



Universidad Central Marta Abreu de Las Villas
Facultad de Construcciones
Departamento de Ingeniería Civil

TESIS DE GRADO

TÍTULO: “Análisis de Cimentaciones Balsas combinadas con pilotes”

Autor: Winnie Zumaquero O'Reilly

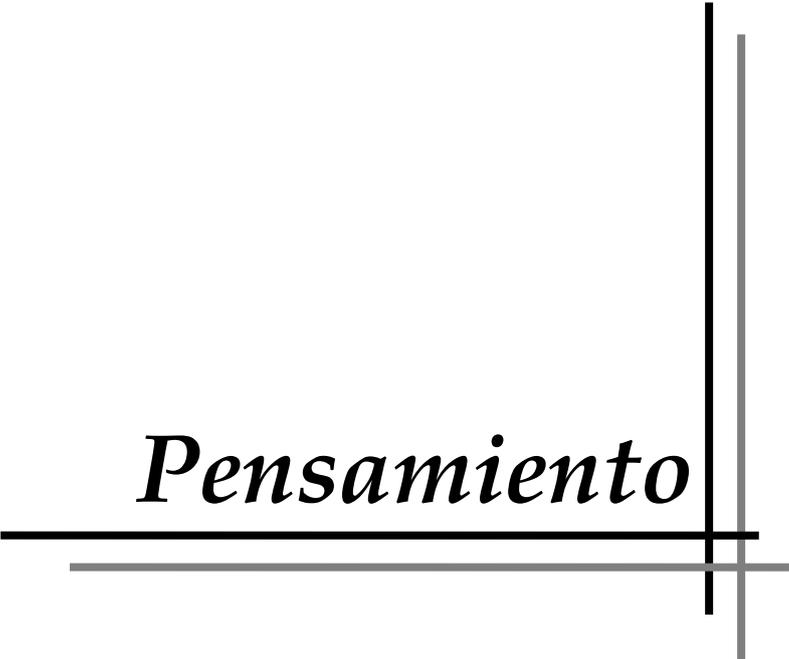
Tutor: Dr. Ing. Luis O. Ibañez Mora



Santa Clara-Cuba

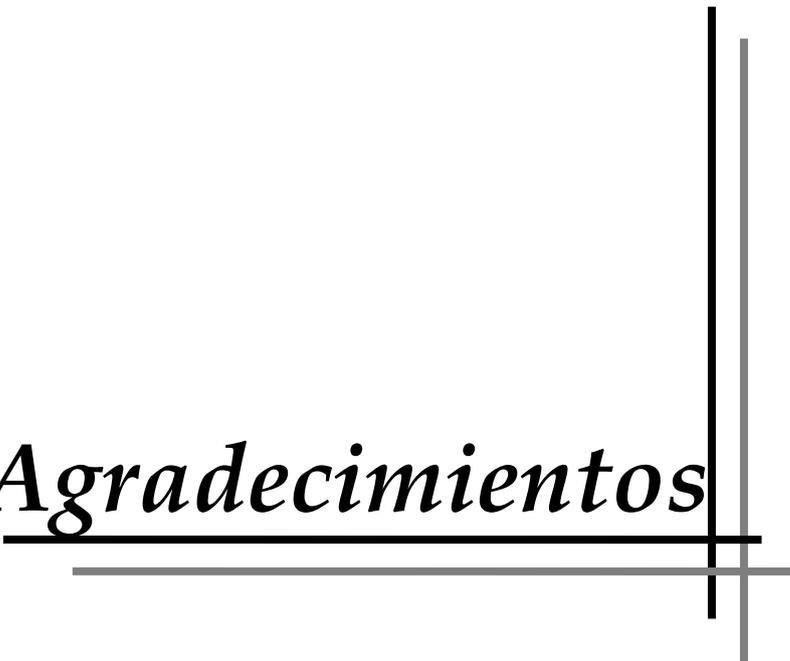
2011-2012

Pensamiento



*“En el ejercicio de la profesión se pone a prueba el espíritu creador
del hombre.”*

Agradecimientos



Mis agradecimientos van dirigidos a todos los que me apoyaron de forma incondicional en el transcurso de estos años:

A mis padres Onelia O`Reilly y Carlos Zumaquero por su apoyo incondicional, por confiar y creer en mí siempre.

A mi hermana Wendy Zumaquero, por colaborar de una forma u otra en hacer posible este sueño.

A mis tíos y primos, por preocuparse y apoyarme sin vacilaciones en todo lo que estuvo a su alcance.

A mi tutor, Dr. Luis Ibañez por su dedicación y ayuda incondicional para la realización de este trabajo.

A mis amigos y compañeros de aula: Suyen, Yanelys, Elizabeth, Leidys, Beatriz y Ernesto por los buenos y malos momentos que compartimos.

A los que me han brindado su apoyo a pesar de la distancia.

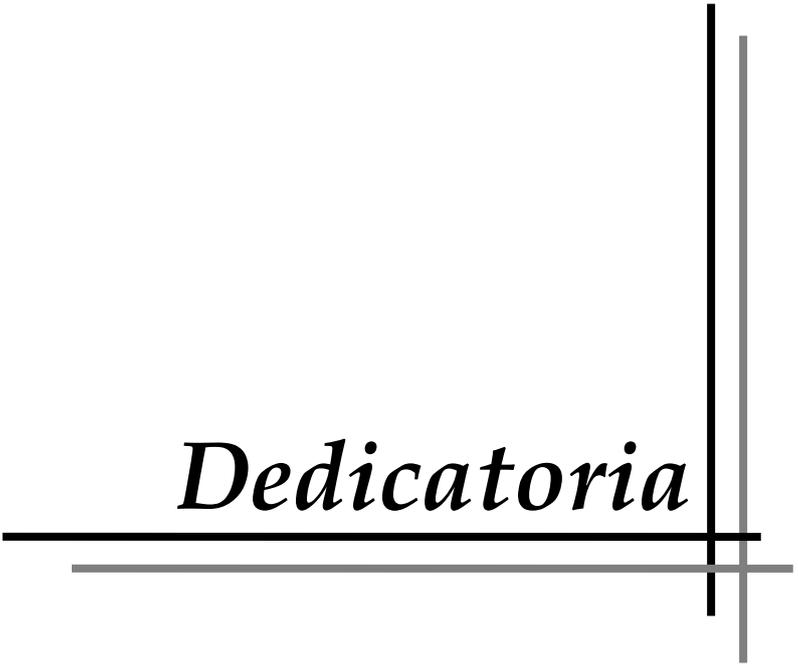
A mis compañeros de aula.

A los profesores de la Facultad de Construcciones, en especial a los del Departamento de Ingeniería Civil, por sus enseñanzas y por contribuir a mi formación profesional.

A todos, mis más sinceros agradecimientos.

Winnie Zumaquero O`Reilly

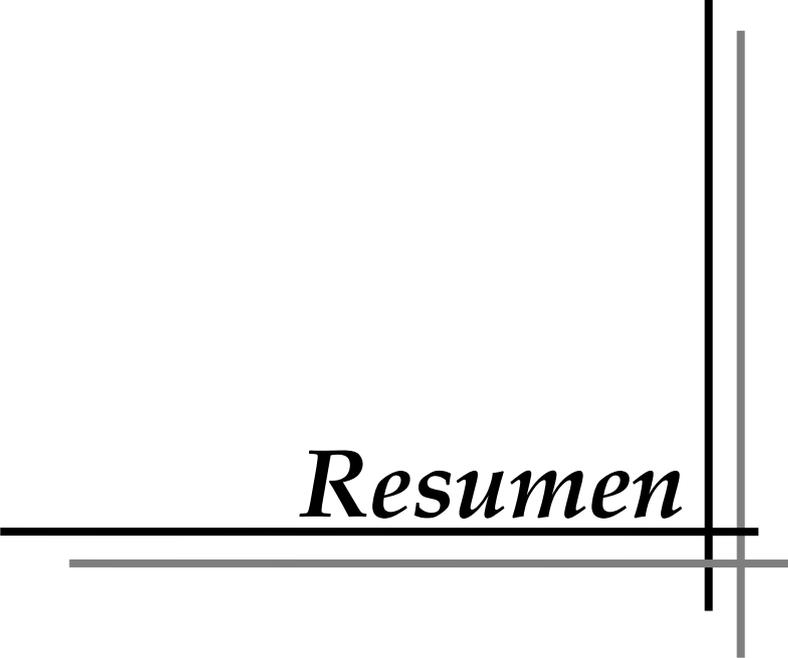
Dedicatoria



*A mis padres, quienes me dieron la vida
y me enseñaron a ir por el camino correcto.*

A mi hermana que comienza ese camino.

Resumen



RESUMEN

En este trabajo de diploma se presenta un análisis de los factores que intervienen en el proceso de diseño de las cimentaciones en balsa combinadas con pilotes (BCP), con el uso de hojas de cálculo programadas en MathCad y la modelación matemática por medio del programa Plaxis. La metodología de diseño utilizada se basa en las tendencias actuales para el análisis y el diseño de este tipo de cimentación.

Para ello se realizó un estudio bibliográfico donde se expusieron los antecedentes y las tendencias a nivel mundial en el tema del diseño de cimentaciones en BCP así como un análisis de los factores que influyen en el diseño.

El resultado final resulta ser un material de interés práctico profesional y de utilidad didáctica para el diseño y la revisión de cimentaciones en BCP, al permitir evaluar diferentes factores que influyen en el proceso de diseño.

Palabras Claves: Pilotes, balsas, modelación numérica, diseño.

SUMMARY

An analysis of the factors that intervene in the process of design of the piled raft foundations is presented in this thesis, using calculation leaves programmed in MathCad and the numerical modeling by the use of the computer program Plaxis. The design methodology used is based on the current tendencies for the analysis and the design of this foundation type.

For that was carried out a bibliographical study where the antecedents and the tendencies at world level in the topic of the design of piled raft foundations were exposed, as well an analysis of the factors that influence in the design.

The final result turns out to be a material of practical professional interest useful for the design and the revision of piled raft foundations, when allowing evaluate different factors that influence in the design process.

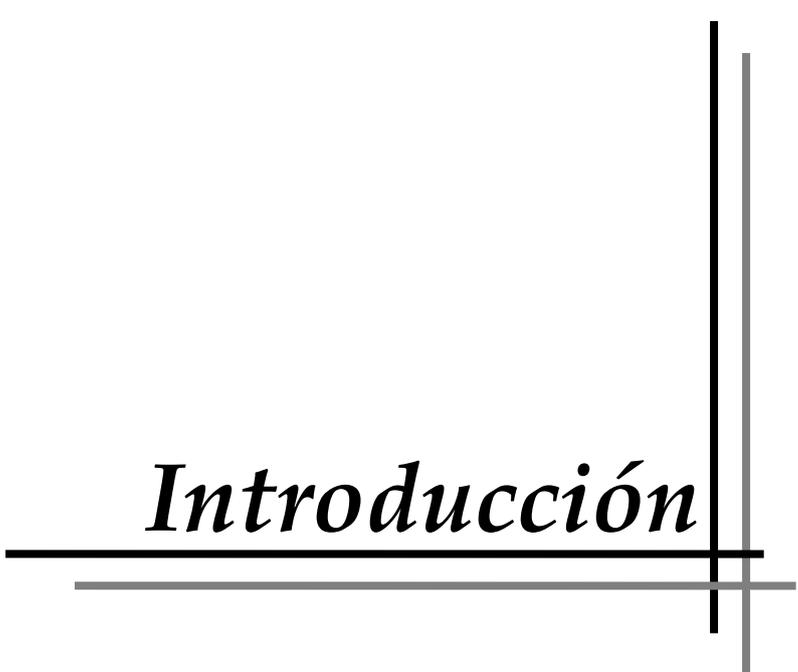
Keywords: numerical modeling and analysis; piled raft, settlement.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	i
Problema científico.....	i
Campo de acción.....	ii
Objetivos.....	ii
Hipótesis.....	ii
Novedad Científica.....	ii
Aportes.....	ii
Métodos y Técnicas empleadas.....	iii
Estructura de los Capítulos.....	iii
Resultados esperados.....	v
Capítulo 1: “Diseño de cimentaciones en balsas combinadas con pilotes, estados del arte.” ...	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Breve reseña histórica del uso de BCP.....	2
1.3 Métodos de diseño de BCP.....	4
1.3.1 Métodos simplificados o preliminares.....	4
1.3.1.1 Correlaciones empíricas.....	5
1.3.1.2 Recurrencia a modelos de cimentaciones equivalentes.....	8
1.3.1.3 Métodos basados en la teoría de la elasticidad.....	12
1.3.1.4 Apoyos independientes de los desplazamientos.....	14
1.3.2 Métodos detallados o numéricos.....	15
1.3.2.1 Análisis con métodos de Elementos de Contorno.....	15
1.3.2.2 Análisis con métodos de los Elementos Finitos.....	16
1.3.2.3 Análisis con métodos mixtos o híbridos.....	17
1.4 Factores que influyen en el diseño de BCP.....	18
1.4.1 Cantidad de pilotes.....	18
1.4.2 Longitud de los pilotes.....	18
1.4.3 Forma de la cimentación.....	20
1.4.4 Rigidez de la balsa.....	20
1.4.5 Profundidad de Cimentación.....	21
1.5 Cálculo de asentamientos en cimentaciones compensadas. Aplicación en BCP.....	22
1.6 Aplicación de Métodos Numéricos.....	24
1.7 Resultados experimentales a escala real.....	25
1.8 Aplicación de hojas de cálculo.....	26

1.9 Conclusiones del capítulo	29
Capítulo 2: “Metodología para el cálculo de los asentamientos de balsas combinadas con pilotes”	30
2.1 Introducción.....	30
2.2 Metodología propuesta para el diseño de BCP.....	30
2.3 Cálculo de asentamientos en cimentaciones compensadas	39
2.4 Análisis crítico de resultados de obras reales.	42
2.5 Metodología propuesta para el diseño de BCP considerando el efecto de la profundidad..	43
2.6 Análisis de los diferentes factores que influyen en el diseño de BCP.....	45
2.7 Conclusiones del capítulo	50
Capítulo 3: “Análisis numérico del cálculo de asentamientos de balsas combinadas con pilotes”	51
3.1 Introducción.....	51
3.2 Implementación de un método de diseño de BCP	51
3.3 Modelación de BCP con el empleo de ayudas de diseño	55
3.4 Análisis de los resultados, comparación con resultados reales	61
3.5 Conclusiones del capítulo	68
Capítulo 4: “Modelación de balsas combinadas con pilotes”	70
4.1 Introducción.....	70
4.2 Recomendaciones para la modelación por MEF de BCP	71
4.3 Modelación de BCP. Calibración del modelo	74
4.4 Modelación de BCP, efecto de la profundidad de cimentación.....	79
4.5 Análisis de los resultados.....	82
4.6 Conclusiones del capítulo	84
Conclusiones Generales.....	85
Recomendaciones.....	86
Referencias Bibliográficas	87
Anexos.....	91

Introducción



INTRODUCCIÓN

La cimentación es una de las partes fundamentales de cualquier estructura, puesto que es la encargada de transmitir las cargas al terreno. Dado que la resistencia y rigidez del terreno son, salvo raros casos, muy inferiores a las de la estructura, las cargas se transmiten a un material más adecuado a mayor profundidad por medio de cimentaciones profundas.

Según investigaciones (Ibañez 2011), en ocasiones a la hora de cimentar una superestructura, en cualquier tipo de suelo, el uso de pilotes puede significar un aumento del costo de la cimentación, debido a que el número de estos aumenta y la distancia se reduce provocando una reducción en la capacidad portante de estos y un aumento de su longitud.

Las cimentaciones de balsa combinadas con pilotes, dan respuesta a esta problemática, ya que constituye un sistema constructivo caracterizado por la acción conjunta de ambos elementos: balsa y pilotes, con la función de transmitir al terreno las cargas de la superestructura que se ha de cimentar. (Cudmani 2008).

El análisis de la interacción balsa, pilotes y suelo, es de primordial importancia para la evaluación de los asentamientos del conjunto, sean uniformes o diferenciales. A su vez, una acertada predicción de los asentamientos es indispensable para verificar que los requerimientos en el estado de servicio se vean cumplidos.

Dada la importancia de este aspecto y lo innovador de este sistema será fundamental evaluar a través del uso del MathCad y la modelación matemática por el método de elementos finitos el efecto de la profundidad de cimentación en el cálculo de asentamientos en balsas combinadas con pilotes.

Problema científico

El comportamiento de la cimentación en balsa combinada con pilotes (en lo adelante BCP) está siendo seguido e investigado desde hace algunas décadas, a pesar de esto por la compleja interacción de sus elementos, aspectos como el mecanismo de distribución de las cargas externas y el comportamiento bajo carga asentamiento, no son aún suficientemente discernidos. Es por esto que será fundamental dar respuesta al siguiente problema científico:

¿Cómo influye la profundidad en los asentamientos de las cimentaciones en BCP?

Objeto de la investigación

El objeto de la investigación serán las cimentaciones en balsas combinadas con pilotes.

Campo de acción

La modelación matemática del efecto de la profundidad de cimentación en el cálculo de asentamientos en balsas combinadas con pilotes

Objetivos

Objetivos generales:

Evaluar a través de hojas de cálculo y la modelación matemática el efecto de la profundidad de cimentación en balsas combinadas con pilotes.

Objetivos específicos:

1. Realizar una búsqueda bibliográfica relacionada con las cargas actuantes en las cimentaciones balsas combinadas con pilotes.
2. Calcular los asentamientos producidos en cimentaciones BCP.
3. Analizar numéricamente los resultados.
4. Modelar cimentaciones balsas combinadas con pilotes.

Hipótesis

A través de la modelación matemática, el empleo de hojas de cálculo y los resultados de mediciones de estructuras reales, se puede estimar el comportamiento deformacional de balsas combinadas con pilotes sin la necesidad de costosos ensayos de carga, con el consiguiente ahorro de tiempo y dinero.

Novedad Científica

La novedad científica del trabajo radica en combinar las técnicas de modelación y empleo de hojas de cálculo en MathCad, con la instrumentación para estimar el comportamiento tenso deformacional de balsas combinadas con pilotes.

Aportes

Aporte Teórico: Se presenta una compilación de información sobre el diseño de cimentaciones en balsas combinadas con pilotes.

Aporte Metodológico: Se presenta una metodología para la estimación de las deformaciones en balsas combinadas con pilotes.

Aporte Práctico: Mediante la modelación numérica y empleo de hojas de cálculo se analizarán los resultados y se compararán con resultados reales, logrando un mayor

entendimiento de la influencia de la profundidad en las deformaciones experimentadas por las cimentaciones en balsas combinadas con pilotes.

Métodos y Técnicas empleadas

Métodos de investigación.

De nivel teórico:

- Histórico- lógico: Se utilizará en la primera parte de la presente investigación con el fin de determinar los antecedentes en el tema del diseño de cimentaciones en balsas combinadas con pilotes.

De nivel empírico:

Se recopilarán resultados obtenidos en obras reales, aplicando una metodología determinada para el cálculo de deformaciones en BCP y se efectuará una comparación con los resultados obtenidos, se utilizará la modelación numérica y el empleo de las hojas de cálculo.

Estructura de los Capítulos

Capítulo 1: Diseño de cimentaciones en balsas combinadas con pilotes, estados del arte.

En este capítulo se realiza el estudio bibliográfico y un análisis del estado del arte de la temática, lo que posibilita justificar el desarrollo de la investigación. En el mismo se exponen los antecedentes y las tendencias a nivel mundial en el tema del diseño de cimentaciones en balsas combinadas con pilotes. Además se analizan los factores que influyen en el diseño y se realizará un cálculo de de los asentamientos en cimentaciones compensadas

1.1 Introducción

1.2 Breve reseña histórica del uso de BCP

1.3 Métodos de diseño de BCP

1.4 Factores que influyen en el diseño de BCP

1.4.1 Cantidad de pilotes

1.4.2 Forma de la cimentación

1.4.3 Rigidez de la balsa

1.4.4 Profundidad de Cimentación

1.5 Cálculo de asentamientos en cimentaciones compensadas. Aplicación en BCP.

- 1.6 Aplicación de Métodos numéricos
- 1.7 Resultados experimentales a escala real
- 1.8 Aplicación de hojas de cálculo
- 1.9 Conclusiones del capítulo

Capítulo 2: Metodología para el cálculo de los asentamientos de balsas combinadas con pilotes.

En este capítulo se elaborará una metodología para la estimación de las deformaciones en BCP y se hará un análisis en obras reales de los resultados.

- 2.1 Introducción
- 2.2 Metodología propuesta para el diseño de BCP.
- 2.3 Cálculo de asentamientos en cimentaciones compensadas
- 2.4 Análisis crítico de resultados de obras reales.
- 2.5 Metodología propuesta para el diseño de BCP considerando el efecto de la profundidad.
- 2.6 Análisis de los diferentes factores que influyen en el diseño de BCP.
- 2.7 Conclusiones del capítulo

Capítulo 3: Análisis numérico del cálculo de asentamientos de balsas combinadas con pilotes.

En este capítulo se desarrollará un método de diseño de BCP y su modelación empleando las ayudas de diseño, se analizarán los resultados y se compararán con resultados reales.

- 3.1 Introducción
- 3.2 Implementación de un método de diseño de BCP
- 3.3 Modelación de BCP con el empleo de ayudas de diseño
- 3.4 Análisis de los resultados, comparación con resultados reales
- 3.3 Conclusiones del capítulo

Capítulo 4: Modelación de balsas combinadas con pilotes.

En este capítulo se darán recomendaciones para la modelación por MEF de BCP teniendo en cuenta la profundidad de cimentación y se analizarán los resultados.

- 4.1 Introducción

4.2 Recomendaciones para la modelación por MEF de BCP

4.3 Modelación de BCP. Calibración del modelo

4.4 Modelación de BCP, efecto de la profundidad de cimentación

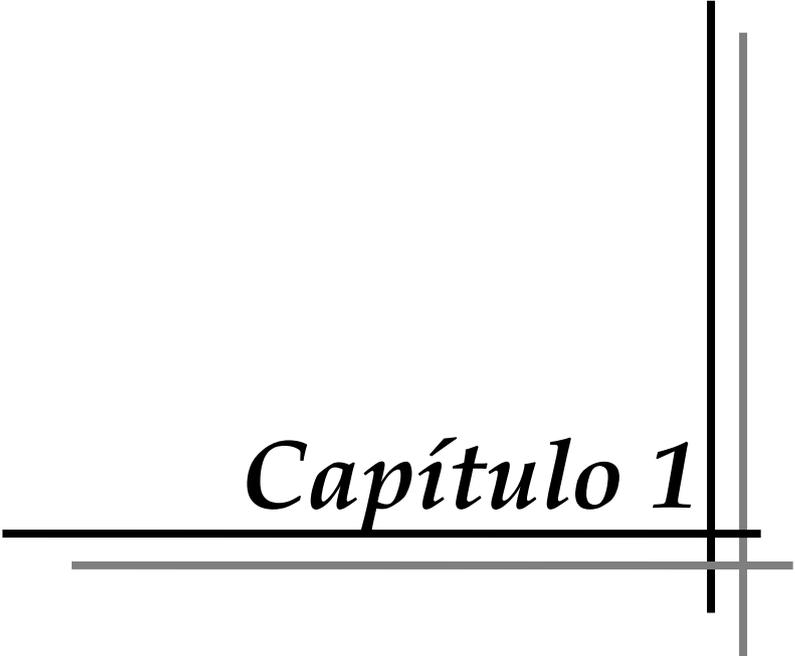
4.5 Análisis de los resultados

4.3 Conclusiones del capítulo

Resultados esperados

Una vez finalizado el trabajo se tendrá mayor conocimiento sobre cómo influye la profundidad de cimentación, en este novedoso sistema de cimentación, en el cálculo de asentamientos. Su empleo conducirá a la ejecución de proyectos más económicos, asociados generalmente a edificios en altura cimentados sobre suelos granulares y en particular sobre suelos arcillosos en estado normalmente consolidados o sobre consolidados. Además recientemente se ha aplicado en cimentaciones de puentes ferroviarios y de carreteras con especiales requerimientos de capacidad de servicio.

Capítulo 1



Capítulo 1: “Diseño de cimentaciones en balsas combinadas con pilotes, estados del arte.”

1.1 Introducción

Las cimentaciones profundas con pilotes son usadas, normalmente, cuando se construyen edificios de gran altura sobre suelos granulares y en particular sobre suelos arcillosos en estado normalmente consolidados, o mejor aún, sobre consolidados blandos. Las cimentaciones corridas, por su parte, se convierten en una alternativa viable cuando no existen varias capas de suelo. En este último caso, para evitar el asentamiento excesivo y diferencial y con el objetivo de garantizar proyectos más económicos, sin comprometer la seguridad y el comportamiento de la cimentación, una cimentación compuesta se ha vuelto muy popular en los últimos años. Esta consta de una cimentación corrida, generalmente de balsa, y un relativamente bajo número de pilotes de fricción y es llamado cimentación en balsa combinada con pilotes (BCP).

A pesar de que esta variante viene usándose en nuestro medio con cierta frecuencia, en la mayoría de los casos su proyecto se apoya en la intuición y experiencia del ingeniero más que en un análisis debidamente fundamentado.

El análisis de la interacción entre los tres elementos – balsa, pilotes y suelo – es de primordial importancia para la evaluación de los asentamientos del conjunto, sean uniformes o diferenciales. A su vez, una acertada predicción de los asentamientos es indispensable para verificar que los requerimientos en el estado de servicio se vean cumplidos. Resumidamente, la balsa y los pilotes son responsables de transferir las cargas actuantes al terreno, activando la capacidad portante de las distintas capas de este último. (Cudmani 2008).

Además de esto la cimentación en BCP tiene efectos positivos adicionales respecto a una balsa de cimentación única como:

- Aumento de la capacidad portante de la cimentación.
- Limitación de la descarga del suelo durante la ejecución de la excavación, debido a que los pilotes, que en esta etapa trabajan a tracción, previenen la liberación de tensiones en el mismo. Evitando los levantamientos excesivos de la base de la excavación.
- Reducción de las tensiones transmitidas al suelo a través de la balsa de cimentación mediante una adecuada elección del número y disposición de los pilotes.

- Reducción del riesgo de fallas o fisuras en elementos de la superestructura, en particular las fachadas de los edificios.
- Implementación de un bloque excéntrico que impide el volcamiento en el caso de cargas actuantes excéntricas, mediante un arreglo asimétrico de los pilotes.

En este capítulo se realizará un estudio detallado de los métodos propuestos para el análisis de cimentaciones en balsa combinadas con pilotes (BCP). Además se llevará a cabo un análisis de los factores que influyen en el proceso de diseño, de la aplicación de softwares basados en métodos numéricos y la comprobación de su validación, se conocerán las ventajas del uso de las hojas de cálculo en el proceso de diseño de cimentaciones en BCP y se analizará la influencia de la profundidad de cimentación en la disminución de asentamientos.

1.2 Breve reseña histórica del uso de BCP

A pesar de esta reciente actividad el concepto de cimentación en BCP no es nuevo ya ha sido descrito por varios autores como (Zeevaert 1957) quien sugirió la utilización de pilotes para reducir la ocurrencia de asentamientos en las cimentaciones superficiales en arcillas de México, además de (Davis and Poulos 1972), (Hooper 1973), (Burland 1977) y muchos otros.

Extensas investigaciones se han realizado a través de los años para examinar el comportamiento de las cimentaciones en BCP desarrollando múltiples métodos de análisis y diseño. Históricamente diversos autores basaron en ensayos reales y de laboratorio sus publicaciones.

En términos de capacidad de carga de cimentaciones en BCP (Kishida and Meyerhof 1965) fueron los primeros en considerar en sus estudios teóricos la contribución de la balsa apoyada sobre la superficie del suelo y los pilotes. A partir del análisis de un grupo de pilotes en arena sugerían dos formas posibles de fallo de estos grupos:

- Para pilotes muy espaciados la capacidad de carga de la cimentación sería: la capacidad de carga de la balsa más la capacidad de carga del grupo de pilotes, tomando en cuenta la sobrecarga en la punta provocada por la balsa.
- Para pilotes poco espaciados habrá una tendencia de ruptura de todos los pilotes en conjunto como si fuese un pilote único. En este caso la capacidad de carga del conjunto sería calculada como la capacidad de carga de el pilote equivalente añadiendo la capacidad de carga de la balsa.

En cuanto al comportamiento de carga vs asentamiento en una cimentación en BCP el primer trabajo teórico podría ser atribuido a (Poulos 1968) quien realizó estudios sobre

la influencia de la balsa en la disminución de asentamientos de un grupo de cimentaciones profundas.

Los trabajos de laboratorio realizados por (Akinmusuru 1973) tienen un gran valor histórico ya que realizó una serie de ensayos con modelos reducidos de BCP en arenas, anteriormente algunos autores habían realizado investigaciones teniendo en cuenta o no el contacto de los pilotes con la balsa pero él sería el primero en estudiar en el mismo suelo el comportamiento de este tipo de cimentación.

Además del trabajo de (Akinmusuru 1973), otros autores como (Whitaker 1961), (Ghosh 1975) y (Abdrabbo 1976) realizaron pruebas de laboratorio con cimentaciones en BCP.

(Cooke 1986) presenta un importante trabajo donde basado en la realización de ensayos en muestras de suelos arcillosos de Londres, variando el diámetro y el espaciamiento de los pilotes constata que una pequeña cantidad de pilotes es suficiente para reducir los asentamientos de la cimentación.

(Butterfield and Banerjee 1971a) analizaron el comportamiento de grupos de balsa con pilotes en contacto con el suelo, haciendo una comparación entre los valores de asentamiento obtenidos teniendo en cuenta o no el contacto con este.

(Ottoviani 1975) por su parte es el primero en emplear el método de elementos finitos en el análisis de las cimentaciones en BCP.

(Hain and Lee 1978), por su parte, son los primeros en hacer el análisis de BCP combinando más de un método. El método de elementos finitos y el de elementos de contorno.

(Randolph 1994) presenta un nuevo concepto donde los pilotes son colocados en el centro de la balsa de forma que el comportamiento flexible de esta se aproxime a uno rígido.

Como consecuencia de los resultados de estas investigaciones y el avance en el conocimiento de su comportamiento, las cimentaciones en BCP han sido usadas en muchos países en las últimas décadas, generalmente en la construcción de edificios de gran altura cimentados sobre suelos granulares particularmente arcillosos. (O'Neill 1996) presenta al Comité Técnico (TC-18) del ISSMFE (International Society on Soil Mechanics and Foundations Engineering) una relación de los principales casos históricos de obras encontradas en la literatura cuyas cimentaciones están conformadas por una cimentación en BCP, entre ellas podemos encontrar:

- *Westend Tower*: Rascacielos situado en Frankfurt, Alemania de 208m de altura. Estudios realizados revelaron que los momentos flectores experimentaron una reducción del 40% en la cimentación en BCP que en una balsa sin pilotaje.
- *Messe Turm Tower*: (1988-1991), Frankfurt, Alemania construido sobre suelos arcillosos. La inclusión de pilotes dio como resultado la reducción del asentamiento máximo en un 55%, la reducción del asentamiento diferencial en un 60% y la reducción de los momentos flectores en la balsa en un 35%.(El-Mossallamy and Franke 1997).
- *Messe-Torhaus*, Frankfurt, Alemania. Es el primer edificio en Alemania con una cimentación diseñada en BCP construido entre 1983 y 1986. Con una altura de 130 m fue en su tiempo el edificio más alto de Europa.
- *Edificio en Urawa, Japón*. Edificio de cinco plantas cimentado sobre arcilla que cuenta con una balsa de 0.3 m de espesor, 20 pilotes uno debajo de cada columna y 2.4 m de profundidad de cimentación. Según cálculos realizados utilizando el programa GARP, se comprobó que la balsa sin la presencia de pilotes experimentaría grandes asentamientos.

1.3 Métodos de diseño de BCP

En los últimos años debido al reconocimiento en el uso de pilotes para reducir los asentamientos en las balsas y los asentamientos diferenciales, muchos métodos han sido usados para el análisis y el diseño con el fin de simplificar los cálculos en cimentaciones con balsas, pilotes y cimentaciones en BCP.

El diseño y análisis de las cimentaciones en BCP son una tarea compleja debido al gran número de factores involucrados en la interacción balsa-pilotes-suelo.

Tras extensas investigaciones han sido publicados en las últimas décadas diferentes métodos de análisis divididos en varias categorías:

- Métodos simplificados o preliminares.
- Métodos detallados o numéricos.

1.3.1 Métodos simplificados o preliminares

Estos métodos resultan satisfactorios en la etapa de pre-dimensionamiento de la estructura. Con estos se puede, inicialmente, estimar los parámetros involucrados, como son: número, diámetro, longitud y disposición de los pilotes. Todos incluyen un

número de simplificaciones en relación al modelo del perfil del suelo y las condiciones de carga de la balsa. (Cudmani 2008)

Estos métodos pueden agruparse en las siguientes categorías:

- Correlaciones empíricas.
- Recurrencia a modelos de cimentaciones equivalentes:
 - Balsa equivalente
 - Pilote equivalente
 - Emparrillado de pilotes equivalente.
- Métodos basados en la teoría de la elasticidad.
- Apoyos independientes de los desplazamientos.

1.3.1.1 Correlaciones empíricas

Estas correlaciones empíricas permiten pronosticar el comportamiento carga-asentamiento de las cimentaciones BCP.

a) Capacidad de carga:

Muchos autores han presentado métodos para determinar la capacidad de carga como:

(Kishida and Meyerhof 1965) quienes sugieren que la capacidad de carga de una cimentación en BCP puede ser estimada mediante la fórmula:

$$Q_t = Q_g + Q_c \quad (1.1)$$

Donde:

Q_t : Capacidad de carga total de la cimentación

Q_g : Capacidad de carga del grupo de pilotes

Q_c : Capacidad de carga de la balsa

Los valores de Q_g y Q_c están en función de la forma prevista de ruptura que a su vez depende del espaciamiento entre pilotes.

(Akinmusuru 1973) por su parte presentó la ecuación:

$$Q_t = \alpha' Q_g + \beta Q_c \quad (1.2)$$

Donde:

α' : Factor de aumento de capacidad de carga del grupo de pilotes debido a la interacción balsa-suelo-pilote.

β : factor de incremento de la capacidad de carga de la balsa debido a la presencia de un grupo de pilotes.

(Liu 1985) con base a ensayos de campo realizados sugería que:

$$Q_t = N (\eta_s Q_s + \eta_b Q_b) + Q_c \quad (1.3)$$

Donde:

N: número de pilotes

Q_s : Capacidad de carga por desgaste lateral de un pilote aislado.

Q_b : Capacidad de carga de la punta de un pilote aislado.

η_s : factor de influencia de la carga del eje debido a la interacción balsa-suelo-pilote.

η_b : factor de influencia de la carga en la punta debido a la interacción balsa-suelo-pilote.

(Phung 1993) propone, generalizando la propuesta de (Liu 1985):

$$Q_t = N (\eta_{1s} \eta_{4s} Q_s + \eta_{1b} \eta_{4b} Q_b) + \eta_6 Q_c \quad (1.4)$$

Donde:

η_{1s} : Factor de influencia del desgaste lateral de los pilotes debido a pilote-suelo-pilote.

η_{4s} : Factor de influencia del desgaste lateral de los pilotes debido a la interacción balsa-suelo-pilote.

η_{1b} : Factor de influencia de resistencia de punta debido a la interacción pilote-suelo-pilote.

η_{4b} : Factor de influencia de resistencia de punta debido a la interacción balsa-suelo-pilote.

η_6 : Factor de influencia de capacidad de carga de la balsa debido a interacción balsa-suelo-pilote.

En todos estos métodos son presentados ábacos para diversos valores de “ α ” y “ η ” como base de ensayos realizados por cada autor para perfiles específicos de suelo.

(El-Mossallamy and Franke 1997) consideran la propuesta presentada por (Kishida and Meyerhof 1965) como un límite inferior y la ecuación de (Phung 1993) como límite superior. Sin embargo por su simplicidad sugieren adecuada la propuesta de los dos primeros como una aproximación inicial. Además en la gran mayoría de los casos la capacidad de carga no es un factor decisivo en la cimentación una vez que la balsa solo es capaz de soportar casi toda o toda la carga actuante.

b) Asentamiento medio:

No existe ninguna correlación específica para determinar los asentamientos de las cimentaciones en BCP, generalmente son usadas correlaciones para grupos de pilotes, este procedimiento está justificado por algunos autores basados en el hecho de que en la mayoría de los casos, estos soportan la mayor cantidad de carga y por tanto definirán el asentamiento de la cimentación. Por simplicidad las correlaciones se expresan en torno al factor de asentamiento (R_s) que es la razón entre el asentamiento del grupo de pilotes y el pilote individual.

(Skempton 1953) dio a conocer el siguiente factor para grupos de pilotes hincados en arena homogénea, en base a mediciones del asentamiento:

$$R_s = \left(\frac{4B + 9}{B + 12} \right)^2 \quad (1.5)$$

Donde:

B: longitud del grupo de pilotes (en metros)

(Meyerhof 1959) propuso para un grupo cuadrático de pilotes hincados en arena el factor:

$$R_s = \frac{c \left(5 - \frac{c}{3} \right)}{\left(1 + \frac{1}{n^2} \right)^2} \quad (1.6)$$

Donde:

C= S/D: relación espaciamento/diámetro del pilote

n_r : número de líneas de pilotes

A su vez (Vesic 1969) presentó una relación aún más simple, también en pilotes hincados en arena:

$$R_s = \sqrt{\frac{B}{D}} \quad (1.7)$$

Donde:

B: longitud del grupo de pilotes (en metros)

D: diámetro del pilote

(Poulos and Davis 1980.) propusieron una serie de ábacos para la determinación de R_s considerando factores de interacción entre pilotes. Estos factores fueron calculados por el Método de Elementos de Contorno (M.E.C.)

1.3.1.2 Recurrencia a modelos de cimentaciones equivalentes

Los modelos de sustitución son empleados en el caso de una cimentación en BCP de planta sencilla, de manera que puedan ser calculados con el auxilio de métodos disponibles corrientes, como por ejemplo los aplicables a cimentaciones con balsa única.

Según este método, se realiza una abstracción de la cimentación BCP, llevando a cabo el cálculo con un modelo simplificado, sea a través de una balsa equivalente o por el contrario, a través de un pilote sustituto de gran diámetro.

a) Balsa equivalente:

En este método, donde el objetivo es determinar el asentamiento de una cimentación en BCP, esta se reemplaza por una balsa sustituta que se ubica a una determinada profundidad por debajo de la balsa real, cuya planta es determinada en base al perímetro de los pilotes externos, incluyendo a veces un suplemento perimetral adicional.

El asentamiento de la cimentación en BCP resulta en este caso de la suma del asentamiento de la balsa sustituta (calculado por la teoría de la elasticidad considerando un semi-espacio isótropo) más el acortamiento de los pilotes, que tiene lugar en la longitud entre la balsa real y la balsa sustituta. Dicha longitud (Z) está comprendida en general entre los límites siguientes:

$$0.67 L \leq Z \leq L$$

Numerosos autores han hecho sus variaciones de este método entre ellos se encuentran: (Terzaghi 1943), (Randolph 1994), (Thaher and Jessberger 1990), entre otros.

La propuesta básica es la sugerida por (Terzaghi 1943), quien considera un grupo de pilotes equivalente a una balsa situada encima de la punta de los pilotes a una distancia de $1/3$ de la longitud de los pilotes. A partir de esta hipótesis serían calculados los incrementos de tensiones utilizándose la teoría de la elasticidad y el asentamiento medio de la cimentación o el método de espaciado de tensiones en la proporción 2:1. (Randolph 1994), sugirió una modificación para incorporar el tamaño de la balsa (Figura 1.1):

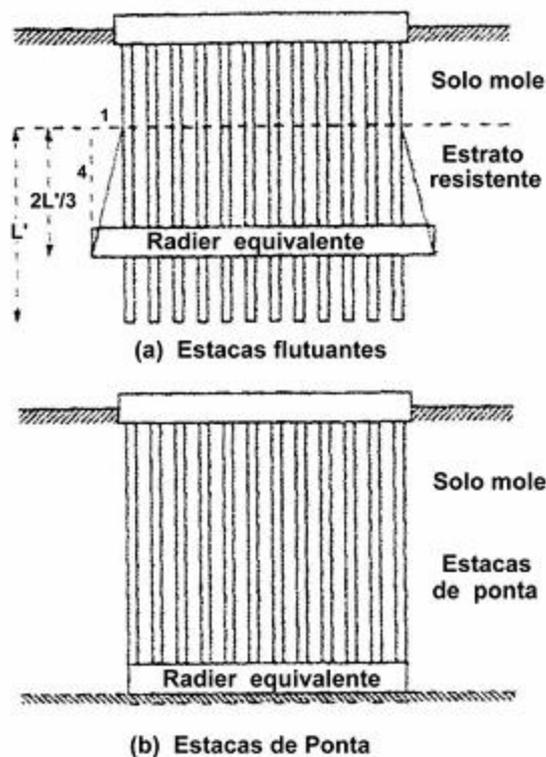


Figura 1.1: Balsa equivalente. Proporción de Randolph (modificado- (Randolph 1994))

(Poulos 1993a) analizando algunos casos de grupos de pilotes sugirió que este método sería más aplicable para pequeños grupos de pilotes (menos de 16 pilotes).

(Thaher and Jessberger 1990), sugerían un “método de balsa equivalente modificado” para calcular el asentamiento de una BCP donde la carga aplicada es transferida a suelo a través de varias balsas en diversas profundidades en vez de una única posición.

A pesar de que este método dio buenos resultados para el caso analizado por estos autores, su utilización no fue tan simple como sería la idea básica de un método simplificado.

La aplicación del método de la balsa sustituta está limitada a estimar el asentamiento de la cimentación en BCP, en particular en los casos de una gran balsa de cimentación y pilotes escasamente distanciados entre sí. Sin embargo, no es factible conocer la distribución de la carga exterior entre la balsa de cimentación y los pilotes, ni de la sollicitación de estos últimos dentro del grupo, lo cual resulta imprescindible para encarar el dimensionado.

b) Pilote equivalente:

La alternativa es trabajar con un pilote sustituto, este reemplaza al grupo de pilotes reales, determinándose su diámetro y rigidez mediante expresiones aproximadas y

operando con éste en la forma convencional. Este método fue propuesto por (Poulos and Davis 1980.) y modificado por (Poulos 1993a).

El grupo de pilotes es reemplazado por un pilote único con diámetro (d_e), o longitud (L_e) y rigidez equivalente. Este concepto fue ilustrado por (Poulos 1993a), Figura 1.2:

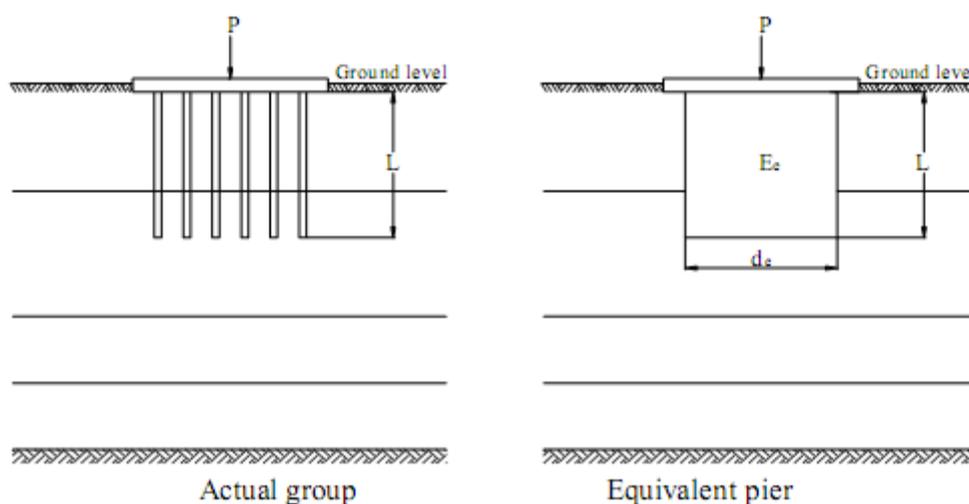


Figura 1.2: Concepto de pilote equivalente. (Poulos 1993a)

L_e es la longitud de empotramiento, mientras que d_e es más apropiado cuando los pilotes pasan a través de diferentes estratos de suelo de materiales diferentes. Para grupos de pilotes flotantes, para los casos más prácticos L_e/L está entre 0.9-0.6 para varias capas de suelo:

Para pilotes de fricción:

$$d_e = 1.27 A_G^{0.5} \quad (1.8)$$

Para pilotes donde predomina la carga en la punta:

$$d_e = 1.13 A_G^{0.5} \quad (1.9)$$

Donde:

A_G : área de la figura plana circunscrita en el grupo de pilotes.

El módulo elástico equivalente de los pilotes es aproximadamente:

$$E_e = E_p \frac{A_p}{AG} + E_s \left(1 - \frac{A_p}{AG}\right) \quad (1.10)$$

Donde:

E_p : Módulo de elasticidad de los pilotes

E_s : valor medio del módulo de elasticidad del suelo dentro del grupo.

A_p : suma de las secciones transversales de los pilotes en el grupo.

El método tampoco contempla la distribución de cargas entre la balsa y los pilotes, es decir posee la misma deficiencia señalada en el caso anterior.

(Randolph 1994) comparó la solución de pilote equivalente con métodos numéricos para diversos valores de espaciamiento, longitud en grupos de hasta 289 pilotes y consideró bastante razonable la solución estimada por el método del pilote equivalente en términos de análisis simplificado y preliminar y llegó a la conclusión de que en general el método tiene una leve tendencia a sobreestimar los asentamientos previstos.

c) Emparrillado de pilotes equivalente

Para grupos de pilotes existe la propuesta de (Schiel 1970) que considera el grupo como un emparrillado despreciando la presencia de suelo entre pilotes. Para cimentaciones en BCP una extensión de este método fue propuesta por (Desai, Kuppusamy et al. 1981). Esos autores presentaron una solución donde además del pórtico representado por los pilotes y la balsa, el suelo es considerado como un medio de Winkler, sustituido por una serie de muelles.

Esta hipótesis no considera la interacción de los diversos elementos, una vez que el medio de Winkler no transmite esfuerzos entre los elementos.

(El-Mossallamy and Franke 1997) afirman que este método puede dar resultados satisfactorios en cuanto a los esfuerzos internos de la balsa.

(Poulos 1999) muestra que el modelo de Winkler, aplicado en el análisis de una balsa, desprende resultados razonables en cuanto a los esfuerzos internos cuando se trata de una sola carga puntual aplicada. A medida que el número de puntas de carga aumenta, siendo la carga distribuida un límite extremo, la diferencia de los resultados del modelo de Winkler, en relación a métodos más precisos, pasa a ser muy representativo y por tanto debería ser utilizado en estos casos.

Obviamente todos los métodos de simplificación citados anteriormente tienen un mejor resultado en ciertos tipos de suelo que en otros, pero como plantea (Poulos 1993a):
“Las imprecisiones que trae consigo el uso de métodos aproximados, generalmente, son menos significativas que las incertidumbres envueltas en la determinación de los parámetros geotécnicos”

1.3.1.3 Métodos basados en la teoría de la elasticidad

Otros métodos analíticos se basan en la teoría de la elasticidad. Cabe mencionar las contribuciones de (Randolph and Wroth 1983) que propusieron un procedimiento analítico simplificado para determinar la relación carga-asentamiento de pilotes individuales, en grupo y en cimentaciones en BCP. Otros autores presentaron soluciones elásticas entre los más populares se puede encontrar el *Método Poulos-Davis-Randolph (PDR)*:

Este método es muy conveniente para estimar el comportamiento carga-asentamiento, involucra dos pasos principales:

- Cálculo de la capacidad de carga final de la cimentación.
- El cálculo del comportamiento carga - asentamiento.

Para estimar el comportamiento de la curva carga-deformación en la cimentación balsa combinada con pilotes, se aplican las expresiones propuestas por (Randolph 1994) y se determina la rigidez de la BCP como:

$$K_{p\text{g}} = \frac{K_p + K_r(1 - \alpha_{cp})}{1 - \alpha_{cp}^2 (K_r/K_p)} \quad (1.11)$$

Donde:

$K_{p\text{g}}$: Rigidez de la cimentación balsa + pilote

K_p : Rigidez del grupo de pilotes

K_r : Rigidez de la balsa

α_{cp} : Factor de interacción balsa pilote

La porción de la carga total que toma la balsa se expresa como:

$$\frac{P_r}{P_t} = \frac{K_r(1 - \alpha_{cp})}{(K_p + K_r(1 - \alpha_{cp}))} = X \quad (1.12)$$

Donde:

P_r : Carga tomada por la balsa

P_t : Carga total aplicada

El factor de interacción balsa pilote se puede determinar de la siguiente forma:

$$\alpha_{cp} = 1 - \ln\left(\frac{r_c}{r_0}\right) / \xi \quad (1.13)$$

Donde:

r_c : Radio medio de la “gorra” del pilote (correspondiente a un área igual al área de la balsa dividida entre el número de pilotes)

r_0 : Radio del pilote

$$\xi = \ln(r_m / r_0) \quad (1.14)$$

$$r_m = (0.25) \xi + [2.5 \rho (1 - \mu) - 0.25] * L \quad (1.15)$$

$$\xi = E_{sl} / E_{sb} \quad (1.16)$$

$$P = E_{sav} / E_{sl} \quad (1.17)$$

Donde:

μ : relación de tierra de Poisson

L: longitud del pilote

E_{sl} : módulo de elasticidad del suelo al nivel del pilote

E_{sb} : módulo de elasticidad del estrato de suelo debajo de la punta del pilote

E_{sav} : valor medio del módulo de Young del suelo a lo largo del eje del pilote

Estas ecuaciones pueden ser utilizadas para desarrollar una curva carga vs asentamiento como se muestra en la Figura 1.3. La rigidez de la balsa se calcula por la ecuación (1.11) para el número de pilotes considerado, esta rigidez quedará en vigencia hasta que la capacidad de pilote sea movilizada completamente. Asumiendo la simplificación de que la movilización de la carga del pilote ocurre simultáneamente, la carga total aplicada P_1 está dada por:

$$P_1 = \frac{P_{up}}{(1 - X)} \quad (1.18)$$

Donde:

P_{up} : capacidad de carga última de los pilotes en el grupo

X: proporción de carga tomada por la balsa. (ecuación (1.12))

Las curvas de carga vs asentamiento para una balsa con varios pilotes puede ser computada con la ayuda de hojas de cálculo o programas matemáticos como el MATLAB.

De este modo, es simple determinar la relación entre el número de pilotes y el asentamiento medio de la cimentación. Estos cálculos constituyen medios rápidos para valorar si las filosofías de diseño para cimentaciones con pilotes son viables.

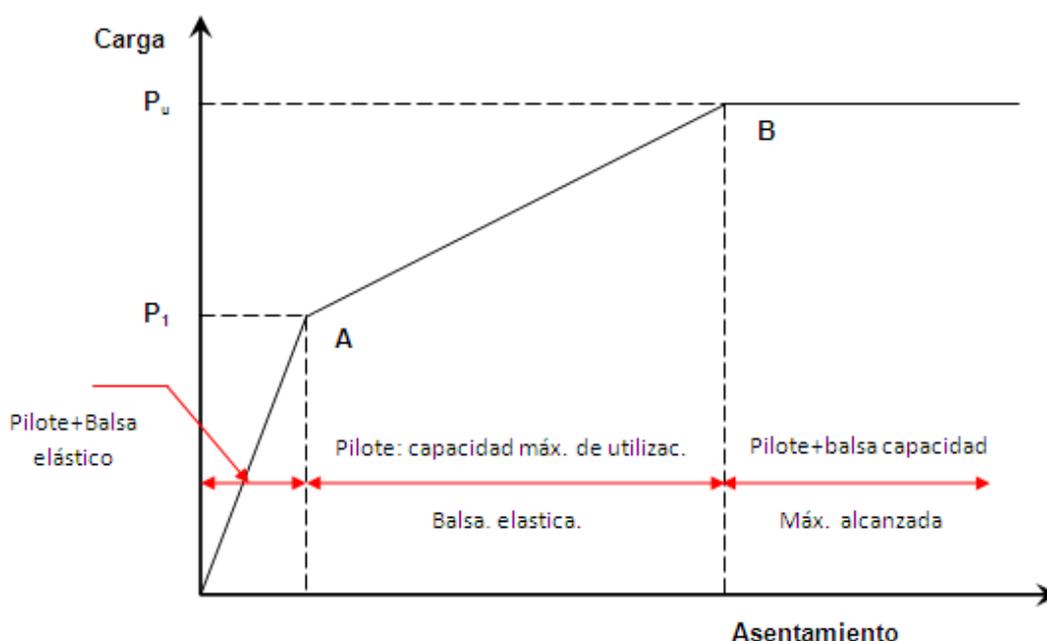


Figura 1.3: Curva de carga vs asentamiento simplificada para análisis preliminar.
(Poulos 2001)

1.3.1.4 Apoyos independientes de los desplazamientos.

Una de las formas más simples de estimar el comportamiento de una cimentación BCP es la conocida como: principio de los apoyos independientes de los desplazamientos. Se basa en determinar en primer lugar la carga para la cual la balsa experimenta asentamientos admisibles, despreciando la colaboración de los pilotes.

Se asigna luego el resto de la carga exterior a los pilotes, para lo cual se admite que los desplazamientos son de tal magnitud, que se alcanza la totalidad de la carga portante de los mismos. Por lo tanto, todos los pilotes pueden ser dimensionados como si se tratara de un pilote individual, y a su vez, la balsa puede dimensionarse con la carga ya determinada mediante métodos convencionales. Obviamente, esta forma

de análisis desprecia por completo toda interacción entre los elementos de la cimentación en BCP y el suelo, en particular las interacciones pilote-pilote y balsa-pilotes, las cuales en rigor dominan el comportamiento de una cimentación en BCP. A pesar de ello, este método se usa con frecuencia con motivo de su relativa sencillez y facilidad de aplicación. (Cudmani 2008)

1.3.2 Métodos detallados o numéricos.

En las últimas décadas se ha observado un progreso notable en el desarrollo de métodos numéricos. Para la solución de una cimentación BCP se han aplicado los Métodos de los Elementos Finitos, de Diferencias Finitas, de Elementos de Contorno. Este desarrollo ha posibilitado tener en cuenta influencias complejas en el análisis, tales como el comportamiento no lineal del suelo, la rigidez real de los elementos estructurales y casos generales de sollicitación.

Los métodos numéricos disponibles para el análisis de cimentaciones en BCP pueden ser agrupados de la siguiente manera:

- Análisis con métodos de Elementos de Contorno (en lo adelante MEC)
- Análisis con métodos de los Elementos Finitos (en lo adelante MEF)
- Análisis con métodos mixtos o híbridos.

1.3.2.1 Análisis con métodos de Elementos de Contorno

Este método es una herramienta muy poderosa que puede ser utilizada en aplicaciones de ingeniería cuando solo el contorno debe ser discretizado, incluye la solución de un conjunto de ecuaciones integrales.

La solución numérica es inicialmente obtenida en los contornos y posteriormente son inferidos los valores en los puntos inferiores del dominio en cuestión.

Estas soluciones parten de la ecuación de (Mindlin 1936) para una carga puntual en un semi-espacio elástico. Como consecuencia de este hecho la heterogeneidad del suelo, su no-linealidad y la interacción pilote-suelo solo pueden ser consideradas de manera aproximada. Además casi la totalidad de los trabajos publicados por varios autores consideran la balsa como rígida que puede no ser una situación real.

Dentro de los principales trabajos se pueden encontrar:

- (Butterfield and Banerjee 1971a): analizaron el comportamiento de grupos de pilotes con balsa (rígida) en contacto con el suelo. Este trabajo se usa actualmente como punto de comparación con cada método nuevo que surge.

- (Kuwabara 1989): desarrolló un programa utilizando el MEC y describió el análisis de una balsa rígida combinada con pilotes en un medio semi-elástico llegando a algunas interesantes observaciones:
 - La relación carga-asentamiento es levemente mayor para una cimentación en BCP cuando se comparan un grupo de pilotes sin tener en cuenta el contacto con la balsa.
 - Pilotes con alta compresibilidad, con relación al suelo, implican una disminución de la cantidad de carga que llega a la punta de los pilotes.

1.3.2.2 Análisis con métodos de los Elementos Finitos

Reconocido ya por muchos (Poulos 1993; El-Mossallamy and Franke 1997), este método está siendo muy utilizado en el estudio de las cimentaciones BCP, ya que constituye una herramienta de mayor potencialidad para la consideración de diversos factores que intervienen en el análisis de este tipo de cimentación.

Actualmente muchos autores buscan comparar soluciones obtenidas por métodos simplificados con las obtenidas por el MEF.

(Ottoviani 1975) fue el primero en utilizar este método en una cimentación compuesta utilizando un modelo elástico-lineal para un suelo con o sin tener en cuenta el contacto balsa-suelo. Ottaviani llegaba a la conclusión de que la balsa absorbía parte de la carga aplicada y funcionaría como mecanismo de transferencia de carga al suelo por los pilotes. La presión de contacto de la balsa de la superficie del suelo reduce considerablemente las tensiones de cizallamiento próximas a la parte superior de los pilotes y al mismo tiempo aumenta las tensiones verticales del suelo próximo a la punta de los pilotes.

En las últimas décadas otros autores usaron análisis más complejos con el MEF, por ejemplo (Katzenbach 1994) y (Reul 1998) emplearon análisis 3-D con modelos consecutivos elasto-plásticos para la cimentación del edificio Treptowers en la ciudad de Berlín, Alemania. Entre otros autores podemos encontrar: (Smith and Wang 1998), (Randolph and Reul 2004), (Maharaj and Gandhi 2004).

El análisis de una cimentación en BCP se constituye básicamente de un problema tridimensional y cuando se decide incorporar características como la no linealidad del suelo o un modelo más sofisticado la solución puede demandar una gran cantidad de tiempo (Poulos 1993a). Con la creciente evolución de los equipamientos computacionales esta barrera de tiempo ha sido minimizada continuamente y ciertamente el MEF pasará a ocupar una parte cada vez mayor entre los análisis numéricos de las cimentaciones en BCP en un futuro próximo.

1.3.2.3 Análisis con métodos mixtos o híbridos.

Buscando superar las limitaciones que cada uno de los métodos anteriores ofrecen, varios autores proponen métodos para el análisis de cimentaciones en BCP combinando más de una herramienta matemática.

(Hain and Lee 1978) fueron los primeros en esta línea de trabajo. Ellos presentaron un trabajo que discretiza la balsa en elementos de balsa por el M.E.F., para considerar la rigidez de la misma y el conjunto suelo-pilotes fue analizado por el M.E.C. Entre los principales comentarios aportados están:

- Con la inclusión de pocos pilotes bajo la balsa se produce una importante reducción de los asentamientos del conjunto.
- Cuanto más rígida es la balsa mayor será el momento generado y mayor la desigualdad de cargas entre pilotes.

(Poulos 1994) presentó el programa GARP (Geotechnical Analysis of Raft with Piles), donde la balsa es analizada por el método de las diferencias finitas y los pilotes son representados por muelles equivalentes donde fueron consideradas todas las formas de interacción a través del método de superposición de campos de deformación. El programa incorpora algunas técnicas que permite simular:

- Heterogeneidad del perfil de suelo.
- Límite de presión en el subsuelo.
- Pilotes con diferentes propiedades dentro del mismo sistema de cimentación.
- Imposición de campos de deformación del suelo para simular efectos de consolidación y expansión.

(El-Mossallamy and Franke 1997) presentan un programa combinando el MEF para la balsa y el análisis de la relación suelo-pilotes por el M.E.C.

Muchos otros autores vienen usando esta técnica de análisis mixto cuya representación de la balsa por el MEF posibilita incorporar los efectos de la flexibilidad. Para la representación del conjunto suelo- pilotes se emplea generalmente el MEC, para incorporar los efectos de todas las interacciones se debe dar resolución a gigantescos sistemas e ecuaciones.

1.4 Factores que influyen en el diseño de BCP

1.4.1 Cantidad de pilotes.

Uno de los más importantes usos del análisis de las cimentaciones BCP es el conocer cuántos pilotes son necesarios para alcanzar el comportamiento requerido.

Con la adición de un pequeño número de pilotes se produce un efecto significativo en la reducción del asentamiento de la balsa, sin embargo según estudios realizados por varios autores cuando se adicionan un mayor número de pilotes la reducción de estos asentamientos es muy pequeña, casi insignificante, provocando proyectos antieconómicos, es por esto que a la hora de realizar el diseño de una cimentación BCP se debe lograr alcanzar el número de pilotes mínimo para lograr un asentamiento entre los límites tolerables.

(Hansbo and Källström 1983) presentan una estrategia llamada “Creep Piling” para suelos cohesivos relativamente blandos, en esta forma de proyecto cada pilote deberá absorber una carga que corresponde a un 70-80% de su capacidad de carga última donde por lo tanto alguna deformación plástica “creep” debe ocurrir. La cantidad de pilotes es calculada de tal forma que la presión del suelo debajo de la placa no sobrepasa la presión de la arcilla.

La cimentación es dimensionada como una balsa, mas los asentamientos son reducidos por la inclusión de pilotes como reductores de asentamiento distribuidos uniformemente de manera espaciada debajo de la balsa.

(Hansbo and Källström 1983) presentan el desempeño de dos edificios similares donde en uno se emplea un diseño convencional con 211 pilotes y en el otro utilizando el concepto de “Creep Piling” donde solamente 104 pilotes fueron necesarios observándose una pequeña diferencia entre los asentamientos de estas dos estructuras y una reducción de más del 50% de los pilotes empleados.

Otro de los conceptos de diseño más utilizados es el presentado por (Randolph 1994) donde con la adición de pocos pilotes en la región central de la balsa se reducen o anulan los asentamientos diferenciales. En esta forma de diseño los pilotes son posicionados en el centro de la balsa de forma que su comportamiento flexible se aproxime a uno rígido.

1.4.2 Longitud de los pilotes

Los asentamientos y asentamientos diferenciales además de los momentos máximos decrecen con el aumento de la longitud de los pilotes mientras que la proporción de carga tomada por los pilotes aumenta. Esto fue comprobado (Poulos 2001) utilizando

el método PDR para una cimentación con una balsa de 0.5m de espesor, 9 pilotes y una carga de 12 MN, fue variando la longitud de los pilotes para observar su influencia en el asentamiento diferencial, el momento máximo en la balsa, el porcentaje de carga asumida por los pilotes y el asentamiento máximo. Figura 1.4:

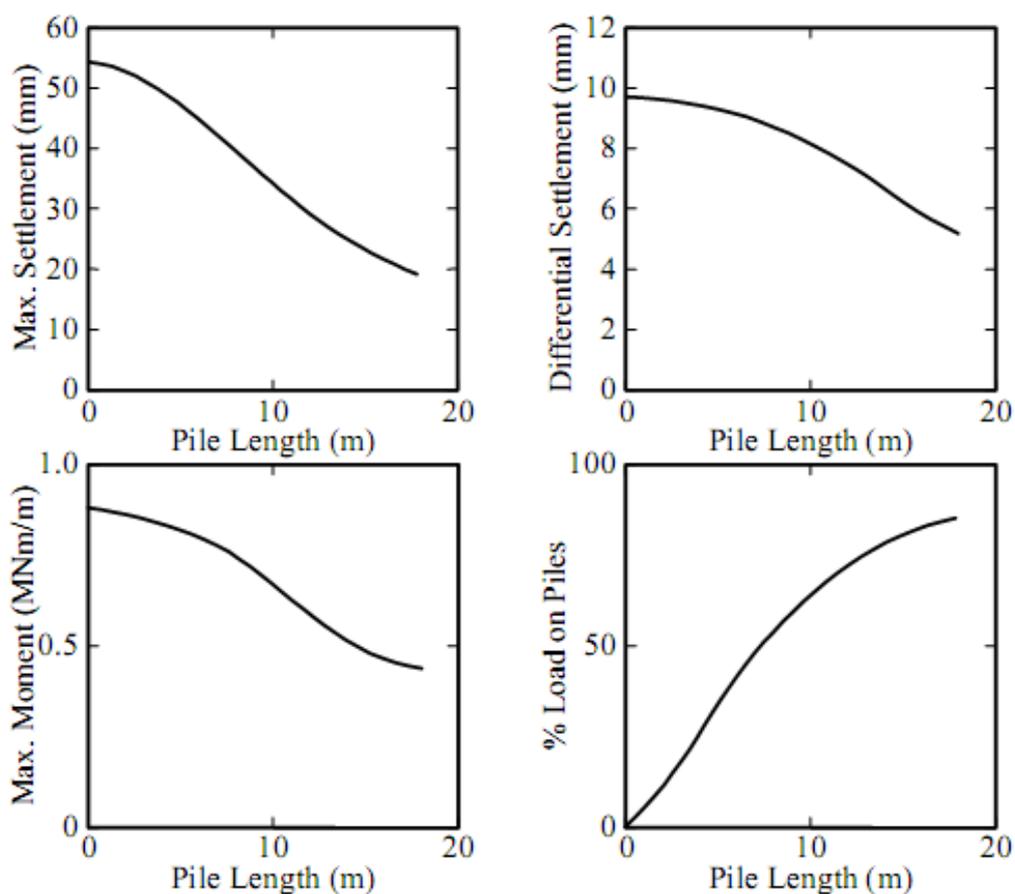


Figura 1.4: Efecto de la longitud de los pilotes en el rendimiento de la cimentación para un espesor de 0.5m , 9 pilotes y una carga de 12 MN. (Poulos 2001)

Efecto del espaciado de los pilotes:

Para una balsa de área determinada el asentamiento, el asentamiento diferencial y el momento máximo en la balsa se incrementan mientras el espaciado entre los pilotes se hace mayor. El grado de este efecto es muy diferente entre grandes grupos de pilotes y pequeños. Para pequeños grupos de pilotes a medida que el espaciado se va haciendo mayor el asentamiento diferencial y el momento máximo en la balsa aumentan significativamente mientras que el asentamiento y el porcentaje de carga tomada por los pilotes aumenta moderadamente. Sin embargo, estas cantidades incrementan poco para grupos de pilotes más grandes. O sea asumir un espaciado de pilotes más grande parece ser aceptable para grupos de

pilotes grandes tomando en consideración el asentamiento, momento máximo, y el compartimiento de carga entre los pilotes y la balsa.

1.4.3 Forma de la cimentación.

De acuerdo con (Poulos 2001), (De Sanctis 2001) y (Viggiani 2001) las cimentaciones en BCP se distinguen en dos tipos:

- Pequeñas: BCP donde la razón principal para añadir los pilotes es aumentar el factor de seguridad (esto incluye balsas típicamente con los anchos entre 5 y 15 m)
- Grandes: BCP donde la capacidad de carga de la losa es suficiente para soportar la carga aplicada con un margen de seguridad razonable, pero los pilotes son requeridos para reducir los asentamientos o asentamientos diferenciales. En este caso el ancho de la balsa es grande en comparación con la longitud de los pilotes (típicamente, el espesor de los pilotes excede su longitud).

Los pilotes por su parte pueden tener sección:

- Circular
- Cuadrada
- Tubular
- Octagonal
- Sección H

1.4.4 Rigidez de la balsa.

Las balsas transmiten las cargas de las columnas y paredes de la estructura sobre el área más amplia posible y el asentamiento diferencial puede ser minimizado o controlado variando la rigidez de la balsa.

Según análisis realizados por (Poulos 2001) utilizando el programa GARP para una cimentación en BCP con 9 pilotes soportado por una balsa de espesor variable mostrada en la Figura 1.5, excepto por balsas muy finas el asentamiento máximo no se ve grandemente afectado por el espesor de estas mientras que el asentamiento diferencial decrece significativamente con el aumento del espesor de la balsa. Sin embargo el momento máximo en la balsa aumenta con el aumento del espesor de la balsa. Además la proporción de carga tomada por los pilotes es insensible al espesor de la balsa a partir de los 0.8m de espesor.

De los resultados obtenidos se puede concluir que el incremento del espesor de la balsa es efectivo primeramente en la reducción del asentamiento diferencial, puede

ser beneficioso también en la resistencia de las fuerzas de cizallamiento de los dos pilotes y columnas de carga.

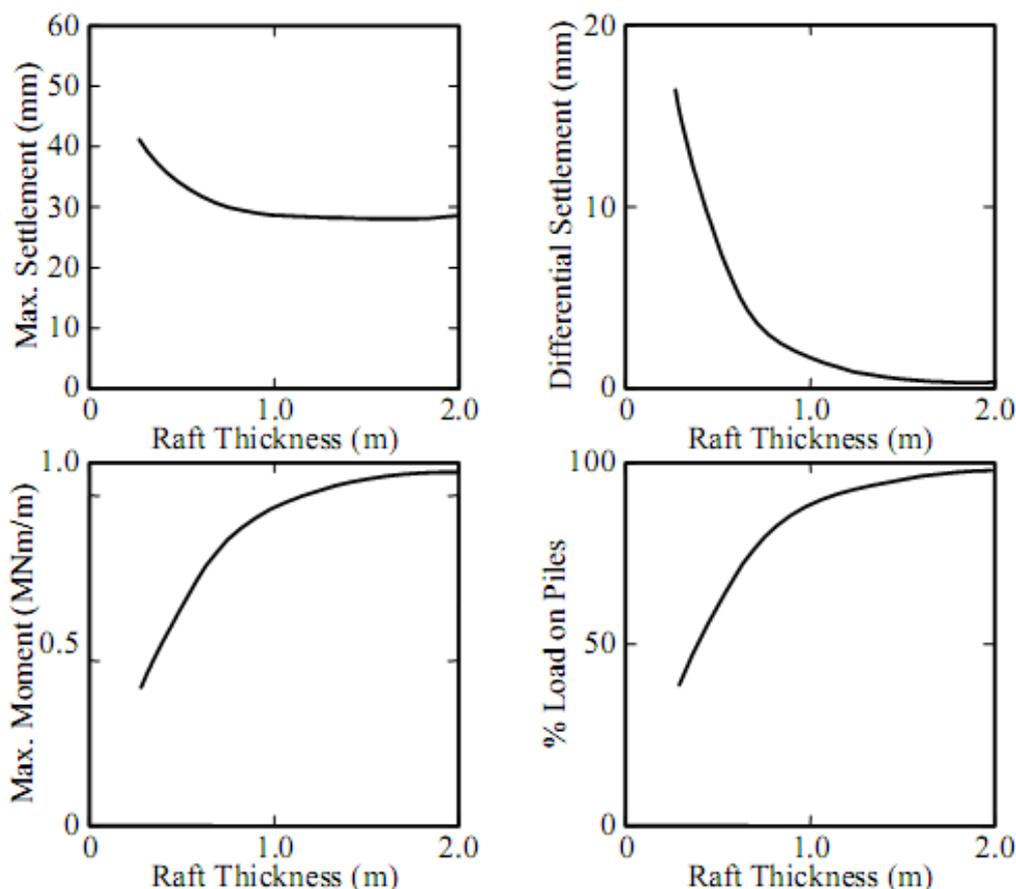


Figura 1.5: Efecto del espesor de la losa en el rendimiento de la cimentación. Balsa con 9 pilotes, 10m de longitud, carga de 12 MN. (Poulos 2001)

1.4.5 Profundidad de Cimentación.

La construcción de la cimentación tiene un gran efecto en el comportamiento futuro de la misma. Los pilotes se pueden colocar antes o después de la excavación. Los asentamientos en la cimentación teniendo en cuenta la forma de construcción dependen de factores como el proceso de excavación, el tiempo entre el fin de la excavación y la construcción de la balsa, la variación del nivel freático y el tiempo de la construcción.

En función de estos aspectos se definen tres etapas en el comportamiento de la cimentación en BCP:

Etapa 1: etapa en el que el suelo se considera sobre consolidado, las tensiones generadas por la construcción de la balsa son menores a las resistidas por el suelo en su vida geológica.

Etapa 2: etapa en que comienza actuar toda la carga de la estructura. Se considera los parámetros de suelo no drenado.

Etapa 3: período después de la construcción. Se trabaja con los parámetros del suelo drenado.

En la medida en que aumenta la profundidad de cimentación, esta se comporta como un cimiento compensado, disminuyendo los asentamientos. Esto evidencia otras de las ventajas de las cimentaciones en BCP, al combinarse con la excavación de grandes volúmenes de suelo, logra una cimentación eficiente desde el punto de vista de resistencia y deformación. (Ibañez 2011).

1.5 Cálculo de asentamientos en cimentaciones compensadas. Aplicación en BCP.

Las cimentaciones totalmente compensadas son aquellas en que la que el peso de la estructura es igual a la carga del material excavado, en donde se va a construir la cimentación que soportará dicha estructura. Por su parte las cimentaciones parcialmente compensadas pueden ser de dos tipos:

- Cimentación sub compensada: El peso de la estructura es menor que la carga del material excavado.
- Cimentación sobre compensada: El peso de la estructura es mayor que la carga del material excavado.

El empleo de cimentaciones compensadas inicialmente se remonta a la necesidad de garantizar estructuras de cimentación en suelos muy compasibles, donde se garantice el criterio de deformación, sin la necesidad de acudir a cimentaciones sobre pilotes (Juárez 1969), (Jimenez Salas 1986).

En cimentaciones compensadas total o parcialmente se busca reducir los incrementos de esfuerzos netos a distintas profundidades, por medio de una excavación (sótano). Para ello, en el cálculo de los asentamientos deberá restarse a los esfuerzos transmitidos por la estructura, el esfuerzo producto del material excavado. Adicionalmente, deberá trabajarse con los rangos de pre consolidación de las curvas esfuerzo deformación, en las áreas donde la remoción de la carga haya producido pre consolidación del material. Debe verificarse que la presión neta tenga un factor de seguridad mínimo de 1.5 contra asentamientos, respecto a la presión pre-

consolidación en los suelos influenciados por el cajón de sótano, con el fin de evitar asentamientos excesivos. (Código Cimentaciones. Costa Rica).

Deformaciones del suelo en una cimentación parcialmente compensada:

La remoción de la sobre carga cuando se excava al nivel de la cimentación causa una expansión del fondo de la excavación. Después de aplicar la carga el suelo se re-comprime, después de que la carga se incrementa hasta la presión original de la sobrecarga, ocurre la re-compresión inmediata. Estos movimientos son insignificantes en caso de cimentaciones poco profundas pero se deben tomar en cuenta en cimentaciones profundas. (Tomlinson 1986)

Si el nivel de cargas aplicadas al suelo supera a la presión excavada, se presentan asentamientos inmediatos y asentamientos diferidos por re-compresión y compresión debidos al incremento neto de carga, este incremento se determina con las siguientes expresiones:

$$\Delta q_{\text{neta}} = q_{\text{máx}} - q_{\text{exc}} \quad (1.19)$$

$$\Delta q_{\text{neta}} = q_{\text{media}} - q_{\text{exc}} \quad (1.20)$$

Donde:

Δq_{neta} : incremento neto de carga.

$\Delta q_{\text{máx}}$: presión máxima aplicada. Esta se utiliza para el cálculo de asentamientos inmediatos.

Δq_{media} : presión que actúa durante la vida útil de la obra

Δq_{exc} : suma de la presión por peso propio a nivel de desplante de la cimentación

Expansión del fondo de la excavación:

Las expansiones inmediatas son de tipo elástico por lo que se calculan usando la teoría elástica. La deformación lineal se calcula como:

$$\delta_z = \left(\frac{H}{E_e} \right) [\sigma - \mu (\sigma_x + \sigma_y)] \quad (1.21)$$

Donde:

E_e : módulo tangente inicial de deformación del suelo se puede obtener mediante pruebas de compresión axial

Asentamientos inmediatos por re-compresión:

Se calcula con la teoría de la elasticidad, de forma similar al de las expansiones solo que ahora el signo de los esfuerzos son de compresión.

Asentamientos inmediatos por compresión debido al incremento neto de carga:

Se calcula con la teoría de la elasticidad considerando el módulo de deformación (E) correspondiente.

En el caso de cimentaciones en balsa combinada con pilotes, se busca que los pilotes tengan efecto de reducir los asentamientos, sin embargo, combinado el uso de pilotes con la compensación, se alcanzan resultados satisfactorios, disminuyendo a su vez la longitud de los pilotes y por tanto el costo de la construcción.

1.6 Aplicación de Métodos Numéricos

El análisis de una cimentación en BCP no es un para nada simple debido a que es un problema tridimensional, envuelve la asociación de varios elementos con diferentes respuestas de carga vs asentamiento, etc. Es por esto necesario el empleo de análisis más rigurosos como el método de los Elementos Finitos (MEF) y el método de Elementos de Contorno (MEC). Estos métodos han sido empleados por diferentes autores como (Randolph and Reul 2004) quienes presentaron un análisis basado en el MEF de edificios situado en Frankfurt, Alemania.

En los últimos años varios autores han desarrollado programas computacionales que combinan más de un método y adoptan hipótesis más simples para facilitar el estudio de cimentaciones con pilotes y en BCP. Entre ellos podemos encontrar:

- GARP6 (General Analysis of Rafts with Piles) (Small and Poulos 1998).
- ALLFINE (Farias 1993)
- HyPR (Clancy and Randolph 1993)
- NAPRA (Russo 1995)
- PIRAF, (Ta and Small 1996)
- Plaxis 3D Foundation (1987)
- Tief (2008). Entre otros

Estos softwares han sido empleados por diferentes autores como (Cunha, Neusa et al. 2004) quienes presentaron los resultados de una simulación numérica realizada a un hotel localizado en Belgrado, Yugoslavia con cimentación en balsa que fue modificado con la introducción de pilotes, este análisis se realizó mediante la utilización de los softwares DEFPIG (Deformation Analysis of Piles Groups) y GARP (Geotechnical Analysis of Raft with Piles) obteniendo resultados como:

- Los asentamientos disminuirían principalmente en la región central.
- Se verificó que con la reducción del número de pilotes de 24 a 8 para una longitud de 8m los asentamientos prácticamente no aumentarían.

(Cunha, Neusa et al. 2004) presentaron los resultados de la predicción del comportamiento de una cimentación en BCP correspondiente a un edificio ubicado en Gothenburg, Suiza utilizando las herramientas de análisis numérico GARP6 y DEFPIG.

(Poulos 1997) realizó varios cálculos para realizar la predicción del comportamiento del edificio Westend Tower, Frankfurt, Alemania, usando diferentes métodos de análisis como:

- Análisis por el MEF (Ta and Small 1996)
- Análisis utilizando el programa GARP descrito anteriormente.
- La combinación de el MEF y MEC desarrollado por (Sinha 1997)
- La combinación de el MEF y MEC propuesto por (Franke 1994).

Llegando a las siguientes conclusiones:

- El asentamiento máximo alcanzado es de 105 mm y la mayoría de los métodos pudieron sobre-pronosticar este asentamiento. Sin embargo la mayoría de los métodos proporcionaron una aceptable predicción del diseño.
- Los pilotes en esta estructura soportan el 50 % de la carga total y la mayoría de los métodos sobre-pronosticaron esta proporción, pero desde el punto de vista del diseño, la mayoría de los métodos dieron estimaciones aceptables.

Este caso demuestra claramente que los métodos numéricos pueden trabajar exitosamente para producir una cimentación económica y que trabaje satisfactoriamente.

1.7 Resultados experimentales a escala real

Los ensayos con prototipos en el mismo suelo en que serán ejecutadas las cimentaciones reales son la mejor forma de tomar en cuenta la mayoría de las propiedades de los suelos que intervienen (Poulos 1989). Entre los trabajos vale la pena destacar:

(Garg 1979) en su artículo ``Bored pile groups under vertical load in sand`` presentó los resultados de varias pruebas de carga en pilotes excavados manualmente en arenas de la India. Este realizó ensayos con placas superficiales, pilotes aislados y grupos de pilotes obteniendo los siguientes resultados:

- Las pruebas de carga de las placas fueron realizadas en períodos lluviosos y secos, observando que en época de lluvia las placas presentaban una reducción del 60% de su capacidad portante mostrando un comportamiento menos rígido.
- El aumento del espaciamiento de 1.5 a 2.5 m implicó un leve aumento de la capacidad de carga del grupo de pilotes.
- Cuando la placa estaba en contacto con el suelo la carga absorbida por el grupo fue mayor que cuando la placa no se apoyaba sobre el mismo.
- La rigidez de los grupos de pilotes sin el contacto de la placa con el suelo fue menor que cuando la placa tocaba la superficie del suelo.

(Liu 1985) en su artículo: “Cap-pile-soil interaction of bored pile groups” presenta los resultados de una serie de 51 pruebas de carga en pilotes aislados y grupos de pilotes con un total de 330 pilotes. Estos ensayos fueron realizados en China cerca del río Amarelo con índices de saturación entre 0.85-0.95. Variando el diámetro, la longitud y el espaciamiento, (Liu 1985) propone la expresión para calcular la capacidad de carga:

$$Q_{\tau} = N (\eta_s Q_{su} + \eta_b Q_{pu}) + Q_c \quad (1.22)$$

1.8 Aplicación de hojas de cálculo

El empleo de hojas de cálculo para la realización del análisis de cimentaciones en BCP evita la necesidad del uso de programas de cálculo de más complejidad aprovechando las bondades de las mismas en el diseño de ingeniería.

Mathcad es la solución de cálculos de ingeniería que simultáneamente resuelve y documenta los cálculos y da la posibilidad de modificar datos de entrada y parámetros de diseño, a la vez que reduce considerablemente el riesgo de errores costosos. Este programa, permite a los ingenieros diseñar, solucionar y documentar su trabajo, en un formato comprensible, que pueden compartir y reutilizar, lo cual mejora la verificación y validación, la publicación y la colaboración en todo el proceso de desarrollo.

(Ibañez 2011) realizó la programación de varias hojas de cálculo en MathCad con el fin de evaluar el efecto de la profundidad de cimentación en los asentamientos en BCP. Par su validación comprobó los resultados obtenidos con los citados por (Sales 2000) obteniéndose para el caso de cimentaciones en balsa apoyadas en 4 pilotes resultados similares, notándose la mayor diferencia para cargas mayores a 500 kN, valores para los cuales comienza trabajar de forma conjunta la cimentación. (Tabla 1.2)

Tabla 1.2: Comparación entre los métodos para estimar los asentamientos en una balsa sobre 4 pilotes. (Ibañez 2011)

Carga (kN)	Asentamientos (mm)		
	Método Poulos (1980)	Método Poulos (1998)	Hojas de Cálculo
0	0	0	0
100	1,162	1,41	1,34
200	2,34	2,83	2,26
300	3,48	4,24	3,40
400	4,64	5,66	5,61
500	5,81	7,09	6,68
550	7,68	7,78	8,57
600	9,55	9,51	11,56
700	13,29	13,25	14,56
800	17,03	16,99	17,55

Una vez comparados los resultados de las hojas de cálculo con ejemplos de la literatura internacional, (Ibañez 2011) procedió a su aplicación en problemas reales. Para ello utilizó los resultados obtenidos por (Koizumi 1967) en una cimentación conformada por una zapata de 2m x 2m, apoyada sobre 9 pilotes de 0.3 m de diámetro, atravesando 2 estratos de suelos. Este autor determinó el aporte individual y colectivo de la cimentación, los pilotes y la cimentación balsa pilote. En la Tabla 1.3 aparecen los datos utilizados en el análisis.

Tabla 1.3: Valores de los suelos, balsa y pilotes del ejemplo analizado. (Ibañez 2011)

Suelo	Módulo Gral de Deformación (MPa)	Coefficiente de poisson	Espesor/ Diámetro(m)
Suelo 1	12.8	0.4	1.7
Suelo 2	15.6	0.4	3.8
Balsa	30000	0.2	0.7
Pilote	200000	0.2	0.3

De la comparación el ensayo real (Koizumi 1967) y las hojas de cálculo (Figura 1.6) se reafirmó una vez más la validación de las hojas de cálculo en la estimación de comportamiento carga deformación de cimentaciones en balsa sobre pilotes.

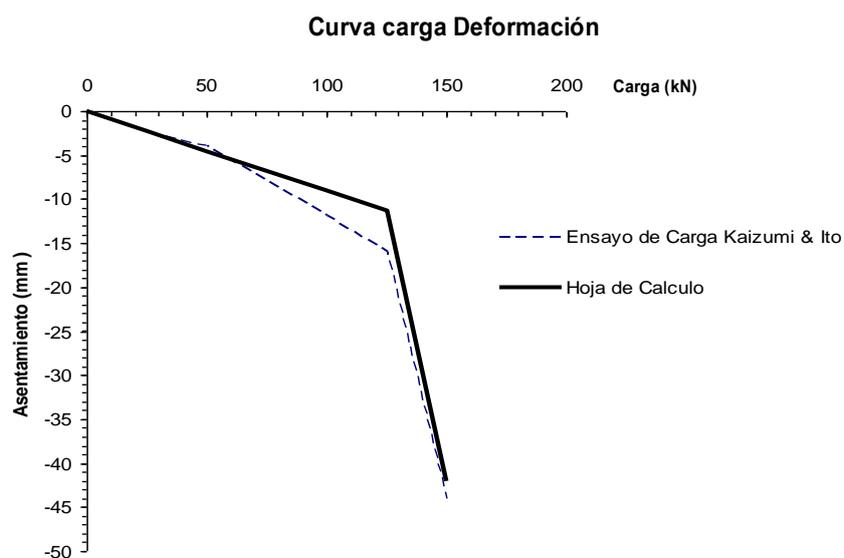


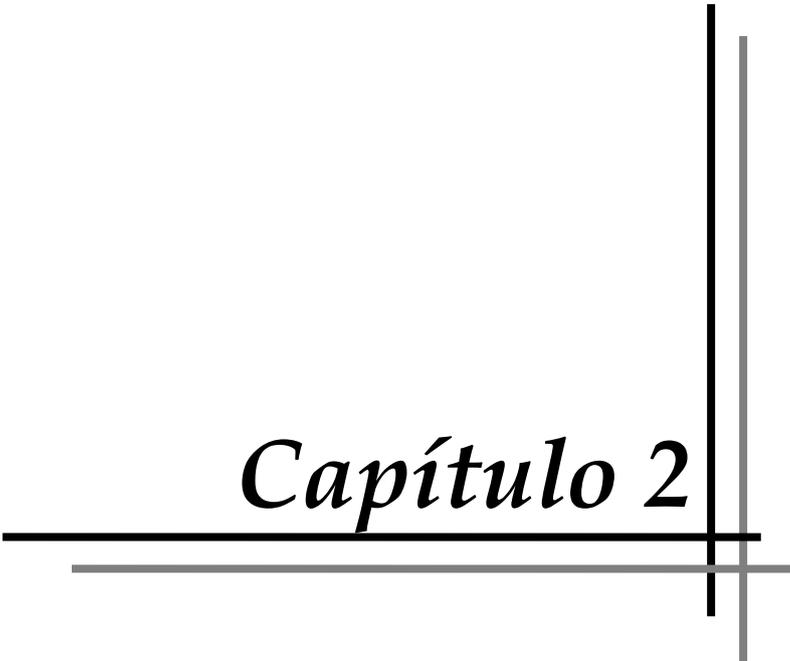
Figura 1.6: Curva carga deformación en el ensayo real (Koizumi 1967) y las hojas de cálculo.

1.9 Conclusiones del capítulo

Una vez realizado el análisis del estado actual del conocimiento en lo que a cimentaciones en BCP se refiere podemos arribar a las siguientes conclusiones parciales:

1. Existe un gran número de métodos propuestos para realizar el análisis y el diseño de cimentaciones en BCP, basadas en diferentes criterios e hipótesis.
2. En el proceso de diseño influyen un grupo de variables como la longitud de los pilotes, la cantidad, la forma de la cimentación, la rigidez de la losa y la profundidad de cimentación.
3. En los últimos años se han desarrollado un gran número de softwares para el análisis y diseño de cimentaciones en BCP, basados en diferentes métodos numéricos debido a que estos tienen en cuenta influencias complejas en el análisis. La efectividad de estos métodos ha sido comprobada por la comparación con resultados reales.
4. Es una tendencia actual el uso de hojas de cálculo en la Ingeniería Civil y en todos los procesos de diseño.
5. La profundidad de cimentación es un factor muy importante a tener en cuenta en el proceso de diseño, ya que a medida que esta aumenta la cimentación se comporta como un cimiento compensado. El empleo de este tipo de cimentación garantiza la disminución de los asentamientos y logra una cimentación eficiente desde el punto de vista de la resistencia.

Capítulo 2



Capítulo 2: “Metodología para el cálculo de los asentamientos de balsas combinadas con pilotes”

2.1 Introducción

En las últimas décadas han sido numerosas las investigaciones y desarrollos conceptuales, que han conducido a mejorar el conocimiento del comportamiento conjunto de la balsa y los pilotes. La evolución de las técnicas de diseño de las cimentaciones en BCP han sido descritas en muchos artículos por varios autores ((Randolph and Wroth 1983) (Randolph 1994) (Poulos 1997) (Poulos 2001)).

Anteriormente fueron analizadas las ventajas y desventajas de los métodos de diseño y análisis de cimentaciones en BCP. En este capítulo se hará uso de los métodos simplificados o preliminares que permiten su programación en las hojas de cálculo en MathCad, con el fin de facilitar la evaluación del efecto de los diferentes factores que influyen en el diseño.

Además de proponer una metodología de cálculo para la determinación de los asentamientos en cimentaciones en BCP, se analizarán varios ejemplos de cimentaciones compensadas en estructuras reales para analizar sus características.

2.2 Metodología propuesta para el diseño de BCP.

La metodología propuesta para el diseño de la cimentación en BCP, que será posteriormente programada en las hojas de cálculo en MathCad, está basada en el empleo de métodos simplificados y fue propuesta por (Hemsley 2000).

Para realizar el cálculo de las deformaciones en un sistema de BCP, primeramente se definen las cargas de trabajo de la cimentación que tienen en cuenta los elementos que llegan a la cimentación (Columnas, tímpanos, caja escalera, etc.):

V_{total} (Carga Axial), M_x (Momento en X), H_x (Carga Horizontal)

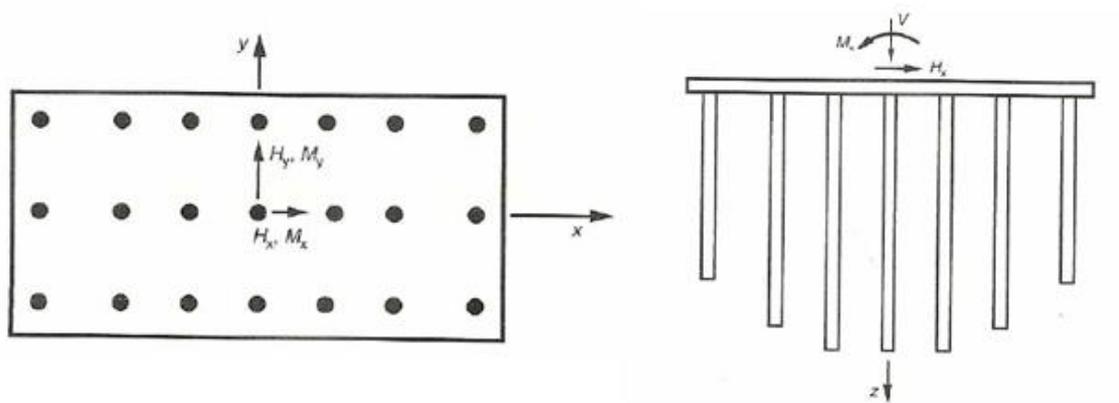


Figura (2.1): Sistema de BCP, Hemsley, J.A. (2000).

Posteriormente se definen las características de la cimentación, datos de los suelos, materiales, dimensiones de los elementos y las cargas actuantes.

Características de la balsa:

Largo (L_{balsa})

Ancho (B_{balsa})

Espesor (t_{balsa})

Profundidad de Cimentación (D_f)

Densidad del Concreto (γ_{concreto})

Resistencia a la compresión del hormigón (f_c)

El módulo de deformación de la balsa (E_{raft}) se define como:

$$E_{\text{raft}} = 4700\sqrt{f_c} \quad (2.1)$$

Se determinan mediante ensayos los datos del suelo:

Cohesión (C_u)

Ángulo de fricción interna (ϕ)

Coefficiente de Poisson Promedio (μ)

Densidad (γ_1)

Se definen las características de los pilotes:

Longitud del pilote (L_{pilote})

Diámetro del pilote (D_{pilote})

Coefficiente de Poisson (μ)

Capacidad de Carga por fricción (Q_f)

Capacidad de Carga de punta (Qp)

Capacidad de Carga del pilote aislado

Resistencia a compresión del material del pilote (fc)

Se define la distribución de los pilotes:

Cantidad de pilotes

Espaciamiento de filas

Espaciamiento de columnas

Cálculo de la capacidad de carga de la balsa y los pilotes:

La capacidad de carga puede ser resultado de los ensayos de carga realizados o como de cálculos efectuados:

Para la balsa:

Fórmula propuesta por Brinch Hansen

$$R_{balsa} = \text{Cap. de Carga} \cdot \text{eficiencia} \quad (2.2)$$

Donde:

$$(2.3)$$

$$\text{eficiencia} = 1 - \left[\frac{\left(\frac{A_{gv}}{A_v} \right)}{\left(\frac{\text{espac. de filas}}{D_{pilote}} \right)} \right] \quad (2.4)$$

$$A_{gv} = \left(\sqrt{N_{pilotes}} - 1 \right) \cdot \text{espac. de filas}^2 \quad (2.5)$$

$$A_v = L_{balsa} \cdot B_{balsa} \quad (2.6)$$

Para $\phi \neq 0$

$$\text{Cap. de Carga} = \left(0.5 \cdot \gamma \cdot N_q \cdot S_q \cdot D_q \cdot B + C \cdot N_c \cdot S_c \cdot D_c + \gamma \cdot D_f \cdot N_\gamma \cdot S_\gamma \cdot D_\gamma \right) \cdot (B \cdot L) \quad (2.7)$$

Para $\phi = 0$

$$\text{Cap. de Carga} = [(B \cdot L) \cdot 6 \cdot C] \quad (2.8)$$

Donde:

Factores de carga

$$N_q = \frac{e^{2\left[\left(\frac{3}{4}\right)\pi - \frac{\theta}{2}\right]\tan\theta}}{2 \cdot \cos\left[\left(45 + \frac{\theta}{2}\right)\frac{\pi}{180}\right]^2} \quad (2.9)$$

$$N_Y = 0.105 \cdot e^{9.6\theta} \quad (2.10)$$

$$N_c = (N_q - 1) \cdot \cot\theta \quad (2.11)$$

Factores de forma

$$S_q = 1 + \left(\frac{B}{L}\right) \tan\theta \quad (2.12)$$

$$S_Y = 1 - 0.4 \left(\frac{B}{L}\right) \quad (2.13)$$

$$S_c = 1 + \left(\frac{B}{L}\right) \left(\frac{N_q}{N_c}\right) \quad (2.14)$$

Factores de profundidad

$$D_q = 1 + 2 \cdot \tan\theta \cdot (1 - \sin\theta)^2 \cdot \operatorname{atan}\left(\frac{D_f \cdot \pi}{B \cdot 180}\right) \quad (2.15)$$

$$D_q = 1 + 0.33 \operatorname{atan}\left(\frac{D_f \cdot \pi}{B \cdot 180}\right) \quad (2.16)$$

$$D_Y = 1 \quad (2.17)$$

Para los pilotes:

$$R_{\text{pilotes}} = N_{\text{pilotes}} \cdot Q_{\text{pilote}} \cdot \text{Eficiencia} \quad (2.18)$$

Donde:

N_{pilotes} : Cantidad de pilotes

Q_{pilote} : Capacidad de Carga del pilote aislado obtenida de los ensayos de carga

Eficiencia: eficiencia del grupo de pilotes. Los valores pueden obtenerse de la Tabla (2.1) o por la ecuación (2.19)

Eficiencia	
r/d	Eg
2.5	0.7
3.0	0.73
3.5	0.75
4.0	0.78
4.5	0.81
5.0	0.84
5.5	0.86
6.0	0.89
7.0	0.94
7.5	0.97
8.0	1.00

Tabla (2.1): valores de eficiencia del grupo de pilotes.

$$\text{Eficiencia} = 1 - \left[\frac{D}{\Pi \cdot S_p \cdot n_f} * nc(nc - 1) + nf(nc - 1) + 1.4(nc - 1) \right] \quad (2.19)$$

Donde:

D: diámetro del pilote

S_p : espaciamiento de fila

n_f : número de pilotes por fila

nc : número de pilotes por columna

Capacidad de carga Balsa y Pilote:

$$R_{TOTALBP} = R_{balsa} + R_{pilotes} \quad (2.20)$$

Capacidad de carga del bloque:

$$R1 = 2[(Lb + D_{pilote}) + (Bb + D_{pilote})] \cdot Qf \cdot L_{pilote} \quad (2.21)$$

$$R2 = (Lb + D_{\text{pilote}}) + (Bb + D_{\text{pilote}}) \cdot Qp \quad (2.22)$$

$$R3 = [L_{\text{balsa}} + B_{\text{balsa}} - (Lb + D_{\text{pilote}}) \cdot (Bb + D_{\text{pilote}})] \cdot qu \quad (2.23)$$

$$R_{\text{total}} = R1 + R2 + R3 \quad (2.24)$$

Donde:

Qf: Capacidad de Carga por fricción

Qp: Capacidad de Carga de punta

Lb y Bb: Dimensiones del bloque de pilotes

$$Lb = (N_{\text{pilotesFILA}} - 1) \cdot \text{Espaciamiento.Fila} > L_{\text{balsa}} \quad (2.25)$$

$$Bb = (N_{\text{pilotesCOLUMNA}} - 1) \cdot \text{Espaciamiento.Columna} \quad (2.26)$$

➤ Capacidad total de carga (R) es la menor capacidad calculada entre R_{total} y

R_{TOTALBP} .

➤ Factor de Seguridad

$$FS = \frac{R}{V_{\text{total}}} \quad (2.27)$$

Diseño estructural de la cimentación:

Determinación del Momento Último M_u :

$$M_m = \frac{P_{ur} \cdot B_{\text{balsa}} \cdot L_{\text{balsa}}^2}{8} \quad (2.28)$$

Donde:

P_{ur} : Capacidad de carga última debajo de la balsa

$$P_{ur} = \frac{\text{Capac. carga}}{B_{\text{balsa}} \cdot L_{\text{balsa}}}$$

Momento último para la balsa:

$$M_{ur} = M_m \cdot \left(\frac{27}{4}\right) \cdot \left(\frac{V_{total}}{R}\right) \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{V_{total}}{R}}\right) \quad (2.29)$$

Donde:

V_{total} : carga axial aplicada

El momento último contribuido por los pilotes se calcula como:

$$M_{up} = Q_{tension} \cdot Y \cdot \sum_{i=1}^{Np} (Xi) \quad (2.30)$$

Donde:

$Q_{tension} = 1MN$

Xi : distancia absoluta del pilote i al centro de gravedad del grupo.

Y : Cantidad de pilotes por columna.

Momento ultimo del bloque:

$$M_u = M_{ur} + M_{up} \quad (2.31)$$

En el caso de que no actúe ninguna carga horizontal Poulos y Davis proponen la siguiente expresión:

$$M_{uB} = \alpha_B \cdot pu \cdot B_{balsa} \cdot L_{pilote}^2 \quad (2.32)$$

Donde:

pu : carga ultima lateral de resistencia del suelo a lo largo de la balsa.

$$pu = Q_f \cdot 4.5 \quad (2.33)$$

α_B : factor que depende de distribución de la carga lateral con la profundidad.

$\alpha_B = 0.25$ para Pu constante con la profundidad

$\alpha_B = 0.2$ cuando Pu tiene un crecimiento lineal con la profundidad, desde 0 en la superficie.

El Momento último (M_{uFINAL}) será el menor valor entre M_u y M_{uB}

Factor de Seguridad al momento

$$FSm = \frac{M_{uFINAL}}{M_x} \quad (2.34)$$

Construcción de la curva carga vs deformación:

La Figura 1.3 muestra de forma gráfica la relación carga-asentamiento para una cimentación BCP. El punto A representa el punto donde la capacidad del pilote está totalmente movilizada, donde la carga vertical total aplicada es P_1 . Por encima de este punto la balsa y los pilotes comparten la carga y el asentamiento se puede expresar como:

$$S = \frac{V}{K_{pr}} \quad (2.35)$$

Donde:

V: carga vertical aplicada

K_{pr} : rigidez axial para el sistema de BCP

Debajo del punto A, una carga adicional es tomada por la balsa y el asentamiento estará definido por:

$$S = \frac{P_1}{K_{pr}} + \frac{V - P_1}{K_r} \quad (2.36)$$

K_r : rigidez axial de la balsa.

P_1 es la carga que moviliza los pilotes, puede ser calculada como:

$$P_1 = \frac{V_{pu}}{\beta_p} \quad (2.37)$$

Donde:

V_{pu} : capacidad última de los pilotes.

β_p : Proporción de carga que toman los pilotes:

$$K_{pr} = X \cdot K_p \quad (2.38)$$

$$X = \frac{1 - 0.6 \left(\frac{K_r}{K_p} \right)}{1 - 0.64 \left(\frac{K_r}{K_p} \right)} \quad (2.39)$$

$$\beta_p = \frac{1}{1 + \alpha} \quad (2.40)$$

$$\alpha = \frac{0.2}{1 - 0.8 \left(\frac{K_r}{K_p} \right)} \left(\frac{K_r}{K_p} \right) \quad (2.41)$$

Es asumido que la relación carga-asentamiento es hiperbólica, por tanto la rigidez de los pilotes (K_p) y la de la balsa (K_r) se expresa como:

$$K_p = K_{pi} \left(1 - R_{fp} \frac{V_p}{V_{pu}} \right) \quad (2.42)$$

$$K_r = K_{ri} \left(1 - R_{fr} \frac{V_r}{V_{ru}} \right) \quad (2.43)$$

Donde:

K_{pi} : rigidez inicial del grupo de pilotes.

R_{fp} : Factor Hiperbólico de los pilotes. ($0 \leq R_{fp} \leq 1$)

V_p : carga tomada por los pilotes.

V_{pu} : capacidad última de los pilotes.

K_{ri} : rigidez inicial de la balsa.

R_{fr} : Factor Hiperbólico de la losa. ($0 \leq R_{fr} \leq 1$)

V_r : carga tomada por la balsa.

V_{ru} : capacidad última de la balsa

$$V_p = \beta_p \cdot V \leq V_{pu} \quad (2.44)$$

$$V_r = V - V_p \quad (2.45)$$

Sustituyendo las ecuaciones (2.37) y (2.45) en las expresiones (2.35) y (2.36) se obtiene para el sistema de BCP:

$$S_A = \frac{P_1}{XK_{pi} \left(1 - \frac{R_{fp}\beta_p V}{V_{pu}} \right)} \quad (2.46)$$

$$S_B = S_1 + \frac{P_u - P_1}{K_{ri} \left(1 - R_{fr} \frac{V - V_{pu}}{V_{ru}} \right)} \quad (2.47)$$

Donde:

$$S_1 = \frac{P_1}{XK_{pi}(1 - R_{fp})} \quad (2.48)$$

$$P_u = R_{balsa} + R_{pilotes} \quad (2.49)$$

Asentamiento total:

$$S_{total} = \frac{V_{total}}{XK_{pi} \left(1 - \frac{R_{fp}\beta_p V}{V_{pu}} \right)} \quad (2.50)$$

2.3 Cálculo de asentamientos en cimentaciones compensadas

El incremento de edificios de gran altura alrededor del mundo y la necesidad de utilizar el espacio bajo la superficie ha dado como resultado el surgimiento de muchos proyectos con varios niveles de sótanos. Cuando en estas estructuras se utiliza la cimentación en BCP el proceso de construcción y la aplicación o removida de cargas son factores muy importantes en el comportamiento final de la cimentación.

El proceso de excavación e instalación de los pilotes también son factores importantes. En edificios con excavaciones superficiales la instalación de los pilotes

puede ser ejecutada antes de la excavación (Figura 2.2a). En otros casos cuando debe ser alcanzada una gran profundidad los pilotes pueden ser colocados luego de la excavación, (Figura 2.2b).

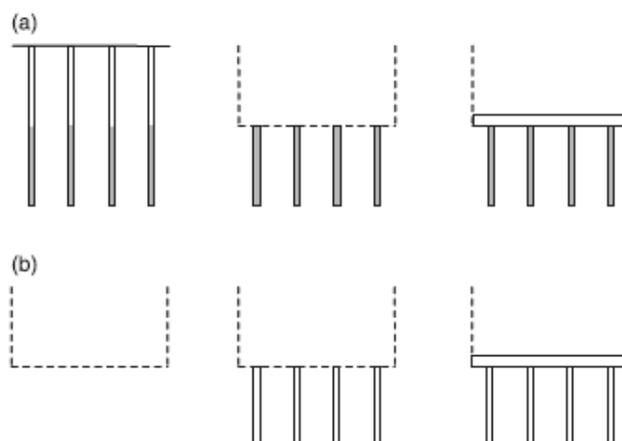


Figura 2.2: Diferentes formas de construcción de BCP compensadas. (Poulos 2001)

(a) los pilotes se colocan antes de la excavación

(b) los pilotes se colocan después de la excavación

Otros de los aspectos a tener en cuenta para determinar los asentamientos en la cimentación son:

- Proceso de excavación
- Tiempo entre el fin de la excavación y la construcción de la balsa
- Variación del nivel freático
- Tiempo de la construcción

Considerando lo anteriormente dicho (Sales, Jonh C. et al. 2009) presentan un método de análisis simplificado. Este método puede ser aplicado en tres etapas como se muestra en la Tabla 2.2:

Tabla 2.2: Etapas de análisis para una cimentación en BCP. (Sales, Jonh C. et al. 2009)

Etapas	Período de construcción	Carga Total (V)	Condiciones del suelo	Cálculos		
				S	P'	R y R'
1 A	Const. Balsa.	$V=R_f$	sobre consolidado, no drenado	S_0	P'_0	R'_0
1 B	Comienzo de la estructura.	$R_f < V \leq Ex'$	sobre consolidado, no drenado	$S_0 + \Delta S_1$	$P'_0 + \Delta P'_1$	$R'_1 = R'_0 + \Delta R'_1, R_1$
2	Comienza a actuar la carga de la estructura.	$Ex' < V \leq G$	Estado virgen no drenado	$S_0 + \Delta S_2$	$P'_0 + \Delta P'_2$	$R'_2 = R'_1 + \Delta R'_2, R_2$
3	Periodo después de la construcción.	$V = G + P$	Estado virgen drenado	$S_0 + \Delta S_3$	$P'_0 + \Delta P'_3$	$R'_3 = R'_1 + \Delta R'_3, R_3$

Donde:

R_f: Peso de la balsa

S: Asentamiento

P': Carga que actúa sobre el grupo de pilotes.

R: Carga resultante de la balsa

R': Carga de la balsa

Ex': Carga efectiva del suelo excavado.

ΔP': Incremento de la carga efectiva del grupo de pilotes.

ΔR': Incremento de la carga efectiva en la balsa.

G: Carga muerta (Peso de la estructura), varía con el tiempo.

P: Carga viva.

0, 1, 2 y 3: Etapas de construcción.

Para la predicción de las cargas en la etapa 1 y 2 se utilizó el programa GARP (Small and Poulos 2007).

En la etapa 1 debido a la falta de datos consideran un módulo de elasticidad 5 veces mayor justo debajo de la balsa y luego una variación lineal de este valor fue usada hasta alcanzar el módulo de suelo original en la profundidad de cimentación como se muestra en la Figura 2.3

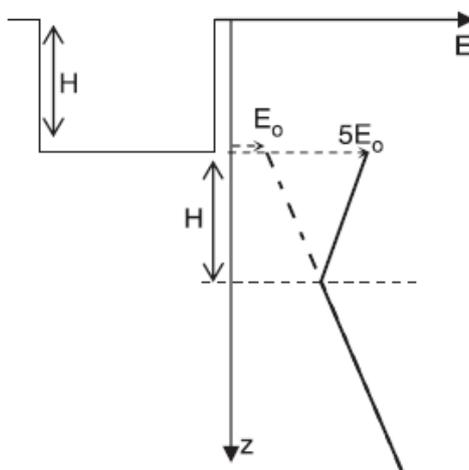


Figura 2.3: incremento aproximado del módulo del suelo (E). E_0 , módulo original al nivel excavado; H, profundidad de excavación y z profundidad (Sales, Jonh C. et al. 2009)

También se utilizó el programa CONS3D (Small and Liu 2007) para estimar el proceso de consolidación. Este programa utiliza el método de elementos finitos (MEF).

El uso de este método simplificado (Sales, Jonh C. et al. 2009) reduce considerablemente los cálculos, además ha desprendido resultados positivos en el análisis de cimentaciones compensadas reales.

2.4 Análisis crítico de resultados de obras reales.

(Zeevaert 1957) presentó el uso de una cimentación en balsa compensada con pilotes de fricción en la arcilla volcánica de los suelos de México y demostró que este estudio aseguraba un buen comportamiento y además una solución económica.

En obras reales se ha podido comprobar que con el uso de cimentaciones compensadas las cimentaciones experimentan una disminución de los

asentamientos, los pilotes toman una significativamente menor proporción de carga y la balsa se vuelve más efectiva.

(Sales, Jonh C. et al. 2009) analizaron los resultados de instrumentación de edificios construidos en Inglaterra (Hyde Park Cavalry) y Alemania (Messeturm y Skyper en Frankfurt). Estos dos casos de cimentaciones compensadas fueron analizados por el método propuesto por estos autores obteniendo resultados satisfactorios concluyendo que, el asentamiento calculado en las estructuras Hyde Park Cavalry, Messeturm y Skyper son influidos significativamente por la presencia de excavaciones considerables. El hecho de que estas estructuras tengan cimentaciones compensadas reduce significativamente los asentamientos y aumenta la efectividad de la balsa.

2.5 Metodología propuesta para el diseño de BCP considerando el efecto de la profundidad.

Como se ha visto anteriormente la profundidad de cimentación es un factor importante a tener en cuenta en el proceso de diseño para lograr cimentaciones compensadas y así garantizar cimentaciones con asentamientos mínimos y más resistencia.

La influencia de la profundidad de cimentación en el correcto funcionamiento de estas puede ser evaluada por medio de hojas de cálculo en MathCad (Figura 2.4), teniendo en cuenta que la carga total aplicada (V), para una profundidad de cimentación (D_f) diferente de cero, sería el resultado de restar la carga de la estructura menos el peso del volumen de suelo excavado, evaluando de esta forma la compensación:

$$V = N_{\text{ESTRUCTURA}} - \gamma_{\text{SUELO}} (\text{área de las base} \times D_f) \quad (2.51)$$

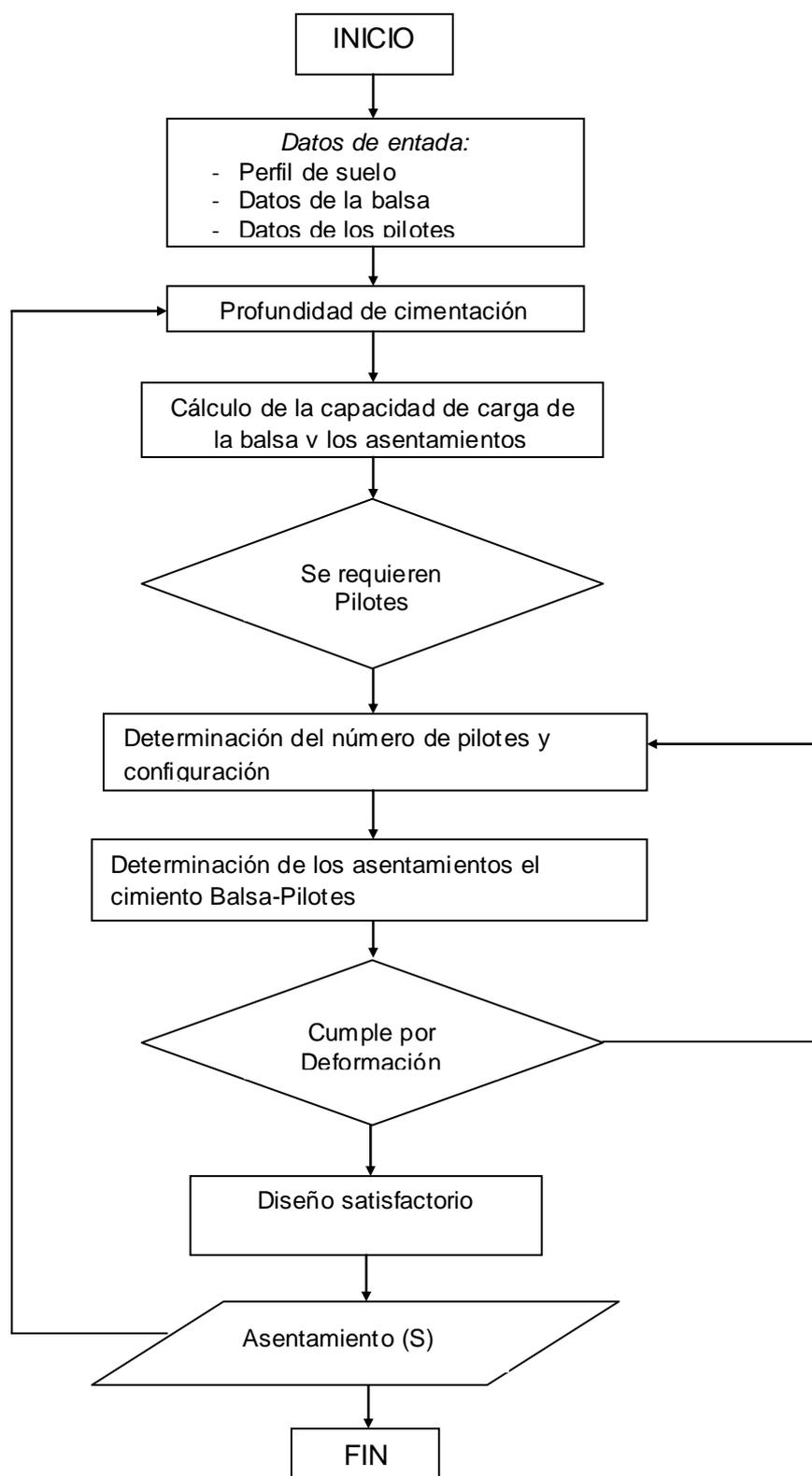


Figura 2.4: Procedimiento propuesto de las hojas de cálculo considerando el efecto de la profundidad.

2.6 Análisis de los diferentes factores que influyen en el diseño de BCP.

(Poulos 2001a) evalúa los parámetros que intervienen en el análisis de cimentaciones en BCP utilizando como base el ejemplo hipotético que se muestra en la Figura 2.5. Para esto se utilizó el programa GARP teniendo en cuenta aspectos importantes como la no homogeneidad del perfil del suelo.

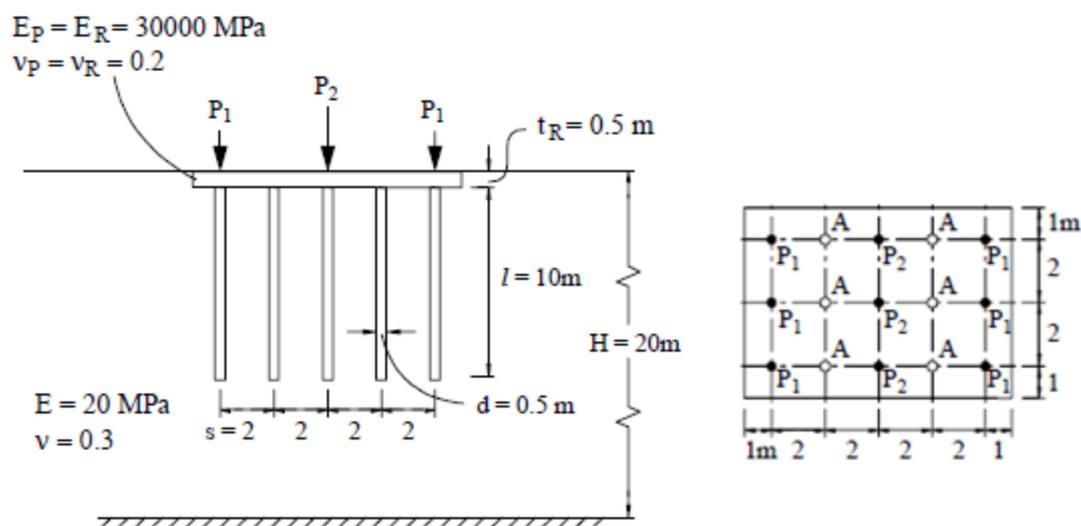


Figura 2.5: Ejemplo hipotético usado para analizar la influencia de los diferentes factores de diseño. (Poulos 2001a)

Efecto del número de pilotes y el tipo de carga:

Asumiendo el espesor de la balsa de 0.5 m y una carga total aplicada de 12 MN se obtuvieron los gráficos de la Figura 2.6, llegando a las siguientes conclusiones:

- Con el aumento del número de pilotes decrece el asentamiento máximo, pero se vuelve casi constante para 20 o más pilotes.
- Para pequeños números de pilotes el asentamiento máximo para carga concentrada es mayor que para carga distribuida, pero la diferencia se vuelve casi nula para 10 o más pilotes.
- El porcentaje de carga tomada por los pilotes aumenta con el aumento del número de pilotes

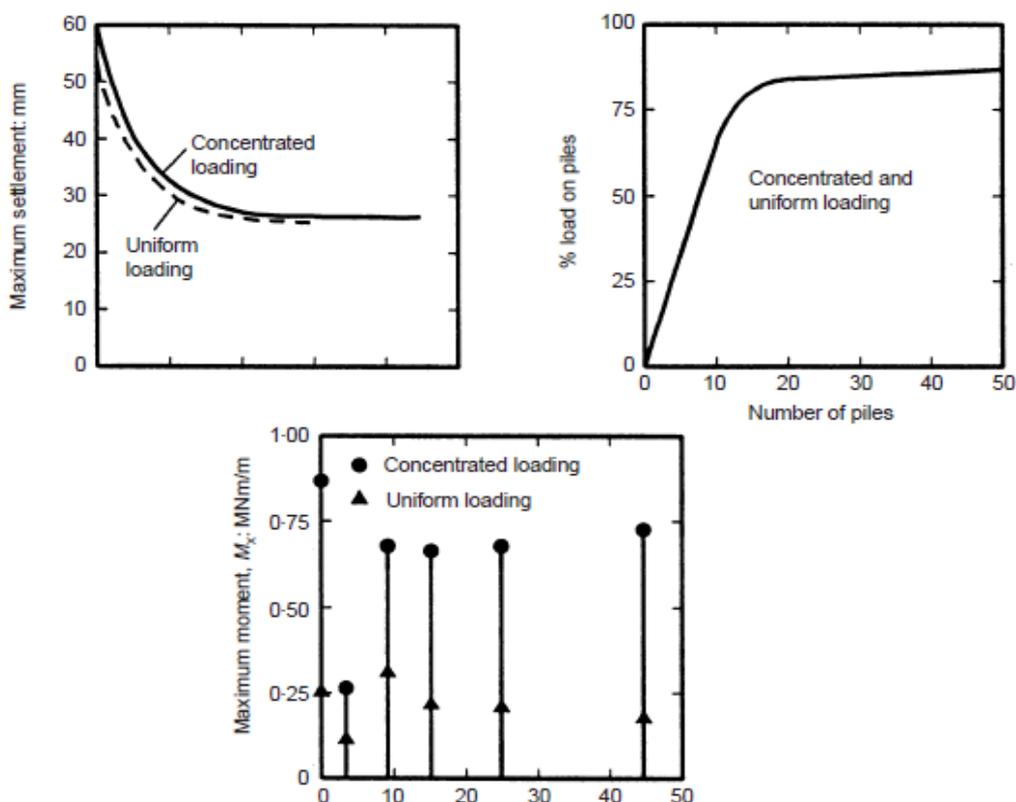


Figura 2.6: Efecto del número de pilotes en el comportamiento de una cimentación en BCP. (Poulos 2001a)

Efecto del espesor de la losa:

La Figura 2.7 muestra el efecto del espesor de la losa en el comportamiento de la cimentación. Se puede observar claramente el porcentaje de carga tomada por los pilotes no es muy sensible al espesor de la losa. Además se puede observar, como es esperado el asentamiento diferencial disminuye con el aumento del espesor de la losa pero generalmente aumenta el momento máximo. Para cero cantidad de pilotes (la losa trabajando sola) el comportamiento de la losa es no lineal para espesores pequeños, pero con la presencia de tres pilotes la cimentación tiene un comportamiento adecuado, esto demuestra la importancia de la adecuada localización de los pilotes debajo de la losa.

Cantidad de pilotes:

0
 3
 9
 15
 45

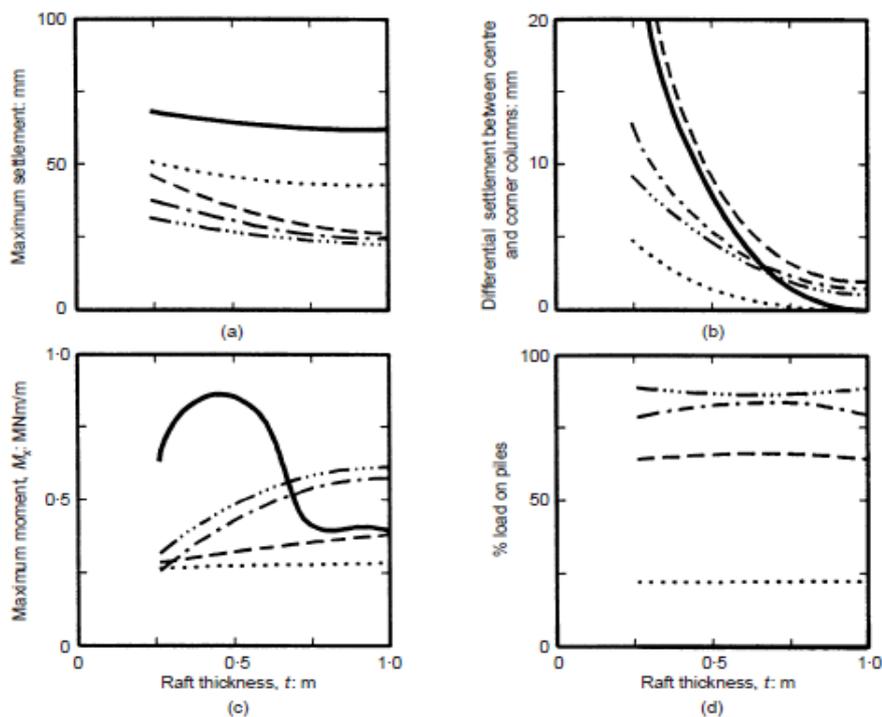


Figura 2.7: Efecto del espesor de la balsa, para diferentes cantidades de pilotes, en el comportamiento de una cimentación BCP para un ejemplo hipotético. (Poulos 2001a)

Efecto del nivel de carga en el asentamiento:

La Figura 2.8 muestra las curvas carga vs asentamiento para BCP con varios números de pilotes. Claramente el asentamiento crece con el aumento del nivel de carga. Se puede observar además lo beneficioso de la adición de pilotes a medida que aumenta la carga de diseño.

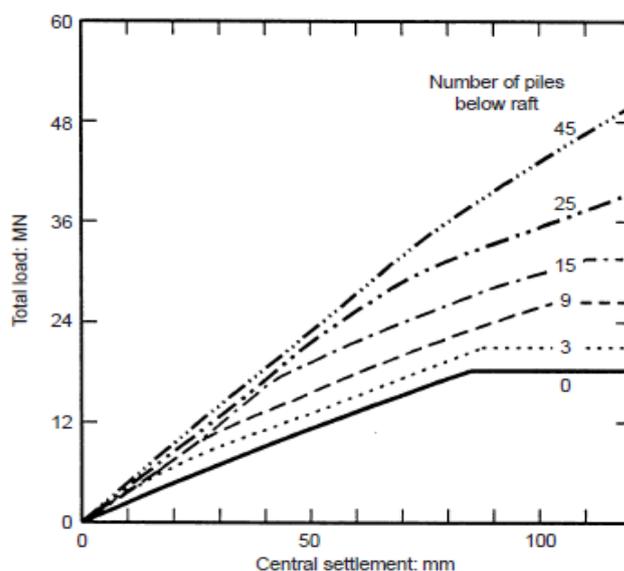


Figura 2.8: Curvas de carga-asentamiento para varios sistemas de cimentaciones en BCP. (Poulos 2001a).

Para la cimentación en BCP hipotética que se presenta en la Figura 2.5 (Poulos 2001a), Se evaluó diferentes factores que intervienen en el diseño (Ibañez 2011), utilizando los ficheros en MathCad aprovechando las facilidades que estos brindan.

En la Tabla 2.3 y 2.4 se puede observar que los resultados obtenidos, para el caso de la balsa sobre 9 y 16 pilotes, son similares con el empleo de las hojas de cálculo y del programa GARP:

Tabla 2.3: Valores de rigidez obtenidos aplicando diferentes métodos. Balsa sobre 9 pilotes. (Ibañez 2011)

Parámetro	Software GARP6	MathCad
Kr: Rigidez de la balsa (kN/m)	27719,51	26742
Kp: Rigidez de los pilotes (KN/m)	39824,77	37252
Kpr: Rigidez del sistema de BCP (kN/m)	79702,21	70531
β : Proporción de carga que toman los pilotes (%)	90,93	93,9

Tabla 2.4 Valores de rigidez obtenidos aplicando diferentes métodos. Balsa sobre 16 pilotes. (Ibañez 2011)

Parámetro	Software GARP6	MathCad
Kr: Rigidez de la balsa (kN/m)	310,89	240,00
Kp: Rigidez de los pilotes (KN/m)	1901,06	2174,00
Kpr: Rigidez del sistema de BCP (kN/m)	157,30	156,49
β : Proporción de carga que toman los pilotes (%)	97,65	97,9

En la Figura 2.9 se puede observar una comparación entre diferentes métodos con las hojas de cálculo obteniendo resultados similares, en la Figura 2.10 se observa la curva carga-deformación para diferentes números de pilotes, obtenidos por medio de los ficheros en MathCad donde los resultados confirman los propuestos por (Poulos 2001a).

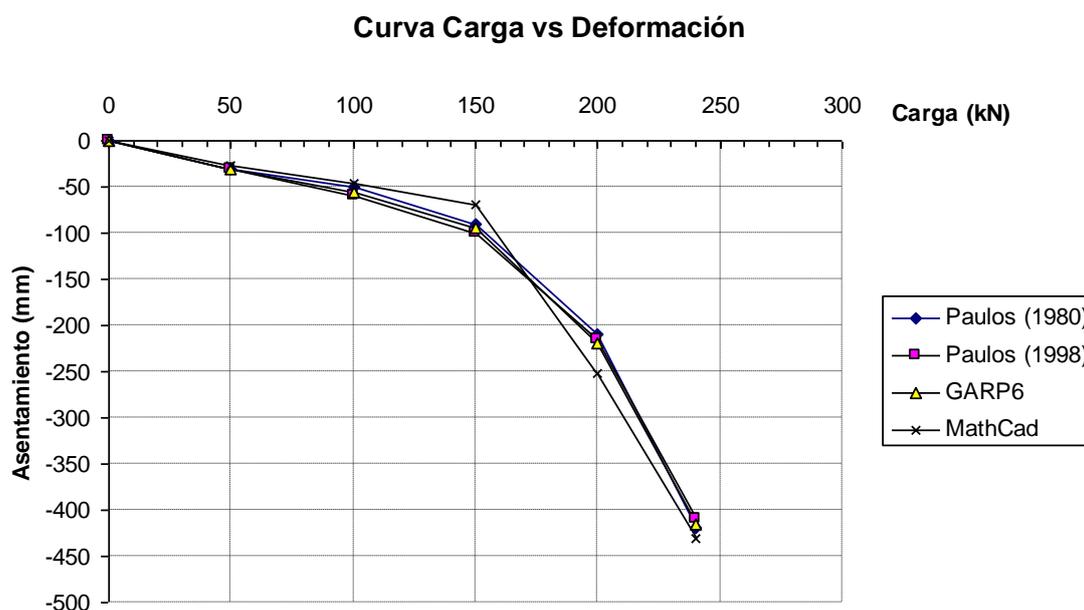


Figura 2.9: Curva Carga vs deformación utilizando varios métodos. (Ibañez 2011)

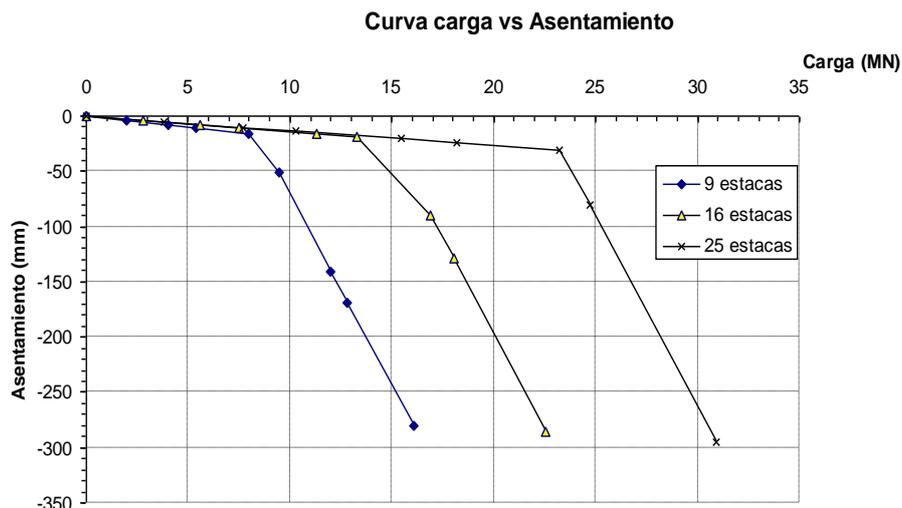


Figura 2.10 Curva carga deformación para diferente número de pilotes. (Ibañez 2011)

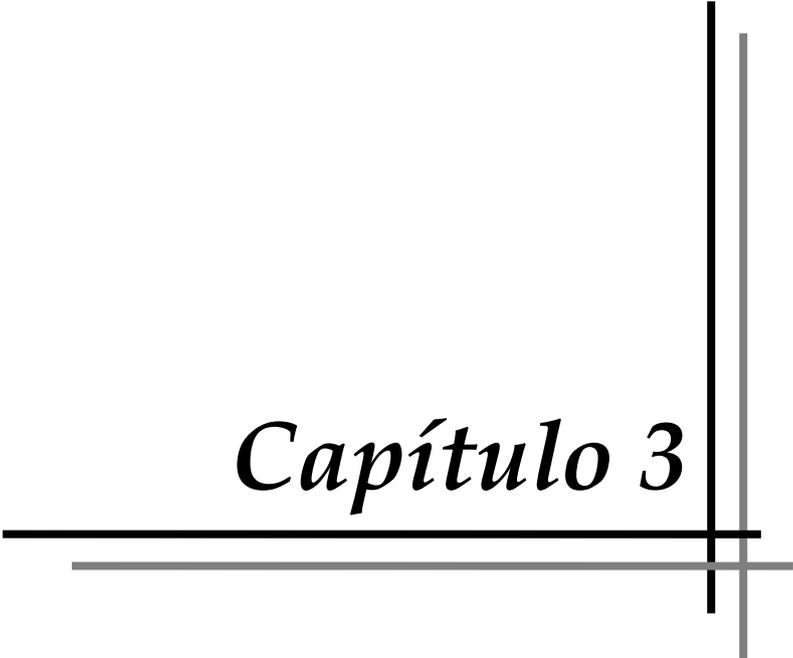
En general los resultados son similares a los obtenidos con el empleo del programa GARP (Poulos 2001a), lo que demuestra la validez y potencialidades de las hojas de cálculo en MathCad confeccionadas a partir de métodos simplificados.

2.7 Conclusiones del capítulo

Una vez propuesta la metodología de cálculo a emplear y realizar un análisis de las cimentaciones compensadas en obras reales podemos llegar a las siguientes conclusiones:

1. Los métodos simplificados son válidos puesto que se alcanzan resultados satisfactorios y a nivel de anteproyecto dan una idea general del comportamiento de la cimentación.
2. Para el cálculo de asentamientos en cimentaciones compensadas es necesario tener en cuenta aspectos como: el proceso de excavación, el tiempo entre el fin de la excavación y la construcción de la balsa, la variación del nivel freático y el tiempo de la construcción.
3. Con el uso de cimentaciones compensadas en obras reales se ha podido comprobar lo beneficioso de su uso en la reducción de asentamientos y la ejecución de proyectos más económicos.
4. El uso de las hojas de cálculo en MathCad facilita la evaluación de los diferentes factores que intervienen en el diseño como la profundidad de cimentación.

Capítulo 3



Capítulo 3: “Análisis numérico del cálculo de asentamientos de balsas combinadas con pilotes”

3.1 Introducción

En el diseño de cimentaciones en balsa combinadas con pilotes, se determina un gran número de incógnitas de forma tal que se diseñe una cimentación racional y que a su vez cumpla con los requerimientos del proyecto. El empleo de hojas de cálculo, facilita el trabajo del proyectista, al poder pre dimensionar la cimentación, evaluando la influencia de los diferentes parámetros que intervienen en el diseño. (Ibañez 2011).

En este capítulo se realizará una comparación entre los resultados obtenidos con hojas de cálculo programadas en MathCad y ejemplos de estructuras reales de la literatura internacional. Además se realizará la evaluación del efecto de diferentes factores que intervienen en el diseño haciendo hincapié en la influencia del efecto de la profundidad en el comportamiento de la cimentación.

3.2 Implementación de un método de diseño de BCP

Para la solución del problema, sin la necesidad de utilizar potentes programas de cálculo, se procedió a la programación de hojas de cálculo en MathCad, del procedimiento descrito anteriormente en el Capítulo 2, aprovechando las bondades de las mismas en el diseño de ingeniería.

MathCad es una herramienta ideal para resolver problemas de ingeniería con un enfoque didáctico. Una ventaja especial de este software es su capacidad de representación algebraica de las ecuaciones involucradas en la solución del problema junto con su evaluación numérica. Esta característica hace a esta herramienta ideal para la solución de problemas de ingeniería que requieren ser presentadas en un reporte o memoria de cálculo, para coadyuvar a la comprensión del problema ((MathCad 2011) (Galambos 2001)). Además ofrece un entorno de “diseño en pizarra” que permite a los ingenieros capturar, aplicar y gestionar fácilmente los requisitos, los datos críticos, los métodos y las suposiciones de los productos para realizar rápidamente los cálculos. Con el uso del MathCad, los conceptos originales, las suposiciones subyacentes, las fórmulas matemáticas, los gráficos ilustrativos, el texto explicativo, las anotaciones, los esbozos y los resultados están claramente visibles en la hoja de trabajo.

En el caso que nos ocupa se programaron varias hojas de cálculo que interactúan entre sí permitiendo una interface amable entre el usuario y la máquina y la posibilidad de modificar datos de entrada y parámetros de diseño.

Entre las ventajas que se pueden citar con el empleo de estas hojas de cálculos están:

- Permite analizar diferentes variantes, con un ahorro de tiempo y recursos computacionales
- Se pueden analizar suelos estratificados.
- Se pueden analizar la variación del módulo general de deformación con la profundidad.
- Se puede interactuar con la hoja de cálculo y modificar expresiones, parámetros, etc.
- Permiten evaluar las soluciones propuestas y adaptarse a los datos suministrados por el usuario.

El procedimiento propuesto a seguir para el uso de las hojas de cálculo se puede observar en la Figura 3.1.

La simbología utilizada para las diferentes zonas de entrada y salida de datos y acceso a ficheros externos se puede observar en la Figura 3.2. En las diferentes zonas de entrada de datos se pueden introducir las cargas de trabajo de la cimentación (Figura 3.3) además de parámetros iniciales como: las dimensiones de la balsa (Figura 3.4), los datos del suelo (Figura 3.5) y las dimensiones y distribución de los pilotes (Figura 3.6).

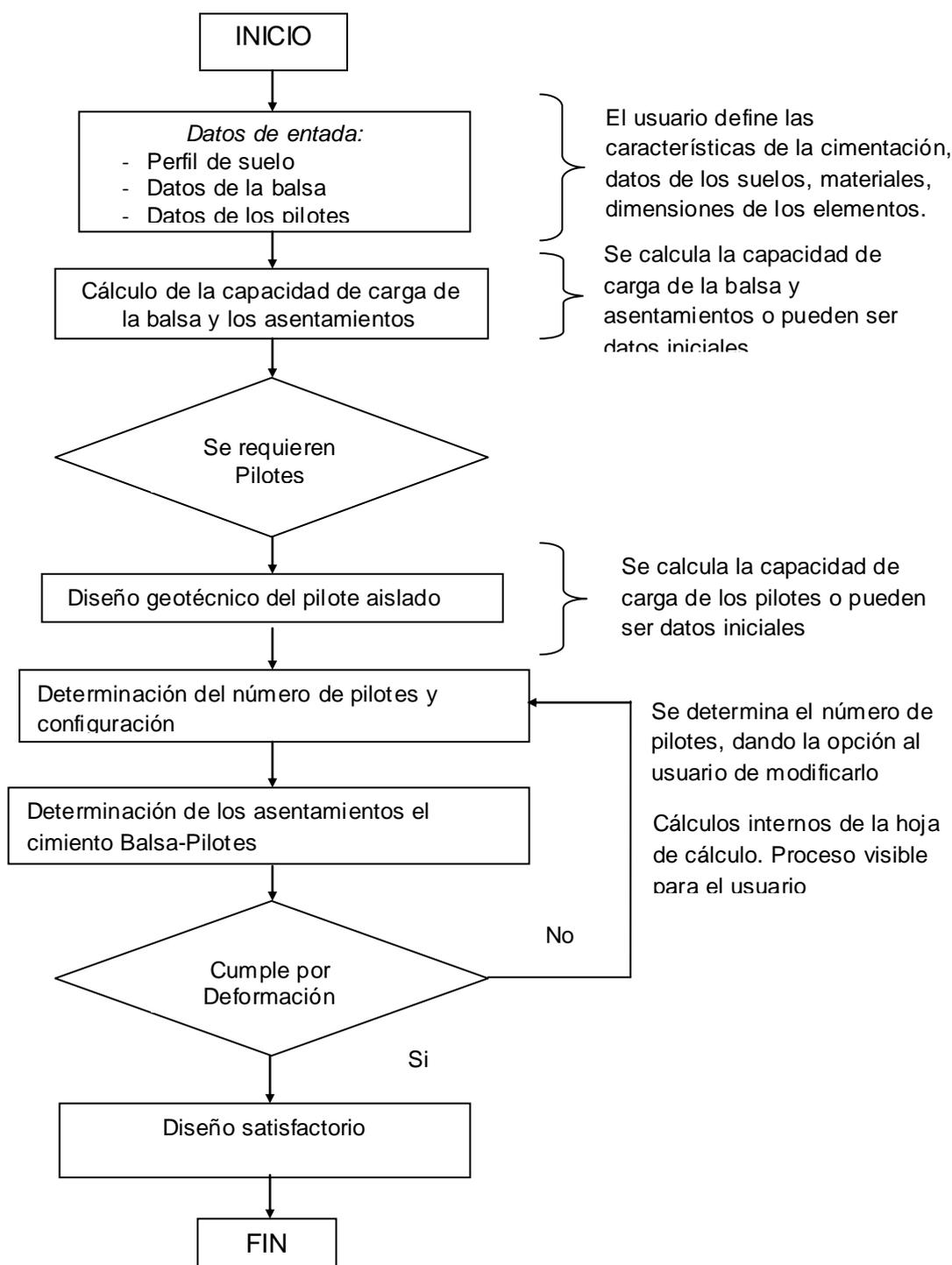


Figura 3.1: Procedimiento propuesto de las hojas de cálculo (Ibañez 2011).

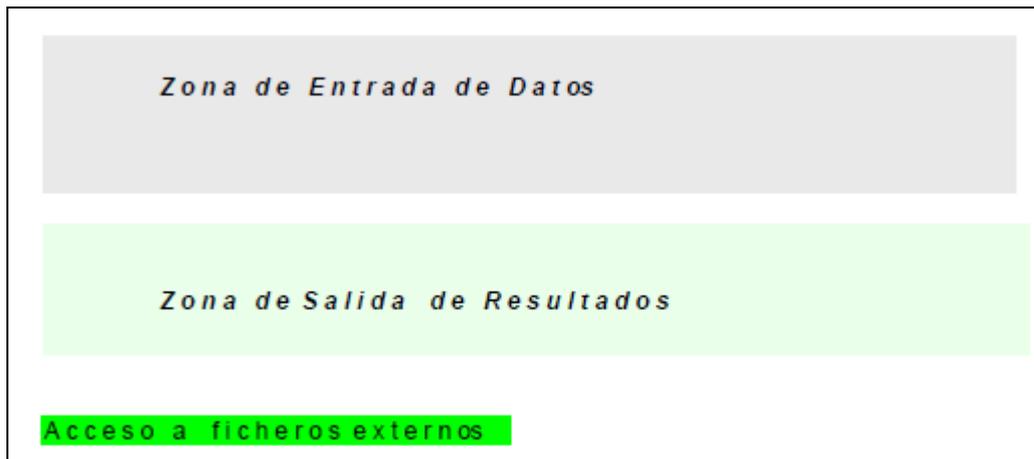


Figura 3.2: Simbología utilizada en las hojas de cálculo.



Figura 3.3: Carga de trabajo de la cimentación.

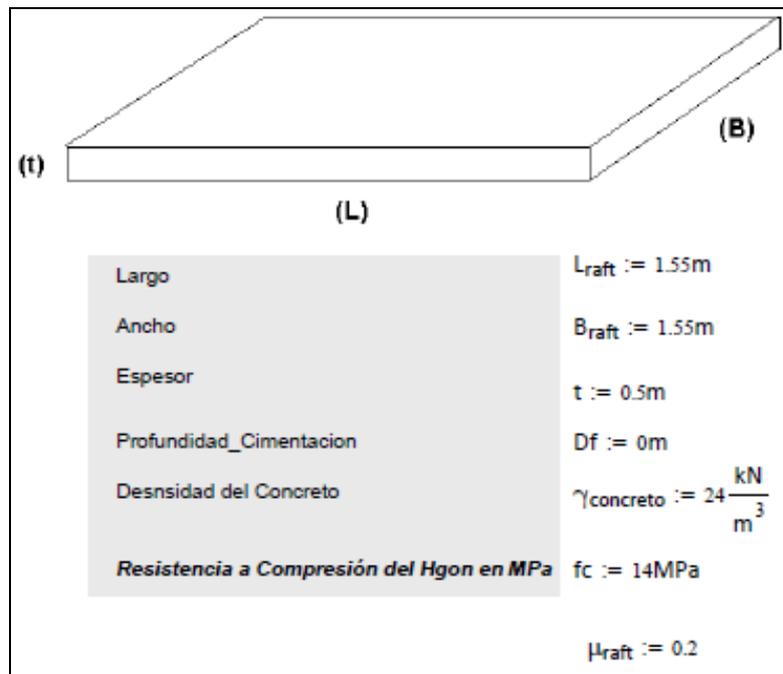


Figura 3.4: Dimensiones y características de la balsa.

Cohesion	$C_u := 0 \text{ kPa}$
Angulo_friccion_interna	$\phi_{\text{dato}} := 30$
Densidad	$\gamma_1 := 18 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$
Coefficiente de Poisson Promedio	$\mu := 0.3$

Figura 3.5: Datos del suelo

Longitud_pilote	$L_{\text{pilote}} := 4.5 \text{ m}$
Diametro_pilote	$D_{\text{pilote}} := 0.3 \text{ m}$
Coefficiente_poisson	$\mu_{\text{pilote}} := 0.2$
Capacidad_Carga_friccion	$Q_f := 100 \text{ kPa}$
Capacidad_Carga_punta	$Q_p := 400 \text{ kPa}$
Capacidad_Carga_pilote_aislado	$Q_{\text{pilote}} := Q_{\text{pilote}} = 0.64 \cdot \text{MN}$
Resistencia a compresion del material del pilote	$f_c := 14 \text{ en MPA}$
	$(Q_{\text{tension}}) := 1 \text{ MN}$
Pilotes_x_Fila	$N_{\text{pilotesFILA}} := 2$
Pilotes_x_Columna	$N_{\text{pilotesCOLUMNA}} := 2$
Espaciamiento x Fila	$\text{EspaciamientoFILA} := 1.05 \text{ m}$
Espaciamiento x Columnas	$\text{EspaciamientoCOLUMNA} := 1.05 \text{ m}$

Figura 3.6: Dimensiones y distribución de los pilotes.

3.3 Modelación de BCP con el empleo de ayudas de diseño

Luego de analizar las ventajas de las hojas de cálculo y proponer un procedimiento para su uso se procederá a su aplicación en un problema real.

La estructura a analizar es el edificio Messe-Torhaus situado en la ciudad de Frankfurt, Alemania. Fue el primer edificio en este país con una cimentación diseñada en BCP construido entre 1983 y 1986. Con una altura de 130 m fue en su tiempo el edificio más alto de Europa.

Esta estructura está soportada por dos balsas idénticas con dimensiones de 24.5 x 17.5 m (área de 428.75 m²) cada una, con una separación entre ellas de 10m como se observa en la Figura 3.2. Cada balsa cuenta con 42 pilotes de 90 cm de diámetro y 20m de longitud cuyo espaciamiento varía entre 6 y 7 veces el radio.

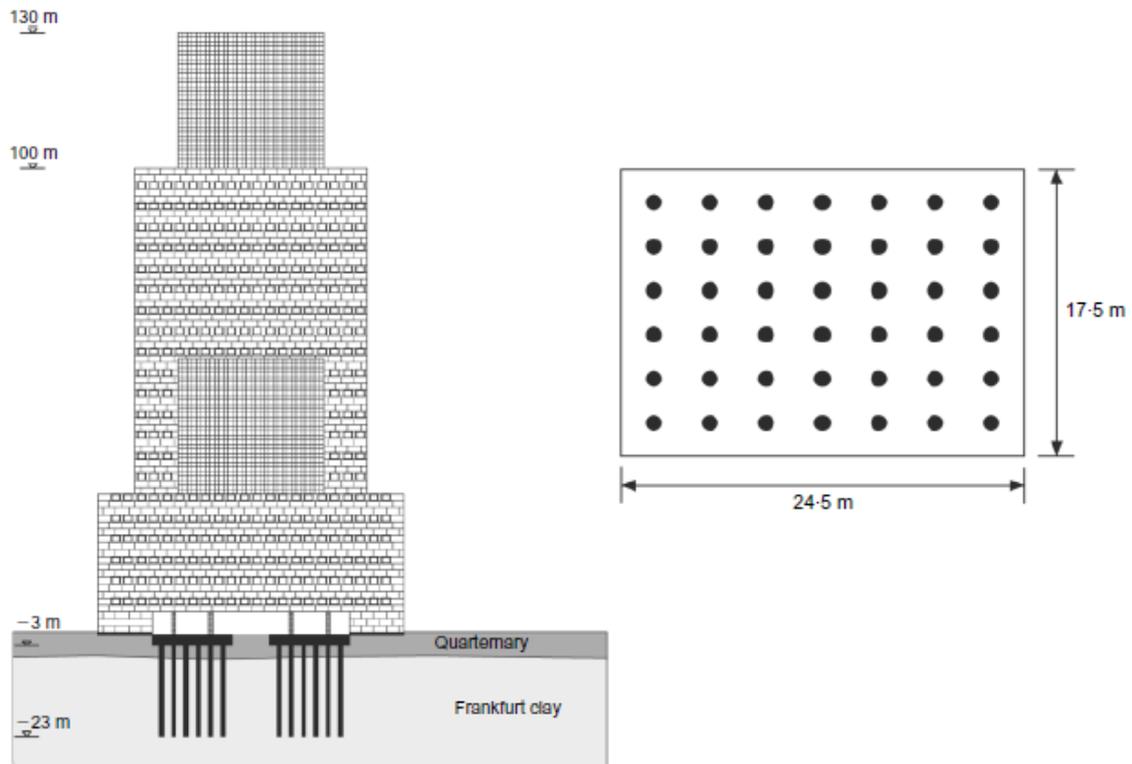


Figura 3.7: Características de la cimentación y condiciones del subsuelo. (Reul 2000)

La profundidad de cimentación es de 3 m con un peso total de suelo excavado de 23.152 MN (asumiendo el peso de la unidad de suelo de 18 kN/m^3).

El subsuelo está compuesto por una capa de arena cuaternaria de 5.5 m de espesor, seguida por una capa de 23 m de arcilla de Frankfurt cuyas características se resumen en la Tabla 3.1, resultado de ensayos realizados en el terreno por (Reul 2000).

Tabla 3.1: Parámetros utilizados en el análisis

Parámetro	Suelo 1: Arena cuaternaria	Suelo 2: Arcilla de Frankfurt	Balsa	Pilote
Módulo General de Deformación, E : MPa	75	Ecuación (2.51)	34000	23500
Coefficiente de Poisson	0.25	0.15	0.2	0.2
Ángulo de fricción interna, ϕ : grados	20	32.5	–	–
Cohesión, C : kPa	20	0	–	–
Espesor/ Diámetro, m	5.5	23.0	2.5	0.9

El módulo general de deformación en el suelo arcilloso de Frankfurt varía con la longitud y es descrito por una fórmula empírica propuesta por (Reul 2000):

$$E = 45 + \left[\tan\left(\frac{z - 30}{15}\right) + 1 \right] \cdot 0.7 z \quad (3.1)$$

Donde:

z : profundidad del estrato de suelo.

La cimentación soportará una carga efectiva de 200 MN, donde según ensayos de carga en el terreno por (Reul 2000) la capacidad de carga del pilote aislado varía entre 1.7 a 6.9 MN.

Con el uso de las hojas de cálculo se analizó el efecto de diferentes factores que intervienen en el diseño como:

Espesor de la balsa (Figura 3.8), (Figura 3.9)

Para evaluar el efecto del espesor de la balsa en el comportamiento de la cimentación del edificio Messe-Torhaus se fue variando el espesor de 1.5 - 3.5 m, para un número de 42 pilotes y una carga total de 200 MN.

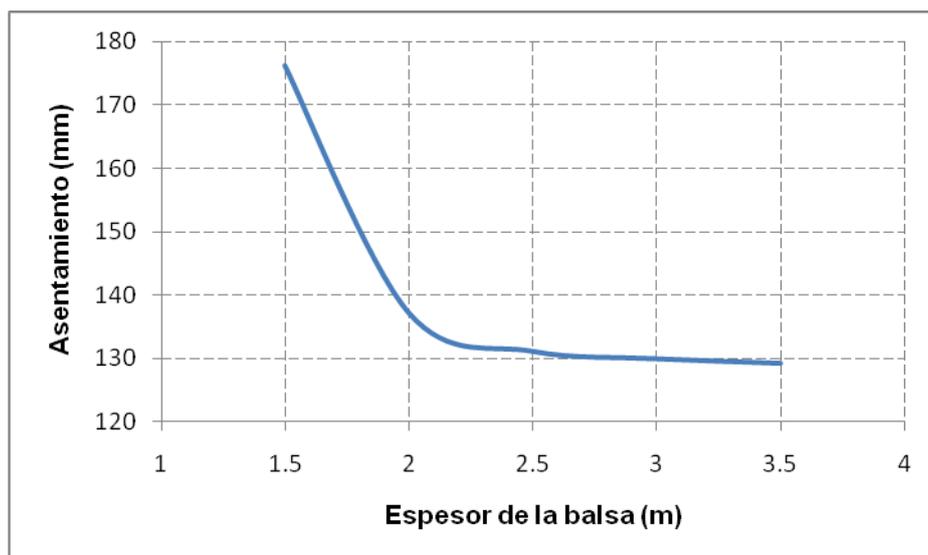


Figura 3.8: Curva Asentamiento vs espesor de la balsa

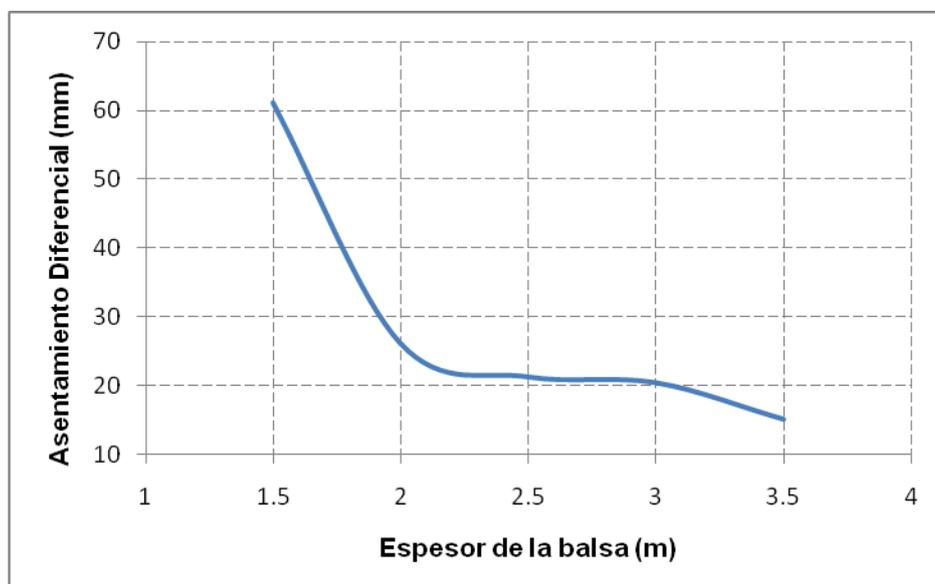


Figura 3.9: Curva Asentamiento Diferencial vs espesor de la balsa

Número de pilotes (Figura 3.10)

El efecto del número de pilotes se observó realizando la variación entre 9 y 72 pilotes para una profundidad de cimentación de 3m, una balsa de 2.5 m de espesor y una carga total de 200 MN.

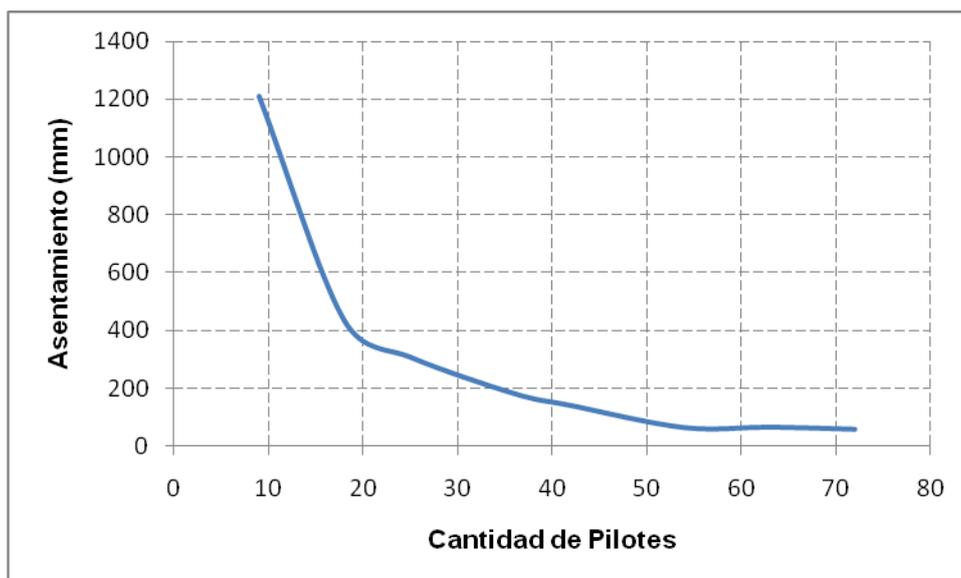


Figura 3.10: Curva Asentamiento vs Cantidad de pilotes

Profundidad de cimentación (Figura 3.11), (Figura 3.12), (Figura 3.13)

Para evaluar la profundidad de cimentación se comenzó por evaluar el comportamiento de la cimentación para $D_f=0$ hasta una profundidad de 6 m por debajo de la superficie del terreno, teniendo en cuenta que para $D_f \neq 0$ la carga total aplicada (V) sería el resultado de restar la carga de la estructura menos el peso del volumen de suelo excavado, evaluando de esta forma la compensación (Ecuación 2.50).

Además se evaluó el efecto de la profundidad de cimentación para diferentes cantidades de pilotes y espesores de balsa obteniendo los gráficos siguientes:

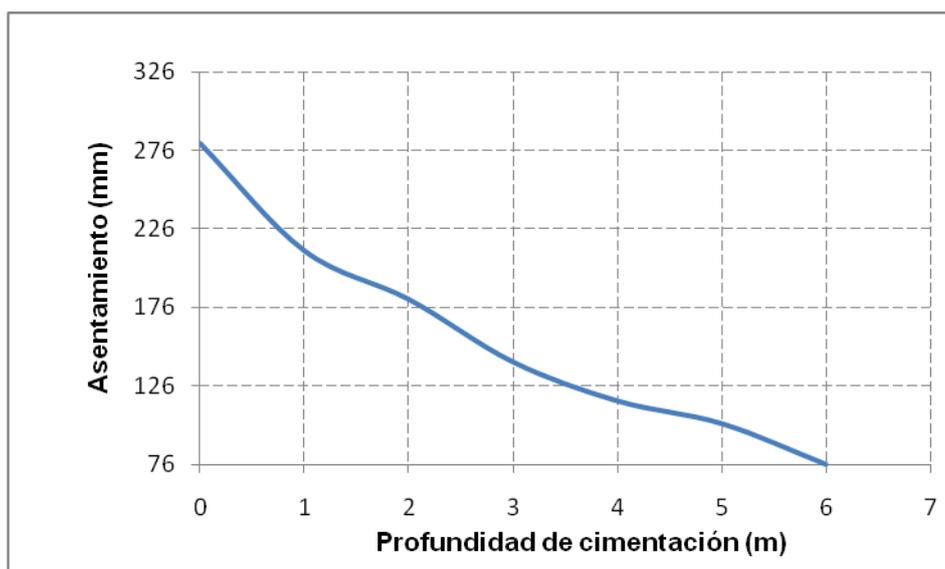


Figura 3.11: Curva Asentamiento vs Profundidad de cimentación

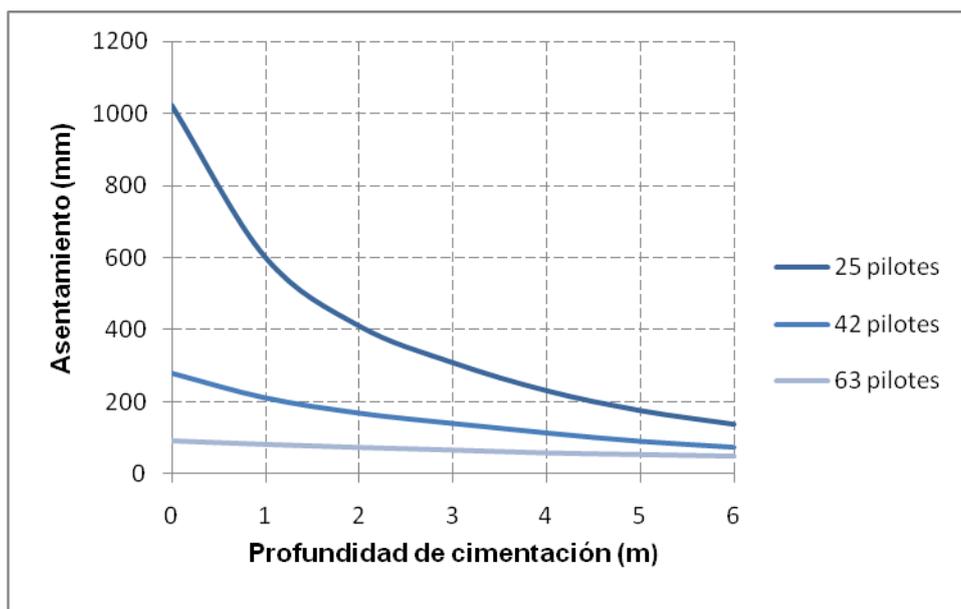


Figura 3.12: Curva Asentamiento vs Profundidad de cimentación para varios números de pilotes.

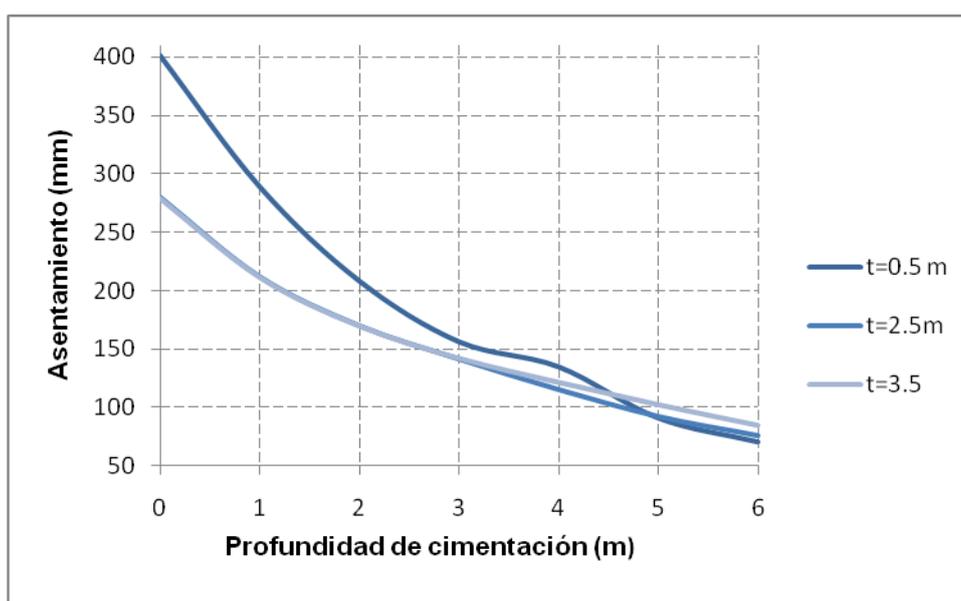


Figura 3.13: Curva Asentamiento vs Profundidad de cimentación para varios espesores de balsa.

En la Figura 3.14, se representa la curva trilineal (carga - deformación), explicada anteriormente para el sistema de cimentación en BCP del edificio Messe-Torhaus, con una cantidad de 42 pilotes, una balsa de 2.5 m de espesor y una profundidad de cimentación de 3.0 m.

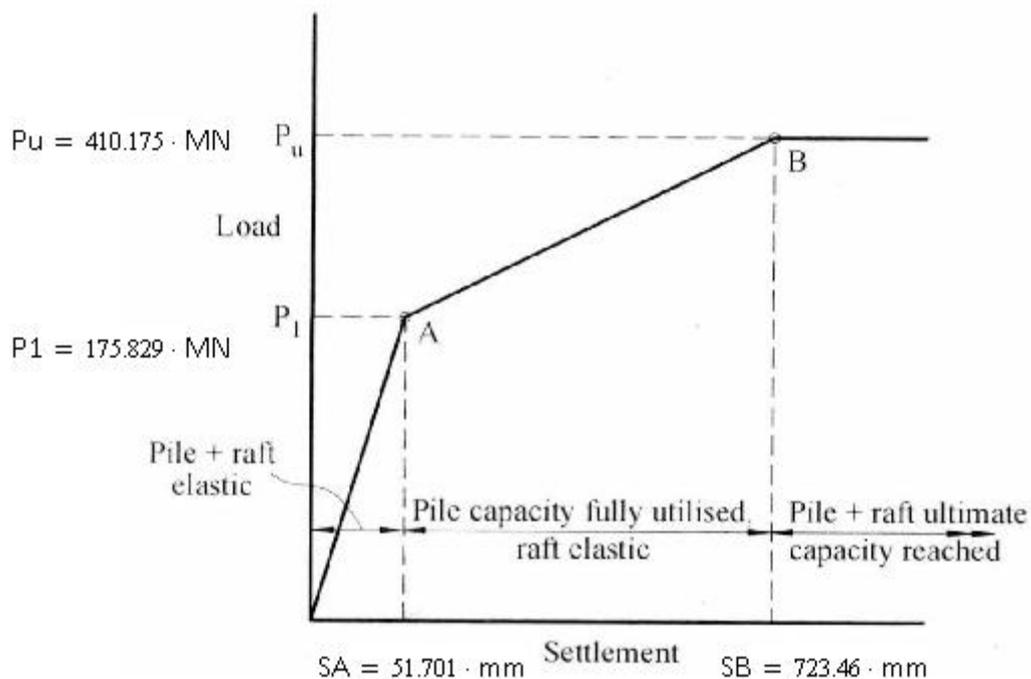


Figura 3.14: Curva simplificada. Análisis preliminar (Randolph 1994).

3.4 Análisis de los resultados, comparación con resultados reales

Una vez obtenidos los resultados se analizar los diferentes factores que intervienen en el diseño:

Efecto del espesor de la balsa:

Como resultado del análisis realizado se puede observar en la Figura 3.8 que para balsas de espesores muy pequeños el asentamiento tiene un aumento considerable pero para balsas a partir de 2 m de espesor los asentamientos no se ven grandemente afectados. Por otro lado como se observa en la Figura 3.9 se puede concluir que el incremento del espesor de la balsa es efectivo en la reducción del asentamiento diferencial.

Efecto del número de pilotes:

Como se observa en la Figura 3.10 con la adición de un pequeño número de pilotes se produce un efecto significativo en la reducción del asentamiento de la balsa.

Sin embargo como se puede observar a partir de 40 pilotes la reducción de los asentamientos es muy pequeña, casi insignificante, provocando proyectos antieconómicos, por lo que se puede concluir que un número de 42 pilotes es adecuado para esta cimentación en particular. Por lo que queda comprobado que

Cuando se colocan mas pilotes que los necesarios para disminuir el asentamiento, su efecto es no significativo.

Efecto de la profundidad de cimentación:

En la Figura 3.11 se puede observar claramente que a medida que aumenta la profundidad de cimentación disminuyen los asentamientos.

Como se puede observar en la Figura 3.12 al aumentar la profundidad de cimentación para pequeños grupos de pilotes los asentamientos de la cimentación decrecen considerablemente, sin embargo para grupos grandes esta disminución es casi nula. Esto trae consigo que al aumentar la profundidad de cimentación, una disminución del número de pilotes seguirá asegurando un comportamiento adecuado de la cimentación desde el punto de vista deformacional, asegurando así proyectos más económicos.

Algo similar sucede con el espesor de la balsa, como se observa en la Figura 3.13 al aumentar la profundidad de cimentación los asentamientos disminuyen pero a partir de los 4 m de profundidad este no se ve afectado por el espesor de la balsa, obteniendo asentamientos similares para balsas de 0.5, 2.5 y 3.5m de espesor.

Los resultados obtenidos con el uso de las hojas de cálculo en MathCad tienen correspondencia con resultados obtenidos por otros autores. Como se puede observar en la Tabla 3.2 los valores de asentamiento obtenidos por medio de las hojas de cálculo son similares a los medidos en el terreno y a los determinados por diferentes autores.

Tabla 3.2: Asentamientos determinados por diferentes métodos.

Método	Asentamiento (mm)	Observaciones
Elementos Finitos	120	Programa GARP
Ayudas de Diseño	141	Ayudas de Diseño en MathCad
Mediciones en el terreno	140	Medido al finalizar la construcción

Además del ejemplo anterior se analizaron otros ejemplos reales de la literatura internacional con el fin de demostrar la validación de las hojas de cálculo programadas basadas en métodos preliminares o simplificados:

Gran Terminal, Ghent, Bélgica:

Esta terminal situada en la ciudad de Ghent, Bélgica y diseñada para el tránsito y el almacenamiento, cuenta con una cimentación en BCP donde la balsa tiene un espesor

de 1.2 m y un área de 34 m x 84 m que descansa sobre 697 pilotes de concreto reforzado con una longitud de 13.4 m y un diámetro de 0.52 m. Las características del subsuelo asumidas en el análisis se encuentran en la Figura 3.15.

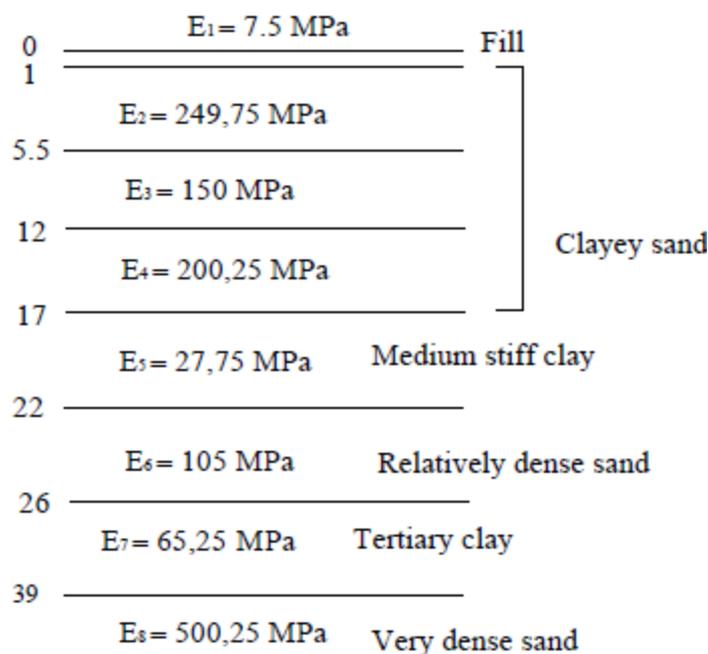


Figura 3.15: Perfil del subsuelo adoptado en el análisis., (Poulos 1993), (Mandolini and Viggiani 1997) (Guo and Randolph 1999).

El asentamiento obtenido en las hojas de cálculo en MathCad fue comparado con el medido en el terreno, el determinado con el uso del programa GASGROUP (usa el principio de superposición con factores de interacción) y el obtenido con el uso de métodos simplificados como el del pilote y la balsa equivalente. Como se puede observar en la Tabla 3.3 y al Figura 3.16 los resultados son muy similares.

Tabla 3.3: Asentamientos determinados por diferentes métodos.

Programa / Método de cálculo	Asentamiento (mm)	Observaciones
Medido en el terreno	185 mm	–
GASGROUP	186,3 mm	(Poulos 1993)
Balsa equivalente	111.83mm	(SAĞLAM 2003)
Pilote equivalente	176.49 mm	(SAĞLAM 2003)
Por hojas de Cálculo	163 mm	–

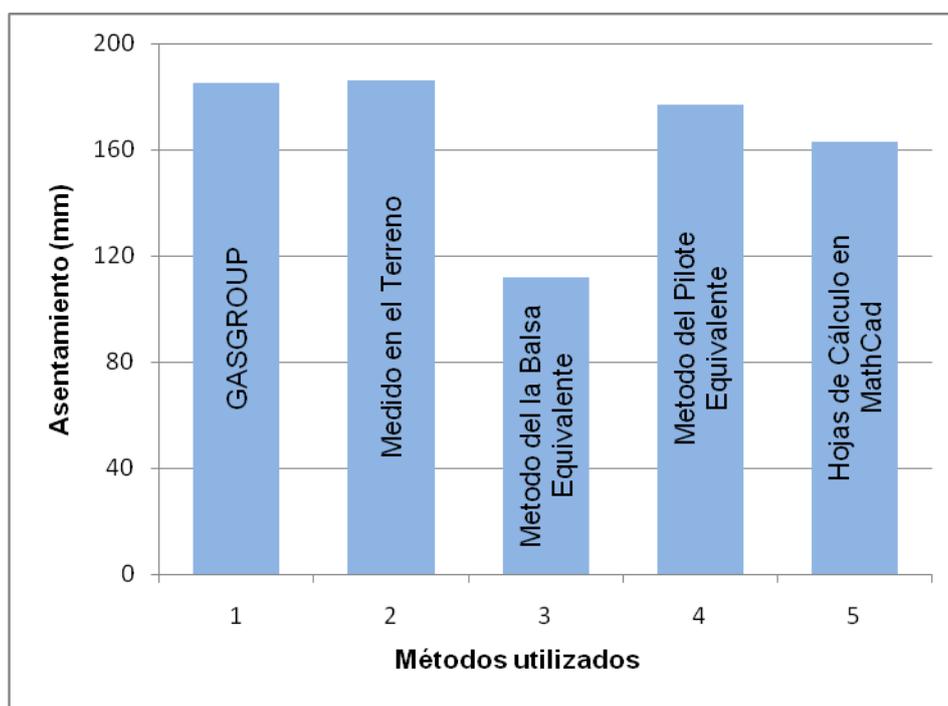


Figura 3.16: Comparación de resultados obtenidos con el uso de diferentes métodos.

Centro de Congresos, Frankfurt, Alemania:

El Centro de Congresos situado en Frankfurt, Alemania fue construido en 1995-1997 y está compuesto por un hotel de 13 pisos y un edificio de oficinas de 14 plantas al lado del hotel como se observa en la Figura 3.17. La cimentación de este edificio tiene un espesor que varía entre 0.8 - 2.7 m y se encuentra a 8 m por debajo de la superficie y

con un área de 10200 m². Está soportada por 141 pilotes ubicados debajo de las columnas más cargadas con el fin de minimizar los asentamientos diferenciales, estos tienen un diámetro de 1.3 m y su longitud y espaciamiento varía de acuerdo con la carga aplicada como se observa en la Figura 3.17. (Katzenbach 2000). Los asentamientos obtenidos en las hojas de cálculo, al igual que en ejemplo anterior, fueron comparados con los resultados de mediciones en el terreno y el empleo de métodos de análisis simplificados (SAĞLAM 2003), de este análisis podemos observar en la Tabla 3.4 y la Figura 3.18 que son muy similares.

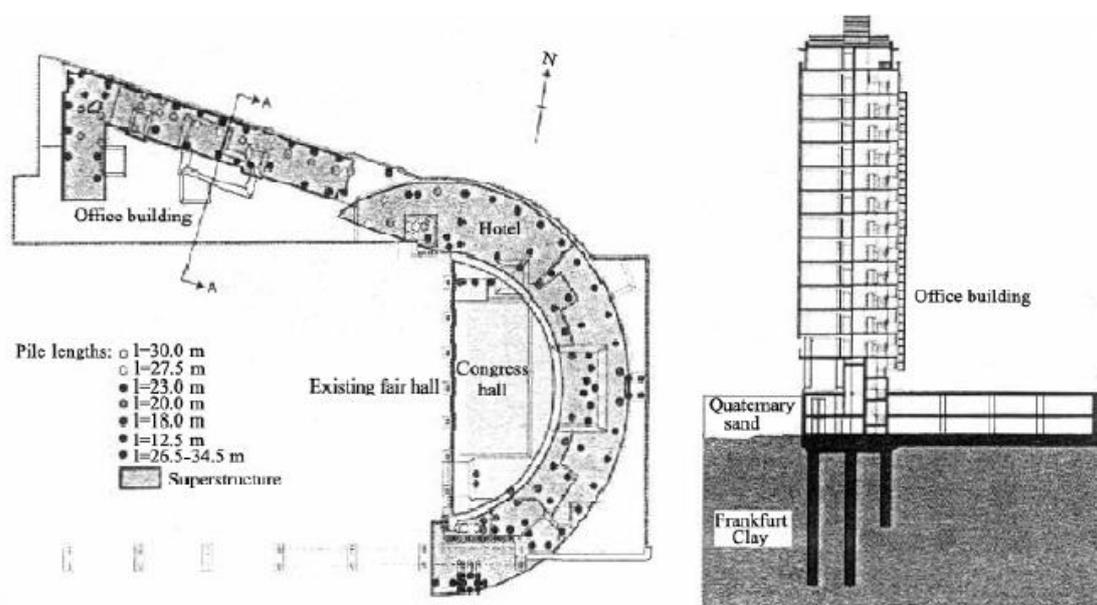
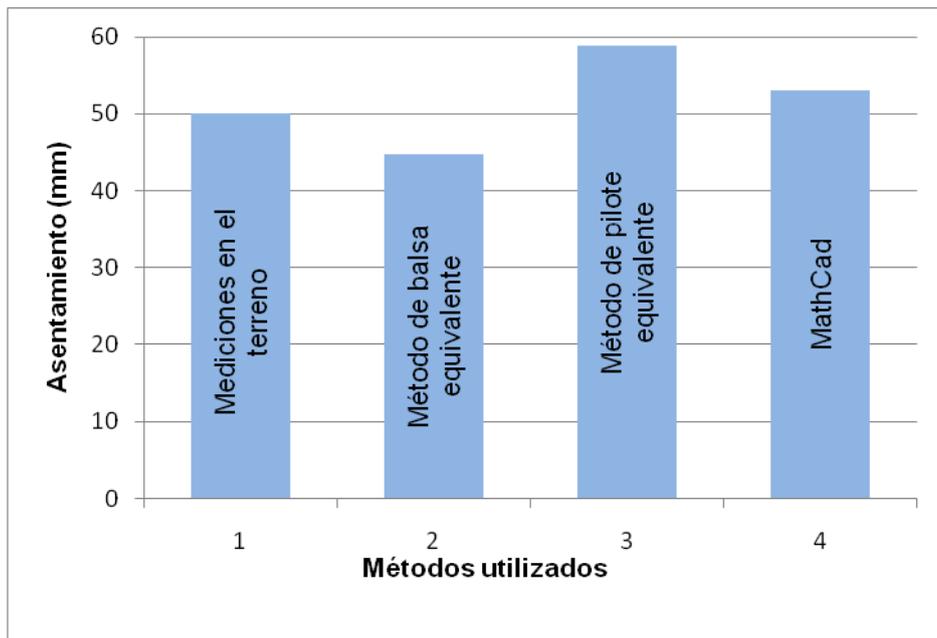


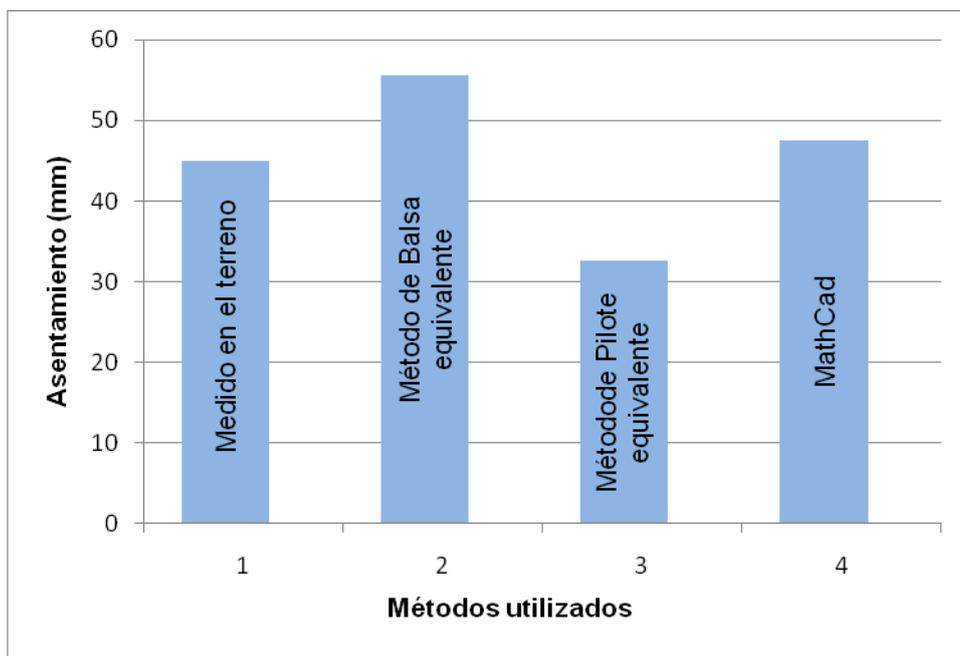
Figura 3.17: Vista en planta y sección A-A del Centro de Congresos, Frankfurt, Alemania. (Katzenbach 2000).

Tabla 3.4: Asentamientos determinados por diferentes métodos.

Programa / Método de cálculo	Asentamiento en el Hotel (mm)	Asentamiento en Oficinas (mm)	Obsevaciones
Medido en el terreno	50.00	45.00	–
Balsa equivalente	44.80	55.65	(SAĞLAM 2003)
Pilote equivalente	58.89	32.63	(SAĞLAM 2003)
Por hojas de Cálculo	53.02	47.56	–



(a)



(b)

Figura 3.18: Comparación de resultados obtenidos con el uso de diferentes métodos.

(a) Hotel (b) Oficinas.

Meseturm Tower, Frankfurt, Alemania:

Este edificio de 256 m de altura está cimentado sobre una balsa de 58 m x 58 m con un espesor que decrece de 6 m en el centro a 3 m en los bordes, como se observa en la Figura 3.19, soportada por 64 pilotes de 1.3 m de diámetro distribuidos en tres círculos concéntricos, su espaciamiento varía de 3.5-6m el diámetro y una longitud que varía entre 26.9- 34.9 m. La balsa encuentra a una profundidad de 14 m y a 9 m del nivel freático. El suelo está compuesto por una capa de grava y arena de 8 m seguido por una de arcilla de Frankfurt con una profundidad de más de 100 m. La carga estimada del edificio es de 1880 MN. Como en los casos anteriores se compararon los asentamientos obtenidos con los medidos en el terreno (Katzenbach 2000) y por medio de métodos simplificados (SAĞLAM 2003) obteniendo resultados similares como se observa en la Tabla 3.5 y Figura 3.20.

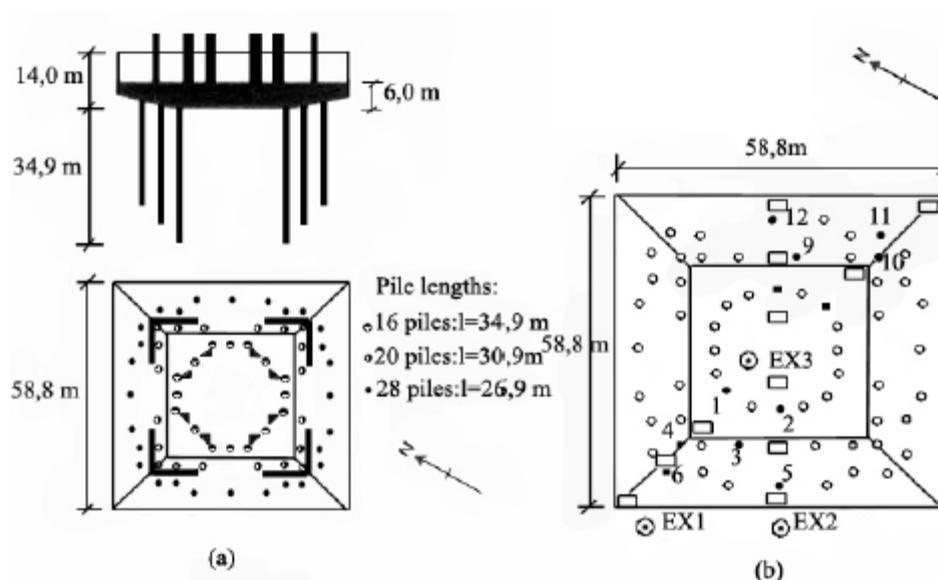


Figura 3.19: Cimentación en BCP de Messeturm Tower, (a) Sección transversal
(b) Localización e instrumentación de los pilotes. (Katzenbach 2000) (Poulos 2001)

Tabla 3.5: Asentamientos determinados por diferentes métodos.

Programa / Método de cálculo	Asentamiento (mm)	Observaciones
Medido en el terreno	130.00	–
Balsa equivalente	107.35	(SAGLAM 2003)
Pilote equivalente	141.70	(SAGLAM 2003)
Por hojas de Cálculo	138.00	–

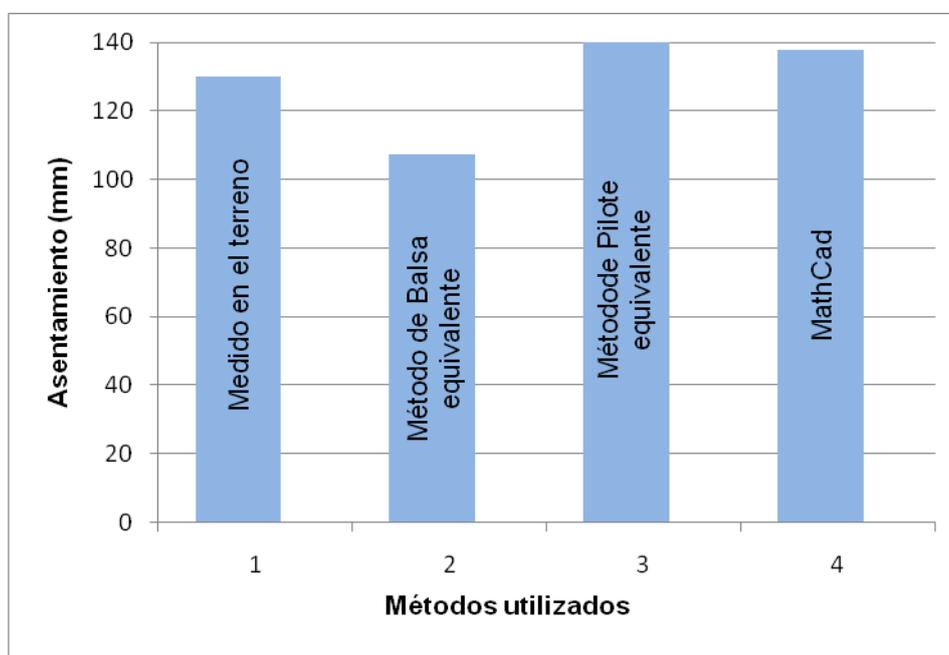


Figura 3.20: Comparación de resultados obtenidos con el uso de diferentes métodos para el edificio Messeturm Tower.

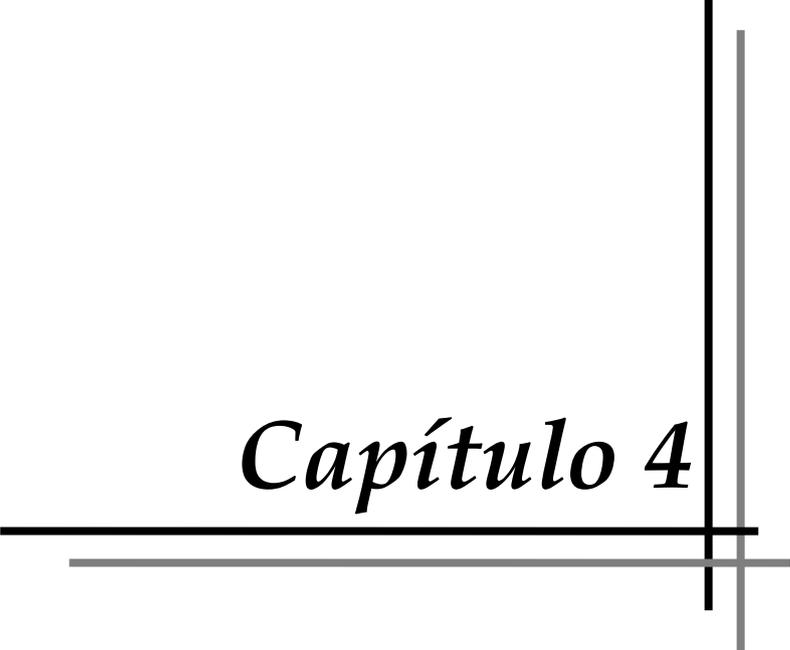
3.5 Conclusiones del capítulo

Una vez analizados los resultados obtenidos en las hojas de cálculo de MathCad podemos arribar a las siguientes conclusiones:

1. El uso de las hojas de cálculo programadas en MathCad facilita el proceso de diseño y permite evaluar de manera sencilla los factores que intervienen en el proceso de diseño.
2. El aumento de la profundidad de cimentación resulta beneficioso en la reducción de asentamientos y la ejecución de proyectos más económicos.

3. Con el uso de métodos de cálculo simplificado o preliminar se alcanzan resultados similares a los reales o con el uso de métodos de cálculo detallado.

Capítulo 4



Capítulo 4: “Modelación de balsas combinadas con pilotes”

4.1 Introducción

Numerosas contribuciones en el análisis de cimentaciones en BCP han sido realizadas por diversos investigadores ((Berezantzev 1961), (Vesic 1969), (Burland 1977)). Como un gran paso de avance en el análisis, varios softwares computacionales están disponibles en estos momentos para el estudio de este tipo de cimentaciones y han sido reportados por muchos investigadores. Entre estos software podemos encontrar: PILEGRP (1989), UNIPILE (2004), CAPWAP (1996), GASP (1998), GROUP (1989), NAPRA (1998), FLAC (2000), ABAQUS (2003) y muchos otros.

El método de elementos finitos constituye en la actualidad el procedimiento de cálculo más utilizado en Mecánica Estructural y Mecánica de Sólidos. Su uso está también muy extendido en la resolución de problemas de Transferencias de Calor, y empieza a cobrar importancia en otras áreas, como la Mecánica de Fluidos o el Electromagnetismo.

Los análisis numéricos que usan técnicas de elementos finitos son populares en estos años en el campo de la geotecnia. Hasta la fecha una gran variedad de programas de este tipo han sido desarrollados con un gran número de facilidades para satisfacer diferentes necesidades, el comportamiento del suelo también está incorporado. El análisis de cimentaciones en BCP con el uso de elementos finitos ha sido utilizado por varios autores (Reul and Randolph 2003) (Poulos 2001a),.

El programa PLAXIS fue creado en la universidad Técnica de Delft, a partir de una iniciativa del Departamento de Trabajos Públicos y Dirección del Agua, en el año 1987. El objetivo inicial fue el desarrollo de un código de fácil uso basado en elementos finitos para el análisis de diques construidos sobre las capas de suelo blando que forman el subsuelo de Holanda. En los años siguientes el programa PLAXIS ha sido ampliado para cubrir la mayor parte de las áreas de la ingeniería geotécnica.

En este capítulo se realizará la modelación de una cimentación en BCP utilizando este programa, con el fin de analizar cómo influye la profundidad de cimentación en este tipo de cimentación. Además se utilizará el programa Tief y las hojas de cálculo programadas en MathCad, verificando así una vez más la facilidad de su uso.

4.2 Recomendaciones para la modelación por MEF de BCP

A la hora de enfrentar cualquier problema ingenieril innumerables son las formas de resolverlos y en muchos casos el modelo propuesto solo puede ser soluble con la aplicación de potentes programas de computación con base en diferentes Métodos Numéricos. Diferentes autores coinciden que los procedimientos a la hora de resolver un problema (Sowers 1977) deben seguir la siguiente secuencia:

- 1- Identificar el problema en su totalidad y después simplificarlo, dividiéndolo en partes y fijando factores significativos.
- 2- Utilizar las teorías apropiadas con las tolerancias permitidas, impuestas por sus limitaciones.
- 3- Utilizar modelos físicos o matemáticos cuando se compruebe que las teorías son inadecuadas.
- 4- Los resultados de los estudios teóricos y con medios deben ser interpretadas a la luz de la experiencia.
- 5- Las lagunas en el conocimiento del problema deben llenarse intuitivamente.
- 6- Las soluciones deben ser reevaluadas y revisadas cuando la observación del funcionamiento real de la obra demuestre que son inadecuadas.

Los métodos numéricos son aquellos en los que la solución analítica es inabordable por la complejidad matemática que requiere y que hoy en día con la ayuda del cálculo electrónico se tiene una respuesta rápida. Dentro de estos métodos podemos citar el Método de las Diferencias Finitas y el Método de los Elementos Finitos. En el primero de ellos es preciso, como paso previo, la formulación de la ecuación o sistema de ecuaciones diferenciales que rigen el problema. El principio fundamental del método estriba en sustituir la expresión diferencial por una expresión equivalente en términos de incrementos finitos de las variables. Todas las variables del problema quedan discretizadas. La discretización de las variables geométricas conduce a una subdivisión del dominio mediante una red ortogonal. La discretización de las ecuaciones diferenciales permite obtener expresiones que relacionan los valores de las variables y sus incrementos y por tanto permiten la solución en forma incremental (Jimenez Salas 1986).

Una malla de elementos finitos para la solución de un problema debe tener en cuenta lo esencial de la geometría de la estructura y las capas de suelo que se ponen en contacto para la solución del problema (heterogeneidad de los materiales, presencia

de discontinuidad). Pero la malla debe ser en sí, el fruto de un compromiso entre la capacidad de cálculo posible (número máximo de grados de libertad) y la precisión aceptable sobre los resultados numéricos. La malla utilizada debe ser construida considerando los siguientes puntos.

1 Todas las simetrías compatibles con el problema mecánico (geometría, condiciones límites, cargas) deben ser utilizadas a fin de reducir el tamaño del sistema estudiado.

2 La malla debe ser suficientemente fina en las zonas más solicitadas, quiere decir, en las zonas donde existan grandes variaciones de los desplazamientos y las tensiones. Estas variaciones son coaccionadas ya sea por una carga, o por la presencia de una singularidad geométrica (ángulo brusco, cambio de espesor), por los contornos geométricos de fuerte curvatura (cavidades), o también por las características mecánicas localmente muy leves o muy fuertes en correspondencia a este medio ambiente (Mestat 1993).

3 El tamaño de los elementos debe estar, en la medida de lo posible de tal forma que la relación entre la mayor dimensión del elemento y la menor dimensión este cercana a la unidad. En particular, en las zonas de fuertes gradientes, los triángulos tendrán similitud, en lo posible, a los triángulos equiláteros, los cuadriláteros a los cuadrados, y los hexaedros a los cúbicos, para no introducir perturbaciones en los cálculos numéricos (distorsión de los elementos).

4 En las zonas menos solicitadas, los elementos de gran tamaño son generalmente colocados en el lugar para alcanzar las fronteras exteriores. No hay reglas precisas para establecer el tamaño de los elementos, es suficiente argumentar un aumento progresivo regular lejos de las zonas sensibles.

La modelación de las obras geotécnicas por los Métodos de los Elementos Finitos se ha hecho posible por un grupo de hipótesis basadas en la geometría de las obras, de su entorno, los materiales y su comportamiento, las cargas, las condiciones límites y las condiciones iniciales. Estas hipótesis, muchas veces simplificadas (pero que deben respetar los fenómenos mecánicos esenciales) han quedado bajo la responsabilidad del ingeniero encargado del estudio. Por otra parte los resultados obtenidos a través de la modelación demuestran la posibilidad de la utilización de los métodos numéricos para la modelación de las cimentaciones sobre pilotes y la validez de las recomendaciones prácticas abordadas en el trabajo.

En la Facultad de Construcciones contamos con programas que trabajan con el método de los elementos finitos entre los que podemos citar el Geoslope, Plaxis,

Abacus, Staad Pro y Sap 2000. Dentro del Paquete Geoslope se encuentra el Sigma/W en el cual se pueden modelar problemas tensionales y deformacionales planos e incluye los modelos de suelo Mohr-Coulomb y Can Clay, entre otros. Su aplicación esta relaciona con problemas geotécnicos, lográndose modelar en el mismos ensayos de carga y determinación de cargas de rotura. De todos los sistemas, a pesar de realizar un análisis plano y axial simétrico, es de fácil manejo, y no requiere de un gran número de pasos para definir el modelo. (Leiva 2010)

El Abacus, considerado como una de la más potente herramienta, permite el análisis en 3D para diferentes modelos de materiales obteniéndose estados tensionales y deformacionales, carga de rotura, etc. En el mismo el mallado es creado por el usuario, incluyendo un gran cantidad de tipos de elementos y permitiendo introducir los criterios de resistencia de los materiales a modelar. De todos los sistemas, a pesar de su versatilidad, es de mayor complejidad en su aplicación, por la cantidad de datos de entrada necesarios para la corrida

El SAP 2000 y el Staad Pro analizan y diseñan estructuras de hormigón, acero, madera y otros materiales, se puede trabajar en 2D y 3D es aplicable para estructuras, no para problemas geotécnicos. Las recomendaciones aquí tratadas son validad para el mallado del modelo, y aunque incluyen elementos tipo sólido de 8 nodos, su aplicación está vinculada a estructuras de hormigón armado.

El sistema Plaxis, que será el utilizado en este capítulo, permite analizar en 2D y 3D problemas geotécnicos, fundamentalmente relacionados con cimentaciones, presas de tierras y tabla estacas. En el mismo se pueden modelar problemas de capacidad de carga estados tensionales y deformacionales, incluyendo una biblioteca de materiales que describen fundamentalmente el comportamiento del suelo, el hormigón y el acero. En este sistema es de destacar que el mallado es autogenerado por el mismo, y el usuario, puede en función del problema analizado densificar la malla, lo que se traduce en mayor precisión en los cálculos y requerimiento computacional. (Leiva 2010)

En la literatura internacional, podemos citar otros softwares como el COSMOS, ANSYS y más recientemente el MIDAS, con las mismas potencialidades a los anteriormente citados y de mayor uso en la Ingeniería Mecánica.

La selección del software a utilizar dependerá del tipo de problema a modelar, la capacidad de respuesta computacional (Hardware) y el conocimiento que se tenga del mismo, o sea los datos que son necesarios para su corrida, y los resultados que el mismo brindan en función de las necesidades del ingeniero.

4.3 Modelación de BCP. Calibración del modelo

Como se ha comentado anteriormente, el programa PLAXIS fue concebido inicialmente para el análisis de diques construidos sobre las capas de suelo blando que forman el subsuelo de Holanda. Actualmente, las aplicaciones de PLAXIS engloban la mayoría de los problemas de ingeniería geotécnica, tanto de mecánica de suelos como de mecánica de rocas.

El programa PLAXIS es recomendado para problemas de excavaciones subterráneas, análisis de la tensión y deformación del suelo sometido a grandes cargas drenadas y no drenadas, y problemas de flujo acoplado.

PLAXIS permite el estudio de una gran variedad de modelos constitutivos:

- Modelo de elasticidad
- Modelo de Mohr – Coulomb
- Modelo del endurecimiento isotrópico (Hardening-Soil)
- Modelo del deslizamiento del suelo blando
- Modelo del suelo blando

Aunque las aplicaciones del programa en problemas de geotecnia parecen estar totalmente resueltos, en realidad no es así, ya que el programa ha sido desarrollado partiendo de la filosofía inicial del estudio del subsuelo sometido a grandes cargas y a grandes excavaciones subterráneas, incluyendo en todos ellos el problema de flujo y ofreciendo la posibilidad del análisis mediante diferentes modelos de comportamiento del terreno. De todos modos, PLAXIS es un programa que almacena gran cantidad de opciones para el estudio de cualquier tipo de terreno y de geometría.

El programa Tief, por su parte, pertenece al paquete de GEOTEC Office encargado de realizar diseños geotécnicos, contiene los siguientes programas: ELPLA (Análisis de las zapatas, balsas y grupos de pilotes), BOHR (Dibujo de registro del pozo de capas de suelo por medio de símbolos diferentes), GeoTools (Analizar los diferentes problemas de ingeniería geotécnica) y el Tief que analiza pilotes individuales, las paredes del pilote, los problemas simples de grupos de pilotes y balsas combinadas con pilotes.

El ejemplo real a analizar con el uso del programa PLAXIS, el Tief y el MathCad es el propuesto por (OH 2008), este cuenta con una balsa de cimentación de 5 m x 5m y un espesor de 0.5 m y con cuatro pilotes de 16 m de longitud y 0.5 m de diámetro,

espaciados a 3 m. Las condiciones del subsuelo son similares a las de Surfers Paradise en Australia y son resultado de ensayos realizados en el terreno, las propiedades del suelo adoptadas para el análisis se pueden observar en la Figura 4.1.

El suelo de Surfers Paradise tiene una elevada capacidad de carga en la superficie lo que hace favorable el uso de cimentaciones en balsa, pero la alta compresibilidad de la turba orgánica puede ser el causante de asentamientos excesivos para los edificios cimentados en esa zona, es por esto la necesidad del uso de cimentaciones en BCP.

0		Capa 1: Loose-Medium Sand	$\gamma = 15 \text{ kN/m}^3$, $\gamma_{\text{sat}}=18 \text{ kN/m}^3$, $C=0 \text{ kN/m}^2$, $\phi=28^\circ$, $E_s=6 \text{ MN/m}^2$, $\mu=0.3$
5		Capa 2: Arena Densa	$\gamma = 12 \text{ kN/m}^3$, $\gamma_{\text{sat}}=20 \text{ kN/m}^3$, $C=0 \text{ kN/m}^2$, $\phi=36^\circ$, $E_s=30 \text{ MN/m}^2$, $\mu=0.3$
13		Capa 3: Turba Orgánica	$\gamma_{\text{sat}}=17 \text{ kN/m}^3$, $C=25 \text{ kN/m}^2$, $\phi=0^\circ$, $E_s=8 \text{ MN/m}^2$, $\mu=0.35$
16		Capa 4: Arena muy Densa	$\gamma = 17 \text{ kN/m}^3$, $\gamma_{\text{sat}}=20 \text{ kN/m}^3$, $C=0 \text{ kN/m}^2$, $\phi=36^\circ$, $E_s=35 \text{ MN/m}^2$, $\mu=0.3$
22		Capa 5: Arcilla Rígida	$\gamma = 16 \text{ kN/m}^3$, $\gamma_{\text{sat}}=19 \text{ kN/m}^3$, $C=80 \text{ kN/m}^2$, $\phi=0^\circ$, $E_s=20 \text{ MN/m}^2$, $\mu=0.35$
30			

Figura 4.1: Propiedades del suelo utilizadas en el análisis. (OH 2008).

Para la modelación del suelo y basados en el material que lo compone (arena principalmente) es preferible utilizar el modelo de Mohr-Coulomb por su simplicidad y rapidez para realizar un análisis preliminar de cualquier problema a resolver.

La balsa fue modelada utilizando el comando "Floor" y los pilotes utilizando el "Pile" con los apropiados parámetros geométricos y geotécnicos que se pueden ver resumidos en la Tabla 4.1.

La cimentación deberá soportar una carga de servicio de 215 kN/m.

Tabla 4.1: Parámetros utilizados en el análisis.

Parámetro	Balsa	Pilote
Módulo General de Deformación, E : MPa	34000	23500
Coefficiente de Poisson	0.2	0.2
Espesor/ Diámetro, m	2.5	0.9
Cantidad	1	4

En la Figura 4.2 se puede observar el modelo de la cimentación realizado en el programa PLAXIS y en la Figura 4.3 se presenta la curva Carga vs Deformación obtenida como resultado del análisis. Se obtuvo un asentamiento de 0.335 m.

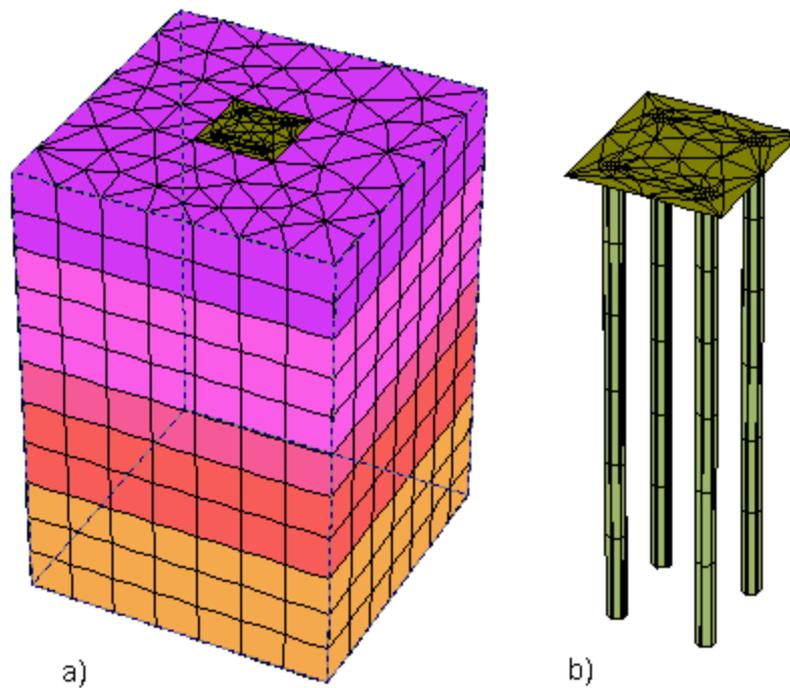


Figura 4.2: Modelación de las capas de suelo (a) y la cimentación en BCP (b).

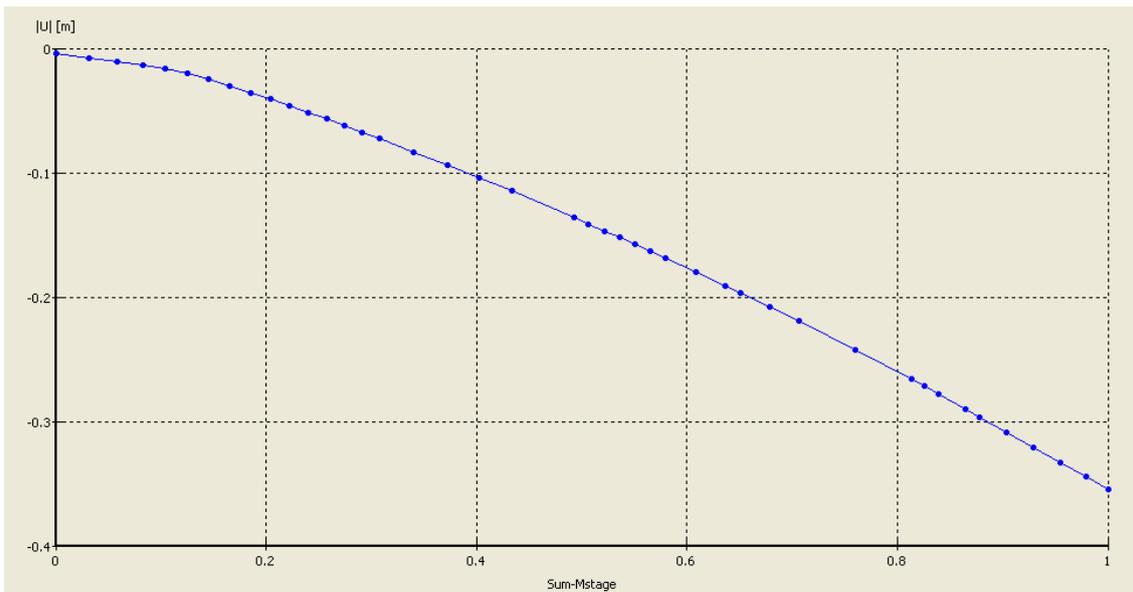


Figura 4.3: Curva carga vs Deformación obtenida para una profundidad de cimentación de 0 m.

Luego se procedió a la determinación de los asentamientos con el programa Tief perteneciente al paquete de Geotec Office, para esto fue necesario introducir los datos iniciales como se muestra en las Figuras 4.4, 4.5, 4.6 y 4.7. El valor de asentamiento obtenido fue de 37.94 mm. Las hojas con el proceso de cálculo en el programa Tief se pueden observar en el Anexo 1.

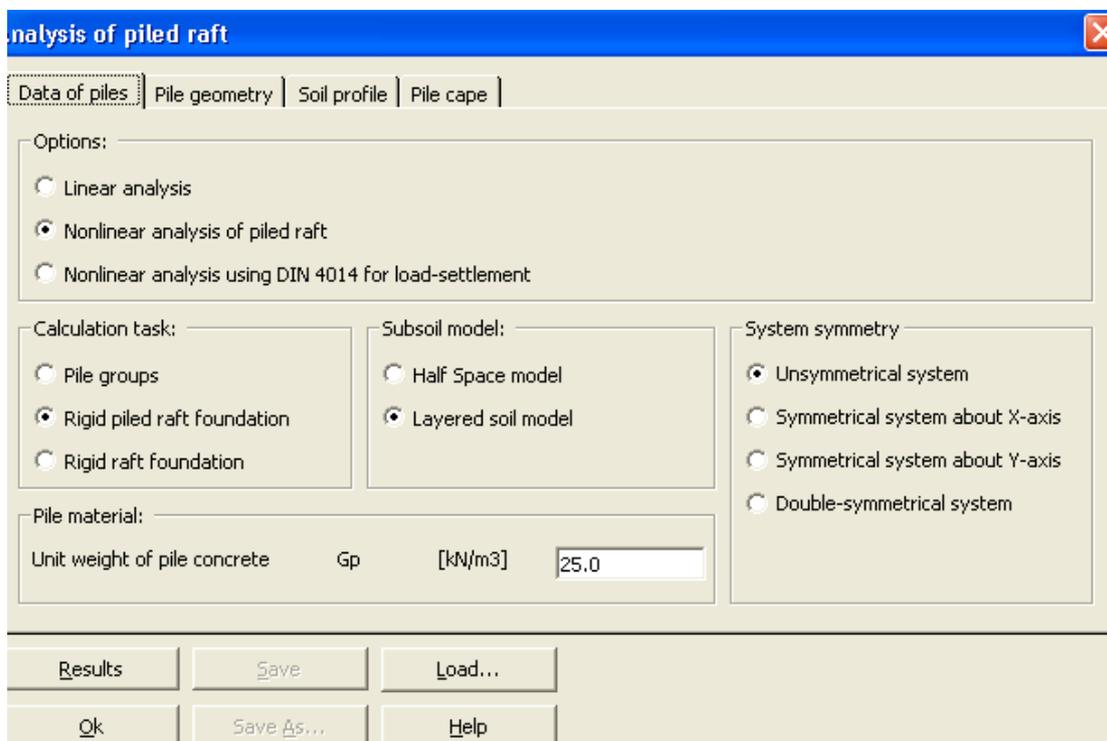


Figura 4.4: Pantalla principal del programa Tief.

No. I [-]	Pile length L [m]	Pile diameter D [m]	X-coord. Xp [m]	Y-coord. Yp [m]	Limit pile load Qli [kN]
1	20.00	0.50	1.00	1.00	640.0
2	20.00	0.50	1.00	4.00	640.0
3	20.00	0.50	4.00	1.00	640.0
4	20.00	0.50	4.00	4.00	640.0

Figura 4.5: Datos de los pilotes.

Layer No. I [-]	Level of layer under ground Z [m]	Modulus of compressibility for loading Es [kN/m ²]	Modulus of compressibility for reloading [kN/m ²]	Poisson's ratio of soil Nue [-]	Unit weight of the soil Gam [kN/m ³]	Penetration resistance qs [kN/m ²]	Undrainage cohesion of soil Cu [kN/m ²]
1	5.00	6000	6000	0.30	15.0	10.000	0.000
2	13.00	30000	30000	0.30	17.0	72.000	0.000
3	16.00	8000	8000	0.35	0.0	11.000	25.000
4	22.00	35000	35000	0.30	17.0	73.000	0.000
5	30.00	20000	20000	0.50	16.0	20.000	80.000

Figura 4.6: Datos de las capas de suelo.

Pile cape:

Dimension of the pile cape in X-direction	A	[m]	<input type="text" value="5.00"/>
Dimension of the pile cape in Y-direction	B	[m]	<input type="text" value="5.00"/>
Depth of the pile cape base under the surface	Tf	[m]	<input type="text" value="6.00"/>
Unit weight of the pile cape concrete	Gb	[kN/m ³]	<input type="text" value="25.0"/>
Thickness of the pile cape	Te	[m]	<input type="text" value="0.50"/>
Load on the pile cape	Pa	[kN]	<input type="text" value="13760.0"/>
Eccentricity	ex	[m]	<input type="text" value="0.00"/>
Eccentricity	ey	[m]	<input type="text" value="0.00"/>

Figura 4.7: Características de la balsa.

Los valores de asentamiento obtenidos para esta cimentación con el uso de las hojas de cálculo programadas en MathCad y el Tief fueron similares como se puede observar en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2: Asentamiento obtenido con el uso de varios programas.

Programa Utilizado	Asentamiento (cm)
PLAXIS	33.50
Tief	37.94

MathCad	36.62
---------	-------

4.4 Modelación de BCP, efecto de la profundidad de cimentación

Con el fin de analizar la influencia de la profundidad de cimentación en el comportamiento de la misma se realizaron dos modelos en el programa PLAXIS, para 3 y 6 m.

Para una profundidad de cimentación diferente de 0 las paredes de la excavación fueron modeladas utilizando el comando ``Wall``. En la Figura 4.4 se observa el modelo de la cimentación en BCP para una profundidad de cimentación de 3 m y en la Figura 4.5 la curva carga vs deformación obtenida.

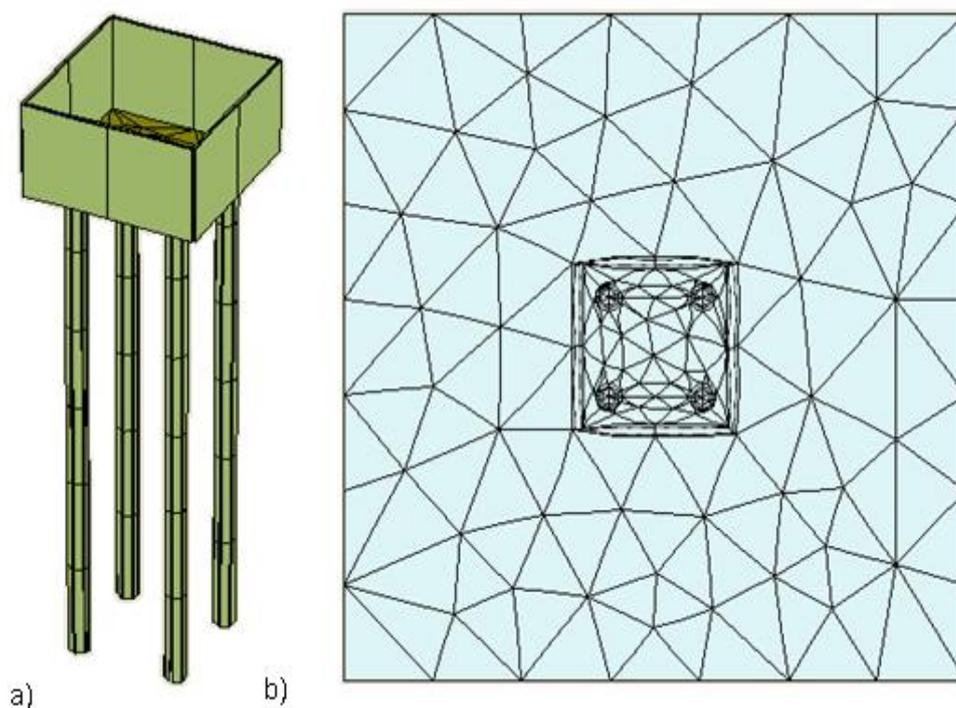


Figura 4.4: Modelación de la cimentación en BCP (a) y vista en planta (b).

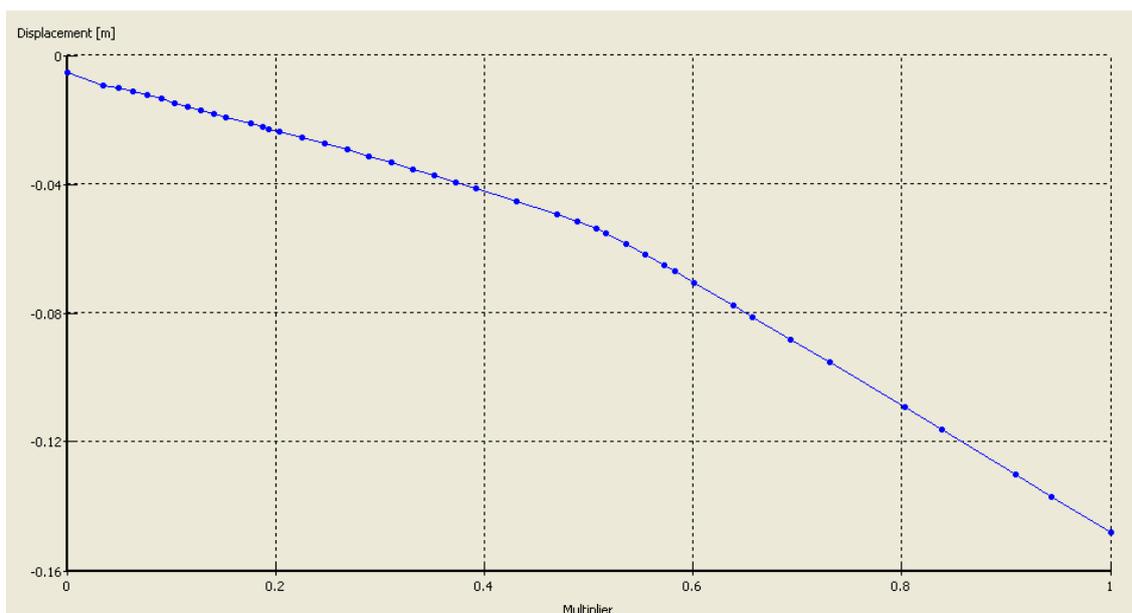


Figura 4.5: Curva carga vs Deformación obtenida para una profundidad de cimentación de 3 m.

Los valores de asentamiento obtenidos para esta cimentación con el uso de las hojas de cálculo programadas en MathCad y el Tief fueron similares como se puede observar en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2: Asentamiento obtenido con el uso de varios programas.

Programa Utilizado	Asentamiento (cm)
PLAXIS	14.80
Tief	17.20
MathCad	15.68

En la Figura 4.6 se observa el modelo de la cimentación en BCP para una profundidad de cimentación de 6 m y en la Figura 4.7 la curva carga vs deformación obtenida.

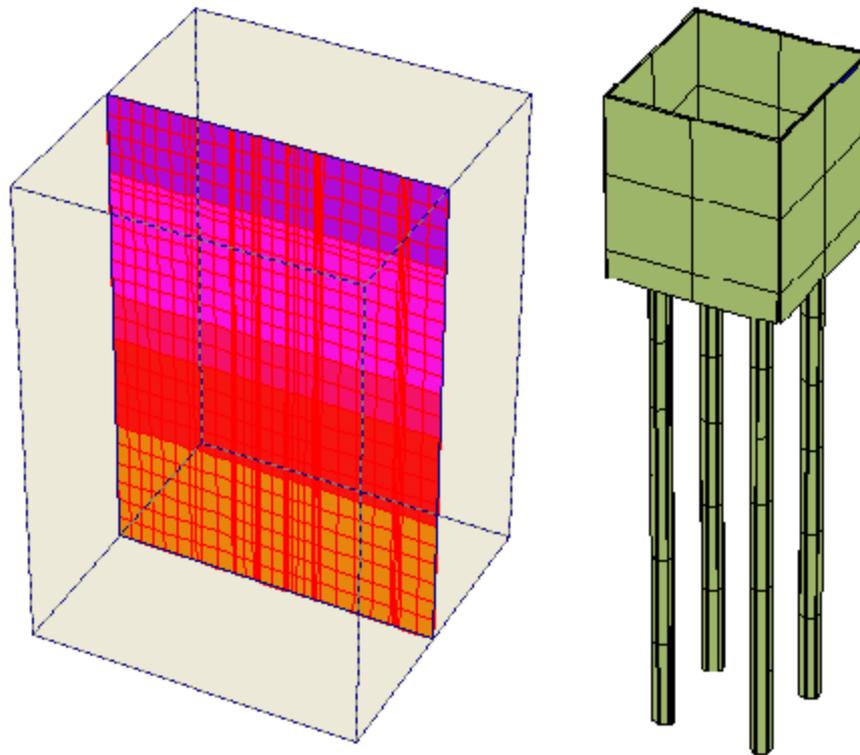


Figura 4.6: Modelación de la cimentación en BCP.

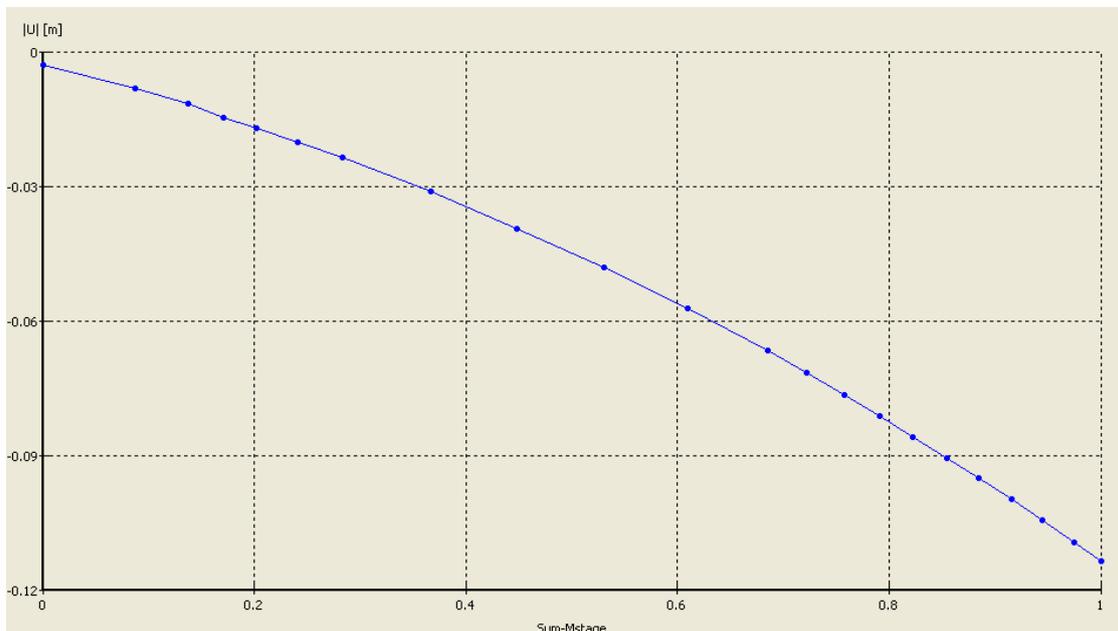


Figura 4.7: Curva carga vs Deformación obtenida para una profundidad de cimentación de 6 m.

En la Figura 4.8 se puede observar la sección transversal de la cimentación modelada donde se observa que los asentamientos mayores se encuentran en los bordes de la cimentación.

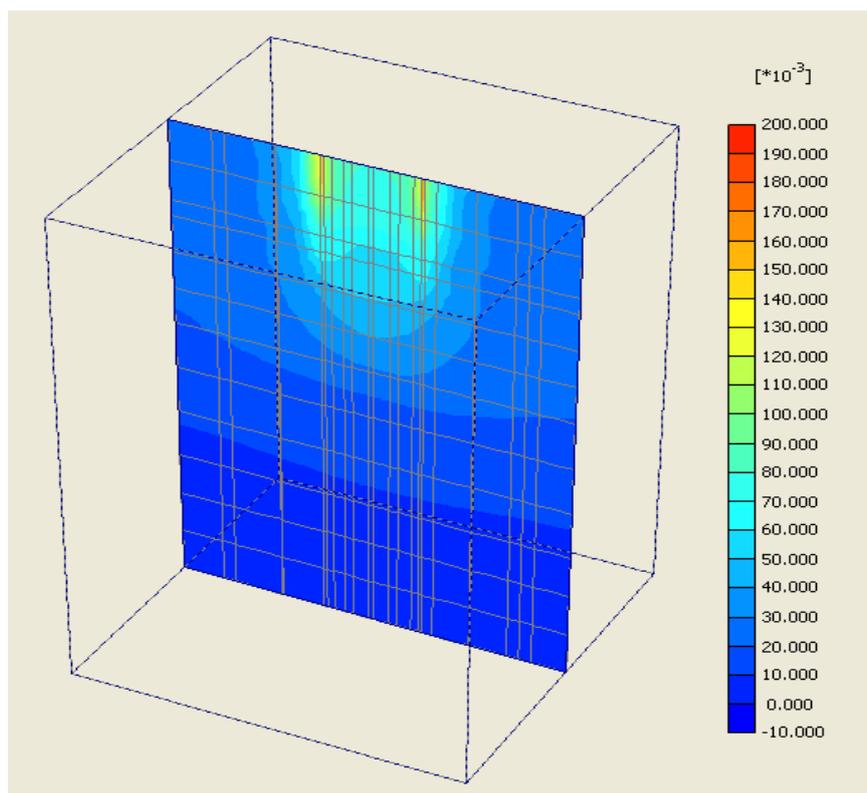


Figura 4.8: Asentamientos de la cimentación en BCP.

Los valores de asentamiento obtenidos con el uso de las hojas de cálculo programadas en MathCad y el Tief fueron similares como se puede observar en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3: Asentamiento obtenido con el uso de varios programas.

Programa Utilizado	Asentamiento (cm)
PLAXIS	11.40
Tief	9.74
MathCad	9.02

4.5 Análisis de los resultados

Como se observa en la Figura 4.9 y en la Tabla 4.4 el aumento de la profundidad de cimentación en cimentaciones en BCP trae consigo una disminución considerable en los asentamientos del sistema. También se puede observar en la Tabla 4.4 y en la Figura 4.10 que los resultados obtenidos con el uso del programa PLAXIS, el Tief y las hojas de cálculo son similares, demostrando una vez más que son un medio seguro y sencillo para realizar el análisis de cimentaciones en BCP.

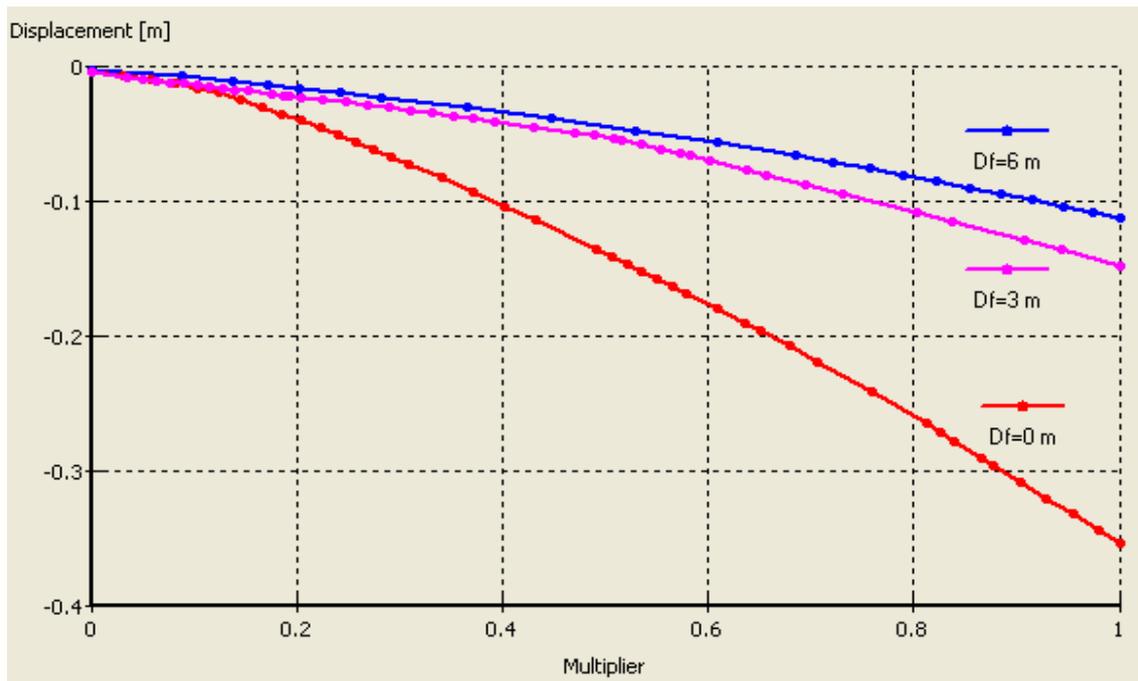


Figura 4.9: Curvas carga vs deformación para profundidades de cimentación de 0, 3 y 6 m.

Tabla 4.4: Resultados obtenidos para profundidades de cimentación de 0, 3 y 6 m.

Profundidad de cimentación, Df (m)	Asentamiento (cm)		
	PLAXIS	Tief	MathCad
0	35.50	37.94	36.62
3	14.80	17.20	15.68
6	11.40	9.74	9.02

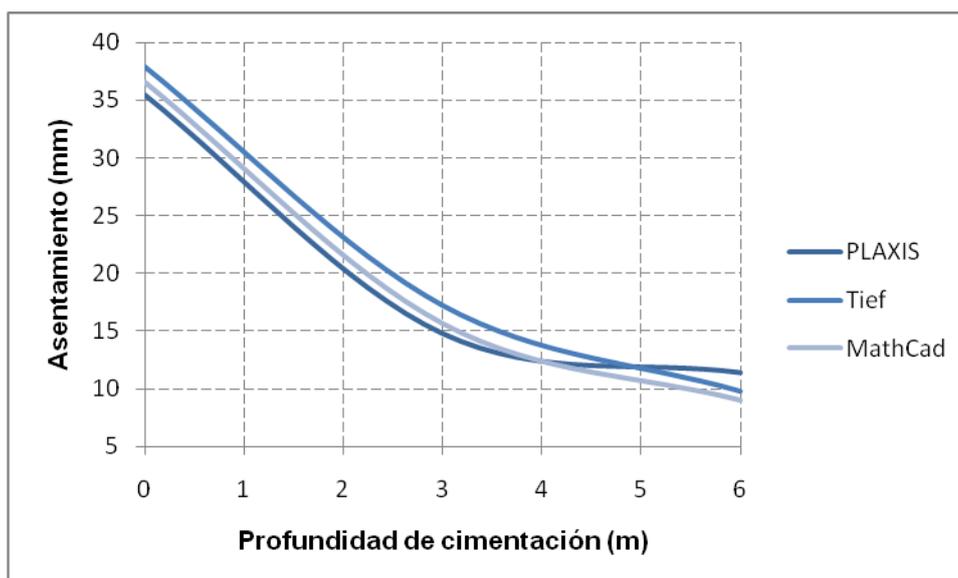


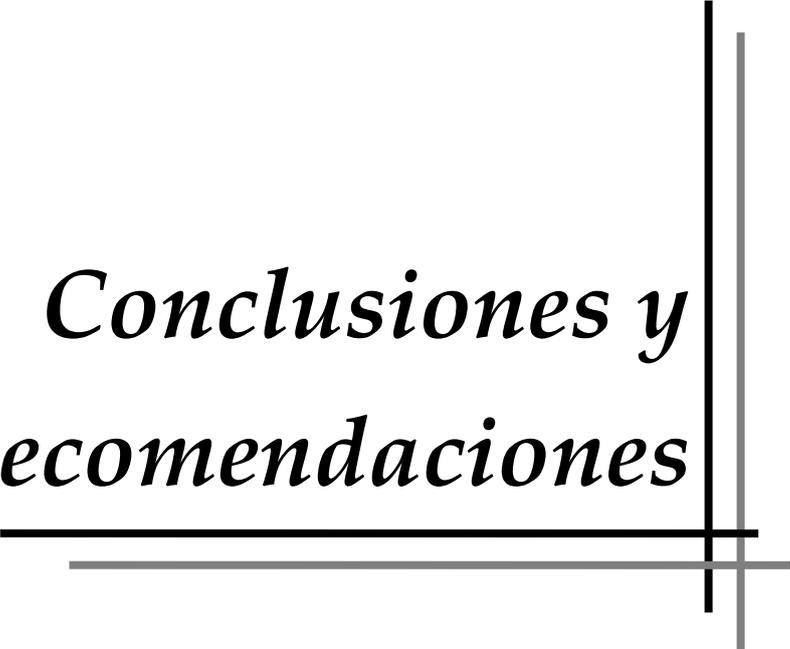
Figura 4.10: Resultados obtenidos para profundidades de cimentación de 0, 3 y 6 m.

4.6 Conclusiones del capítulo

Una vez analizada la cimentación en BCP con el uso del programa PLAXIS, el Tief y las hojas de cálculo programadas en MathCad se puede llegar a las siguientes conclusiones:

1. El uso de softwares para el análisis y diseño de cimentaciones en BCP, basados en métodos numéricos tienen en cuenta influencias complejas en el análisis, reportando resultados razonables.
2. El uso de las hojas de cálculo en MathCad permite evaluar de manera sencilla los factores que intervienen en el proceso de diseño, alcanzando resultados similares a los obtenidos con el uso de software más complejos.
3. Se ha comprobado que el aumento de la profundidad de cimentación resulta beneficioso en la reducción de asentamientos y por tanto en la ejecución de proyectos más económicos.

*Conclusiones y
Recomendaciones*

A decorative graphic consisting of a vertical line on the right side and a horizontal line at the bottom, intersecting to form a corner shape. The vertical line is on the right side of the text, and the horizontal line is below the text.

Conclusiones Generales

En este trabajo de diploma han sido investigadas diferentes problemáticas relacionadas con el análisis de las cimentaciones en balsa combinadas con pilotes (BCP), como los métodos disponibles actualmente para realizar su análisis, los diferentes factores que intervienen en este, las facilidades que brinda el uso de hojas de cálculo y softwares más complejos en su diseño, entre otros. Estos aspectos fueron abordados en cuatro capítulos llegando a conclusiones específicas en cada uno de ellos. A continuación, se hace énfasis en aquellas conclusiones, que engloban el aporte de este trabajo al tema objeto de estudio:

1. Existe un gran número de métodos propuestos para realizar el análisis y el diseño de cimentaciones en BCP, basadas en diferentes criterios e hipótesis.
2. Los softwares para el análisis y diseño de cimentaciones en BCP, basados en métodos numéricos tienen en cuenta influencias complejas en el análisis. La efectividad de estos métodos ha sido comprobada por la comparación con resultados reales.
3. Los métodos simplificados son válidos puesto que se alcanzan resultados satisfactorios y a nivel de anteproyecto dan una idea general del comportamiento de la cimentación.
4. El uso de las hojas de cálculo programadas en MathCad, basadas en métodos simplificados, facilita el proceso de diseño y permite evaluar de manera sencilla los factores que intervienen en el proceso de diseño, reportando resultados favorables.
5. La profundidad de cimentación es un factor muy importante a tener en cuenta en el proceso de diseño, ya que a medida que esta aumenta la cimentación se comporta como un cimiento compensado. El empleo de este tipo de cimentación garantiza la disminución de los asentamientos y logra una cimentación eficiente desde el punto de vista de la resistencia.
6. Con el uso de cimentaciones compensadas en obras reales se ha podido comprobar lo beneficioso de su uso en la reducción de asentamientos y la ejecución de proyectos más económicos.

Recomendaciones

No obstante los resultados obtenidos en esta investigación, aún quedan muchos aspectos relacionados con el comportamiento de las cimentaciones en BCP que deben ser analizados con mayor profundidad. Como recomendaciones y futuras líneas de investigación que continúen las presentadas en este trabajo se pueden destacar las siguientes:

1. Modelar el efecto de los diferentes factores que influyen el diseño de BCP.
2. Desarrollar nuevas modelaciones con un mayor número de pilotes, utilizando los softwares profesionales.
3. Comparar los resultados de la modelación con resultados a escala real de obras ya construidas.

Referencias
Bibliográficas

Referencias Bibliográficas

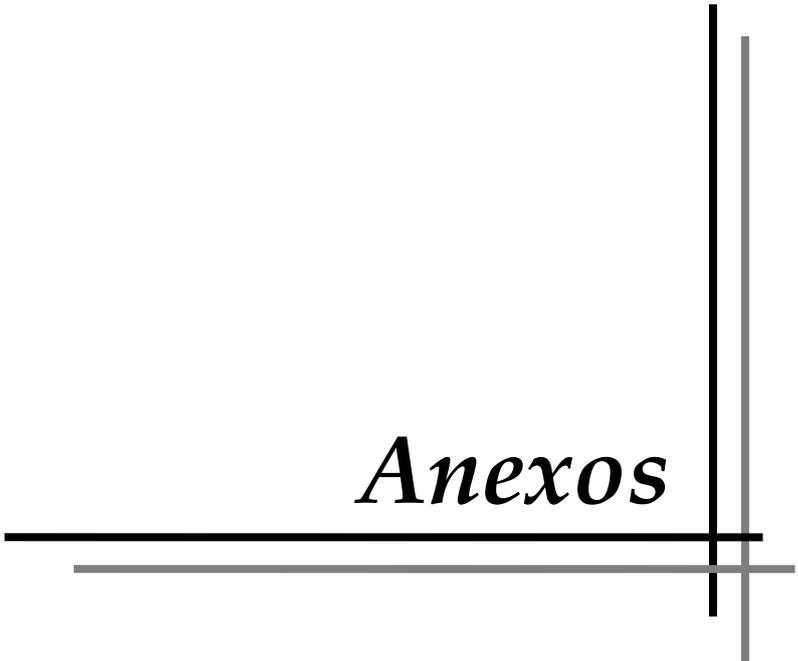
- Abdrabbo, F. M. (1976). A Model Scale Study of Single Piles and Pile Groups under General Planar Loads, Southampton University.
- Akinmusuru, J. O. (1973). The Influence of a Pile Cap on a Bearing Capacity of Piles in Sand. Nigéria, Univ. of Zaria.
- Berezantzev, V. G., Khristoforov, V. and Golubkov, V. (1961). "Load bearing capacity and deformation of piled foundations." Proc. 5th Int. Conf. Soil Mech. Fdn Engng, Paris. 2.: pp 11-15.
- Burland, J. B., Broms, B. B. & de Mello, V. F. B. (1977). "Behaviour of foundations and structures." Proc. 9th Int. Conf. Soil Mech. Found. Engng, Tokyo 2.: pp 495-546.
- Butterfield, R. and P. K. Banerjee (1971a). "The problem of pile group-pile cap interaction." Geotechnique Vol. 21, No. 2.: pp 351-371
- Clancy, P. and M. F. Randolph (1993). "An approximate analysis procedure for piled raft foundations." Int. Journal for Num. & Anal. Meth. in Geomechanics, 17(12): pp 849-869.
- Cooke, R. W. (1986). "Piled raft foundation on stiff clays, a contribution to design philosophy." Geotechnique, 36(2).
- Cudmani, R. O. (2008). "*Fundaciones Combinadas de Placa y Pilotaje.*" Cuadernos de la Facultad.
- Cunha, J., M. S. Neusa, et al. (2004). "Otimização de um Projeto de Fundações, Através do uso de Radier Estaqueado." 10 p.
- Davis, E. H. and H. G. Poulos (1972). "The Analysis of Pile-Raft Systems." Aust. Geomechs, Jul, Vol. G2, No. 1.: pp 21-27.
- De Sanctis, L., Mandolini, A., Russo, G. and Viggiani, C. (2001). "Some Remarks on the Optimum Design of Piled Rafts." Personal Communication of paper submitted for publication.
- Desai, C. S., T. Kuppusamy, et al. (1981). "Pile-cap group-soil interaction." Journal of Geot. Eng. Div., ASCE, 107 (5).: pp 817-834.
- El-Mossallamy and E. Franke (1997). "Piled rafts: numerical modelling to simulate the behaviour of piled raft foundations." Darmstadt: the authors.
- Farias, M. M. (1993). Numerical Analysis of Clay Core Dams. PhD Thesis, University Swansea, UK, University College of Swansea.: 159p.
- Franke, E., LUTZ, B. & EL-MOSSALAMY, Y. (1994). "Measurements and numerical modelling of high-rise building foundations on Frankfurt clay." Conference on Vertical and Horizontal Def. of Found. and Embankments, Texas, ASCE Geot. Special Publ., N. 40(2) pp 1325-1336.
- Galambos, T. V. (2001). "Strength of Singly Symmetric I-Shaped Beam-Columns." Engineering Journal-American Institute of Steel Construction Inc., 38 (2).: pp 65-77.
- Garg, K. G. (1979). "Bored pile groups under vertical load in sand." Journal of Geot. Eng. Div., ASCE, 105(8).: pp 939-956.
- Ghosh, N. (1975). A model Scale Investigation of the working Load Stiffness of Single Pile and Groups of piles in Clay under Centric and Eccentric Vertical Loads., Southampton University.
- Guo, W. D. and M. F. Randolph (1999). "An efficient approach for settlement prediction of pile groups." Geotechnic 49, No.2.: pp 161-179.
- Hain, S. J. and I. K. Lee (1978). "The analysis of flexible raft-pile systems." Geotechnique 28 (1).: pp 65-83.
- Hansbo, S. and R. Källström (1983). "A case study of two alternative foundation principles." Väg-och Vattenbyggaren, 7-8.: pp 23-27.
- Hemsley, J. A. (2000). Design applications of raft foundations: pp 425-465.
- Hooper, J. A. (1973). "Observations on the behaviour of a piled-raft foundation on London Clay." Proc. Inst. Civ. Engrs 55, No. 2.: pp 855-877.

- Ibañez, L. O. (2011). "Modelación de Cimentaciones sobre Pilote. Análisis de balsas combinadas con pilotes. ." Programa Capes-MES/Cuba: 26p.
- Jimenez Salas, J. A. (1986). Geotecnia y cimientos, Editorial Rueda. Madrid.
- Juárez (1969). Mecánica de suelo. . La Habana.
- Katzenbach, R., Arslan (2000). "Piled raft foundation projects in Germany". Design Applications of Raft Foundations. J. A. T. T. Hemsley. London: pp 323-391.
- Katzenbach, R., ARSLAN, U. & GUTWALD, J. (1994). "A numerical study on pile foundation of the 300m high Commerzbank Tower in Frankfurt am Main." Proc. 3 rd European Conf. on Numerical Methods in Geomechanics, Manchester: pp. 271-277.
- Kishida, H. and G. G. Meyerhof (1965). "Bearing capacity of piled groups undwer eccentric loads in sand." Proc. 6 th ICSMFE, Toronto, 2.: pp 270-274.
- Koizumi (1967). "Field tests with regard to pile driving and bearing capacity of piled foundations. ." Soil Found, 7(3): pp 30–53.
- Kuwabara, F. (1989). "An elastic analysis for piled raft foundations in a homogeneous soil." Soils and Foundations Vol. 29 (1): pp 82-92.
- Leiva, A. O. M. (2010). Recomendaciones para la modelación por el Método de los Elementos Finitos., U.C.L.V.: pp 44-46.
- Liu, J. L., Yuan, Z.L., Zhang, K.P. (1985). "Cap-pile-soil interaction of bored pile groups." Proc. 11th ICSMFE. San Francisco, 4: pp 1433-1436.
- Maharaj, D. K. and S. R. Gandhi (2004). "Non linear finite element analysis of piled raft foundations." Proc. Inst. Civ. Engrns, Geotechnical Engineering, No 157: pp 170-113.
- Mandolini, A. and C. Viggiani (1997). ""Settlement of piled foundations". " Geotechnique 47, No.4: pp 791-816.
- MathCad. (2011). " User Guide."
- Mestat, P. (1993). Combinaciones de elementos finitos para las obras geotecnicas. Consejos y recomendaciones. Boletín de laboratorio de mecánica de suelo # 212 (Julio- Agosto) pp 39-64.
- Meyerhof, G. G. (1959). "Compaction of sands and bearing capacity of piles." Journal of Geot. Eng. Div., ASCE, 85 (SM6) pp 1-29.
- Mindlin, R. D. (1936). "Forces at a point in the interior of a semi-infinite-solid. ." Physics 7: pp 195-202.
- O'Neill, M. W., Caputo, V., De Cock, Hartikainen, J. y Mets, M. (1996). "Case historiesa of piled-supported raft." Report for ISSMFE Tech. Comm. TC-18. Univ. of Houston, Texas.
- OH, E. Y. N. (2008). Finite Element Modeling For Piled Raft Foundation In Sand.
- Ottoviani, M. (1975). "Three-dimensional finite element analysis of vertically loaded pile groups." Geotechnique 25, No. 2.: pp 159-174.
- Phung, D. L. (1993). Footings With Settlement-Reducing Piles in Non-Cohesive soil. Dep. of Geotechnical Eng., Chalmers Univ. of Technology, Gothenburg, Sweden: 179 p.
- Poulos, H. G. (1968). " "Analysis of settlement of pile groups."." Geotechnique 18, No.4: pp 449-471.
- Poulos, H. G. (1989). "Pile behaviour – theory and application." Geotechnique, 39(3): pp 365-415.
- Poulos, H. G. (1993). "Piled rafts in swelling or consolidating soils." Jnl. Geotechnical Div., ASCE, 119(2),: pp 374-380.
- Poulos, H. G. (1993a). ""Settlementprediction for bored pile groups."." Proc. 2nd Int. Seminar on Deep Foundations, Ghent: pp 103-117.
- Poulos, H. G. (1994). "An approximate numerical analysis of pile-raft interaction." Int.Conf. Deep Foundations, Singapore,: pp 239-244. .
- Poulos, H. G. (1997). "Comparison of some methods for analysis of piled raft." Proc. 14 th Int. Conf. Soil Mech. Foundn Engng, Hamburg.: pp 1119-1124.

- Poulos, H. G. (1999). "Common procedures for foundations settlement analysis- are they adequate?" Proc. 8th Australia-New Zealand Conf. on Geomechanics, Hobart, Australia **Vol 1**: pp 3-25.
- Poulos, H. G. (2001). ""Methods of Analysis of Piled Raft Foundations."" A Report Prepared on Behalf of Technical Committee, TC18 on Piled Foundations, International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. .
- Poulos, H. G. (2001a). "Piled Raft Foundations: design and applications." Geotechnique 51, No. 2 pp 95-113.
- Poulos, H. G. and E. H. Davis (1980.). "Pile Foundation Analysis and Design". John Wiley and Sons. New York, New York . pp 71-142.
- Randolph, M. F. (1994). " "Design methods for pile groups and piled rafts."" Thirteenth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, New Delhi, India. Volume 5.: pp 61-82.
- Randolph, M. F. and O. Reul (2004). ""Design strategies for Piled Rafts subjected to Non-Uniform Vertical Loadings"" Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 130(1), : pp 1-13.
- Randolph, M. F. and C. P. Wroth (1983). "An analysis of the vertical deformation of pile groups." Geotechnique 29, 1983: pp 423-439
- Reul, O. (1998). "Soil-structure-interaction of a piled raft foundation of a 121m high office building in Berlin. ." Proc. 12th European Young Geot. Eng. Confer., Tallinn, Estonia.: pp 1-12.
- Reul, O. (2000). In-situ measurements and numerical studies on the bearing behaviour of piled rafts, Darmstadt University of Technology, Germany (in German).
- Reul, O. and M. F. Randolph (2003). "Piled rafts in overconsolidated clay: comparison of in situ measurements and numerical analyses." Geotechnique 53, No. 3.: pp 301–315.
- Russo, G. (1995). Interazione Terreno Struttura per Piastrine su Pali., Univ. de Napoli Federico II. .
- SAĞLAM, N. (2003). Settlement of Piled Raft a Critical Review of the Case Histories and Calculation Methods. Department of Civil Engineering, The Middle East Technical University: 289 p.
- Sales, M. M. (2000). Análise do Comportamento de Sapatas Estaqueadas. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília: 229p
- Sales, M. M., S. Jonh C., et al. (2009). "Compensated piled rafts in clayey soils: behaviour, measurements, and predictions." Can. Geotech. Journal **Vol. 47**: 327-345.
- Schiel, F. (1970). "Statik der Pfahlwerke." 2 Anlang, Springer-Verlang, Berlin.
- Sinha, J. (1997). Piled raft foundations subjected to swelling and shrinking soils, Univ. Sydney, Australia.
- Skempton, A. W. (1953). "Discussion contribution: piles and pile foundations, settlement of piled foundations." Proc. 3rd ICSMFE, Zurich, 3: 172 p.
- Small, J. C. and J. L. Liu (2007). "Time-settlement behavior of piled raft foundations using infinite elements." Computers and Geotechnics, 35(2): pp 187-195.
- Small, J. C. and H. G. Poulos (1998). "User's Manual of GARP6." Centre for Geotechnical Researches. Univ. of Sydney. Australia. .
- Small, J. C. and H. G. Poulos (2007). "A Method of Analysis of Piled Raft." Proceedings. 10th Australia New Zealand Conference on Geomechanics, Bridbane, Australia, 21-24 October 2007 **Vol. 1**: pp 550-555.
- Smith, I. M. and A. Wang (1998). ""Analysis of Piled Rafts"" International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 22: pp 777-790.
- Sowers, G. B. (1977). Introducción a la mecánica de suelo y cimentaciones. La Habana, Editorial Pueblo y Educación.

- Ta, L. D. and J. C. Small (1996). "Analysis of piled raft systems in layered soils." Int. Journal for Num. & Anal. Meth. in Geomechanics, 20: pp 57-72. .
- Terzaghi, K. (1943). "Theoretical Soil Mechanics." Jonh Wiley and Sons, New York.
- Thaier, M. and H. L. Jessberger (1990). "Settlement reduction of high-rise buildings by a limited number of piles supporting the foundation raft." Proc. Conf. on Deep Foundations Practice, Singapore.: pp 247-256.
- Tomlinson, M. J. (1986). "Foundation design and construction." Longman Scientific and Technical, Harlow, 5th edn.
- Vesic, A. S. (1969). "Experiments with instrumented pile groups in sand." Symposium on Deep Foundations. San Francisco, ASTM Special Publication 444: pp 177-222.
- Viggiani, C. (2001). "Analysis and Design of Piled Foundations." 1st Arrigo Croce Lecture, Rivista Italiana de Geot., 1/2001: pp 47-75. .
- Whitaker, T. (1961). "Some experiments on model piled foundations in clay." Proc. Symp. Piled Foudations, 6th Congr. Int. Assn. Bridge and Structural Engineering, Stockholm.: pp 124-139.
- Zeevaert, L. (1957). "Compensated friction-pile foundation to reduce the settlement of buildings on highly compressible volcanic clay of Mexico City." Proc. 4th Int. Conf. Soil Mech. Found. Engng, London 2.

Anexos



Anexos

Anexo No 1: Hojas de resultados obtenidos en el Tief para diferentes valores de profundidad de cimentación.

Profundidad de cimentación (Df)= 0 m

Tief

Version 9.2 SP1

Program authors M. Kany/ M. El Gendy/ A. El Gendy

Title: Ejemplo real

Date: Martes, 15 de Mayo de 2012

Project: TG

File: Ejemplo Real

Rigid piled raft foundation

Nonlinear analysis of piled raft

Data:

Data of pile cape:

Dimension of the pile cape in X-direction	AA [m]	= 5.00
Dimension of the pile cape in Y-direction	BB [m]	= 5.00
Thickness of the pile cape	TE [m]	= 0.50
Depth of the pile cape base under the surface	Tf [m]	= 0.00
Unit weight of the pile cape concrete	GB [kN/m3]	= 25.0
Load on the pile cape	PA [kN]	= 13760.0
Eccentricity	ex [m]	= 0.00
Eccentricity	ey [m]	= 0.00

Pile material:

Unit weight of pile concrete	Gp [kN/m3]	= 25.0
------------------------------	------------	--------

Pile geometry:

Pile No.	Pile length	Pile diameter	Pile coordinate	Pile coordinate	Limit pile load
I	Lg	Dp	Xp	Yp	Qli
[-]	[m]	[m]	[m]	[m]	[kN]
1	20.00	0.50	1.00	1.00	640.0
2	20.00	0.50	1.00	4.00	640.0
3	20.00	0.50	4.00	1.00	640.0
4	20.00	0.50	4.00	4.00	640.0

Soil data:

Subsoil model: Layered soil model

Boring:

Layer No.	Level of layer under ground	Modulus of compressibility for loading	Modulus of compressibility for reloading	Poisson's ratio of the soil	Unit weight of soil
I	z	Es	Ws	Nue	Gam
[-]	[m]	[kN/m ²]	[kN/m ²]	[-]	[kN/m ³]
1	5.00	6000	6000	0.30	15.0
2	13.00	30000	30000	0.30	17.0
3	16.00	8000	8000	0.35	0.0
4	22.00	35000	35000	0.30	17.0
5	30.00	20000	20000	0.50	16.0

Boring:

Layer No.	Level of layer	Penetration tip	Undrainage cohesion
-----------	----------------	-----------------	---------------------

	under ground	resistance	of soil
I	z	qs	Cu
[-]	[m]	[kN/m ²]	[kN/m ²]
1	5.00	10.000	-----
2	13.00	72.000	-----
3	16.00	-----	25.000
4	22.00	73.000	-----
5	30.00	-----	80.000

Final results:

Load on pile/ Displacement:

Pile No.	Load on pile	Displacement	Soil stiffness
I	Fr	Sr	ks
[-]	[kN]	[cm]	[kN/m]
1	607.8	37.94	1602.1
2	607.8	37.94	1602.0
3	607.8	37.94	1602.1
4	607.8	37.94	1602.0

Value of total load (including own wt.) Q [kN] = 14465.2
 Total pile loads P [kN] = 2431.0
 Bearing factor of piled raft Alfa_kpp [%] = 16.81

Contact pressure/ Displacement:

No.	Coord.	Coord.	Contact pressure	Settlement
-----	--------	--------	---------------------	------------

I	x	y	q	s
[-]	[m]	[m]	[kN/m ²]	[cm]
1	0.00	0.00	2809.0	37.94
2	1.00	0.00	963.6	37.94
3	2.00	0.00	807.5	37.94
4	3.00	0.00	807.5	37.94
5	4.00	0.00	963.6	37.94
6	5.00	0.00	2809.0	37.94
7	0.00	1.00	963.6	37.94
8	1.00	1.00	0.0	37.94
9	2.00	1.00	202.0	37.94
10	3.00	1.00	202.0	37.94
11	4.00	1.00	0.0	37.94
12	5.00	1.00	963.6	37.94
13	0.00	2.00	807.5	37.94
14	1.00	2.00	202.0	37.94
15	2.00	2.00	131.3	37.94
16	3.00	2.00	131.3	37.94
17	4.00	2.00	202.0	37.94
18	5.00	2.00	807.5	37.94
19	0.00	3.00	807.5	37.94
20	1.00	3.00	202.0	37.94
21	2.00	3.00	131.3	37.94
22	3.00	3.00	131.3	37.94
23	4.00	3.00	202.0	37.94
24	5.00	3.00	807.5	37.94
25	0.00	4.00	963.6	37.94
26	1.00	4.00	0.0	37.94
27	2.00	4.00	202.0	37.94
28	3.00	4.00	202.0	37.94
29	4.00	4.00	0.0	37.94
30	5.00	4.00	963.6	37.94
31	0.00	5.00	2809.0	37.94
32	1.00	5.00	963.6	37.94

33	2.00	5.00	807.5	37.94
34	3.00	5.00	807.5	37.94
35	4.00	5.00	963.6	37.94
36	5.00	5.00	2809.0	37.94

Profundidad de cimentación (Df)= 3 m

Tief

Version 9.2 SP1

Program authors M. Kany/ M. El Gendy/ A. El Gendy

Title: Ejemplo real

Date: Martes, 15 de Mayo de 2012

Project: TG

File: Ejemplo Real

Rigid piled raft foundation

Nonlinear analysis of piled raft

Data:

Data of pile cape:

Dimension of the pile cape in X-direction	AA [m]	= 5.00
Dimension of the pile cape in Y-direction	BB [m]	= 5.00
Thickness of the pile cape	TE [m]	= 0.50
Depth of the pile cape base under the surface	Tf [m]	= 3.00
Unit weight of the pile cape concrete	GB [kN/m3]	= 25.0
Load on the pile cape	PA [kN]	= 13760.0
Eccentricity	ex [m]	= 0.00
Eccentricity	ey [m]	= 0.00

Pile material:

Unit weight of pile concrete	Gp [kN/m3]	= 25.0
------------------------------	------------	--------

File geometry:

File No.	File length	File diameter	File coordinate	File coordinate	Limit pile load
I	Lg	Dp	Xp	Yp	Qli
[-]	[m]	[m]	[m]	[m]	[kN]
1	20.00	0.50	1.00	1.00	640.0
2	20.00	0.50	1.00	4.00	640.0
3	20.00	0.50	4.00	1.00	640.0
4	20.00	0.50	4.00	4.00	640.0

Soil data:

Subsoil model: Layered soil model

Boring:

Layer No.	Level of layer under ground	Modulus of compressibility for loading	Modulus of compressibility for reloading	Poisson's ratio of soil	Unit weight of soil
I	z	Es	Ws	Nue	Gam
[-]	[m]	[kN/m ²]	[kN/m ²]	[-]	[kN/m ³]
1	5.00	6000	6000	0.30	15.0
2	13.00	30000	30000	0.30	17.0
3	16.00	8000	8000	0.35	0.0
4	22.00	35000	35000	0.30	17.0
5	30.00	20000	20000	0.50	16.0

Boring:

Layer No.	Level of layer under ground	Penetration tip resistance	Undrainage cohesion of soil
I	z	qs	Cu
[-]	[m]	[kN/m ²]	[kN/m ²]
1	5.00	10.000	-----
2	13.00	72.000	-----
3	16.00	-----	25.000
4	22.00	73.000	-----
5	30.00	-----	80.000

Final results:

Load on pile/ Displacement:

File No.	Load on pile	Displacement	Soil stiffness
I	Fr	Sr	ks
[-]	[kN]	[cm]	[kN/m]
1	567.6	17.20	3300.0
2	567.6	17.20	3300.0
3	567.6	17.20	3300.0
4	567.6	17.20	3300.0

Value of total load (including own wt.) Q [kN] = 14465.2

Total pile loads P [kN] = 2270.5

Bearing factor of piled raft Alfa_kpp [%] = 15.70

Contact pressure/ Displacement:

No.	Coord.	Coord.	Contact pressure	Settlement
I	x	y	q	s
[-]	[m]	[m]	[kN/m ²]	[cm]
1	0.00	0.00	2090.0	17.20
2	1.00	0.00	856.1	17.20
3	2.00	0.00	793.8	17.20
4	3.00	0.00	793.8	17.20
5	4.00	0.00	856.1	17.20
6	5.00	0.00	2090.0	17.20
7	0.00	1.00	856.1	17.20
8	1.00	1.00	0.0	17.20
9	2.00	1.00	302.2	17.20
10	3.00	1.00	302.2	17.20
11	4.00	1.00	0.0	17.20
12	5.00	1.00	856.1	17.20
13	0.00	2.00	793.8	17.20
14	1.00	2.00	302.2	17.20
15	2.00	2.00	271.9	17.20
16	3.00	2.00	271.9	17.20
17	4.00	2.00	302.2	17.20
18	5.00	2.00	793.8	17.20
19	0.00	3.00	793.8	17.20
20	1.00	3.00	302.2	17.20
21	2.00	3.00	271.9	17.20
22	3.00	3.00	271.9	17.20
23	4.00	3.00	302.2	17.20
24	5.00	3.00	793.8	17.20
25	0.00	4.00	856.1	17.20
26	1.00	4.00	0.0	17.20
27	2.00	4.00	302.2	17.20
28	3.00	4.00	302.2	17.20
29	4.00	4.00	0.0	17.20
30	5.00	4.00	856.0	17.20

31	0.00	5.00	2090.0	17.20
32	1.00	5.00	856.1	17.20
33	2.00	5.00	793.8	17.20
34	3.00	5.00	793.8	17.20
35	4.00	5.00	856.1	17.20
36	5.00	5.00	2090.0	17.20

Profundidad de cimentación (Df)= 6 m

Tief

Version 9.2 SP1

Program authors M. Kany/ M. El Gendy/ A. El Gendy

Title: Ejemplo real

Date: Martes, 15 de Mayo de 2012

Project: TG

File: Ejemplo Real

Rigid piled raft foundation

Nonlinear analysis of piled raft

Data:

Data of pile cape:

Dimension of the pile cape in X-direction	AA [m]	= 5.00
Dimension of the pile cape in Y-direction	BB [m]	= 5.00
Thickness of the pile cape	TE [m]	= 0.50
Depth of the pile cape base under the surface	Tf [m]	= 6.00
Unit weight of the pile cape concrete	GB [kN/m3]	= 25.0
Load on the pile cape	PA [kN]	= 13760.0
Eccentricity	ex [m]	= 0.00
Eccentricity	ey [m]	= 0.00

Pile material:

Unit weight of pile concrete G_p [kN/m³] = 25.0

Pile geometry:

Pile No.	Pile length	Pile diameter	Pile coordinate	Pile coordinate	Limit pile load
I	Lg	Dp	Xp	Yp	Qli
[-]	[m]	[m]	[m]	[m]	[kN]
1	20.00	0.50	1.00	1.00	640.0
2	20.00	0.50	1.00	4.00	640.0
3	20.00	0.50	4.00	1.00	640.0
4	20.00	0.50	4.00	4.00	640.0

Soil data:

Subsoil model: Layered soil model

Boring:

Layer No.	Level of layer under ground	Modulus of compressibility for loading	Modulus of compressibility for reloading	Poisson's ratio of soil	Unit weight of soil
I	z	Es	Ws	Nue	Gam
[-]	[m]	[kN/m ²]	[kN/m ²]	[-]	[kN/m ³]
1	5.00	6000	6000	0.30	15.0
2	13.00	30000	30000	0.30	17.0
3	16.00	8000	8000	0.35	0.0
4	22.00	35000	35000	0.30	17.0
5	30.00	20000	20000	0.50	16.0

Boring:

Layer No.	Level of layer under ground z [m]	Penetration tip resistance qs [kN/m ²]	Undrainage cohesion of soil Cu [kN/m ²]
1	5.00	10.000	-----
2	13.00	72.000	-----
3	16.00	-----	25.000
4	22.00	73.000	-----
5	30.00	-----	80.000

Final results:

Load on pile/ Displacement:

Pile No.	Load on pile Fr [kN]	Displacement Sr [cm]	Soil stiffness ks [kN/m]
1	547.2	9.74	5616.8
2	547.2	9.74	5616.8
3	547.2	9.74	5616.8
4	547.2	9.74	5616.8

Value of total load (including own wt.) Q [kN] = 14465.2
 Total pile loads P [kN] = 2188.6
 Bearing factor of piled raft Alfa_kpp [%] = 15.13

Contact pressure/ Displacement:

No.	Coord. x	Coord. y	Contact pressure q	Settlement s
[-]	[m]	[m]	[kN/m ²]	[cm]
1	0.00	0.00	3544.3	9.74
2	1.00	0.00	884.7	9.74
3	2.00	0.00	999.2	9.74
4	3.00	0.00	999.2	9.74
5	4.00	0.00	884.7	9.74
6	5.00	0.00	3544.3	9.74
7	0.00	1.00	884.7	9.74
8	1.00	1.00	0.0	9.74
9	2.00	1.00	76.6	9.74
10	3.00	1.00	76.6	9.74
11	4.00	1.00	0.0	9.74
12	5.00	1.00	884.7	9.74
13	0.00	2.00	999.2	9.74
14	1.00	2.00	76.6	9.74
15	2.00	2.00	146.0	9.74
16	3.00	2.00	146.0	9.74
17	4.00	2.00	76.6	9.74
18	5.00	2.00	999.2	9.74
19	0.00	3.00	999.2	9.74
20	1.00	3.00	76.6	9.74
21	2.00	3.00	146.0	9.74
22	3.00	3.00	146.0	9.74
23	4.00	3.00	76.6	9.74
24	5.00	3.00	999.2	9.74
25	0.00	4.00	884.7	9.74
26	1.00	4.00	0.0	9.74
27	2.00	4.00	76.6	9.74
28	3.00	4.00	76.6	9.74

29	4.00	4.00	0.0	9.74
30	5.00	4.00	884.7	9.74
31	0.00	5.00	3544.3	9.74
32	1.00	5.00	884.7	9.74
33	2.00	5.00	999.2	9.74
34	3.00	5.00	999.2	9.74
35	4.00	5.00	884.7	9.74
36	5.00	5.00	3544.3	9.74
