

Hojas de cálculo para el análisis de losas combinadas con pilotes

Spreadsheets for the analysis of piled raft foundations

Luis Ibañez^{1*}, Renato Cunha^{**}

* Universidad Central Marta Abreu de Las Villas. CUBA

** Universidad de Brasilia. UnB. BRASIL

Fecha de Recepción: 12/12/2012
Fecha de Aceptación: 15/05/2013
PAG 207 - 216

Resumen

En el diseño de cimentaciones en balsas combinadas con pilotes, se determina un gran número de incógnitas de forma tal que se obtenga una cimentación racional y que a su vez cumpla con los requerimientos de proyecto. El empleo de hojas de cálculo, facilita el trabajo del proyectista, al poder predimensionar la cimentación, evaluando la influencia de los diferentes parámetros que intervienen en el diseño, para finalmente utilizar programas de cómputos para el cálculo definitivo. En este trabajo se muestran los resultados obtenidos con hojas de cálculo programadas en MathCad y se comparan los valores de la curva estimada carga vs deformación de las hojas de cálculo con resultados de modelos a escala real y otros de la literatura sobre el tema.

Palabras Clave: Pilotes, balsas, modelación numérica, diseño

Abstract

In the design of foundations in piled rafts, a great number of unknown facts are determined in order to obtain a rational foundation, which in turn meets the requirements of the project. The use of spreadsheets facilitates the work for the designer, to estimate the dimensions of foundation, thus evaluating the influence of various parameters involved in the design, so as to finally use computer programs for the final calculation. This paper shows the results obtained from spreadsheets programmed by MathCad and, it compares the values of the estimated curve load v/s deformation of spreadsheets with the results of full scale models and others from literature on the subject.

Keywords: Piled raft, settlement, numerical modeling, design

1. Introducción

Las cimentaciones en balsas combinadas con pilotes 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. En las últimas décadas son numerosas las investigaciones y desarrollos conceptuales que han conducido a mejorar el conocimiento del comportamiento conjunto de la balsa y pilotes (Poulos 2001; Cunha et al., 2000a; Cunha et al., 2000b; O'Neill et al., 2001, Van Impe W.F. y De Clercq 1994), y que hacen de este sistema constructivo una alternativa de cimentación asociada en general a edificios en altura cimentados sobre suelos granulares y en particular sobre suelos arcillosos en estado normalmente consolidados o sobre consolidados.

Independientemente del tipo de suelo, la aplicación del sistema balsa - pilotes puede ser ventajosa cuando en una cimentación basada sólo en pilotes el número de éstos aumenta y la distancia entre ellos se reduce. En una cimentación profunda convencional, la capacidad portante de los pilotes en el grupo debe ser reducida cuando la distancia entre pilotes disminuye a valores menores de aproximadamente tres o cuatro veces su diámetro. Ello implica un aumento de la longitud de los pilotes y por ende, de los costos de la cimentación.

1. Introduction

Piled raft foundation is a constructive system characterized by the joint action of the following elements: rafts and piles, which purpose is to transfer loads from the superstructure onto the ground where the foundation is to be laid. Over the past decades several investigations and concept developments have been carried out, in order to better understand the joint behavior of rafts and piles (Poulos 2001; Cunha et al., 2000a; Cunha et al., 2000b, O'Neill et al., 2001; Van Impe W.F. y De Clercq 1994), which turns this constructive system into a foundation alternative generally associated to high buildings laid on granular soils and, particularly on clay-strengthened or over-strengthened soils.

Regardless of the type of soil, the application of the raft-piles system could become an advantage, when a foundation is only laid on piles, the number of piles increases and the distance between them decreases. In a deep conventional foundation, the piles' supporting capacity shall be reduced when the distance between piles decreases to values lower than three or four times its diameter approximately. It leads to an increase of piles length and, therefore, it raises the foundation costs.

¹ Autor de correspondencia / Corresponding author:
E-mail: ibanez@uclv.edu.cu

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.

Además de conducir a la reducción de los asentamientos, pueden mencionarse efectos positivos adicionales de la combinación balsa sobre pilotes (BCP) respecto a una balsa de cimentación única:

- Aumento de la capacidad portante de la cimentación
- Reducción de las tensiones transmitidas al suelo a través de la balsa de fundación mediante una adecuada elección del número y disposición de los pilotes.
- Mejora de el comportamiento en servicio mediante la reducción de los asentamientos individuales o diferenciales. En otras palabras, la BCP actúa como un freno de los asentamientos.
- Reducción del riesgo de fallas o fisuras en elementos de la superestructura, en particular las fachadas de los edificios.
- Se asegura la estabilidad de la cimentación completa, ya que la balsa por sí sola no garantiza la estabilidad respecto a las cargas actuantes.

Según la norma DIN 1054 (1994), el proyecto de una BCP se basaba en la idea de absorber la carga total mediante el pilotaje, despreciando la capacidad portante de la balsa de fundación. Es evidente que tener en cuenta esta última colaboración conducirá a proyectos más económicos, posibilitando la disminución del número de pilotes y asegurando al mismo tiempo asentamientos dentro de límites permisibles.

A pesar que el comportamiento de la BCP está siendo seguido e investigado desde hace algunas décadas, el mecanismo de distribución de las cargas exteriores, como asimismo el comportamiento bajo carga asentamiento, no son aún suficientemente discernidos, lo que debe atribuirse a la compleja interacción de sus elementos.

Los factores más importantes que intervienen en el comportamiento carga-asentamiento de una BCP son:

- La interacción entre los pilotes de un grupo
- El efecto recíproco entre los pilotes y la balsa

La Figura 1 representa esquemáticamente la relación carga asentamiento de un pilote individual, de un pilote de un grupo y de una balsa. Las interacciones entre los pilotes de un grupo y de los pilotes con la balsa conducen por una parte a la disminución la rigidez de los pilotes en relación a su comportamiento carga-asentamiento, y por otra parte aumentan su carga portante límite.

The interaction analysis of the three elements: raft, piles and soil is of major importance for the evaluation of the settlements unit, no matter if they are uniform or differential ones. At the same time, an accurate settlement forecast is essential in order to verify that serviceability requirements are duly met.

Besides leading to a settlements reduction, additional positive effects can be mentioned about piled rafts (CPRF) compared to a single foundation raft:

- *Increased supporting capacity of foundation*
- *Reduction of loading strengths transferred into the soil from the foundation raft, by means of a proper selection of piles amount and layout.*
- *Improved service behavior due to the reduction of individual or differential settlements. In other words the CPRF acts by putting the brake on the settlement.*
- *Reduction of failure and cracking risks on the superstructure elements, particularly on buildings front walls.*
- *The stability for the whole foundation unit is secured, as the raft itself does not guarantee the stability in regards to live loads.*

In accordance with regulation DIN 1054 (1994), a CPRF project is based on the idea of absorbing the total load by means of a piles system, by disregarding the supporting capacity from the foundation raft. It is quite evident that taking this proposal into consideration will lead to cost-effective projects, thus reducing the amount of piles and, at the same time, ensuring settlements within allowed limits.

Although the CRPF behavior has been surveyed and researched since decades, the exterior loads distribution mechanisms, as well as the behavior under load settlement, have not been fully distinguished, because of the complex interaction of its elements.

The most important factors affecting the load-settlement behavior in a CRPF are the following:

- *Interaction between a set of piles*
- *The reciprocal effect between piles and rafts*

The Figure 1 depicts the layout for the relationship load-settlement for a single pile, for a set of piles and for a raft. On one hand, the interactions between the set of piles and the piled raft, lead to a reduction of piles stiffness, in regards to their load-settlement behavior. On the other hand, they increase their supporting capacity to its limit.

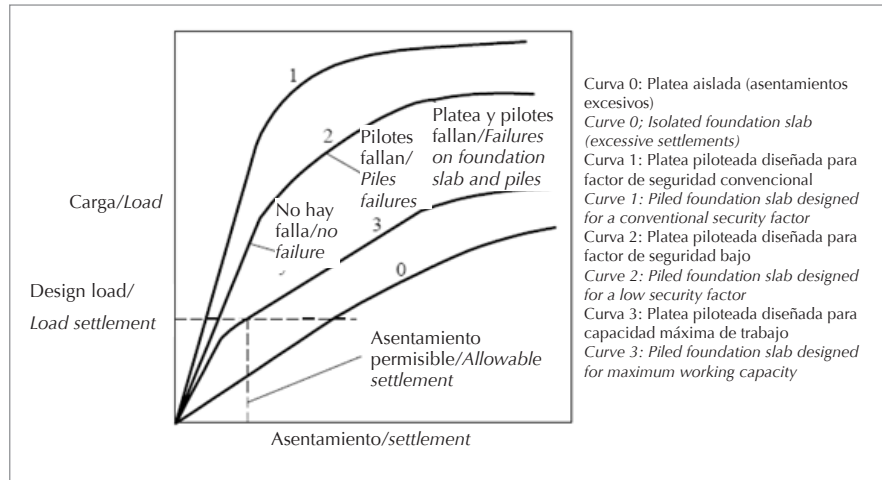


Figura 1. Curvas esquemáticas carga asentamiento (Poulos 2001)

Figure 1. Layout curves for load-settlement (Poulos 2011)

2. Desarrollo

2.1 Métodos de análisis

Varios métodos de análisis para cimentaciones en balsas combinadas con pilotes se han desarrollado (Poulos et al., 1997), entre las que podemos citar:

- Métodos de cálculo simplificado
- Métodos computacionales aproximados
- Métodos computacionales rigurosos

Entre los métodos simplificados, podemos citar los propuestos por Poulos y Davis (1980); Randolph y Wroth (1983); Randolph (1994); Van Impe y De Clerq (1994) y Burland (1995). En todos ellos se realiza una simplificación en la modelación del suelo, y la forma de aplicación de la carga.

A continuación se describe el método de Poulos y Davis (PDR), utilizado en el desarrollo del trabajo. Las hipótesis del mismo se basan en considerar que la capacidad de carga última de la cimentación en su conjunto bajo carga vertical tomo uno de los siguientes valores:

- La suma de la capacidad de carga de la balsa más la capacidad de carga de todos los pilotes o
- La suma de la capacidad de carga del bloque que conforman los pilotes y la balsa, más la porción restante de la balsa

Es importante destacar que la capacidad de carga del pilote aislado se vera afectado por el efecto de pilotes vecinos, lo que se conoce como eficiencia de grupo y puede variar entre $\xi = 0.7$ a 1.

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

2. Development

2.1 Analysis Methods

Several analysis methods for combined piled raft foundations have been developed (Poulos et. al., 1997), some of them are mentioned as follows:

- Streamlined calculation methods
- Approximate computer methods
- Accurate computer methods

Among streamlined methods, we are able to mention the ones proposed by Poulos and Davis (1980); Randolph y Wroth (1983); Randolph (1994); Van Impe and De Clerq (1994) and Burland (1995). All of them develop a streamlined soil modeling and a loading application streamline.

The method by Poulos and David (PDR) employed for the development of this study is further described. The hypothesis is based on the consideration that the ultimate foundation loading capacity, under vertical loading, absorbed one of the following values:

- The addition of the raft's loading capacity plus the total piles' loading capacity, or
- The addition of loading capacity of the unit formed by piles and the raft plus the raft remaining portion.

It is worth mentioning that the isolated pile's loading capacity will be affected by the adjacent piles, which is known as unit efficiency, varying from $\xi = 0.7$ to 1.

So as to estimate the load deformation curve behavior on the combined piled raft foundation, the expressions proposed by Randolph (1994) are applied and, the stiffness of the CPR foundation is determined as follows:

$$K_{pg} = \frac{K_p + K_r(1 - \alpha_{cp})}{1 - \alpha_{cp}^2 \left(\frac{K_r}{K_p} \right)} \quad (1)$$

Donde:

K_{pg} Rigidez de la cimentación balsa pilote

K_p Rigidez del pilote

K_r Rigidez de la balsa

α_{cp} Factor de interacción balsa pilote

Where:

K_{pg} Stiffness of piled raft foundation

K_p Pile stiffness

K_r Raft stiffness

α_{cp} Piled raft interaction factor

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

The share of total load transferred to the slab is expressed as follows:

$$X = \frac{K_r(1 - \alpha_{cp})}{K_p + K_r(1 - \alpha_{cp})} \quad (2)$$

Conociendo estos coeficientes se puede confeccionar la curva estimada carga deformación de la cimentación. Poulos (2001) propone el empleo de hojas de cálculo en MathCad para facilitar los procesos de cálculo y evaluar de manera rápida el efecto del número de pilotes a utilizar en la cimentación.

By obtaining such coefficients, the estimated foundation load deformation curve can be developed. Poulos (2001) proposed the use of MathCad spreadsheets in order to facilitate calculation processes and to rapidly evaluate the effect of piles amount to be used for laying the foundation.

2.2 Empleo de hojas de cálculo

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

2.2 Use of Spreadsheets

So as to solve this problem, not needing to employ powerful calculation programs, MathCad spreadsheets were selected for the abovementioned procedure, by taking advantage of their abilities for engineering design.

MathCad es la solución de cálculos de ingeniería que simultáneamente resuelve y documenta los cálculos, 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.

MathCad is the solution for engineering calculations, which simultaneously solves and stores calculations, also considerably reducing the risk of high cost errors. This program allows engineers to design, solve and store their work under an easy-to-understand format, which is shareable and reusable, thus improving cross checking and validation, broadcasting and collaboration during the whole execution process.

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.

MathCad is an ideal tool used to solve engineering problems under a didactic approach. A special advantage of this software is its ability to represent algebraic equations involved in the solution of a problem, together with the corresponding numeric evaluation. This feature turns this software into an ideal tool for engineering problems, which presentation is required as a report or a calculation worksheet, thus helping to understand the problem (MathCad 2011; Galambos 2001). Besides, this tool offers a "board design" environment allowing engineers to capture, apply and easily manage requirements, critical data, methods and products assumptions in order to quickly develop calculations. By using MathCad, original concepts, underlying assumptions, math formulas, explanatory graphs, information texts, remarks, outlines and results are clearly seen on the worksheet.

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

Entre las ventajas que se pueden cita con el empleo de las hojas de cálculos esta:

- Permite analizar diferentes variantes, con un ahorro de tiempo y recursos computacionales
- Se pueden analizar suelos estratificados
- Se pueden analizar la variación del modulo general de deformación con la profundidad
- Se puede interactuar con la hoja de cálculo y modificar expresiones, parámetros, etc.

For this case that draws our attention, several spreadsheets were programmed interacting among themselves, so as to allow a friendly interface between the user and the computer, thus offering the possibility of changing entry data and design parameters.

Among the several advantages provided by the use of spreadsheets, we mention that:

- They facilitate the analysis of several variables, saving time and computer resources.
- Stratum soils can be analyzed.
- The variation of the general deformation module and its depth can be analyzed.
- It is possible to interact with the spreadsheet and to modify expressions, parameters, etc.

2.3 Aplicaciones

2.3.1 Validación de las hojas de cálculo

Para la validación de las hojas de cálculo se comparan los resultados obtenidos por Sales (2001). Este autor analiza casos citados en la literatura internacional para cimentaciones balsas combinadas con pilotes apoyadas en 4 y 16 pilotes.

2.3 Applications

2.3.1 Spreadsheet Validation

So as to validate spreadsheets, they are compared with the results obtained by Sales (2001). This author analyzed cases quoted by international literature about combined piled raft foundations supported by 4 and 16 piles.

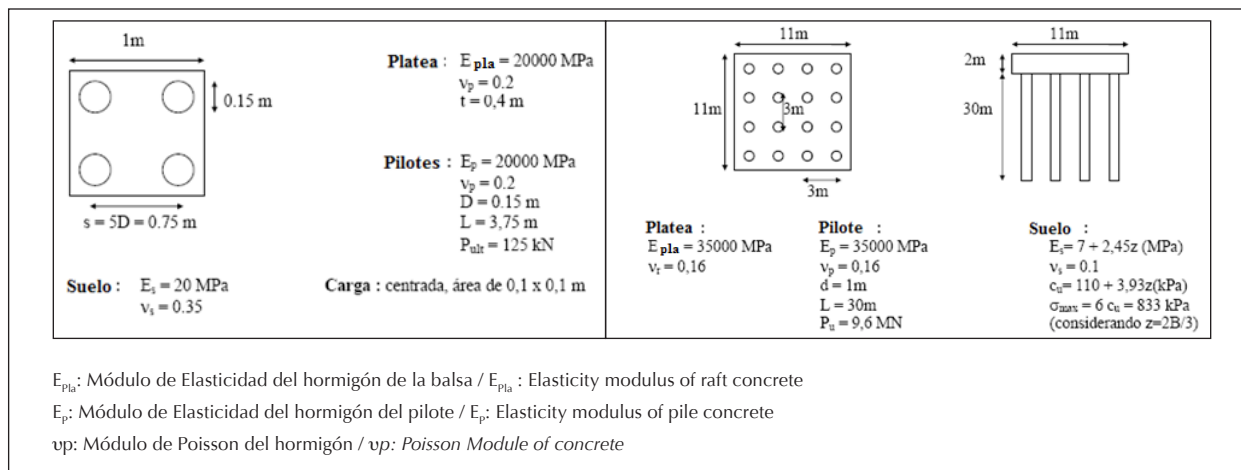


Figura 2. Ejemplos analizados

Figure 2. Analyzed examples

Para el caso de cimentaciones en balsa apoyadas en 4 pilotes (Tabla 1), se comprueba la veracidad de los resultados obtenidos, notándose la mayor diferencia para cargas mayores a 500 kN, valores para los cuales comienza trabajar de forma conjunta la cimentación.

For the case of piled raft foundations supported by 4 piles (Table 1), the soundness of obtained results is proven, thus showing a greater difference for loads higher than 500 kN, where the foundation begins to work under a combined way.

Tabla 1. Comparación entre los métodos para estimar los asentamientos en una balsa sobre 4 pilotes

Table 1. Comparison between methods used to estimate the settlements of a raft supported by 4 piles.

Carga (kN)/ Load (kN)	Asentamientos (mm)/ Settlements (mm)		
	Método Poulos (1980)/ Poulos Method (1980)	Método Poulos (1998)/ Poulos Method (1998)	Hojas de Cálculo/ Spreadsheets
0	0	0	0
100	1.16	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

Para el caso de la balsa sobre 9 y 16 pilotes (Tabla 2 y 3) propuesto por Comité Técnico TC-18 del ISSMGE (Poulos (2001)) los resultados son similares a los obtenidos con el empleo de programas de computo como el GARP6, lo que demuestra la validez de las hojas de cálculo confeccionadas y sus potencialidades.

El empleo de hojas de cálculo permite de una forma rápida contar con herramienta computacional desarrollada aplicando el método de Poulos (1998), sin la necesidad de engorrosos cálculos manuales que requiere dicho método. No debemos olvidar, que las hojas de cálculo, nunca sustituyen la experiencia de los ingenieros y que los resultados que están brindados deben comparados con otros métodos y resultados a escala real.

In the case of rafts supported by 9 and 16 piles (Tables 2 and 3) proposed by the Technical Committee TC-18 of ISSMGE (Poulos (2001)), the results are similar to the ones obtained by the calculation software, GARP6, which proves the soundness of elaborated spreadsheets and their potential.

The use of spreadsheets quickly allows to count with a computer tool developed by applying the Poulos method (1998), disregarding the use of complicated hand-made calculations originally demanded by such method. However, we should not forget that spreadsheets can never replace the engineers' experience and that obtained results shall be compared with some other methods and full scale results.

Tabla 2. Valores de rigidez obtenidos aplicando diferentes métodos. Balsa sobre 9 pilotes
Table 2. Stiffness values obtained by applying different methods. Raft supported by 9 piles

Parámetro/ Parameter	Método Poulos (1998)/ Poulos Method (1998)	Software GARP6/ GARP6 Software	MathCad
Kr (kN/m)	26739	27719	26742
Kp (kN/m)	37152	39824	37252
Kpr (kN/m)	70630	79702	70531

Tabla 3. Valores de rigidez obtenidos aplicando diferentes métodos. Balsa sobre 16 pilotes
Table 3. Stiffness values obtained by applying different methods. Raft supported by 16 piles

Parámetro/ Parameter	Método Poulos (1998)/ Poulos Method (1998)	Software GARP6/ GARP6 Software	MathCad
Kr (MN/m)	240	310	240
Kp (MN/m)	2190	1901	2174
Kpr (MN/m)	157	157	156

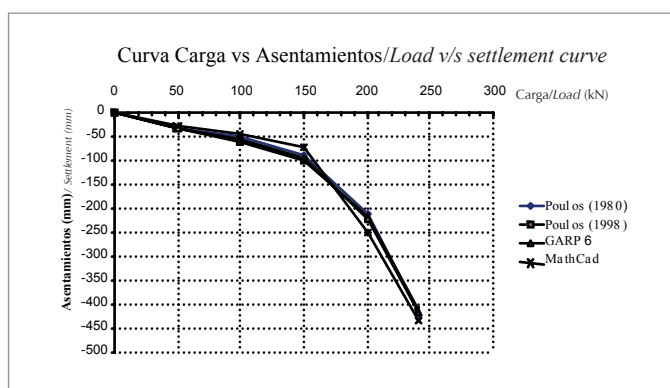


Figura 3. Curva Carga vs asentamiento utilizando varios métodos
Figure 3. Load v/s settlement curve employing several methods

2.3.2 Ensayos de carga reales

Una vez comparados los resultados de las hojas de cálculo con ejemplos de la literatura internacional, se procede a su aplicación en problemas reales de los cuales existe documentación de los ensayos de carga a escala real. Para ello se utilizan los resultados obtenidos por Koizumi y Ito (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. Estos autores determinan el aporte individual y colectivo de la cimentación, los pilotes y la cimentación balsas combinadas con pilotes. En la tabla 4 aparecen los datos utilizados en el análisis.

2.3.2 Actual Load Tests

Once results obtained from spreadsheets were compared to international literature examples, they were applied to actual problems, which are documented by full scale load tests. To do so, the results obtained by Koizumi and Ito (1967) were applied to a 2m x 2m footing foundation, supported by 9 piles of 0.3 m diameter each, which lay across two soil layers. Such authors determined the individual and collective contribution of the foundation, piles and combined piled raft foundation.

Tabla 4. Parámetros de los suelos, balsa y pilotes del ejemplo analizado
Table 4. Parameters for soils, raft and piles of the analyzed example

Suelo/ Soil	Módulo Gral de Deformación/ Overall Deformation Module (MPa)	Coefficiente de Poisson/ Poisson Coefficient	Espesor/ Diámetro/ Thickness/ Diameter (m)
Suelo 1/ Soil 1	12.8	0.4	1.7
Suelo 2/ Soil 2	15.6	0.4	3.8
Balsa/ Raft	30000	0.2	0.7
Pilote/ Pile	200000	0.2	0.3

En la Figura 4 se observan la comparación entre el ensayo real (Koizumi y Ito (1967)) y las hojas de cálculo, lo que reafirman una vez más su validación y posible uso de las mismas para estimar el comportamiento carga deformación de cimentaciones en balsas sobre pilotes

Figure 4 shows the comparison of results between the actual test (Koizumi and Ito (1967)) and the spreadsheets, which prove once again their soundness and their application to estimate the load deformation behavior of piled raft foundations.

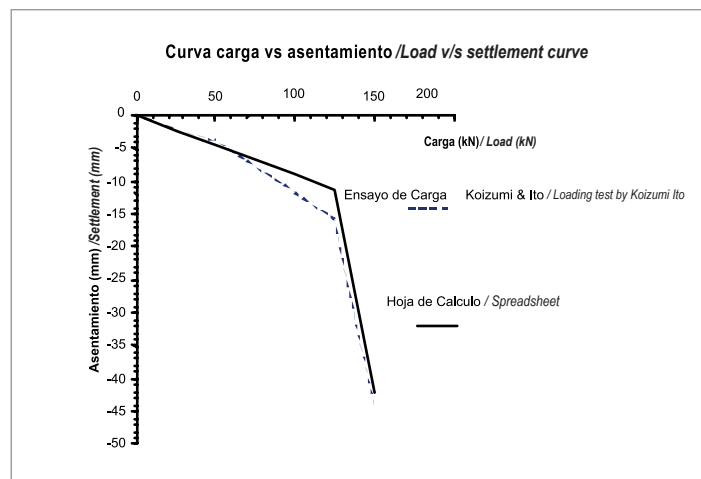


Figura 4. Curva carga asentamiento en el ensayo real Koizumi y Ito (1967) y las hojas de cálculo
Figure 4. Load v/s settlement curve developed by Koizumi and Ito's (1967) actual test and by spreadsheets

Evaluación de la seguridad en el diseño

Una vez validada las hojas de cálculo se procede a evaluar diferentes factores que intervienen en el diseño de cimentaciones de balsas combinadas con pilotes, apoyándonos en las facilidades que brindan los ficheros confeccionados en MathCad.

El primer análisis está relacionado con el efecto de la cantidad de pilotes a utilizar y la seguridad del diseño obtenida, relacionada a su vez con los asentamientos que se estiman ocurran.

Design Safety Evaluation

Once spreadsheets were validated, different factors involved in the foundation design for combined piled raft foundations were evaluated, by employing the abilities provided by card files elaborated by MathCad.

The first analysis is related to the effect of the piles number to be used and the safety of the obtained settlement, which in turn is related to the settlements expected to take place.

Para ello se analiza una balsa piloteada, donde se incrementa el número de pilotes y se determina el factor de seguridad de la cimentación en su conjunto (FS) y los asentamientos estimados. Se parte de una balsa prediseñada de 10m x 8 m (sin pilotes) con FS = 1,5 y asentamientos de 90 mm, y a continuación el efecto de incluir pilotes en la disminución de los asentamientos y aumento del factor de seguridad.

Therefore, a piled raft is analyzed, where the number of piles has been increased and the safety factor is determined for the whole foundation (SF) and the estimated settlements. A pre-designed raft of 10m x 8m (without piles), SF = 1.5 and settlements of 90 mm are considered; then the effect of adding piles for the settlement decrease and the increase of safety factor are taken into account.

$$FS = \frac{P_{\text{última}}}{P_{\text{admisible}}} \quad (3)$$

Donde:

$P_{\text{última}}$: Carga última de la cimentación

$P_{\text{admisible}}$: Carga admisible de la cimentación

Where:

P_{ultimate} : Ultimate foundation load

$P_{\text{allowable}}$: Allowable foundation load

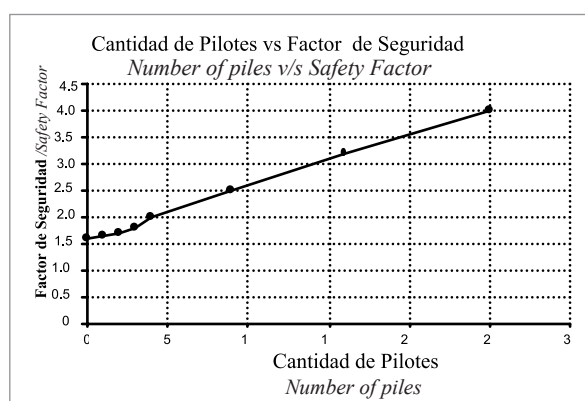


Figura 5. Cantidad de pilotes vs factor de seguridad

Figure 5.

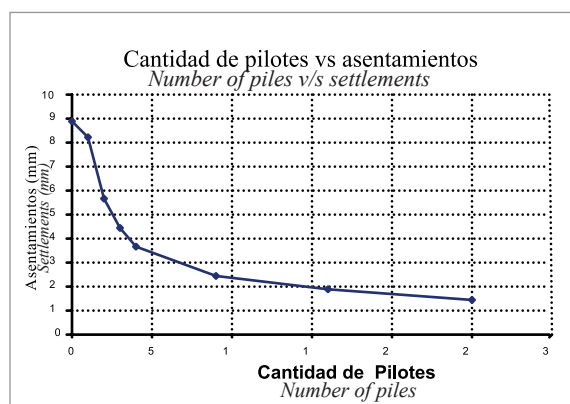


Figura 6. Cantidad de pilotes vs. asentamientos

Figure 6. Number of piles v/s settlements

Como se aprecia de las Figuras 5 y 6, en la medida en que aumenta el número de pilotes (los resultados corresponden a espaciado de 4D), hay un aumento en el factor de seguridad de la cimentación, sin embargo para más de 16 pilotes, los asentamientos estimados se mantienen casi similares, por lo que el incremento de pilotes no disminuye los asentamientos, convirtiendo el diseño en menos racional.

As shown on Figures 5 and 6, there is an increase of security factor as long as the number of piles rises (results correspond to a 4D spacing). However, when using more than 16 piles, the estimated settlements are kept almost equal. Therefore, the increased number of piles does not decrease settlements, thus making this design even less reasonable.

Para valores entre 4 y 16 pilotes (Factor de seguridad FS = 2 a 3), se hace notar el efecto de los mismos como agentes para reducir los asentamientos en la cimentación, lo que justifica el uso de pilotes en BCP, ya que hacen más segura la cimentación, y se alcanzan las deformaciones de proyecto.

Estos resultados son similares a los propuestos por Poulos (2001) en "A Report Prepared on Behalf of Technical Committee TC18 on Piled Foundations. ICGSMM-2001".

2.3.4 Evaluación de la cantidad de pilotes

A continuación se evalúa el efecto de la cantidad de pilotes en el comportamiento de la curva estimada carga deformación. Para este ejemplo numérico se considera una balsa de 8m x 8m y peralte 0.7 metros. Los pilotes son de hormigón armado de 0.5 metros de diámetro y 15 metros de longitud. Tanto para la balsa como para los pilotes se considero hormigón con resistencia a compresión $f'_c = 30$ MPa. Para el suelo de cimentación se consideraron dos estratos de 5 y 10 metros respectivamente, con $E_o = 12.5$ MPa y $E_o = 30$ MPa. Se consideró que los pilotes tienen una capacidad de carga de 1.93 MN.

For values obtained from 4 and 16 piles (Safety Factor, SF = 2 to 3), the effect of piles as settlement reducer agents is noticeable in the foundation, thus justifying the use of piles in a CPRF, in order to make the foundation safer and to achieve the project deformations.

Such results are similar to the ones proposed by Poulos (2001) in "A Report Prepared on Behalf of Technical Committee TC18 on Piled Foundations, ICGSMM-2001".

2.3.4 Evaluation of Piles Number

The effect of piles number on the behavior of the estimated load deformation curve is evaluated below. For this numerical example a raft of 8m x 8m and 0.7 meters high was considered. Piles are fabricated from reinforced concrete with diameter of 0.5 meters and length of 15 meters. Concrete with compression resistance of $f'_c = 30$ MPa was considered for both raft and piles. For the foundation soil, two layers of 5 and 10 meters were considered $E_o = 12.5$ MPa and $E_o = 30$ MPa, respectively. The estimated loading capacity of piles is 1.93 MN.

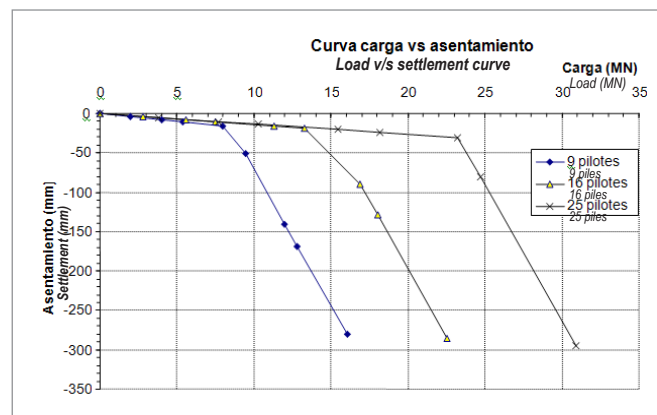


Figura 7. Curva carga asentamiento para diferente número de pilotes

Figure 7. Load v/s Settlement curve for different number of piles

En la Figura 7 se muestran los resultados de la curva carga deformación para diferente número de pilotes. Como se aprecia para bajos valores de carga inferiores a los 8 MN, los asentamientos son similares, por lo que el efecto del número de pilotes es despreciable. En este caso se consideró un factor de seguridad de la cimentación BCP FS = 2. Para 12 MN de carga axial, se aprecia que la cimentación con 9 pilotes, aunque resiste las cargas actuantes (FS = 1.33), las deformaciones son excesivas en el orden de los 150 mm. Sin embargo la cimentación BCP con 16 y 25 pilotes, mantiene valores de seguridad mayores a 2 (FS > 2) y deformaciones del orden de los 40 mm.

Se destaca en este ejemplo que el uso de pilotes se justifica en aquellos casos que se pretenda disminuir los asentamientos de la balsa, pudiendo ocurrir que: (1) se alcancen valores de seguridad ante las cargas externas mayores a 1.5 (FS > 1.5) y no se satisfaga el criterio de deformación límite (uso de 9 pilotes), (2) se alcancen valores de seguridad ante las cargas externas mayores a 1.5 (FS > 1.5) y si se satisfaga el criterio de deformación límite (uso de 16 pilotes, FS = 2), (3) se alcancen valores de seguridad ante las cargas externas muy superiores a 1.5 y si se satisfaga el criterio de deformación límite (uso de 25 pilotes, FS = 2.8)

Figure 7 shows the results of load deformation curve for different number of piles. It is observed that for small loading values lower than 8 MN, the settlements are quite similar, so the effect of piles number is insignificant. In this case a safety factor SF = 2 was considered for the CPR foundation. It is observed that although under 12 MN axial load, the foundation supported by 9 piles stands up against live loads (SF = 1.33) and deformations exceed 150 mm. However, CPR foundation supported by 16 and 25 piles maintains safety values higher than 2 (SF > 2) and deformations of 40mm approximately.

This example highlights the use of piles, which is justified in cases where raft settlements are intended to be reduced. It is possible that: (1) they reach safety values under external loads higher than 1.5 (SF > 1.5) not meeting the ultimate deformation limit (9 piles); (2) safety values under external loads higher than 1.5 (SF > 1.5) are achieved and the ultimate deformation limit is fulfilled (16 piles SF = 2) and; (3) safety values under external loads quite higher than 1.5 (SF > 1.5) are achieved and the ultimate deformation limit is fulfilled (25 piles, SF = 2.8)

Los resultados obtenidos confirman los propuestos por Poulos (2001) en "A Report Prepared on Behalf of Technical Committee TC18 on Piled Foundations. ICGSMM-2001"

3. Conclusiones

Como conclusiones de este trabajo se pueden señalar:

- Se demuestra la validez del empleo de hojas de cálculo confeccionadas en MathCad para el análisis de las cimentaciones BCP
- El empleo de hojas de cálculo facilita el análisis de cimentaciones BCP, al poder evaluar el efecto de diferentes factores, sin la necesidad del empleo de potentes softwares con base en métodos numéricos, ahorrando tiempo y recursos computacionales
- Se evalúa el efecto del empleo de pilotes utilizados en la cimentación BCP, en el factor de seguridad global de la estructura y la curva estimada carga deformación
- A pesar de las ventajas en el empleo de hojas de cálculo para el análisis y diseño en la ingeniería civil, siempre se debe prestar atención a los resultados obtenidos; y ser analizados con la experiencia y capacidad de los ingenieros, a la vez que se complementen con otros métodos y mediciones a escala real.

4. Agradecimientos

A la Universidad de Brasilia, en especial al Programa de Post Graduado en Geotecnia y de manera destacada al profesor Renato P. Cunha. A CAPES por el apoyo financiero para la realización de este trabajo y estancia en la Universidad de Brasilia.

The obtained results do confirm the ones proposed by Poulos (2001) in "A Report Prepared on Behalf of Technical Committee TC18 on Piled Foundations. ICGSMM-2001"

3. Conclusions

The following conclusions are drawn from this study:

- *The ability of spreadsheets elaborated by MathCad for the analysis of CPR foundations analysis is demonstrated.*
- *The use of spreadsheets facilitates the analysis of CPR foundations, allowing the evaluation of different factors effects, not needing powerful softwares based on numerical methods, thus saving time and computer resources.*
- *The effect of piles used for CPR foundations is evaluated on the whole structure safety as well as the estimated loading deformation curve.*
- *Although the advantages of the spreadsheets use for the analysis and design in civil engineering are evident, special attention shall be focused on the obtained results, which shall be analyzed by experienced and skillful engineers. Such results shall be complemented with some other methods and measurements at full scale.*

4. Acknowledgements

Authors express their gratitude to the University of Brasilia, especially to the Post-Graduated Program in Soil Mechanics, and specifically to Professor Renato P. Cunha. Thanks to CAPES for the financial support given to develop this research job and to stay at the University of Brasilia.

5. Referencias/References

- Burland J.B. (1995)**, Piles as Settlement Reducers. Keynote Address, 18th Italian Congress on Soil Mechanics, Pavia, Italy.
- Cunha R.P., Poulos H.G. y Small J. C. (2000b)**, Parametric Analysis of a Piled Raft Case History in UBCCPSala, Sweden. 4º Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia, São Paulo, v 2, p 380-387.
- Cunha R.P., Poulos H.G. y Small J.C. (2000a)**, "Class C" Analysis of a Pile Raft Case History in Gothenburg, Sweden. Developments in Geotechnical Engineering, Thailand, v 1, p 271-280.
- Galambos T.V. (2001)**, "Strength of Singly Symmetric I-Shaped Beam-Columns", Engineering Journal-American Institute of Steel Construction Inc., 38 (2): 65-77.
- Koizumi Y, Ito K. (1967)**, Field tests with regard to pile driving and bearing capacity of piled foundations. Soil Found; 7(3):30-53.
- MathCad (2011)** User Guide. Sitio del software MathCad. <http://www.mathsoft.com>
- Norma DIN 4019 (1987)**, Baugrund, Setzungsberechnungen bei lotrechter, mittiger Belastung, Beton Kalender, Ernst & Sohn
- Norma DIN 1054 (1994)**, Baugrund: Zulässige Belastung des Baugrundes. Beton Kalender, Ernst & Sohn
- O'Neill M.W., Caputo V., De Cock F., Hartikainen J. y Mets M. (2001)**, Case Histories of Pile-SuBCPorted Rafts. Rep. for ISSMFE Tech. Comm. TC18, Univ. of Houston, Texas.
- Poulos H.G. (2001)**, Methods of analysis of piled raft foundations Report Prepared on Behalf of Technical Committee TC18 on Piled Foundations. International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering July 2001
- Poulos H.G. y Davis E.H. (1980)**, Pile Foundation Analysis and Design. Wiley, New York.
- Randolph M.F. (1994)**, Design Methods for Pile Groups and Piled Rafts. S.O.A. Report, 13 ICSMFE, New Delhi, 5: 61-82.
- Randolph M.F. y Wroth C.P. (1983)**, An analysis of the vertical deformation of pile groups. Geotechnique 29, 1983, pag.423-439
- Van Impe W.F. and De Clercq Y.A. (1994)**, a piled raft interaction model. Proc. 5th. Int. Conf. Piling. Deep Finds. Bruges, Belgium, June, 1.3.1-1.31.10. A.A. Balkema, Rotterdam

