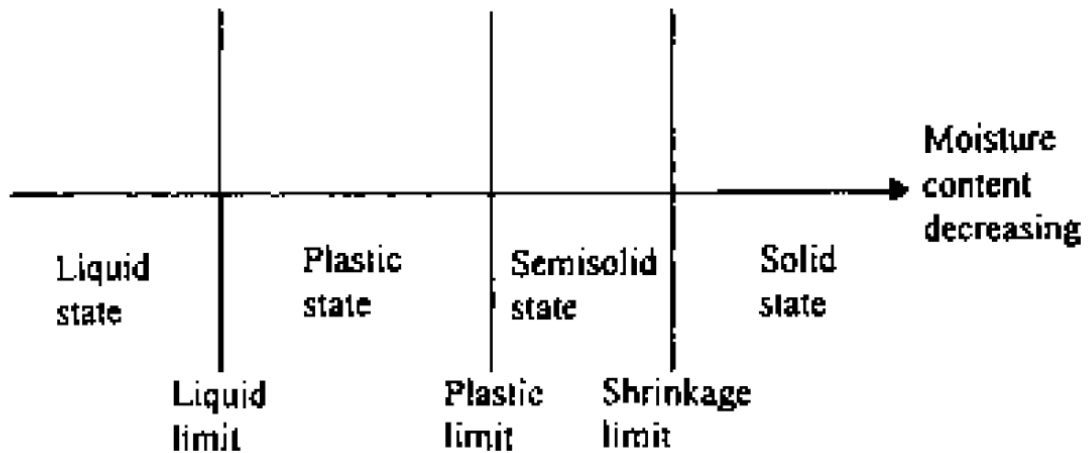
*Tabla 2 clasificación de las partículas del suelo según su tamaño (Braja M.Das, 2008)*

Clasificación	Tamaño (mm)
Grava	>2
Arena gruesa	2-0.2
Arena fina	0.2-0.02
Limo	0.02-0.002
Arcilla	<0.002

Generalmente cuando el contenido de arcillas en los suelos es mayor al 5% estos presentan una propiedad conocida como cohesión la cual permite que en presencia de humedad estos sean remoldeados sin que sus partículas se separen. Según el grado de humedad contenido en ellos se pueden determinar 4 límites, líquido, plástico, semisólido y sólido, esto debido a que según la cantidad de humedad contenida en la muestra esta tenderá a

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

comportarse más como un líquido o como un sólido. A estos límites se les conoce también como los límites de Atterberg (Braja M.Das, 2008) en la Ilustración 7 se representan de manera gráfica.



*Ilustración 7 representación gráfica de los límites de Atterberg (Braja M.Das, 2008)*

Según la distribución del tamaño de los sólidos que hacen parte del suelo y sus propiedades plásticas el suelo se puede clasificar según diferentes metodologías, entre ellas el sistema universal de clasificación de suelos, con el cual, se pueden establecer propiedades generales de la muestra de suelo y determinar posibles comportamientos exhibidos por el mismo ante diferentes sollicitaciones (Braja M.Das, 2008).

A partir de las propiedades anteriores se puede clasificar el suelo según diferentes metodologías, a continuación, se presenta la metodología S.U.S.C o *Soil Unified Classification System* por sus siglas en inglés.

Major divisions	Group symbols	Typical names	Criteria or classification*
Coarse-grained soils (< 50% passing No. 200 sieve)			
Gravels (< 50% of coarse fraction passing No. 4 sieve)			
Gravels with few or no fines	GW	Well-graded gravels; gravel-sand mixtures (few or no fines)	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 4$ ; $C_c = \frac{(D_{30})^2}{(D_{10})(D_{60})}$ Between 1 and 3
	GP	Poorly graded gravels; gravel-sand mixtures (few or no fines)	Not meeting the two criteria for GW
Gravels with fines	GM	Silty gravels; gravel-sand-silt mixtures	Atterberg limits below A-line or plasticity Index less than 4 <sup>f</sup> (see Figure 1.38)
	GC	Clayey gravels; gravel-sand-clay mixtures	Atterberg limits about A-line with plasticity Index greater than 7 <sup>f</sup> (see Figure 1.38)
Sands (≥ 50% of coarse fraction passing No. 4 sieve)			
Clean sands (few or no fines)	SW	Well-graded sands; gravelly sands (few or no fines)	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 6$ ; $C_c = \frac{(D_{30})^2}{(D_{10})(D_{60})}$ Between 1 and 3
	SP	Poorly graded sands; gravelly sands (few or no fines)	Not meeting the two criteria for SW
Sands with fines (appreciable amount of fines)	SM	Silty sands; sand-silt mixtures	Atterberg limits below A-line or plasticity Index less than 4 <sup>f</sup> (see Figure 1.38)
	SC	Clayey sands; sand-clay mixtures	Atterberg limits above A-line with plasticity Index greater than 7 <sup>f</sup> (see Figure 1.38)
Fine-grained soils (≥ 50% passing No. 200 sieve)			
Silts and clay (liquid limit less than 50)	ML	Inorganic silts; very fine sands; rock flour; silty or clayey fine sands	See Figure 1.38
	CL	Inorganic clays (low to medium plasticity); gravelly clays; sandy clays; silty clays; lean clays	See Figure 1.38
	OL	Organic silts; organic silty clays (low plasticity)	See Figure 1.38
Silts and clay (liquid limit greater than 50)	MH	Inorganic silts; micaceous or diatomaceous fine sandy or silty soils; elastic silt	See Figure 1.38
	CH	Inorganic clays (high plasticity); fat clays	See Figure 1.38
	OH	Organic clays (medium to high plasticity); organic silts	See Figure 1.38
Highly organic silts	Pt	Peat; mulch; and other highly organic soils	

Ilustración 8 Sistema unificado de clasificación de suelos

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



El clasificar el suelo dentro de estos grupos permite hacerse una idea de las partículas que lo componen y del grado de plasticidad que pueden llegar a presentar, además de su distribución de tamaños de grano en la muestra.

### 1.2.2 Esfuerzos inducidos por cimentaciones

Cuando las cimentaciones se apoyan sobre el suelo, inducen esfuerzos en él, existen diferentes metodologías para determinar los esfuerzos inducidos. Boussinesq presenta una de las cuales representan una buena aproximación de este fenómeno. A continuación, se muestra un esquema general del problema de los esfuerzos inducidos según Boussinesq .

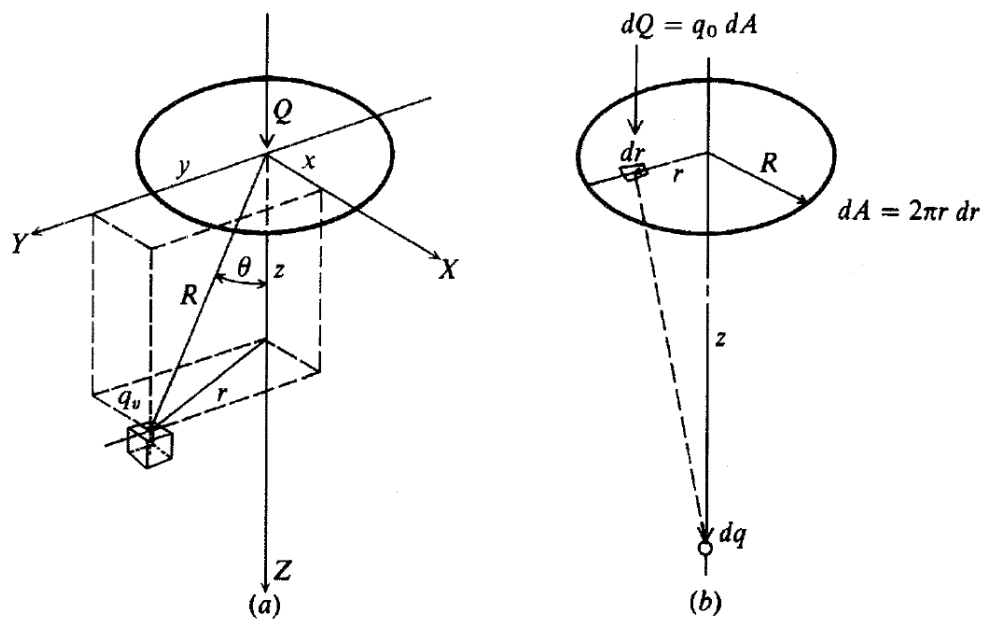


Ilustración 9 esfuerzos inducidos en el suelo por una carga puntual en un área circular según Boussinesq (Bowles, 1997)

Boussinesq determinó que el esfuerzo inducido en un punto cualquiera del suelo generado por una carga aplicada en la superficie del suelo sobre un área circular es:

$$qv = \frac{3Qz^3}{2\pi R^5}$$

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

De manera más general para cargas aplicadas en áreas de diferentes geometrías se utilizan métodos numéricos para determinar los esfuerzos inducidos en cualquier punto de la masa del suelo a partir de la integración de la siguiente ecuación general de Boussinesq, estas variables se muestran en la Ilustración 10.

$$d\sigma_z = \frac{z^3 3q dx dz}{2\pi(x^2 + y^2 + z^2)^{\frac{5}{2}}}$$

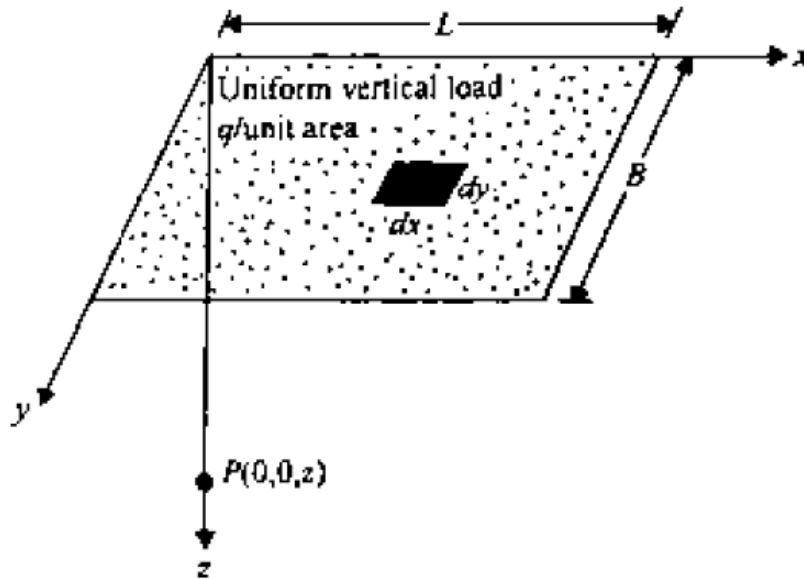


Ilustración 10 Problema general de Boussinesq (Braja M.Das, 2008)

### ○ Asentamientos

Los asentamientos son las deformaciones que ocurren dentro de la masa de suelo, por acción de la carga impuesta, existen diferentes metodologías para su determinación y en esta sección se tratarán los más generales.

#### -Cimentaciones superficiales:

Una vez determinados los esfuerzos inducidos dentro de la masa de suelos se procede a determinar los asentamientos en cada uno de los diferentes puntos por medio de la relación esfuerzo deformación:

$$dS = \frac{d\sigma}{E}$$

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

dS: asentamiento en el punto de análisis por acción de la carga inducida.

dσ: esfuerzo inducido por acción de la carga externa.

E: modulo elástico del suelo.

para facilitar la determinación del asentamiento total, generalmente, se divide el suelo en franjas de espesor h y se determinan el asentamiento generado por el esfuerzo medio inducido, finalmente se suman los asentamientos y se obtiene el asentamiento total para el punto exterior de análisis en el total de la profundidad.

- Cimentaciones profundas: para determinar los asentamientos en una cimentación profunda, debido a que el método de Boussinesq implica la aplicación de la carga en la superficie del suelo, no se puede hacer uso de esta metodología, así Braja M.Das (2002) presenta la siguiente metodología, la cual se basa en la determinación de un asentamiento por acción de la punta del pilote, otro por el fuste del pilote y otro por la deformación axial del elemento.

$$S_t = S_1 + S_2 + S_3$$

S1: asentamiento elástico por deformación del elemento.

S2: asentamiento por acción de la punta del elemento.

S3: asentamiento por acción del fuste del elemento.

$$S_1 = \frac{(Q_{wp} + \zeta Q_{ws})L}{A_p E_p}$$

$$S_2 = \frac{q_{wp} D}{E_s} (1 - \mu_s^2) I_{wp}$$

$$S_3 = \frac{Q_{ws} D}{P L E_s} (1 - \mu_s^2) I_{ws}$$

Q<sub>wp</sub>: Carga en la punta del elemento.

Q<sub>ws</sub>: Carga en el fuste del elemento.

q<sub>wp</sub>: Carga distribuida en la punta del pilote.

q<sub>ws</sub>: Carga distribuida en el fuste del pilote.

μ<sub>s</sub>: Relación de Poisson del suelo.

A<sub>p</sub>: Área del elemento.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

$E_s$ : Modulo elástico del suelo.

P: Perímetro del elemento.

L: Longitud del elemento

$\zeta$ : factor dependiente de la distribución de la carga en la punta y el pilote.

En Braja M.Das (2002) se presenta una explicación profunda para la determinación de cada uno de estos parámetros, los cuales debido a la naturaleza del problema de las cimentaciones profundas, representan una limitación en la precisión de las predicciones en los asentamientos.

### 1.2.3 Capacidad de carga en cimentaciones

La capacidad de carga de las cimentaciones superficiales y la capacidad por punta de las cimentaciones profundas se determinan de la misma manera. Existen diferentes expresiones para este análisis las cuales dependiendo de las propiedades mecánicas de los suelos sobre los cuales se está cimentando, serán más o menos críticas.

De manera general, la capacidad portante en zapatas y punta de pilotes es, como la presenta Bowles (1997), así:

$$P_{pu} = A_p(cN'_c d_c s_c + \eta \bar{q} N'_q d_q s_q + \frac{1}{2} \gamma' B_p N_\gamma s_\gamma)$$

El primer término corresponde a factores de capacidad aportados por la cohesión del suelo, el segundo término corresponde a la capacidad aportada por la profundidad de desplante y el tercer término corresponde a la capacidad aportando por la presión de confinamiento.

$$P_{pu} = A_p(9s_u)$$

Para pilotes, Janbu propone para la capacidad por punta los siguientes factores y la siguiente expresión:

$$Q_p = A_p(cN^*_c + q'_v N^*_q)$$

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Tabla 3 Factores de capacidad de carga según Janbu

$\phi'^{\circ}$	$\eta' = 60^{\circ}$		$\eta' = 75^{\circ}$		$\eta' = 90^{\circ}$	
	$N_c^*$	$N_q^*$	$N_c^*$	$N_q^*$	$N_c^*$	$N_q^*$
0	5.74	1.0	5.74	1.0	5.74	1.0
10	5.95	2.05	7.11	2.25	8.34	2.47
20	9.26	4.37	11.78	5.29	14.83	6.40
30	19.43	10.05	21.82	13.60	30.14	18.40
40	30.58	26.66	48.11	41.37	75.31	64.20
45	46.32	47.32	78.90	79.90	133.87	134.87

- Para la capacidad de carga por fuste de los pilotes se tienen las siguientes expresiones:

En arenas se tiene, como se presenta en Braja M.Das (2002):

$$Q_s = \int_0^{L_1} pf dz = \pi D_s (1 - \sin \phi') \int_0^{L_1} \sigma'_o \tan \delta' dz$$

$D_s$ : diámetro del pilote.

$P$ : perímetro del pilote.

$F$ : capacidad portante del suelo por fricción.

$Dz$ : diferencial de profundidad.

$\phi'$ : ángulo de fricción del suelo.

$\sigma'_o$ : presión de confinamiento efectiva del suelo.

En suelos cohesivos se tiene según el método alfa presentado en Bowles (1997) ; Braja M.Das (2002); Eduardo & Granados (2013):

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

$$Q_s = \sum \alpha \cdot c_u \cdot p \cdot \Delta L_i$$

donde:

$$\alpha = 0.21 + 0.25 \left( \frac{p_a}{c_u} \right)$$

#### **1.2.4 Método SPT de toma de muestras y caracterización indirecta de las propiedades del suelo**

El método SPT o ensayo normal de penetración, es un método que consiste en el golpeteo de un toma muestras, para que penetre en el suelo y de manera indirecta medir algunos de los parámetros fundamentales del suelo y poder caracterizarlo. Las muestras de suelo que se obtienen por medio del ensayo SPT son alteradas, lo que implica que no representan de la manera más fiable las características del terreno virgen, por lo tanto, las correlaciones que se hacen a partir de este ensayo caracterizan el terreno de manera conservadora.

El ensayo SPT está reglamentado por la ASTM D1586-11 (2008) allí se definen las características del toma muestras y la manera como se debe llevar a cabo el ensayo de penetración para que efectivamente sea estándar. El objetivo del ensayo es, además de sustraer las muestras del suelo para su caracterización, determinar un número conocido como "N" el cual consiste en dejar penetrar el toma muestras en el suelo en grupos de 0.45m, por tramos de 0.15m, el número de golpes necesario para penetrar los últimos 0.3m en cada uno de los grupos de 0.45m se conocen como los números N del ensayo SPT, existen metodologías para corregir el número "N" para incorporar los efectos de la sobrepresión y de la no homogeneidad de la maquinaria que toma las muestras. estos se registran y a partir de ellos y correlaciones ampliamente tratadas en la literatura, se pueden determinar diferentes características mecánicas del suelo, a continuación se presenta un resumen de algunas de las propiedades y las correlaciones propuestas por Bowles (1997) quien además presenta de manera más detallada la manera de proceder con el ensayo. Los datos determinados a partir del ensayo SPT y presentados en la Ilustración 11 arrojan resultados en Kpa, los resultados entregados por las correlaciones CPT estarán en las

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

unidades de presión que mida el ensayo, el cual también es explicado en Bowles (1997), groso modo consiste en penetrar el suelo con una punta que mide la presión ejercida sobre ella a lo largo del perfil de suelo, y permite, al igual que el ensayo SPT, correlacionar estas presiones en la punta con las características mecánicas generales del suelo.

Soil	SPT	CPT
Sand (normally consolidated)	$E_s = 500(N + 15)$	$E_s = (2 \text{ to } 4)q_u$
	$= 7000 \sqrt{N}$	$= 8000 \sqrt{q_c}$
	$= 6000N$	---
	---	$E_s = 1.2(3D_r^2 + 2)q_c$
	$\ddagger E_s = (15\,000 \text{ to } 22\,000) \cdot \ln N$	$*E_s = (1 + D_r^2)q_c$
Sand (saturated)	$E_s = 250(N + 15)$	$E_s = Fq_c$
		$e = 1.0 \quad F = 3.5$ $e = 0.6 \quad F = 7.0$
Sands, all (norm. consol.)	$\nabla E_s = (2600 \text{ to } 2900)N$	
Sand (overconsolidated)	$\dagger E_s = 40\,000 + 1050N$	$E_s = (6 \text{ to } 30)q_c$
	$E_{s(\text{OCR})} \approx E_{s,nc} \sqrt{\text{OCR}}$	
Gravelly sand	$E_s = 1200(N + 6)$	
	$= 600(N + 6) \quad N \leq 15$	
	$= 600(N + 6) + 2000 \quad N > 15$	
Clayey sand	$E_s = 320(N + 15)$	$E_s = (3 \text{ to } 6)q_c$
Silt, sandy silt, or clayey silt	$E_s = 300(N + 6)$	$E_s = (1 \text{ to } 2)q_c$
	If $q_c < 2500$ kPa use	$\S E'_s = 2.5q_c$
	$2500 < q_c < 5000$ use	$E'_s = 4q_c + 5000$
	where	
	$E'_s = \text{constrained modulus} = \frac{E_s(1 - \mu)}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)} = \frac{1}{m_v}$	
Soft clay or clayey silt		$E_s = (3 \text{ to } 8)q_c$
Clay and silt	$I_p > 30$ or <i>organic</i>	$E_s = (100 \text{ to } 500)s_u$
Silty or sandy clay	$I_p < 30$ or <i>stiff</i>	$E_s = (500 \text{ to } 1500)s_u$
		Again, $E_{s(\text{OCR})} \approx E_{s,nc} \sqrt{\text{OCR}}$
		Use smaller $s_u$ -coefficient for highly plastic clay.
Of general application in clays is		
	$E_s = Ks_u \quad (\text{units of } s_u)$	(a)
where $K$ is defined as		
	$K = 4200 - 142.54I_p + 1.73I_p^2 - 0.0071I_p^3$	(b)
and $I_p$ = plasticity index in <b>percent</b> . Use $20\% \leq I_p \leq 100\%$ and round $K$ to the nearest multiple of 10.		
Another equation of general application is		
	$E_s = 9400 - 8900I_p + 11\,600I_c - 8800S \quad (\text{kPa})$	(c)
	$I_p, I_c, S$ = previously defined above and/or in Chap. 2	

Ilustración 11 Correlaciones SPT y CPT para módulos elásticos según Bowles (1997)

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

### **1.2.5 Metodología de Cálculo integrada en el software ELPLA para cimentaciones profundas convencionales, de losa rígida y de losa flexible.**

ELPLA es un software desarrollado por GEOTEC, el cual fue fundado inicialmente por el Prof. Dr. Ing. Manfred Kany. Con este programa se pueden realizar diferentes tipos de análisis entre ellos, cimentaciones combinadas de losa con pilotes o CPRF, zapatas, pilotes individuales, losas de cimentación, entre otros.

En el análisis de cimentaciones CPRF el programa tiene en cuenta las diferentes interacciones entre los elementos del sistema:

- Pilote-Suelo
- Pilote-Pilote
- Losa-Suelo
- Losa- Pilote

Además de tener en cuenta las diferentes interacciones, el programa permite analizar el sistema a partir de diferentes metodologías según el tipo de suelo sobre el que se esté trabajando y las características generales del modelo. el programa permite hacer análisis lineales y no lineales por diferentes métodos de cálculo.

Para el propósito de este trabajo de grado se utilizó la metodología implementada en el programa para el análisis de cimentaciones combinadas de losa con pilotes reductores de asentamiento, en donde se hicieron tres suposiciones diferentes.

- Solamente los pilotes transfieren la carga al suelo, pero están amarradas entre sí por medio de la losa.
- Tanto los pilotes como la losa transfieren la carga al suelo, pero la losa es rígida y se deforma como un plano en el espacio.
- Tanto los pilotes como la losa transfieren la carga al suelo, pero la losa es flexible y se deforma proporcionalmente a la carga impuesta en cada pilote.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



Para el análisis del sistema, el software determina los asentamientos causados por cada una de las interacciones que ocurren dentro del sistema. Así, el asentamiento de los pilotes individuales por la carga a la que se ven sometidas con relación al suelo analizado, se calcula a partir de la suposición de una relación esfuerzo-asentamiento hiperbólica, para incluir el comportamiento no lineal de estos elementos. Esta relación se expresa de la siguiente manera.

$$Ph = \frac{Wn}{\frac{1}{Ks} + \frac{Wn}{Ql}}$$

Donde:

Ph: carga en el pilote

Wn: asentamiento del sistema

Ql: Carga límite del pilote

Ks: Modulo de Winkler

$$Ks = \frac{Ph0}{W0}$$

Donde:

Ph0: fuerza en el pilote por medio de un análisis lineal

W0: asentamiento del sistema causado por la fuerza Ph0 en un análisis lineal

Los asentamientos causados por las demás interacciones pilote-pilote, pilote-losa, losa-suelo se calculan por medio de coeficientes de flexibilidad, que se determinan a partir de la ecuación de Mindlin la cual se presenta en El Gendy (2017):

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

$$f_{ij} = \frac{1}{16 \pi G_s (1 - \nu_s)} \left( \frac{3 - 4 \nu_s}{R_1} + \frac{8 (1 - \nu_s)^2 - (3 - 4 \nu_s)}{R_2} + \frac{(z - c)^2}{R_1^3} + \frac{(3 - 4 \nu_s)(z + c)^2 - 2cz}{R_2^3} + \frac{6cz(z + c)^2}{R_2^5} \right)$$

En la Ilustración 12 se presentan de manera gráfica los componentes de la ecuación de Mindlin.

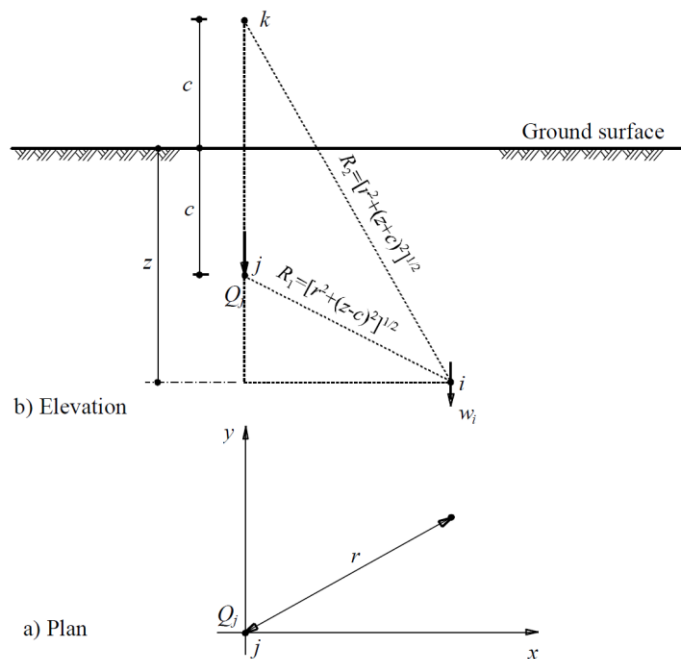


Ilustración 12 Esquema general de los componentes de la ecuación de Mindlin (El Gendy, 2017)

En la Ilustración 12 se presenta, además, la manera como se determina la flexibilidad en el punto i por acción de una fuerza unitaria en el punto j. de la misma manera, se determinan las flexibilidades en cada uno de los elementos del sistema por acción de los demás elementos y se conforma una matriz de flexibilidad del sistema, la cual tiene los siguientes componentes:

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

[Fb]: matriz de coeficientes de flexibilidad de los pilotes por cargas unitarias en la punta de los demás pilotes.

[Is]: matriz de coeficientes de flexibilidad de los pilotes por cargas unitarias en el fuste de los demás pilotes.

[Cb]: matriz de coeficientes de flexibilidad de la superficie del suelo por cargas unitarias en la punta de los pilotes.

[Cs]: matriz de flexibilidad de la superficie del suelo por cargas unitarias en el fuste de los pilotes.

[Jr]: matriz de flexibilidad de los pilotes por cargas unitarias en la superficie del suelo.

[Cr]: matriz de flexibilidad de la losa por cargas unitarias en la superficie del suelo.

Luego de haber determinado las matrices de flexibilidad para cada una de estas interacciones se determina la matriz Ks la cual relaciona las fuerzas unitarias en la losa, con las deformaciones en la superficie del suelo.  $[Ks] = [Cs]^{-1}$ .

Teniendo todas estas componentes, el siguiente paso depende de si la losa se asume rígida o flexible.

Para una losa rígida:

se asume que el asentamiento de la losa tiene la forma de un plano en el espacio definido por:

$$S_i = w_0 + x_i \tan \theta_y + y_i \tan \theta_x$$

Donde:

Si: asentamiento en el punto i

Xi: coordenada x del punto i en la superficie del suelo

Yi: coordenada y del punto i en la superficie del suelo

$\theta_y$ : giro alrededor del eje Y

$\theta_x$ : giro alrededor del eje X

En la Ilustración 13 se presenta el esquema de una CPRF de losa rígida y como debe ser su deformada.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

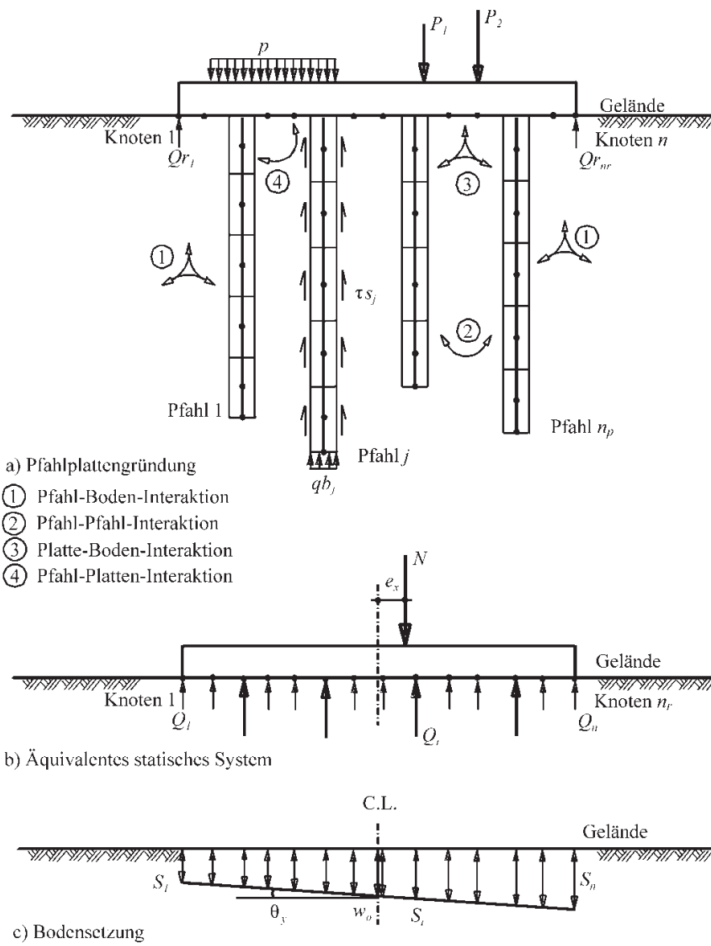


Ilustración 13 CPRF combinada de losa Rígida (El Gendy et al, 2006).

Para una losa flexible:

Los asentamientos se asumen proporcionales a la presión de contacto de la losa con el suelo, la cual depende de las diferentes interacciones dentro del sistema, en Ilustración 14 se presenta un esquema de como una CPRF de losa flexible y como debe ser su deformada.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

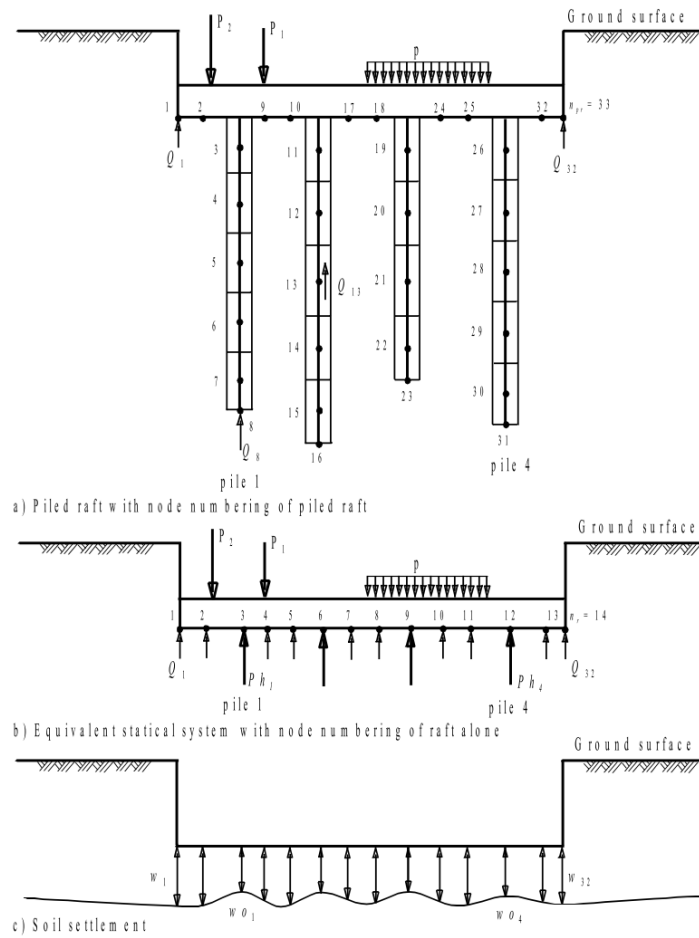


Ilustración 14 CPRF combinada de losa Flexible (El Gendy et al, 2006)

Una vez definidos los parámetros anteriores y el tipo de losa que se va a analizar se procede a solucionar el sistema de ecuaciones que se genera por medio de iteraciones hasta alcanzar la convergencia que se desea, en El Gendy (2017) se presenta de manera detallada el proceso y la metodología para solucionar el sistema.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

## 2. METODOLOGÍA

El proyecto consiste en la determinación de los esfuerzos y los asentamientos en una cimentación de losa con pilotes reductores de asentamientos, primero suponiendo que la losa no carga la estructura, es decir que se comporta como una cimentación profunda por pilotes convencional y luego suponiendo que tanto la losa como los pilotes cargan la estructura, es decir, que se comporta como una CPRF, para posteriormente comparar los esfuerzos y los asentamientos obtenidos con ambas aproximaciones.

A continuación, se presentan las actividades necesarias para la consecución de cada uno de los objetivos específicos por medio de los cuales se pretende alcanzar el general.

- 1) Caracterizar una estructura cimentada sobre una losa apoyada sobre pilas y las propiedades mecánicas del suelo sobre el cual está apoyada:
  - Revisar bibliografía sobre el tema para poder contextualizar el problema y definir los métodos más utilizados para calcular los asentamientos y los esfuerzos sobre una CPRF.
  - Seleccionar la estructura a analizar la cual deberá estar cimentada sobre una losa apoyada en pilotes.
  - Determinar las cargas de servicio sobre la losa,
  - Interpretar el ensayo SPT entregado por el constructor y las recomendaciones del geotecnista para caracterizar el suelo según sus propiedades mecánicas.
  - Seleccionar e interpretar las propiedades mecánicas del suelo más importantes para el diseño y la verificación de la cimentación.
- 2) Verificar la capacidad de carga y los asentamientos de las pilas características de la estructura por medio de métodos clásicos:
  - Definir diferentes metodologías de diseño para cimentaciones aplicables a la situación en cuestión con base en literatura.
  - Calcular la capacidad de carga de los pilotes característicos con base en las metodologías definidas y el estudio geotécnico.
  - Comparar los resultados geotécnicos en cuanto a la capacidad de carga de los pilotes característicos entregados por el geotecnista del proyecto y aquella calculada con base en los métodos de la literatura.
  - Definir metodologías clásicas para el cálculo de asentamientos en pilotes y aplicarlas a la situación en cuestión.
- 3) Determinar los asentamientos y los esfuerzos en la cimentación de la estructura suponiendo que esta transfiera las cargas al suelo como una cimentación profunda convencional por pilas:

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

- Modelar la cimentación por medio de un programa FEM (ELPLA) para determinar los esfuerzos y los asentamientos en la estructura suponiendo que funciona como una cimentación profunda por pilotes convencional.
  - Generar un mapa de asentamientos basado en curvas de nivel para la cimentación como cimentación por pilas.
- 4) Determinar los asentamientos y los esfuerzos en la cimentación de la estructura suponiendo que esta transfiere la carga al suelo como una CPRF:
- Modelar ...
  - Generar un mapa de asentamientos basado en curvas de nivel para la cimentación como CPRF.
- 5) Comparar los asentamientos y esfuerzos en la cimentación de la estructura obtenidos a partir del análisis como pilotes y CPRF.
- Comparar los mapas de asentamientos generados y los esfuerzos en la losa y los pilotes para cada una de las metodologías.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

### **3. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

Con el presente trabajo se pretende entonces analizar el sistema de cimentación con una estructura tipo losa apoyada sobre pilotes, partiendo del supuesto de que toda la carga de la edificación se traslada al suelo por medio de los pilotes, y comparar los resultados con el supuesto de que, debido al hecho de que la losa está directamente apoyada sobre el suelo ésta también contribuye a la disipación de la carga en el suelo, disminuyendo así la carga en las pilas, y por ende los asentamientos.

Para el análisis, se va a partir inicialmente del supuesto de que toda la carga de la edificación se traslada al suelo a través del mecanismo de fricción y punta de los pilotes. La capacidad de carga de los pilotes, así como los asentamientos en este generados por estas cargas se van a determinar utilizando metodologías clásicas como aquellas que se mencionan en Bowles (1997) y en Braja M.Das (2002). Luego se va a determinar las cargas de servicio de la edificación y con la carga admisible de los pilotes ya determinada se va a determinar el número de elementos tipo pilote que se requerirían bajo estas condiciones para soportar la estructura. De esta manera no sólo se van a determinar estas capacidades y asentamientos en los elementos, sino que, si la cantidad de elementos calculados en este punto concuerdan con la cantidad de elementos efectivamente reportada en los diseños, las cargas calculadas de la edificación y las propiedades del suelo estarían validadas.

#### **3.1 CARACTERIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA Y LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL SUELO SOBRE EL CUAL SE APOYA:**

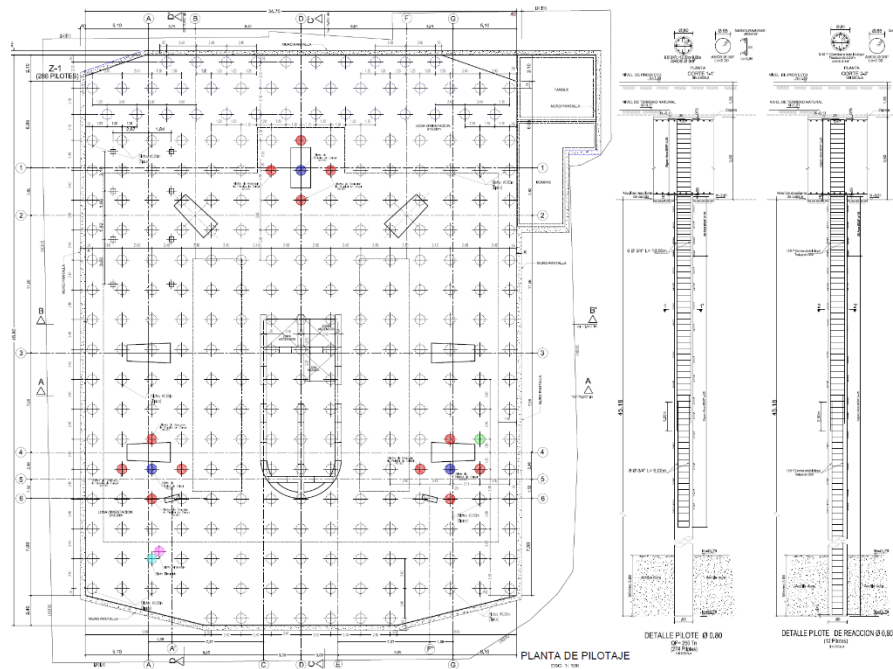
La selección de la estructura de este trabajo se hizo con base en las características de la cimentación de la edificación, esto, pretendiendo encontrar una cimentación con losa y pilotes que debido a su geometría y disposición de los elementos permitiera que las cargas fueran disipadas en el suelo por medio de la losa de cimentación y los pilotes.

La estructura que se presenta en el trabajo consiste en un edificio de 41 pisos ubicado en la ciudad de Cartagena, su cimentación consta de una placa de 45.8x34.5x3.5m y 286 pilotes de 0.8m de diámetro y 45.18m de profundidad medidos a partir de la profundidad de desplante de la losa.

Debido a que los pilotes están conectados todos a la placa de cimentación y ésta está apoyada directamente sobre el terreno natural en la profundidad de desplante, cumple con las características para ser considerada como una CPRF. a continuación, se presenta una vista en planta y un alzado de la cimentación brindados por el constructor. Este se presenta también en la sección de anexos.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.





*Ilustración 15 Planta de sistema de cimentación de la estructura seleccionada*

En la Ilustración 15 se puede apreciar, además de la localización de los pilotes y de las columnas, los pilotes a los que se les realizó prueba de carga (azules) para determinar si las recomendaciones del estudio geotécnico requerían de algún cambio.

Como insumos principales para el análisis, se cuenta con los planos estructurales de la edificación, el estudio geotécnico y los planos arquitectónicos. Estos fueron brindados por el constructor del proyecto.

Para simplificar el cálculo de las cargas de servicio sobre la losa se tomaron como referencia cuatro de las 41 plantas estructurales que podrían ser consideradas como “Típicas”, estas son las plantas para los pisos de parqueaderos, las plantas para los pisos de vivienda, las plantas para los dos pisos de piscina, y aquella que hace referencia al gimnasio y el helipuerto.

- a) El material de los elementos estructurales se definió como un concreto de 4000PSI con un módulo de elasticidad de  $2.48E+07$  KN/m<sup>2</sup> y una resistencia a la compresión de 27.6 Mpa.
- b) El tamaño y localización de los elementos estructurales se hizo con base en la planta de localización de columnas y las plantas, tanto arquitectónicas como estructurales.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Dado que se definieron 4 plantas típicas el tamaño de algunos elementos varía con respecto al de los planos reales.

- c) El grado de capacidad de disipación de energía de la edificación es DMO con un coeficiente de importancia de uno y sobre un perfil de suelo tipo E.
- d) Las cargas a las que está sometida la edificación además de su peso propio son las siguientes:

- Carga muerta:

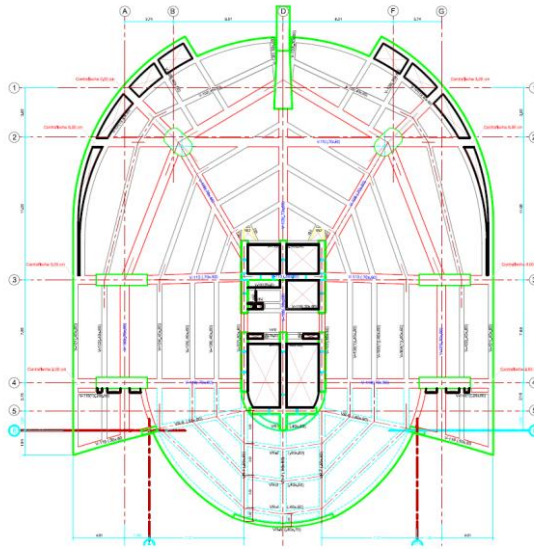
- Muros: 300 Kgf/m<sup>2</sup>
- Acabados: 160 Kgf/m<sup>2</sup>
- Cielo Razo: 20Kgf/m<sup>2</sup>

- Carga Viva:

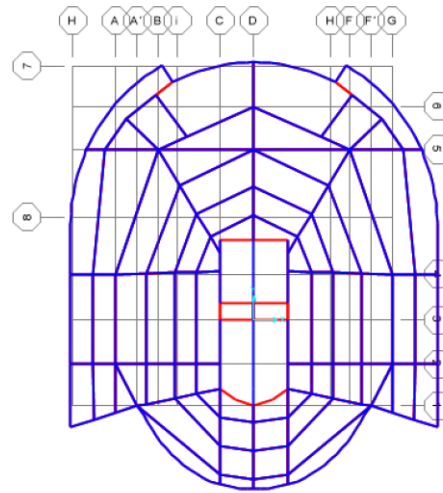
- Apartamentos: 180 Kgf/m<sup>2</sup>
- Parqueaderos: 250 Kgf/m<sup>2</sup>

A partir de los planos arquitectónicos y estructurales de esas plantas, y con base en el plano de localización de columnas se procedió a modelar la estructura en SAP2000, para definir las cargas de servicio en los apoyos, los cuales se supusieron empotrados, para su posterior utilización en el software para el cálculo de los asentamientos y los esfuerzos en la cimentación. A continuación, se presentan las plantas modeladas y las plantas seleccionadas como típicas, brindadas por el constructor. Estas plantas se presentan también en la sección de anexos.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

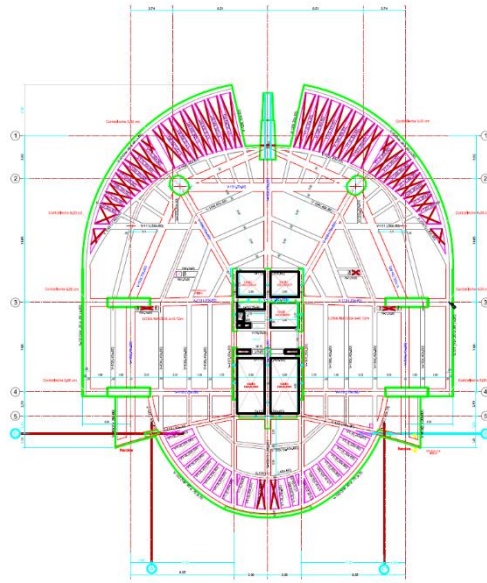


*Ilustración 16 Planta estructural de parqueaderos*

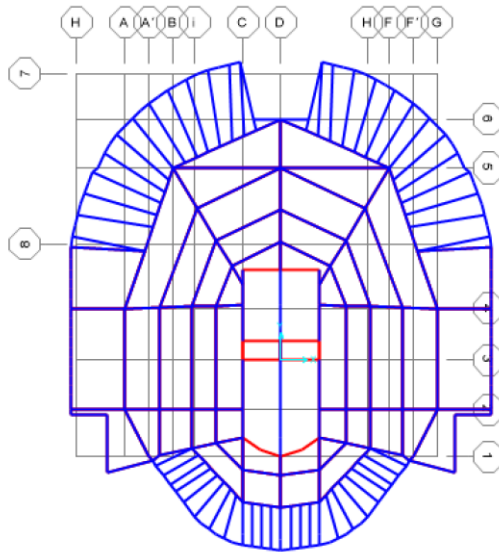


*Ilustración 17 Planta de parqueaderos en SAP2000*

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

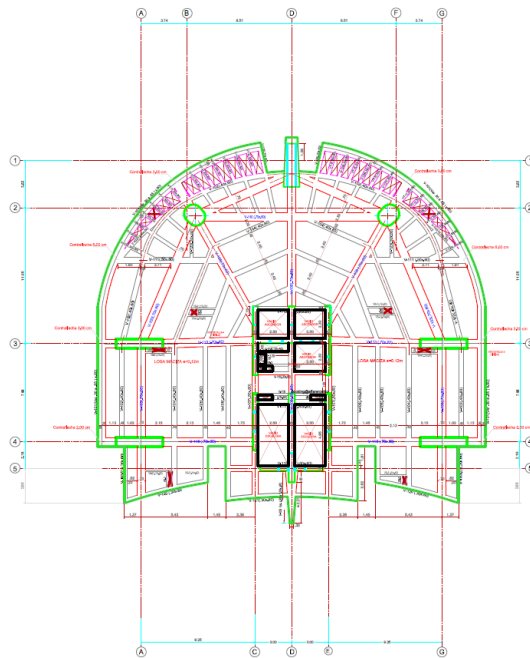


*Ilustración 18 Planta estructural zona de Piscina*

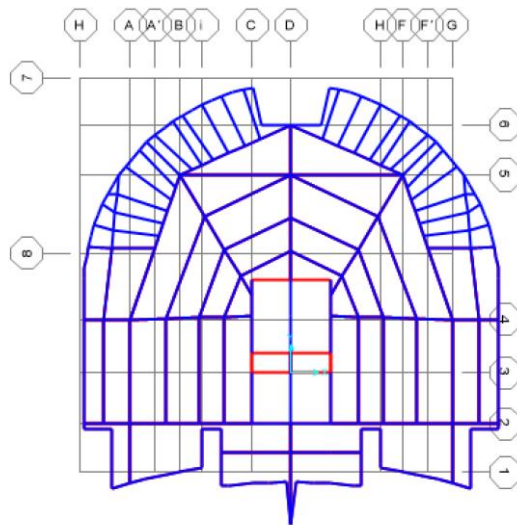


*Ilustración 19 planta de zona de piscina en SAP2000*

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

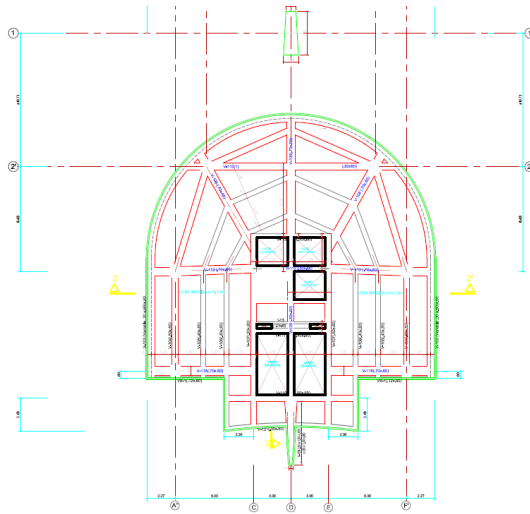


*Ilustración 20 Planta estructural zona de apartamentos*

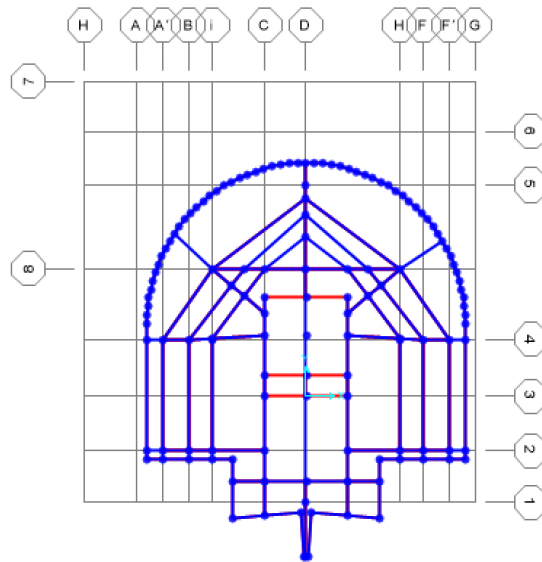


*Ilustración 21 planta zona de apartamentos en SAP2000*

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



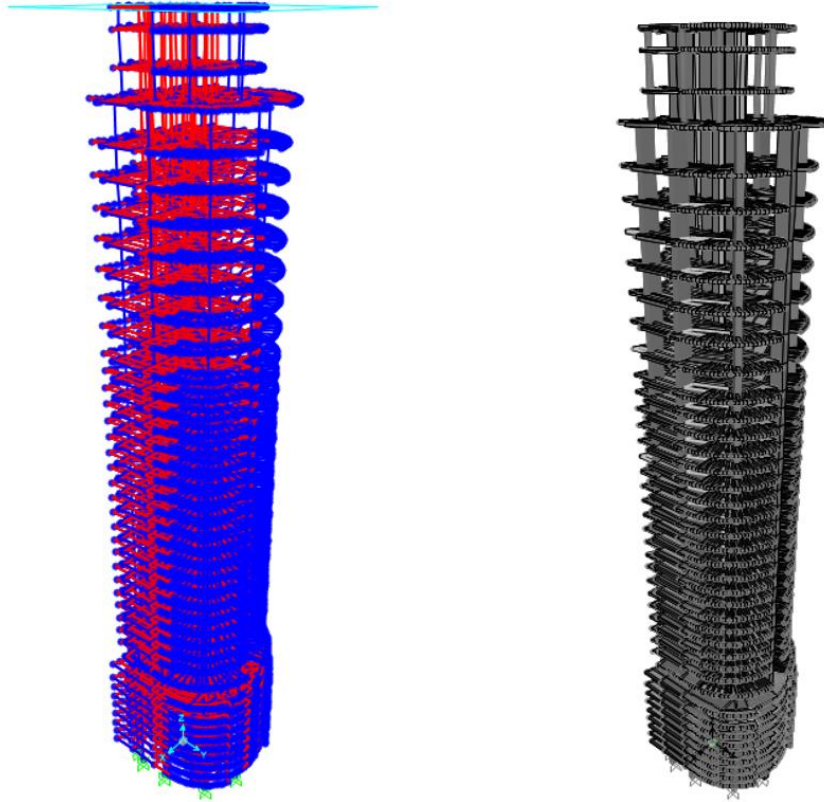
*Ilustración 22 planta estructural zona de gimnasio y helipuerto*



*Ilustración 23 planta zona de gimnasio y helipuerto en SAP2000*

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Con base en esas plantas presentadas, el modelo de la edificación quedó de la siguiente manera:



*Ilustración 24 Edificación analizada en SAP2000*

A partir del análisis de la estructura en SAP2000 se obtuvieron los resultados presentado en la Tabla 3 para la combinación de carga L+D (de servicio).

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Tabla 4 Reacciones en los Pilotes para el caso D+L

Reacciones en Pilotes							
Nodo	Caso	F1	F2	F3	M1	M2	M3
		KN	KN	KN	KN-m	KN-m	KN-m
229	D+L	5578.21	1313.68	14290.66	122.28	-133.84	-0.39
230	D+L	-5.52	190.34	13882.04	-60.23	-11.08	0.00
231	D+L	4174.55	255.45	20916.84	2.32	-118.14	-0.22
232	D+L	-1.76	-4456.69	3339.64	-26.30	-3.45	0.00
233	D+L	-3.05	-3459.19	9189.98	72.31	-8.33	0.00
234	D+L	-1.23	4160.21	7708.65	-15.46	-2.28	0.00
235	D+L	-3.16	207.68	8353.41	-50.71	-5.37	0.00
236	D+L	0.00	-4318.04	8105.77	-99.36	0.00	0.00
237	D+L	0.00	-3360.55	13930.49	241.23	0.00	0.00
238	D+L	-1.38	121.94	29909.94	-120.42	0.04	0.00
239	D+L	-0.65	4820.27	9464.14	213.71	0.04	0.00
240	D+L	-1.41	4405.22	25361.63	44.95	-0.14	0.00
244	D+L	0.05	20.93	58433.63	935.50	0.49	0.14
247	D+L	-51.21	-20.16	51974.72	239.72	-81.90	0.12
248	D+L	19.79	-15.83	6490.77	42.25	45.69	0.00
258	D+L	-60.70	14.41	62730.27	157.23	-99.29	0.12
260	D+L	-120.68	66.01	65782.69	553.07	231.51	0.12
319	D+L	-5575.29	1312.16	14280.88	122.27	133.98	0.39
320	D+L	5.52	190.12	13870.62	-60.23	11.09	0.00
321	D+L	-4173.80	255.36	20908.03	2.30	118.04	0.22
322	D+L	1.76	-4454.33	3337.85	-26.29	3.45	0.00
323	D+L	3.05	-3456.24	9182.26	72.28	8.34	0.00
324	D+L	1.23	4158.19	7704.98	-15.54	2.28	0.00
325	D+L	3.16	207.49	8349.26	-50.67	5.37	0.00
336	D+L	120.81	66.06	65759.54	549.51	-227.39	0.12
453	D+L	476.02	899.10	6992.91	17.45	-5.68	-2.31
454	D+L	-476.92	898.14	6989.76	17.42	5.75	2.31
1410	D+L	-19.74	-15.83	6496.44	42.27	-45.47	0.00
1412	D+L	60.98	14.33	62645.94	156.76	107.89	0.12
1414	D+L	51.37	-20.21	52078.53	239.18	92.75	0.12

Con base en la tabla presentada y como una medida indirecta de la precisión de la carga vertical de la estructura, se procede a dividir ésta por la carga admisible de los pilotes presentada en el informe geotécnico, la cual es de 250 toneladas. Se obtiene que la cantidad de pilotes que se requieren es de 281, al comprar esta cantidad con la cantidad de pilotes reportados en el estudio geotécnico (286), la variación porcentual es del 1.74%.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



Es importante tener presente que la diferencia entre las plantas del modelo estructural y las plantas del modelo creado en SAP 2000 para la determinación de las cargas de servicio D+L se debe a una simplificación en el modelo de los elementos y del edificio en general, de todas formas, como se mencionó anteriormente, debido a la pequeña diferencia entre la cantidad de pilotes calculados con base en las cargas determinadas en el modelo referente a este trabajo y la cantidad de pilas determinadas por los diseñadores, se asume que el modelo es representativo de las cargas de la edificación.

#### Caracterización del perfil de suelo:

Con base en la clasificación de suelos S.U.S.C o sistema unificado de clasificación de suelos, se presenta los perfiles de suelo para cada una de las perforaciones realizadas por medio del ensayo SPT.

Perforacion					
Z(-)m	1	2	3	4	5
2	SP-SM	SMd	SP-SM	SP	SP-SM
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
11					
12					
13					
14					
15					
16	SMd	SMd	SP	SP	SP-SM
17					
18					
19					
20					
21					
22					
23					
24					
25					
26					
27					
28	CL-ML	CL-ML	CL-ML	CL-ML	CL-ML
29					
30					
31					
32					
33					
34					
35	CH	CH	CH	CH	CH
36					
37					
38					
39					
40					
41					
42					
43					
44					
45					
46					

*Ilustración 25 Clasificación del suelo para cada perforación S.U.S.C*

Toda la profundidad reportada en la ilustración Ilustración 25 se encuentra por debajo del nivel freático, ya que este se encuentra a un metro medido a partir de la superficie de terreno natural en la zona de estudio.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

### Caracterización de las propiedades mecánicas del suelo:

La definición de las propiedades mecánicas del suelo se realizó con base en los ensayos SPT, los límites de Atterberg, los ensayos de compresión inconfiada y la granulometría, reportados en el estudio de suelos proporcionado por el constructor. Los datos no registrados en el estudio se obtuvieron de Eduardo & Granados (2013), en el cual determinan la capacidad de carga para pilotes en la misma zona donde será construida la edificación del presente trabajo.

El procedimiento para la determinación de algunas de las propiedades mecánicas del suelo, consistió en correlacionar el número de golpes SPT del informe presentado por el geotecnista para el proyecto en cuestión con base en literatura ampliamente aceptada.

Las propiedades mecánicas que se evaluaron a partir de los informes geotécnicos y las correlaciones SPT fueron las siguientes:

- Tipo de suelo.
- Altura del nivel Freático.
- Cohesión no drenada.
- Carga última en compresión inconfiada.
- Ángulo de fricción para arenas.
- Módulo de elasticidad.

Luego de haber definido las propiedades anteriormente mencionadas se procedió a calcular la carga ultima de los pilotes con base en la geometría mencionada en el apartado de caracterización de la estructura. Posteriormente se comparó este resultado con el entregado por el geotecnista para validar las suposiciones asignadas al suelo, esto dado que en el informe geotécnico no se evalúan algunas de las propiedades necesarias para la determinación de las capacidades de carga de los pilotes. Así se asume que, si la carga admisible reportada por el estudio geotécnico del proyecto y la carga admisible calculada en este trabajo presentan una diferencia pequeña, las propiedades que se le asignaron al perfil del suelo para este trabajo deberían ser comparables con aquellas asignadas al proyecto. Esto es importante, porque para el análisis del sistema como CPRF se tienen en cuenta las diferentes interacciones entre todos los elementos del modelo y el perfil del suelo es uno de los componentes determinantes.

El tipo de suelo, la altura del nivel freático el cual se encuentra un metro debajo de la superficie del terreno natural, la cohesión no drenada y la carga última de compresión inconfiada se tomaron directamente del informe geotécnico, el ángulo de fricción y el módulo de elasticidad se determinaron utilizando las correlaciones propuestas en Bowles (1997) en y Braja M.Das (2002) , de la misma manera, el peso específico de los primeros 38m se supuso de acuerdo a lo propuesto en Eduardo & Granados (2013), dado que no se cuenta con esta información dentro del informe presentado por el geotecnista.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

A continuación, se presentan las relaciones utilizadas para definir los ángulos de fricción y módulos de elasticidad, finalmente se promedian cada una de las relaciones utilizadas para definir un valor medio para las propiedades requeridas.

Para el ángulo de fricción se tienen las siguientes relaciones:

$$\phi(\text{Vias y puentes}) = \sqrt{18N'70} + 15$$

$$\phi(\text{Edificios}) = 0.36N70 + 27$$

$$\phi(\text{Peck}) = 27.1 + 0.3N60 - 0.00054N60^2$$

$$\phi(\text{Schertman}) = \tan^{-1} \left( \frac{N60}{12.2 + 20.3 \left( \frac{\sigma\theta}{Pa} \right)} \right)^{0.34}$$

$$\phi(\text{Hatanaka}) = \sqrt{20(N1)60} + 20$$

$$\phi(\text{Kishida}) = \sqrt{20(N1)60} + 15$$

Todas las relaciones anteriores arrojan resultados en grados, a excepción de la de Schertman la cual los arroja en radianes.

Para el módulo de elasticidad se tiene lo siguiente:

$$E_{\text{sand}}(\text{Bowles})1 = 500(N55 + 15)$$

$$E_{\text{sand}}(\text{Bowles})2 = 7000\sqrt{N55}$$

$$E_{\text{clays}}(\text{Bowles}) = 600Su$$

Donde:

Su: cohesión no drenada.

N#: N corregido para el ensayo SPT.

Las relaciones anteriores arrojan resultados en Kpa.

Las relaciones de Poisson se tomaron de El Gendy (2017) para suelos friccionantes y suelos cohesivos.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

A partir de las correlaciones mencionadas se establecieron perfiles típicos para cada una de las 5 perforaciones evaluadas en el informe geotécnico. A partir de esos perfiles se estableció un solo perfil típico para propósitos de este trabajo, el cual más adelante se utilizó para el cálculo de asentamientos. También se realizó una correlación SPT-CPT para comparar los asentamientos y cargas últimas de los pilotes por diferentes metodologías, la correlación SPT-CPT que se utilizó es de  $CPT=4N'70$  la cual es presentada en Vargas (2008) .

La siguiente grafica muestra el  $N_{60}$  calculado para cada una de las perforaciones, posteriormente a partir de las correlaciones mencionadas se clasifican las propiedades mecánicas del suelo para cada una de las perforaciones y se establece un perfil típico. El perfil típico será utilizado para la modelación del sistema en cada una de sus variantes.

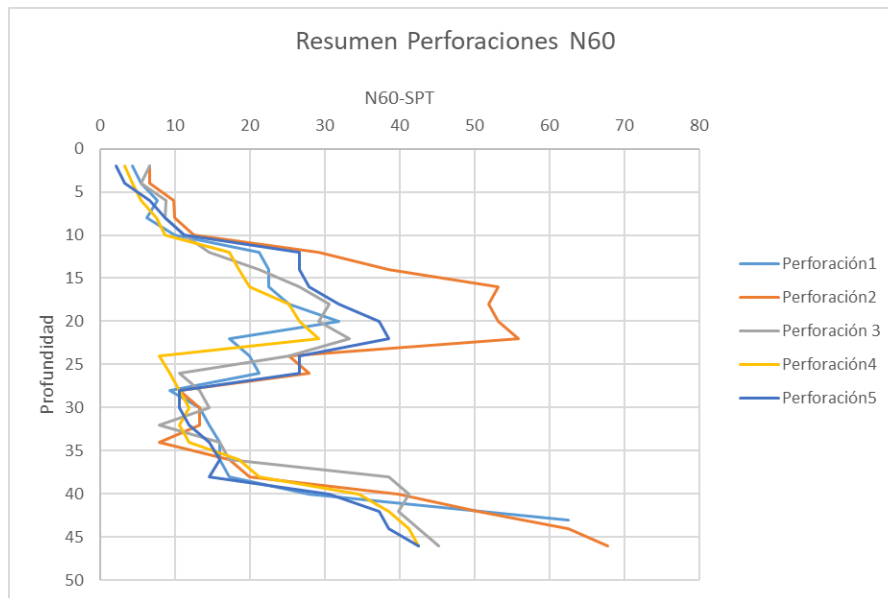


Ilustración 26  $N_{60}$  calculado a partir de los ensayos SPT entregados por el constructor

En la Ilustración 26 se evidencia gráficamente que, según los ensayos SPT las 5 perforaciones se comportan con una tendencia similar ante el golpeo de toma muestra, lo que da una idea de que el suelo de la zona, aunque tiene diferentes capas, es homogéneo dentro de la zona de estudio. A partir de los  $N$  corregidos calculados, se definen las siguientes propiedades mecánicas para cada una de las perforaciones.

Tabla 5 perforación 1

Perforación 1					
Z	Es (Kpa)	Poisson	$\phi$ AVG	CPT (kN/m <sup>2</sup> )	Su(kN/m <sup>2</sup> )
12	13629.2	0.3	29.8	1933.3	
26	19903.7	0.3	32.2	2628.6	

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

34	38587.5	0.5			65.8
43	96799.5	0.5			164.5

*Tabla 6 perforación 2*

Perforación 2					
Z	Es (Kpa)	Poisson	$\phi$ AVG	CPT (kN/m <sup>2</sup> )	Su(kN/m <sup>2</sup> )
12	15049.85	0.30	31.37	2533.33	
26	27061.81	0.30	37.32	4971.43	
36	36750.00	0.50			69.00
46	97020.00	0.50			168.45

*Tabla 7 perforación 3*

Perforación 3					
Z	Es (Kpa)	Poisson	$\phi$ AVG	CPT (kN/m <sup>2</sup> )	Su(kN/m <sup>2</sup> )
14	15557.49	0.30	30.33	2066.67	
26	22336.50	0.30	33.55	2857.14	
34	42262.50	0.50			77.89
46	90720.00	0.50			156.54

*Tabla 8 perforación 4*

Z	Es (Kpa)	Poisson	$\phi$ AVG	CPT(kN/m <sup>2</sup> )	Su(kN/m <sup>2</sup> )
12	12473.94	0.30	28.21	1600.00	
22	19943.58	0.30	32.47	2171.43	
36	28175.00	0.50			59.50
46	77616.00	0.50			130.45

*Tabla 9 perforación 5*

Perforación 5					
Z	Es (Kpa)	Poisson	$\phi$ AVG	CPT(kN/m <sup>2</sup> )	Su(kN/m <sup>2</sup> )
10	12038.33	0.30	28.50	1670.00	
26	23041.56	0.30	35.40	3490.00	

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

32	33075.00	0.50			75.20
46	83716.50	0.50			140.13

Dado que las profundidades en las que se evidencian los cambios de estrato, en las 5 perforaciones, son comparables entre si debido a las pequeñas diferencias entre ellas, se establece el siguiente perfil típico:

*Tabla 10 Perfil de suelo típico*

Perfil típico						
z	Es Kpa	Poisson	$\phi$ AVG	CPT(kN/m <sup>2</sup> )	Su(kN/m <sup>2</sup> )	$\sigma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )
12	13749.76	0.30	29.64	1960.00		18.13
25	22457.43	0.30	34.20	3222.86		18.13
34	35770.00	0.50			69.56	18.54
46	89174.40	0.50			152.02	18.72

Las características presentadas en el perfil de suelo típico son el insumo principal para el cálculo de asentamientos y esfuerzos en el sistema, tanto para el análisis por metodologías convencionales como para el análisis suponiendo que este funciona como una cimentación CPRF. En el siguiente punto se va a discutir la determinación de la capacidad de las pilas y los asentamientos por métodos convencionales.

### **3.2 DETERMINAR LOS ASENTAMIENTOS Y LOS ESFUERZOS EN LA CIMENTACIÓN DE LA ESTRUCTURA SUPONIENDO QUE ESTA TRANSFIERE LAS CARGAS AL SUELO COMO UNA CIMENTACIÓN**

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

## PROFUNDA CONVENCIONAL POR PILAS.

Con base en el perfil típico del suelo se procedió a calcular la capacidad de carga de las pilas, además con base en la relación SPT-CPT que se determinó en el punto anterior se van a comparar los resultados por diferentes metodologías. Aunque en términos generales estas capacidades son variables debido a la incertidumbre en las propiedades de los suelos y a que las correlaciones que se utilizan tienen intervalos relativamente amplios para la selección de las mismas, se pretende validar las características del perfil de suelo. Se compara la capacidad admisible de los pilotes calculada para efectos de este trabajo, con la capacidad de los pilotes reportada en el informe geotécnico.

Los asentamientos se calcularon con el programa ELPLA, el cual los analiza de manera no lineal.

De esta manera, para cada uno de los perfiles del suelo, y para el perfil característico se tiene, con un factor de seguridad de 2:

*Tabla 11 Capacidad de pilotes por correlaciones SPT*

<b>Capacidad de pilotes en KN - propiedades con correlaciones SPT</b>						
	<b>Pilote1</b>	<b>Pilote2</b>	<b>Pilote3</b>	<b>Pilote4</b>	<b>Pilote5</b>	<b>Pilote característico</b>
Punta	707.56	871.22	769.3	584.08	602.7	707.56
Fuste	3448.62	3877.86	3320.24	3570.14	3842.58	3612.28
Total	4156.18	4749.08	4090.52	4154.22	4446.26	4318.86
Admisible	2078.58	2373.56	2045.26	2067.8	2223.62	2159.92
S(ELPLA)(cm)	0.39	0.29	0.51	0.49	0.38	0.43

*Tabla 12 Capacidad de pilotes por correlación SPT-CPT*

<b>Capacidad de pilotes en KN SPT-CPT y ELPLA</b>						
	<b>Pilote1</b>	<b>Pilote2</b>	<b>Pilote3</b>	<b>Pilote4</b>	<b>Pilote5</b>	<b>Pilote característico</b>

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

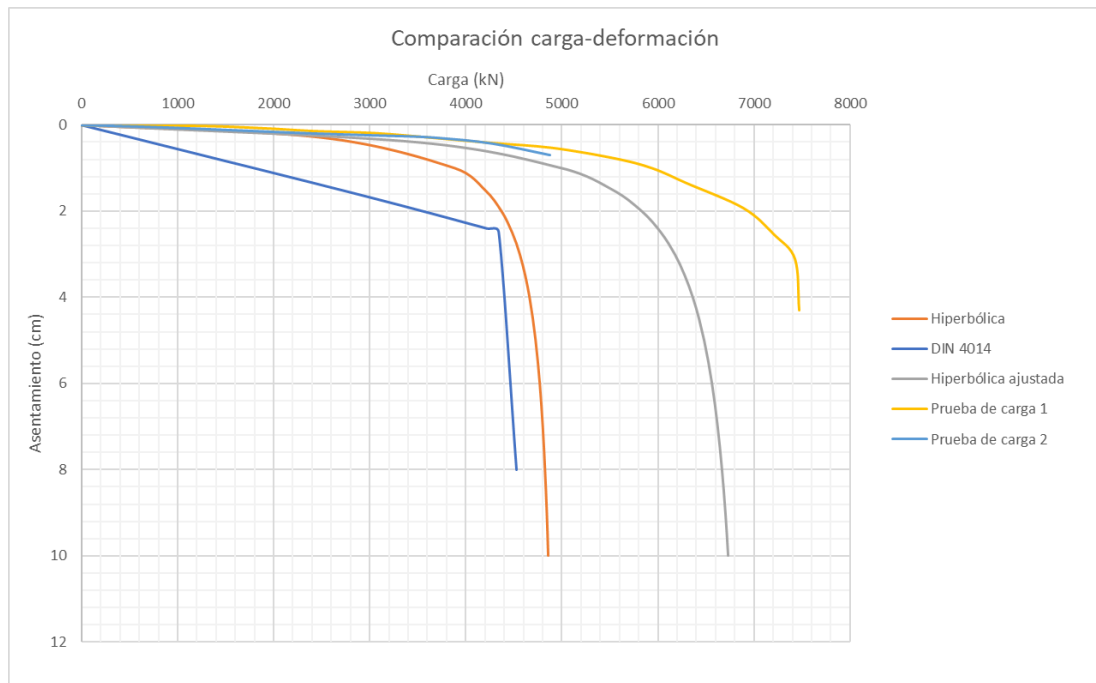


Punta	1228.9 2	1255.38	1174.04	994.7	1061.34	1142.68
Fuste	3812.2	4548.18	3865.12	3407.46	3979.78	3921.96
Total	5041.1 2	5803.56	5039.16	4402.16	5040.14	5064.64
Admisible	2520.5 6	2901.78	2519.58	2201.08	2520.56	2532.32
S(ELPLA) (cm)	1.36	1.32	1.37	1.44	1.38	1.41

De las tablas anteriores se puede apreciar que la diferencia porcentual entre las cargas admisibles es de 14.71%, esto se debe a que las correlaciones entre el ensayo CPT y SPT no son muy precisas y a que las correlaciones entre el esfuerzo y el asentamiento para el caso CPT se hicieron con base en suelos diferentes al que se está estudiando, de todas maneras, para el pilote característico de este trabajo se va a trabajar con una capacidad de carga promediada de los dos análisis, es decir de 240 toneladas con un factor de seguridad de 2. Así la diferencia entre la capacidad de carga reportada en el informe geotécnico de 250 toneladas, y la calculada en este trabajo es del 4%, lo que indica que las propiedades del suelo determinadas en este trabajo representan de manera precisa las utilizadas para el proyecto.

La metodología presentada por la DIN 4014 permite generar una curva de esfuerzo asentamiento según los valores de la correlación propuestos por la norma a partir del ensayo CPT, como no se cuenta con el ensayo CPT se realizó la correlación ya anteriormente mencionada SPT-CPT para, de manera general, comparar esta curva con la de los esfuerzos y asentamientos de las pruebas de carga de los pilotes. A continuación, se presenta la curva calculada SPT-CPT y dos de las pruebas de carga realizadas en los pilotes del proyecto.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



*Ilustración 27 carga asentamiento para el pilote característico según ELPLA, por metodología hiperbólica, CPT y pruebas de carga Insitu.*

En la Ilustración 27 se evidencian las curvas de carga asentamiento obtenidas en las pruebas de carga (prueba 1 y 2) y la utilizada para el análisis del sistema (hiperbólica), la DIN 4014 es aquella basada en ensayos CPT y la hiperbólica ajustada corresponde a una curva que, aunque representa un pilote con una capacidad de carga ultima de 7000KN se asemeja mejor a aquellas reportadas por los ensayos de carga.

Una vez determinada la capacidad de carga del pilote, tanto la admisible, la cual será considerada como aquella reportada por el geotecnista (2500KN) como la última que según el factor de seguridad de 2 es de 5000KN, y los asentamientos individuales de cada uno de los pilotes se procede a hacer el análisis de los asentamientos en el sistema con el software ELPLA para el sistema combinado. Se utilizará la curva hiperbólica sin ajustar, ya que representa la capacidad ultima de carga reportada en el informe geotécnico. Para este análisis se supone que únicamente los pilotes están transfiriendo las cargas de la estructura al suelo, pero estos están amarrados conjuntamente, por medio de una losa rígida. para mayor información sobre la metodología de cálculo ir a El Gendy (2017).

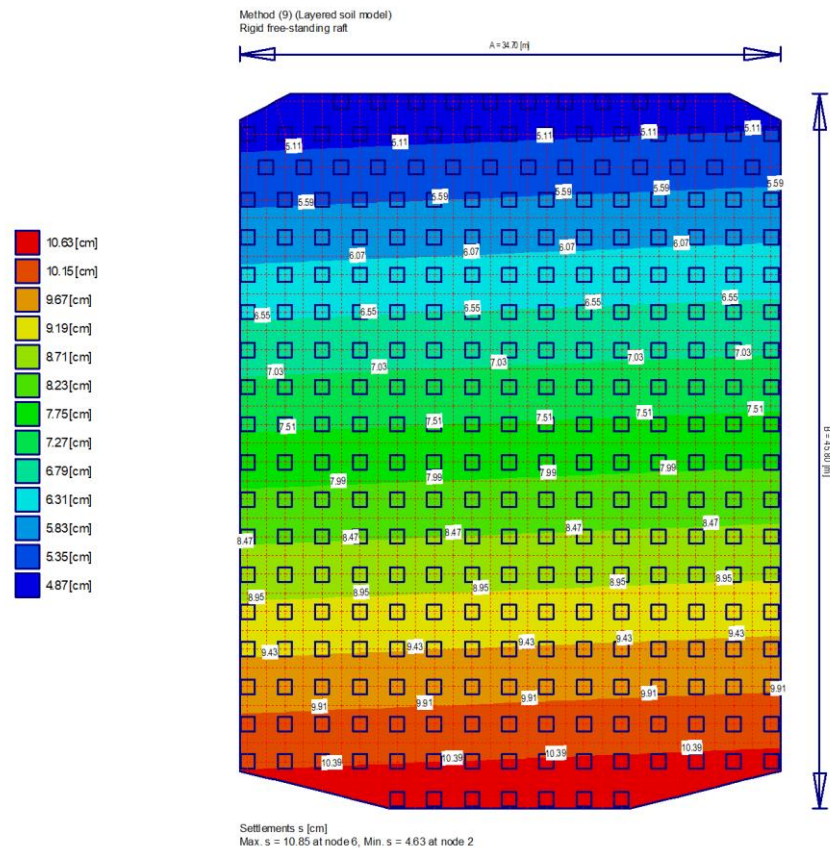
La información que se le ingresó al programa es:

- Geometría de la losa.
- Geometría de los pilotes.
- Ubicación de los pilotes.
- Carga última de los pilotes (5000KN).

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

- Perfil del suelo (Módulos de elasticidad, cohesiones, ángulos de fricción y módulos de Poisson)
- Altura del nivel freático.
- Tipo de análisis (No lineal para sistema de pilas con losa no portante.)

La Ilustración 28 muestra los asentamientos calculados con el software ELPLA para el sistema de losa con pilotes, donde únicamente la carga de la edificación es transmitida al suelo por medio de los pilotes.

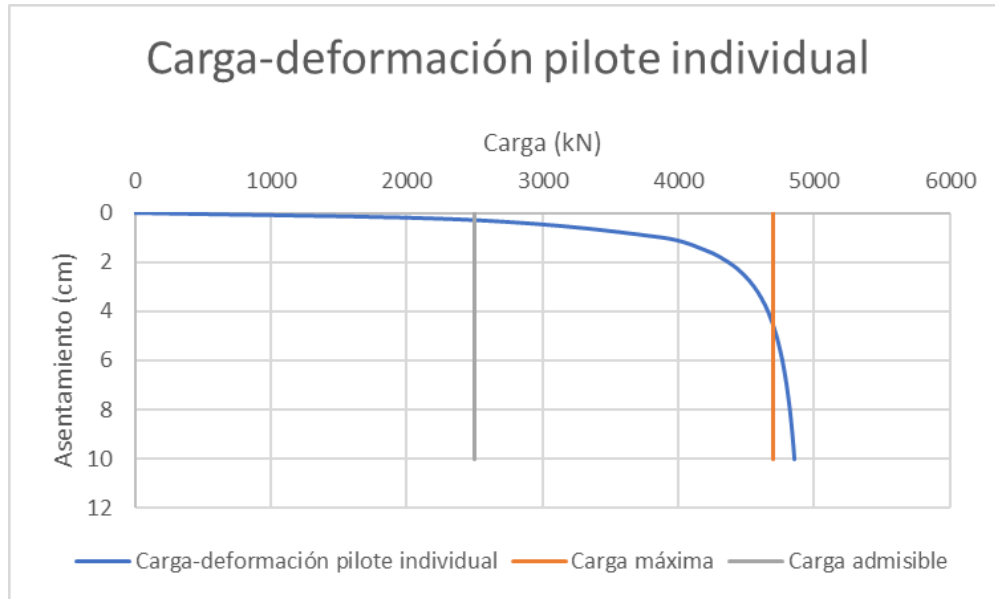


*Ilustración 28 Mapa de asentamientos para el sistema calculado con ELPLA donde sólo las pilas transfieren la carga al suelo.*

Se hace evidente en la Ilustración 28 que los asentamientos para el sistema funcionando como un grupo de pilotes es mucho mayor que cuando trabajan como pilotes individuales, esto debe a que existen pilotes que están cargados casi hasta el límite de carga calculado, en donde la curva esfuerzo deformación del pilote individual, es asintótica y aumenta

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

considerablemente los asentamientos calculados. A continuación se representa este fenómeno con la relación esfuerzo deformación de los pilotes individuales propuestos para el sistema.



*Ilustración 29 Carga deformación pilote individual Vs carga del pilote en el sistema*

En la Ilustración 29 se evidencia como al sobrepasar los 4000KN de carga en un pilote, la deformación, comienza a aumentar de manera considerable. Esta es una de las razones por la cual, el sistema, funcionando como un grupo genera asentamientos mucho mayores que el de un pilote individual debido a la suposición de la relación hiperbólica entre esfuerzo y asentamiento. Además, el conjunto de interacciones dentro del sistema, hacen que los pilotes no se comporten perfectamente como pilotes individuales y logran cambiar de manera drástica la relación esfuerzo asentamiento.

La carga para el pilote que mayor carga debe disipar y el que menor carga debe disipar en este análisis, según el cálculo realizado en ELPLA son:

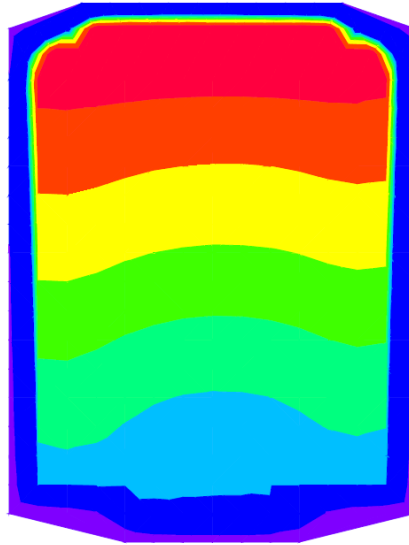
*Tabla 13 pilotes a carga máxima y mínima con su respectivo asentamiento*

Pilote	Carga total (KN)	Asentamiento (cm)
Carga máxima	4694.1	10.50
Carga mínima	1743.2	5.01

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.









En la Tabla 13 se evidencia nuevamente el cambio en el comportamiento de los pilotes al trabajar conjuntamente, ya que estos dejan de comportarse como pilotes individuales y a menor carga se evidencian asentamientos más críticos que aquellos que se esperarían para un pilote individual.

Debido a que para este análisis se supone que no existe interacción entre la losa de cimentación y el suelo las reacciones del sistema se presentan únicamente en los pilotes, a continuación, se presenta un mapa de calor donde se aprecian estas reacciones.



*Ilustración 30 Mapa de calor de las reacciones en los pilotes como cimentación profunda convencional.*

Tabla 14 Leyendas para el mapa de calor de las reacciones en los pilotes del sistema como cimentación profunda convencional.

Fuerzas en los Pilotes KN				
Rango	Intervalo menor	Intervalo mayor	Area m2	Color
1	1742.169	2038.050	166.62	
2	2038.050	2248.253	191.78	
3	2248.253	2417.929	212.75	
4	2417.929	2544.292	190.47	
5	2544.292	2650.712	212.20	
6	2650.712	2749.721	186.08	
7	2749.721	3960.806	251.43	
8	3960.806	4688.972	54.94	

El asentamiento máximo diferencial se presenta entre el borde inferior y el borde superior de la losa en el sentido del lado más largo, este se calcula determinando la diferencia máxima entre los asentamientos en cualquier punto de losa y dividiéndolos por su longitud, a continuación, se presenta una tabla donde se presentan las tolerancias según la NSR-10.

Tabla 15 Asentamientos diferenciales según NSR-10

Tipo de construcción	$\Delta_{max}$
(a) Edificaciones con muros y acabados susceptibles de dañarse con asentamientos menores	$\frac{l}{1000}$
(b) Edificaciones con muros de carga en concreto o en mampostería	$\frac{l}{500}$
(c) Edificaciones con pórticos en concreto, sin acabados susceptibles de dañarse con asentamientos menores	$\frac{l}{300}$
(d) Edificaciones en estructura metálica, sin acabados susceptibles de dañarse con asentamientos menores	$\frac{l}{160}$

Para el caso de los apoyos de esta losa el asentamiento diferencial máximo es de 0.0013 y el máximo permitido para edificaciones susceptibles a dañarse para esa distancia de 45m de longitud de la losa sería de 0.045, por lo que, para términos de diseño, con la suposición de que sólo las pilas transfieren la carga al suelo, cumple con los requisitos de asentamientos diferenciales de la NSR-10.

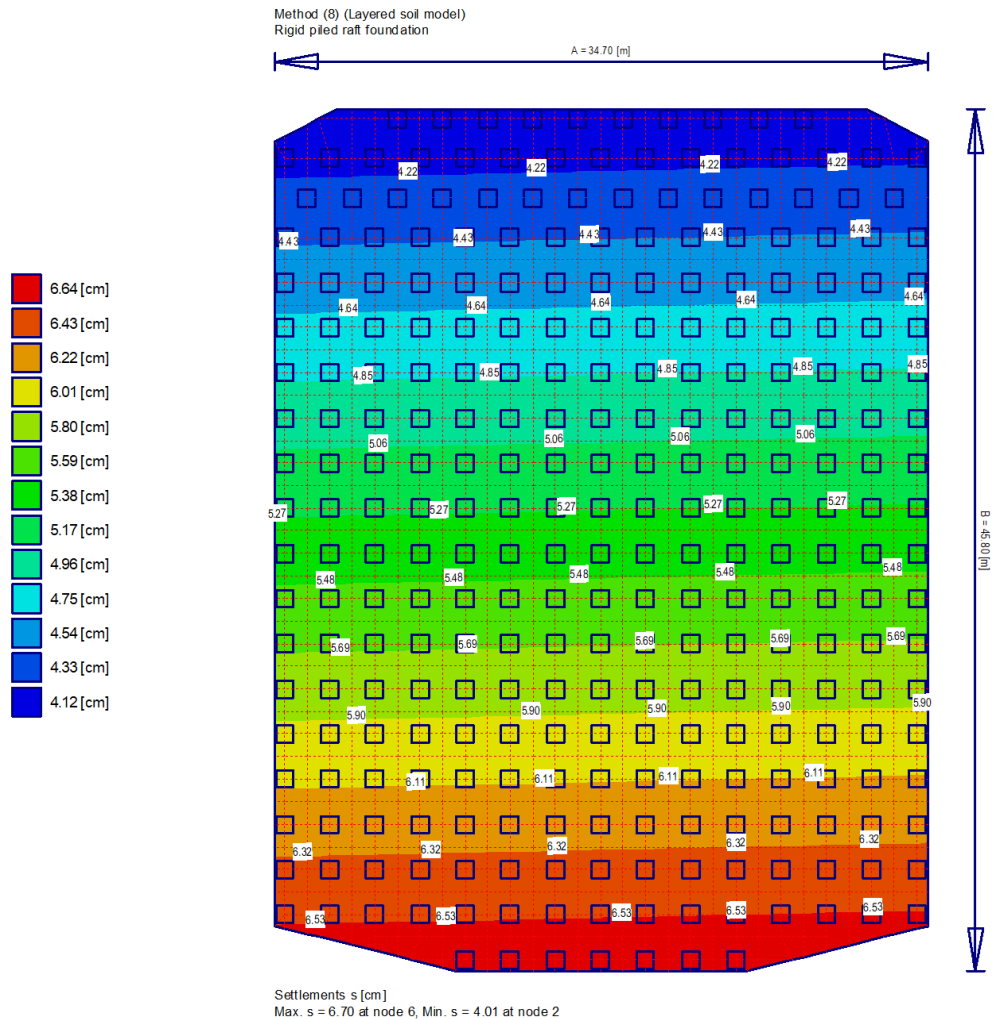
La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

### **3.3 DETERMINAR LOS ASENTAMIENTOS Y LOS ESFUERZOS EN LA CIMENTACIÓN DE LA ESTRUCTURA SUPONIENDO QUE ESTA TRANSFIERE LA CARGA AL SUELO COMO UNA CPRF.**

En este punto, se pueden hacer dos análisis fundamentalmente distintos para determinar tanto los asentamientos en la losa y en los pilotes como las reacciones en los mismos elementos.

El primer tipo es la suposición de que la losa de cimentación es completamente rígida y descansa sobre el suelo, por esta razón, la deformada de la losa es también un plano en el espacio al igual que en el análisis donde se supuso rígida la losa, pero sin estar directamente apoyada sobre el suelo. El segundo tipo supone la losa flexible, es decir, la deformación de la losa, no representa necesariamente un plano en el espacio. En la realidad la losa no es completamente flexible, pero tampoco completamente rígida, así que lo que se pretende con estos análisis es determinar la relación entre la carga que se distribuye en los pilotes y la que se distribuye en la losa y verificar que para las condiciones más críticas de estos análisis la cimentación siga cumpliendo con los criterios de seguridad, es decir, capacidad de carga y límites en sus asentamientos diferenciales.

Para el desarrollo de estos dos casos, las cargas en la losa son las mismas que para el caso en el cual sólo las pilas transfieren las cargas al suelo, el perfil de suelo es el que se determinó como perfil típico y la geometría de las pilas es la misma. a continuación, se presentan entonces, los asentamientos para el primer caso:



*Ilustración 31 Mapa de calor de asentamientos para el sistema calculado con ELPLA donde la carga se transfiere al suelo por medio de una losa rígida y las pilas.*

En la Ilustración 31 se puede apreciar que los asentamientos son menores que aquellos calculados para el sistema anterior. Vale la pena resaltar que la forma de los asentamientos es la misma, esto se da, porque la losa se supone completamente rígida y por lo tanto la deformada debe ser, al igual que para el caso anterior, un plano en el espacio.

Para este caso se calculó un  $\alpha$ CPRF del 79% en donde las pilas transfieren 62789 toneladas al suelo y la losa 16750 toneladas. Así la carga promedio disipada por la losa es de 11.43 ton/m<sup>2</sup>.

En cuanto a las reacciones en los pilotes, se presenta a continuación el mapa de calor.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



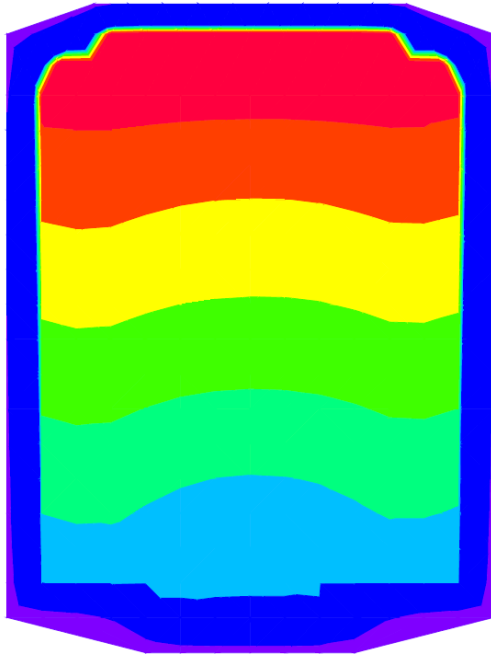


Ilustración 32 Mapa de calor de las reacciones en los pilotes como cimentación CPRF con losa rígida.

Tabla 16 Leyendas para el mapa de calor de las reacciones en los pilotes del sistema como CPRF con losa rígida.

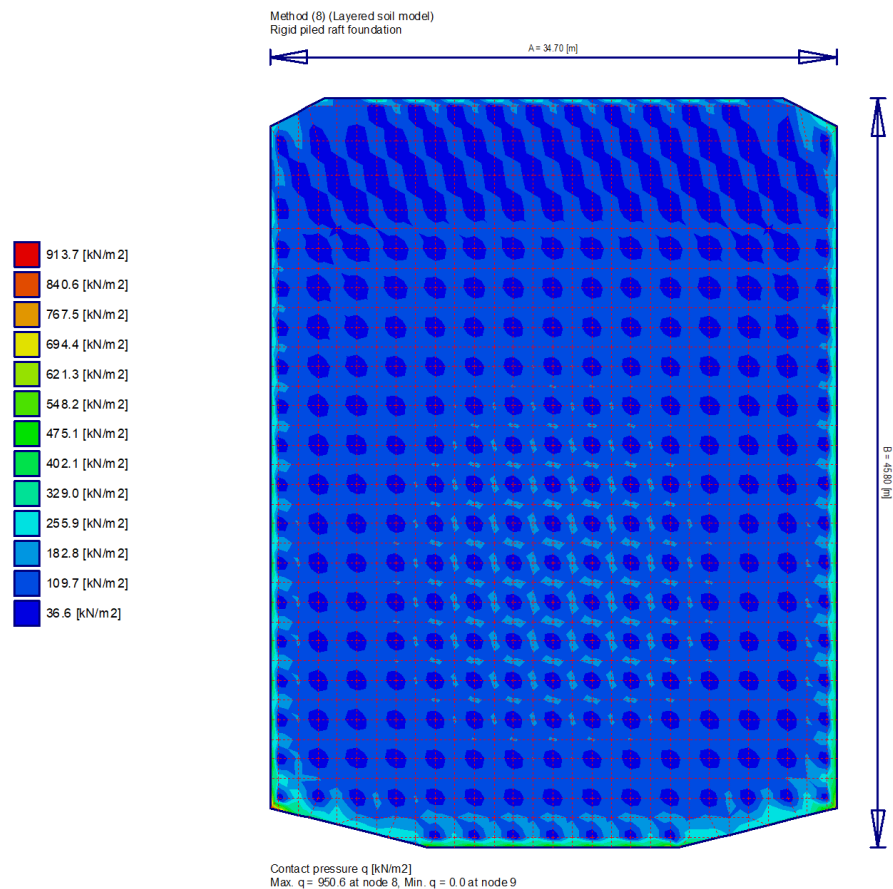
Fuerzas en los Pilotes KN				
Rango	Intervalo menor	Intervalo Mayor	Area m2	Color
1	1364.906	1546.383	165.01	■
2	1546.383	1650.307	182.47	■
3	1650.307	1738.038	201.70	■
4	1738.038	1818.170	194.75	■
5	1818.170	1884.291	194.63	■
6	1884.291	1957.927	184.00	■
7	1957.927	3606.776	294.81	■
8	3606.776	4464.237	48.92	■

De la Tabla 16 se puede confirmar que cada pilote individual genera una reacción menor que aquella generada por el sistema convencional, dado que una porción de la carga se disipa por acción de la losa, para este sistema el asentamiento diferencial es de 0.0005, lo

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

que indica que no sólo los asentamientos individuales son menores, sino que gracias a la carga disipada por la losa incluso el asentamiento diferencial máximo es menor, el cual generalmente condiciona más que los asentamientos individuales.

A diferencia del análisis con losa rígida no apoyada sobre el suelo, en este sistema se general presiones de contacto sobre la losa, los cuales son equivalentes a la carga disipada por la losa.



*Ilustración 33 esfuerzos sobre la losa de cimentación rígida por acción del contacto con el suelo*

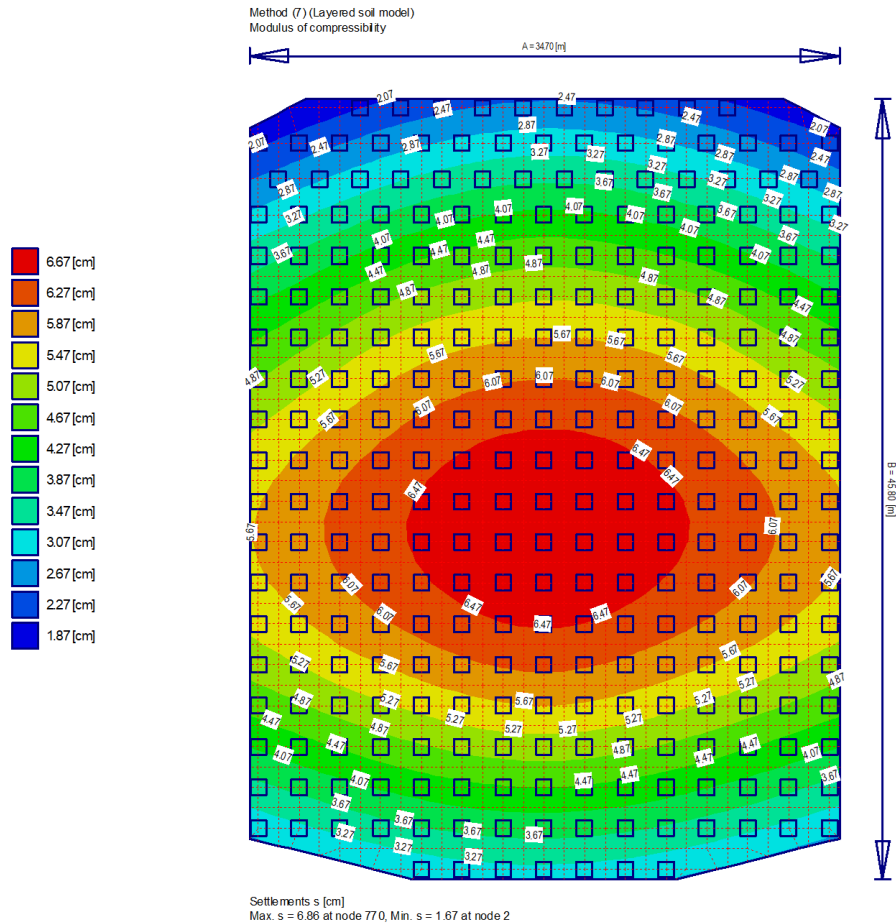
En la Ilustración 33 se puede apreciar que la presión de contacto sobre la losa es mayor en el centro, donde está apoyada la estructura y en los extremos, donde se generan las reacciones más críticas en el sistema, como se evidencia en la Ilustración 32.

El segundo tipo de análisis considera que la losa es flexible, en este caso las deformaciones no conformarán un plano en el espacio, sino alguna otra función proporcional a los asentamientos en cada punto. Por lo general dependiendo del espesor de la losa y las cargas impuestas sobre ella, el sistema tenderá a comportarse más como una losa completamente rígida o como una losa flexible, por medio de métodos más sofisticados es

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

posible determinar de manera más acertada la deformada del sistema, pero estos métodos requieren mayor gasto computacional, más tiempo y una caracterización de las condiciones del terreno por métodos más directos, para eliminar las incertidumbres producidas por la utilización de correlaciones.

Para el caso de CPRF con losa flexible en cuanto a los asentamientos para el sistema en cuestión se presenta el siguiente diagrama.



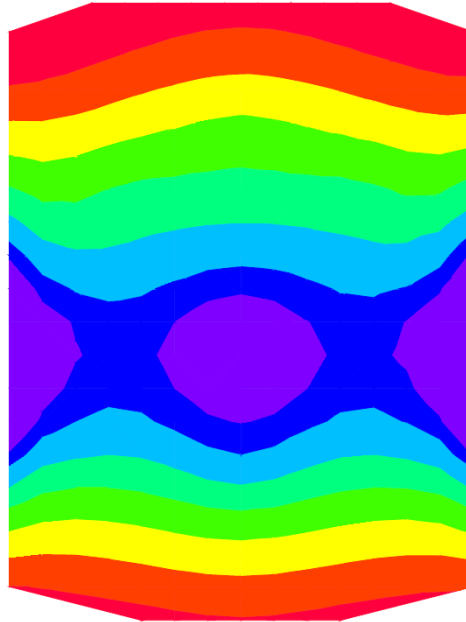
*Ilustración 34 Mapa de calor de asentamientos para el sistema calculado con ELPLA donde la carga se transfiere al suelo por medio de una losa flexible y las pilas.*

Los asentamientos en la parte central del sistema son mayores que en el resto del sistema, esto se debe a la localización de la estructura sobre la losa, en donde además el foso de ascensores se encuentra centrado. En este caso el  $\alpha$ CPRF es de 64% lo que implica que las pilas disipan 50570 toneladas y la losa 28970 toneladas, esto se debe a la deformación

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

de la losa la cual le implica transmitir una carga mayor, en comparación con el sistema CPRF de losa rígida. Así la carga promedio disipada por la losa es de 19.75 ton/m<sup>2</sup>

Las reacciones en los pilotes se presentan a continuación.



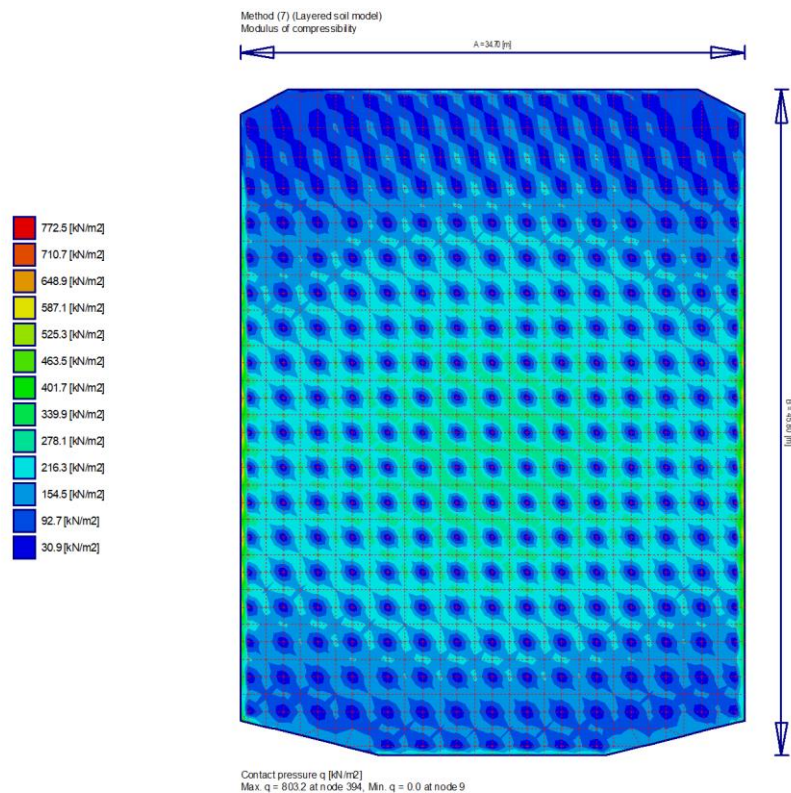
*Ilustración 35 Mapa de calor de las reacciones en los pilotes como cimentación CPRF con losa flexible.*

*Tabla 17 Leyendas para el mapa de calor de las reacciones en los pilotes del sistema como CPRF con losa flexible.*

Fuerza en los pilotes (KN)				
Rango	Intervalo menor	Intervalo mayor	Area m <sup>2</sup>	Color
1	167.95	1031.67	131.78	■
2	1031.67	1410.69	203.19	■
3	1410.69	1689.33	185.88	■
4	1689.33	1894.29	184.46	■
5	1894.29	2046.82	192.78	■
6	2046.82	2168.45	198.88	■
7	2168.45	2240.99	203.53	■
8	2240.99	2458.31	165.78	■

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

En la Ilustración 35 se aprecia claramente como la distribución de las reacciones en los pilotes se diferencia de aquellos sistemas donde la losa se supone rígida, siendo mayor en las zonas donde esta impuesta directamente la carga, es decir en la zona donde se encuentra apoyada la edificación. A continuación, se presentan las presiones de contacto sobre la losa de cimentación.



*Ilustración 36 esfuerzos sobre la losa de cimentación flexible por acción del contacto con el suelo*

Es claro, a partir de la Ilustración 36, que la carga disipada por la losa de cimentación flexible es mayor a aquella disipada por la losa rígida. Esto se evidencia también en el  $\alpha$ CPRF porque para el sistema flexible es menor.

En este caso los pilotes están menos cargados que en los casos mencionados anteriormente, esto debido a que la carga que deben disipar es menor, se puede evidenciar que el pilote más cargado disipa 250 toneladas, es decir aproximadamente, la carga que se propone como admisible en el informe geotécnico, hay que tener en cuenta que de todas maneras la losa del sistema real no es completamente flexible, ni completamente rígida en el plano de deformación vertical por lo que las reacciones reales en los pilotes, no deberían

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

ser tan grandes como en el sistema convencional o el sistema CPRF con losa rígida, ni tan bajas como en el sistema CPRF con losa flexible.

En cuanto al asentamiento diferencial máximo, en este caso sería evaluado con respecto a la mitad de la longitud total debido a la deformada del sistema y es aproximadamente 0.002, así cualquiera de los tres sistemas analizados cumple con el criterio de asentamientos diferenciales máximos propuesto por la norma, siendo el de CPRF con losa rígida el menos crítico de los tres.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

### 3.4 COMPARAR LOS ASENTAMIENTOS Y ESFUERZOS EN LA CIMENTACIÓN DE LA ESTRUCTURA OBTENIDOS A PARTIR DEL ANÁLISIS COMO PILOTES Y CPRF.

Se presentan en la Tabla 18, los asentamientos que se presentarían en una losa rígida y flexible sin pilotes reductores de asentamiento, también calculados con el programa ELPLA, se presentaran únicamente los asentamientos máximo y mínimo para propósitos de comparación con los sistemas CPRF.

*Tabla 18 Asentamientos máximo y mínimo en el sistema de losa flexible y rígida*

Tipo de Losa	Asentamiento (máximo/mínimo) (cm)
Flexible	40.63/30.33
Rígida	42.39/34.22

Es evidente que los asentamientos en un sistema compuesto únicamente por losa de cimentación, son mucho mayores que aquellos que ocurrirían en el sistema de pilotes o los sistemas combinados. A continuación, se comparan los asentamientos para el sistema de pilotes en grupo y los sistemas combinados en las mitades de la losa, es decir, en el eje X a 17.9 metros de los extremos y en el eje Y a 23 metros de los extremos.

En la Ilustración 37 se detalla la definición de los ejes.

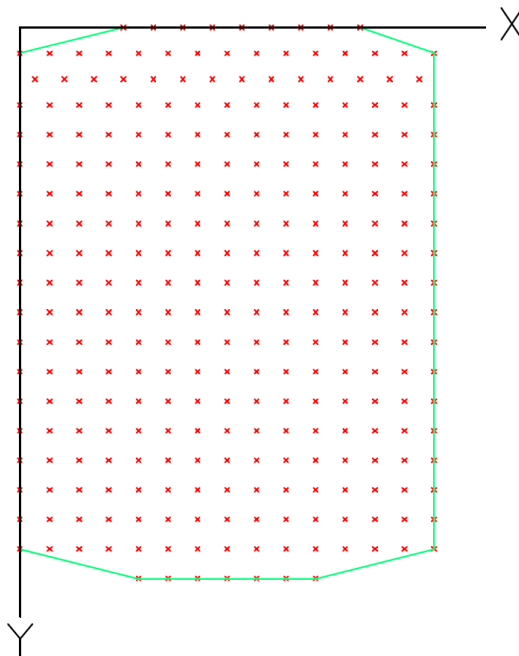


Ilustración 37 Definición de ejes para comparación de asentamientos

Habiendo definido los ejes se van a presentar los cortes en los centros de los dos ejes para cada uno de los análisis realizados y poder comparar las deformaciones en cada uno.

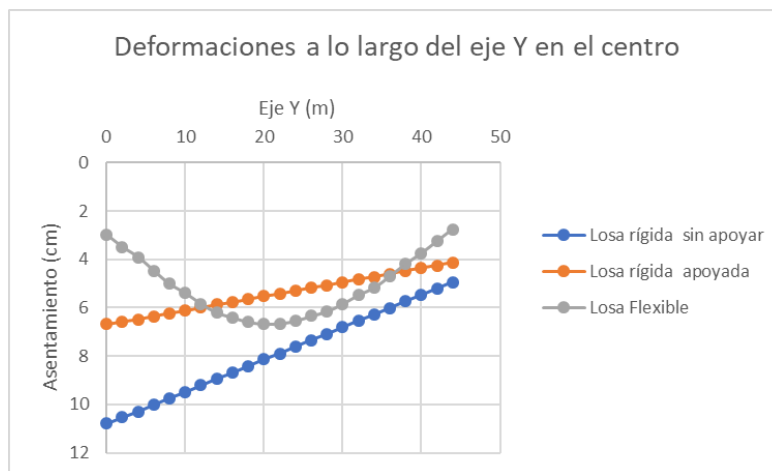


Ilustración 38 deformaciones a lo largo del eje Y en el centro para los 3 análisis

En la Ilustración 38 se evidencia como, según las suposiciones que se hagan para analizar el sistema, los resultados en términos de asentamientos varían. Si se supone que

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



únicamente el sistema esta soportado por las pilas, y que éstas por medio de una losa rígida funcionan solidariamente, los asentamientos que se obtienen son los más críticos de los tres análisis propuestos en este trabajo. Cuando se supone un sistema de losa rígida pero apoyada directamente sobre el suelo, la deformada general es similar a aquella compuesta de una losa rígida no apoyada, pero con asentamientos menores dado que los pilotes estarán menos cargados. En el caso de una losa flexible apoyada sobre el suelo, la deformada ya no conformará un plano en el espacio, sino una función proporcional a las cargas en cada uno de los pilotes y aunque habrá puntos con asentamientos más críticos, en general los asentamientos diferenciales serán menores.

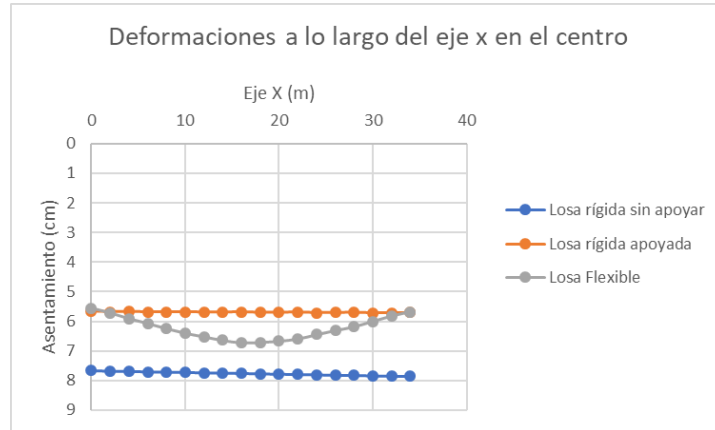


Ilustración 39 deformaciones a lo largo del eje X en el centro para los 3 análisis

La Ilustración 39 representa el corte en el centro de la losa en la dirección X la cual al igual que la Ilustración 38 permite concluir sobre la importancia de determinar cuál es el análisis que mejor representa el sistema, porque según estas suposiciones los resultados son evidentemente diferentes. Estos cortes permiten concluir que entre los dos sistemas rígidos se establecen unas fronteras de asentamientos, el más crítico cuando la losa no se apoya sobre el suelo, y que el sistema flexible, representaría un conjunto de valores dentro de estas fronteras.

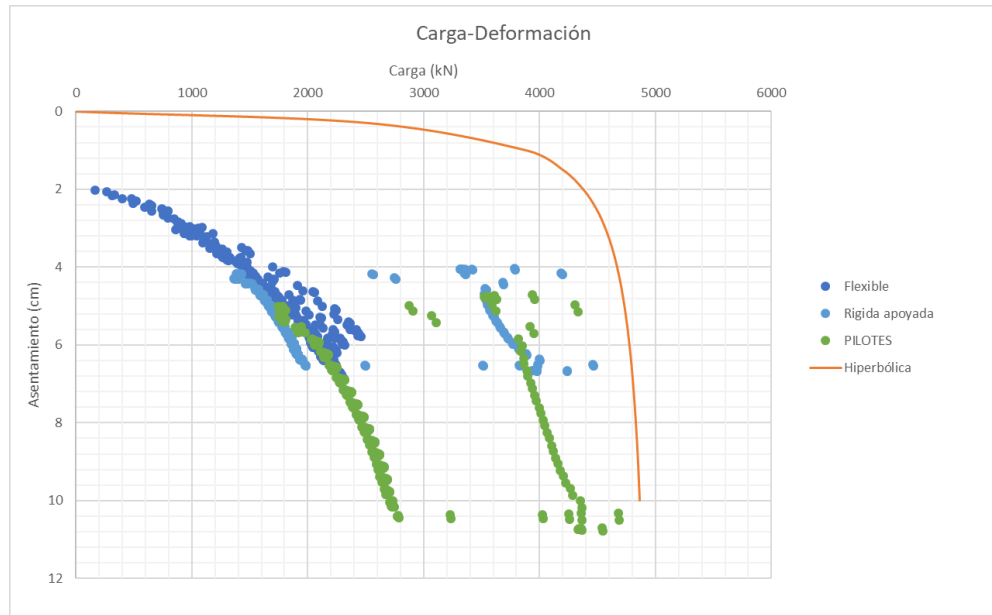
Tabla 19 Resumen general de los 3 sistemas (pilas y CPRF)

Resumen			
Losa	Convencional	CPRF Rígida	CPRF Flexible
S(cm) centro	7.8	5.25	5.8
S Diferencial	0.0013	0.0005	0.002
Carga promedio disipada por la losa (ton/m <sup>2</sup> )	0	11.43	19.75
αCPRF	100%	64%	79%

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

De la Tabla 19 se puede entonces decir que si la realidad del sistema está representada por un sistema CPRF, el cual no es del todo rígido pero tampoco completamente flexible, entonces la carga que deberán disipar los pilotes será alguna cantidad entre el 63% y el 78% del total de la carga, además el asentamiento máximo esperado para las condiciones de suelo determinadas, estaría entre los 5 y 6 centímetros, los asentamientos diferenciales según la tabla presentada anteriormente, no deberían ser problema. El diseñar el sistema como una cimentación profunda por pilotes convencional, subestima la capacidad de la losa de transferir alguna porción de la carga del sistema al suelo, y por lo tanto sobredimensiona los pilotes y el sistema en general.

Como además es evidente que el asentamiento de un pilote individual, tanto simulado como presentado en las pruebas de carga son menores que los calculados para los sistemas de pilotes y combinados, se presenta la Ilustración 40 donde se compara la carga de cada pilote para cada sistema contra el asentamiento del mismo y la suposición hiperbólica propuesta.



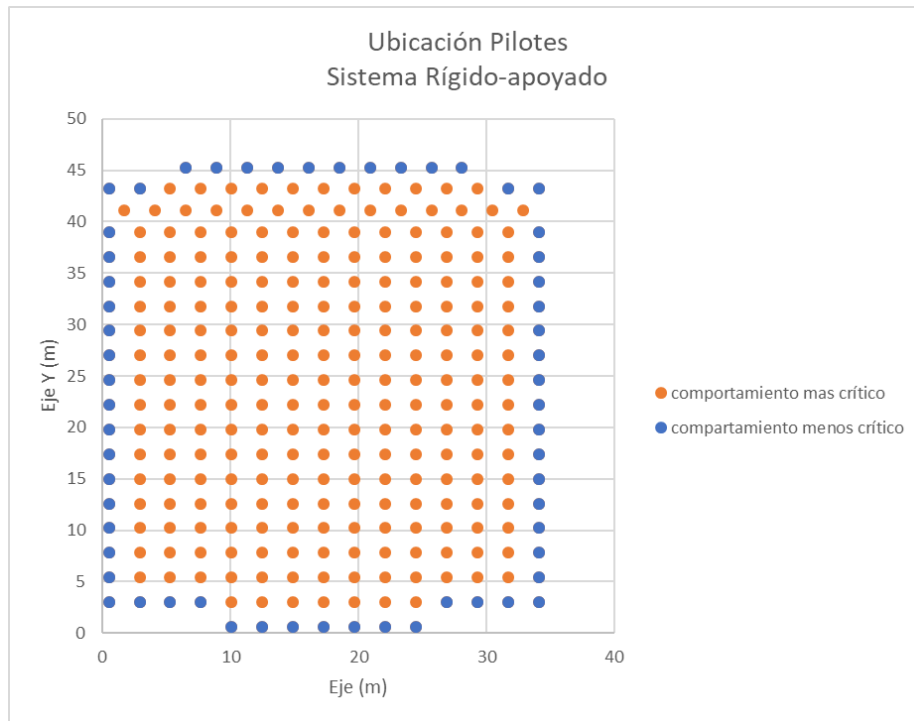
*Ilustración 40 Carga deformación como CPRF, como grupo de pilotes, y curva de pilote individual*

Se ve claramente que al hacer parte de un sistema combinado o grupo de pilotes, el comportamiento esfuerzo-asentamiento es diferente a aquel presentado por un pilote individual.

Para los sistemas rígido apoyado y PILOTES, se ve que los pilotes, se comportan, siguiendo dos tendencias diferentes, por esta razón se presenta la ubicación en planta de los grupos correspondientes a la situación más y menos crítica.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

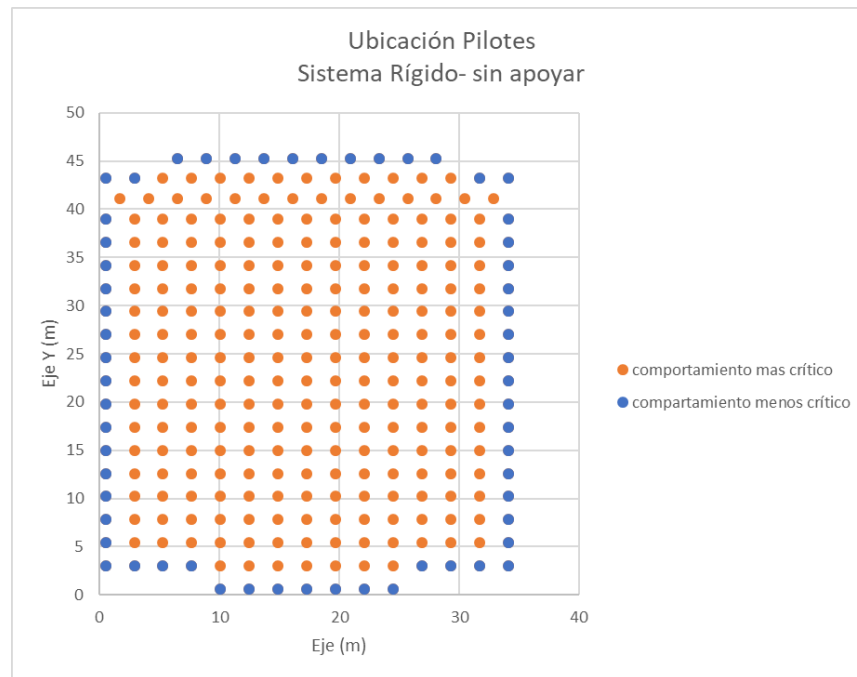
Para el sistema rígido apoyado:



*Ilustración 41 Ubicación de grupos de pilotes para el sistema rígido apoyado según su comportamiento*

Los pilotes en azul representan para el sistema rígido apoyado, aquellos que, aunque tienen mayor carga, presentan un asentamiento menor que el del comportamiento de la curva más crítica en la Ilustración 40.

Para el sistema losa rígida sin apoyar:



*Ilustración 42 Ubicación de grupos de pilotes para el sistema rígido sin apoyar según su comportamiento*

Al igual que en la Ilustración 41 en la Ilustración 42 se aprecia que los pilotes con el comportamiento menos críticos son aquellos que se encuentran ubicados en los bordes y que corresponden a los mismos que en el sistema rígido apoyado, lo que permite inferir que para estos dos sistemas, las pilas cuyo comportamiento será más parecido a la de un pilote individual, serán las de los extremos.

No se presentan esquemas de estas ubicaciones para el sistema flexible, porque este presenta una única tendencia con respecto al comportamiento carga-asentamiento.

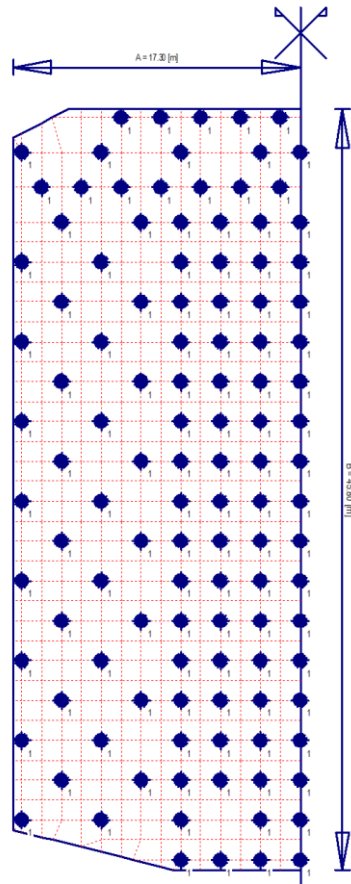
La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

### **3.5 COMPARAR LOS ASENTAMIENTOS Y ESFUERZOS EN LA CIMENTACIÓN DE LA ESTRUCTURA DISMINUYENDO LA CANTIDAD DE PILOTES EN EL SISTEMA.**

Con base en los análisis realizados se determinó que los pilotes, para los análisis tipo CPRF, cargan una porción menor de la carga que la impuesta por la estructura. Por esta razón se considera que la cantidad de pilotes en el sistema se puede disminuir sin afectar los requisitos generales de seguridad de la estructura.

Para la suposición de que la losa del sistema es completamente rígida la carga disipada por los pilotes es de 63% y para la losa flexible es de 78%. Por esta razón, se va a partir del supuesto de que los pilotes van a transmitir el 70% de la carga del sistema al suelo, y la losa el 30% restante, luego se va a determinar cual es el factor  $\alpha$ CPRF calculado para el sistema.

Así si se tienen 286 pilotes por medio de una suposición clásica de transferencia de carga como grupo de pilotes, y se disminuye en un 30% la cantidad de pilotes necesarios es de 200. Es decir, se podrían eliminar 86 pilotes del sistema. para conservar la regularidad del sistema se eliminan 72 pilotes. en la Ilustración 43 se presenta la localización de los pilotes en el sistema, para este caso se trabaja de manera simétrica para disminuir el tiempo de análisis.

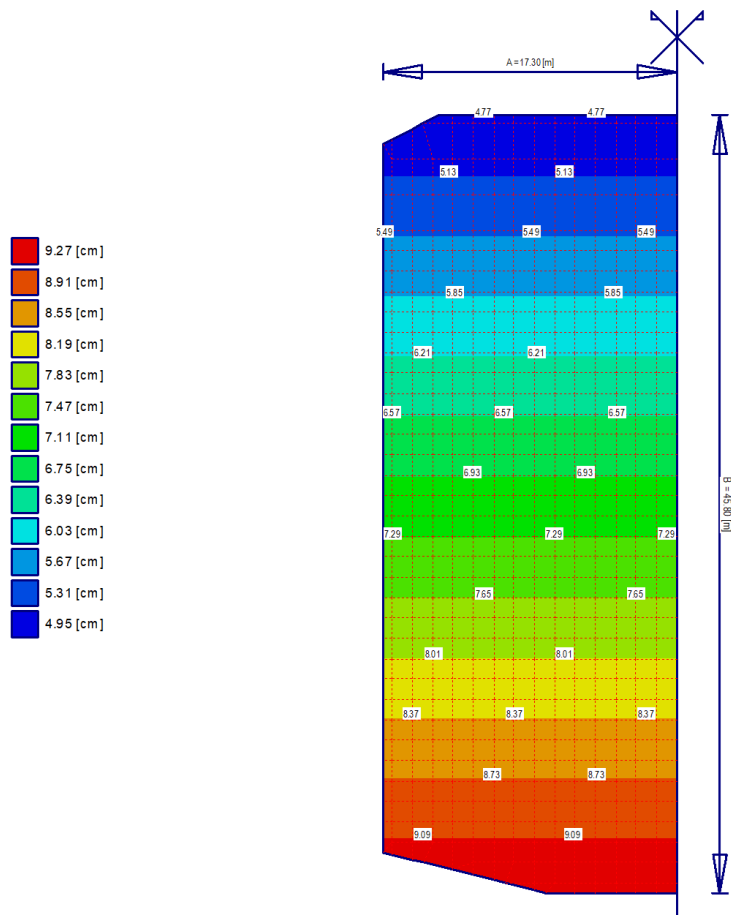


*Ilustración 43 Sistema con cantidad de pilotes reducida*

Para el sistema presentado en la Ilustración 43 los pilotes y la losa tienen las mismas características que en el sistema analizado inicialmente.

A continuación, se presentan los asentamientos calculados para el sistema reducido en pilotes y una curva esfuerzo asentamiento hiperbólica de 5000kN de carga ultima, además en este caso se supone que la losa es rígida y apoyada sobre el suelo.

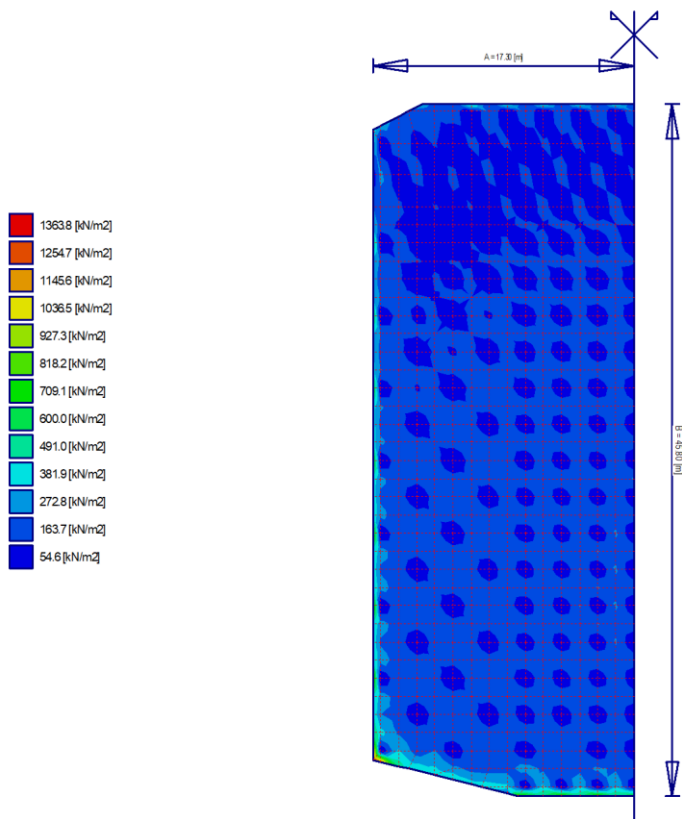
La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



*Ilustración 44 asentamientos para el sistema reducido en pilotes de losa rígida, con una relación carga asentamiento en los pilotes de carga última 5000kN*

El análisis muestra además que el pilote mayor cargado tiene una carga de 4690kN y el menos cargado de 793kN, el  $\alpha$ CPRF es de 73% y el asentamiento diferencial es de 0.001 lo que indica que cumple con la normativa. A continuación, se presentan las presiones de contacto sobre la losa. Es evidente que los pilotes más cargados están cerca de su capacidad calculada, como también se presentó en los sistemas de losa rígida inicialmente analizados.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



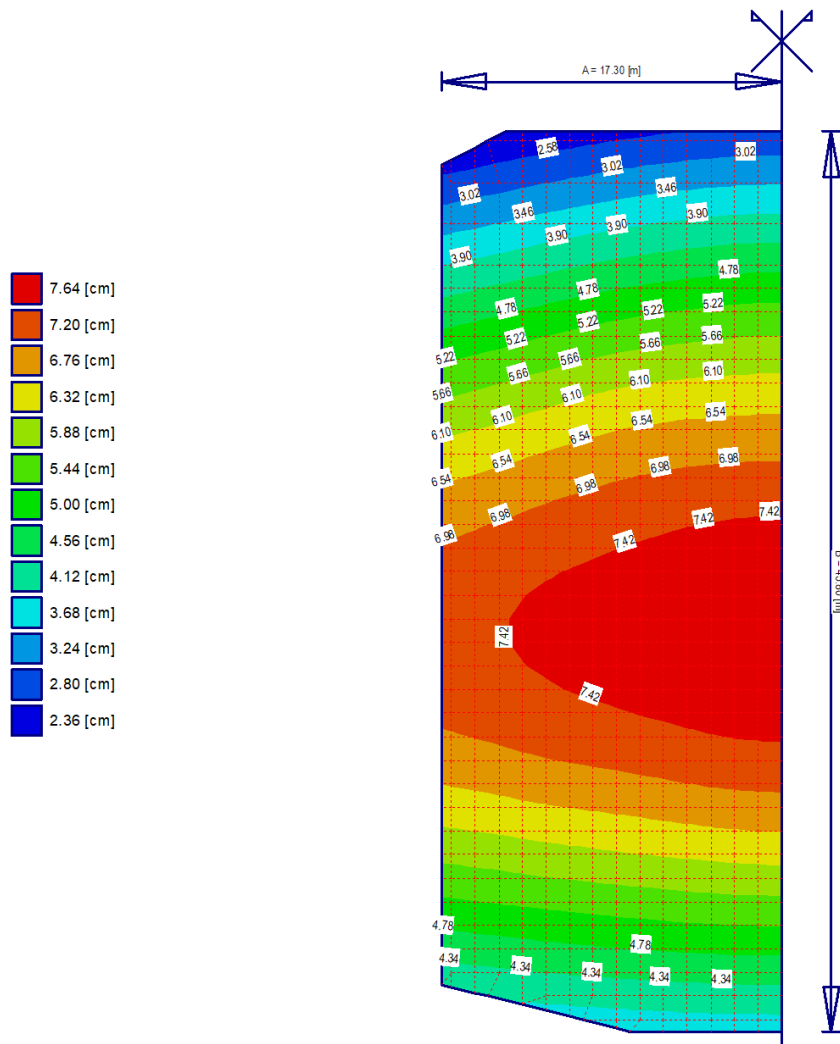
*Ilustración 45 presión de contacto sobre la losa rígida para el sistema reducido en pilotes*

Es evidente en la Ilustración 45 que, para el sistema rígido apoyado reducido en pilotes, existen puntos sobre la losa donde la carga a disipar es mayor que para el sistema analizado inicialmente. Se comprueba también, que, en este caso, aunque hay menor número de pilotes, estos asumen una porción mayor de la carga.

A continuación, se presenta el mismo análisis para la suposición de losa flexible con reducción de pilotes y curva carga asentamiento hiperbólica con carga última de 5000kN.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

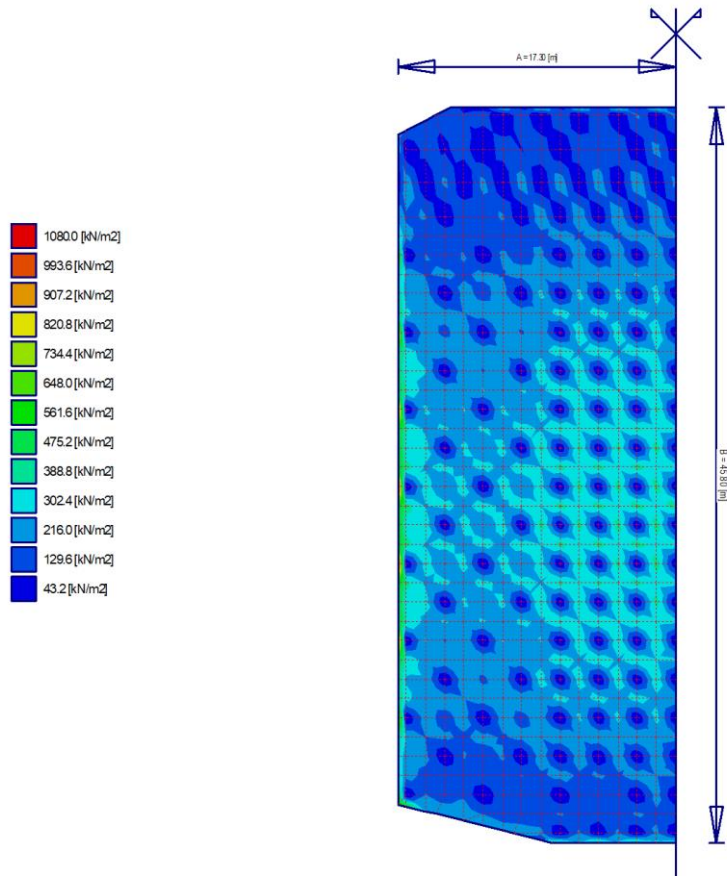




*Ilustración 46 asentamientos para el sistema reducido en pilotes de losa flexible, con una relación carga asentamiento en los pilotes de carga ultima 5000kN*

Al igual que en el sistema rígido con pilotes reducidos, los asentamientos aumentan, para este caso el pilote más cargado tiene 3094kN y el menos cargado 553kN, el  $\alpha$ CPRF calculado por medio de este análisis es de 57%. Con base en esto se puede afirmar, que efectivamente para este tipo de sistemas, los pilotes funcionan como reductores de asentamientos. El asentamiento se extiende de manera más marcada, desde la parte central hacia donde se retiraron pilotes.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



*Ilustración 47 presión de contacto sobre la losa flexible para el sistema reducido en pilotes*

En la Ilustración 47 se aprecia también, que las presiones de contacto sobre la losa son de mayor magnitud que en el sistema original. El asentamiento diferencial máximo para este caso es de 0.003 lo que indica que los dos sistemas analizados en este apartado, incluso con menor cantidad de pilotes, cumplen con los requisitos de la norma y son viables.

Es importante considerar que el  $\alpha$ CPRF supuesto para el Prediseño es diferente a el  $\alpha$ CPRF obtenido luego del análisis, puede buscarse un punto de convergencia o, si el sistema cumple con los requisitos de seguridad, se puede asumir como sistema a diseñar, cualquiera que cumpla con los requisitos de seguridad. También es importante tener presente, que en este tipo de análisis es común que algunos de los pilotes estén cargados cerca de la carga ultima.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

## 4. CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES

Con base en el análisis presentado en la sección anterior se presentan las siguientes conclusiones:

- Con base en las curvas carga-asentamiento de las pruebas de carga realizadas, se puede concluir que las propiedades del suelo determinadas por medio del ensayo SPT, no permiten una determinación precisa de la capacidad de carga real de los pilotes.
- Si se analiza el sistema de losa con pilotes, de manera convencional, es decir, suponiendo que toda la carga se transmite al suelo por acción de los pilotes, se obtienen asentamientos más altos que por las otras dos metodologías propuestas.
- Debido a las diferentes interacciones entre los elementos de un sistema de losa sobre pilotes, la relación carga-asentamiento para los pilotes que trabajan en grupo, presenta asentamientos más grandes ante una carga impuesta que un pilote de las mismas características trabajando individualmente ante la misma carga.
- Para un entramado relativamente homogéneo y simétrico de pilotes, se podría comenzar suponiendo que los pilotes transmiten al suelo entre el 60% y el 80% de la carga de la edificación para el prediseño del elemento CPRF e ir ajustando el diseño y disposición de los elementos a partir del análisis hasta encontrar un punto de convergencia o un diseño convincente.
- De acuerdo con los resultados obtenidos sobre la carga asumida por los pilotes para las metodologías CPRF, se concluye que se podría disminuir el número de pilotes, esto debido a la porción de carga que asume la losa, la cantidad de pilotes en la que se puede disminuir el sistema, se determinará por medio de un análisis iterativo de sensibilidad.
- El  $\alpha$ CPRF no es un factor que se pueda determinar a priori, sino que es una consecuencia del análisis del sistema. así se comprobó al realizar los análisis en el sistema con pilotes reducidos.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Además de las conclusiones presentadas se recomienda que realizando análisis posteriores y con base en análisis de sensibilidad de los sistemas CPRF se podría:

- Determinar un diseño más óptimo con menos pilotes que el presentado en este trabajo, que cumpla con los requisitos de seguridad necesarios y permita disminuir costos de construcción. Se pueden variar las características de los pilotes para incluir diferentes grupos con diferentes geometrías.
- Utilizar información sobre las propiedades del suelo, obtenidas de ensayos con mayor confiabilidad, para que la simulación de los modelos planteados sea lo más parecida a la realidad posible.
- Realizar el análisis del sistema integrando una relación carga asentamiento para los pilotes, que represente la realidad, ya sea ajustada por algún método matemático, o por medio de la integración al software de la curva obtenida a partir de las pruebas de carga.
- Comparar el costo directo de un diseño con menos pilotes para la misma estructura con respecto al diseño original.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

## REFERENCIAS

- ASTM. (2008). Standard Test Method for Standard Penetration Test (SPT) and Split-Barrel Sampling of Soils. *ASTM Standard Test Method, D1586-08a*, 1–9. <https://doi.org/10.1520/D1586-11.2>
- Bowles, J. E. (1997). *Foundation-Analysis-and-Design-5th-Edition-Joseph-E-Bowles.pdf*. McGraw-Hill.
- Braja M.Das. (2002a). *Principles of Foundation Engineering. McGraw-Hill handbooks*. <https://doi.org/0-495-91356-1>
- Braja M.Das. (2002b). Principles of Foundation Engineering. *McGraw-Hill Handbooks*, xvii, 595 . <https://doi.org/0-495-91356-1>
- Braja M.Das. (2008). *Advanced Soil MEchanics* (3rd ed.). New York: Taylor & Francis.
- Eduardo, E., & Granados, R. (2013). Análisis comparativo de capacidad portante y asentamientos de pilotes a partir de ecuaciones semi- empíricas , modelos numéricos y ensayos CPTU Comparison of bearing capacity and settlement analysis of piles from semi-empirical equations , numerical model.
- El-Garhy, B., Galil, A. A., Youssef, A. F., & Raia, M. A. (2013). Behavior of raft on settlement reducing piles: Experimental model study. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 5(5), 389–399. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2013.07.005>
- El-Mossallamy, Y. (1996). *Ein Berechnungsmodell zum Tragverhalten der Kombinierten Pfahl-Plattengründung*. TU Darmstadt. Retrieved from <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/758/>
- El Gendy, M. (2017). Analysis of Piled Rafts by the program ELPLA 2017.
- El Gendy, M., Hanisch, J., & Kany, M. (2006). Empirische nichtlineare Berechnung von Kombinierten Pfahl- Plattengrü ndungen (KPP). *Bautechnik*, 83(9), 604–617. <https://doi.org/10.1002/bate.200610053>
- Elwakil, A. Z., & Azzam, W. R. (2016). Experimental and numerical study of piled raft system. *Alexandria Engineering Journal*, 55(1), 547–560. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2015.10.001>
- González de Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002). *Ingeniería Geológica. Editorial Pearson Education, Madrid*.
- Katzenbach, R., & Leppla, S. (2017). Workshop Combined Pile-Raft Foundations ( CPRF )

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Fundaciones combinadas de losas y pilas.

- Lee, S., & Moon, J. (2016). Effect of Interactions between Piled Raft Components and Soil on behavior of Piled Raft Foundation, *0(0)*, 1–10. <https://doi.org/10.1007/s12205-016-0880-z>
- Liang, F. Y., & Chen, L. Z. (2004). A modified variational approach for the analysis of piled raft foundation. *Mechanics Research Communications*, *31(5)*, 593–604. <https://doi.org/10.1016/j.mechrescom.2004.03.003>
- Long, P. D. (2010). Piled raft - A cost-effective foundation method for high-rises. *Geotechnical Engineering*, *41(3)*.
- Lutz, B. (2002). *Beitrag zur Modellierung des Tragverhaltens Kombinerter Pfahl-Plattengründungen (KPP) unter Verwendung geotechnischer Messungen*. TU Darmstadt. Retrieved from <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/3121/%0A>
- Poulos, H. G., Small, J. C., & Chow, H. (2011). Piled Raft Foundations for Tall Buildings, *42(June)*, 78–84.
- Silva, R. D. G. da. (2009). Combined Pile Raft Foundations, (December).
- Tan, & Chow. (2004). Design of Piled Raft Foundation on Soft Ground(Final).pdf. *Internet*.
- Vargas, M. D. (2008). *Ingeniería de fundaciones*. (E. C. de Ingeniería, Ed.) (5th ed.). Bogota.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.