

# Asentamientos de cimentaciones en balsas combinadas con pilotes

Settlements of piled raft foundations

DOI: <https://doi.org/10.21703/0718-2813.2024.36.3005>

Fecha de entrega: 20 de marzo 2024

Fecha de aceptación: 4 de octubre 2024

Luis O. Ibáñez<sup>1</sup>, Gilberto Quevedo<sup>1</sup> y Miguel Maestre<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Santa Clara, Villa Clara, Cuba, [Ibanez@uclv.edu.cu](mailto:Ibanez@uclv.edu.cu), [quevedo@uclv.edu.cu](mailto:quevedo@uclv.edu.cu)

<sup>2</sup> Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas, Cuba

*En este trabajo se presentan resultados de asentamientos obtenidos de mediciones y modelación numérica de cimentaciones en Balsas Combinadas con Pilotes BCP (losas de fundación con pilotes) en una estructura industrial con cargas significativas. Con el objetivo de evaluar los asentamientos ocurridos en la balsa debido a los años de explotación, se lleva a cabo un análisis del comportamiento de la cimentación ante diversas combinaciones de cargas. Además, se verifica la validez del modelo utilizado mediante la comparación con mediciones reales de desplazamientos en la base de la cimentación.*

*Palabras clave: balsas combinadas con pilotes, mediciones geodésica, análisis numérico*

*In this work, settlements results from measurements and from the numerical modelling of piled raft foundations are presented for an industrial structure under large loads. Due to the years of exploitation, it was needed to verify the settlements taken place in the raft, and the definitive values that can be reached. A numerical modelling is carried out to analyse the behaviour of the piled raft foundation under the action of the different combinations of loads. In addition, the validity of the model used is verified by comparison with measurements of displacements at the base of the foundation.*

*Keywords: piled raft foundation, geodesical measurements, numerical analysis*

## Introducción

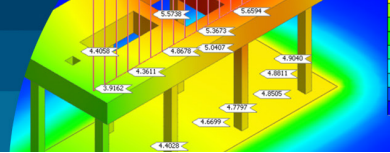
La cimentación de balsa en combinación con pilotes constituye un sistema constructivo caracterizado por la acción conjunta de ambos elementos: balsa y pilotes, con la función de transmitir al terreno las cargas de la superestructura que se ha de cimentar. En las últimas décadas se han realizado investigaciones y desarrollos conceptuales que han conducido a mejorar el conocimiento del comportamiento conjunto de la balsa y pilotes (Poulos, 2001; Cunha, 2000a, 2000b; O'Neill, 2001, Van Impe y Lungu, 1996), 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 resultar ventajosa en comparación con una cimentación basada únicamente

en pilotes, especialmente cuando el número de pilotes aumenta y la distancia entre ellos se reduce. En una cimentación profunda convencional, la capacidad portante de los pilotes en el grupo se ve comprometida cuando la distancia entre pilotes disminuye a valores inferiores a aproximadamente tres o cuatro veces su diámetro. Esto implica la necesidad de aumentar la longitud de los pilotes, lo que a su vez incrementa los costos de la cimentación.

El análisis de la interacción entre los tres elementos: balsa, pilotes y suelo, es de vital importancia para evaluar los asentamientos del conjunto, ya sean uniformes o diferenciales. A su vez, una predicción precisa de los asentamientos resulta indispensable para verificar el cumplimiento de los requisitos en cuanto al estado de servicio.

Además de conducir a la reducción de los asentamientos, la combinación balsa sobre pilotes (BCP) presenta otros efectos positivos:



1. Aumento de la capacidad portante de la cimentación: La BCP mejora la capacidad de carga de la cimentación en comparación con una balsa de cimentación única.
2. Reducción de las tensiones transmitidas al suelo: Mediante una adecuada elección del número y disposición de los pilotes, se logra disminuir las tensiones que se transmiten al suelo a través de la balsa de fundación.
3. Mejora del comportamiento en servicio: La BCP contribuye a reducir los asentamientos individuales o diferenciales, lo que significa que actúa como un freno para los asentamientos.
4. Garantía de estabilidad para la cimentación completa: A diferencia de una balsa de cimentación única, la BCP asegura la estabilidad completa de la cimentación al considerar tanto la balsa como los pilotes, teniendo en cuenta las cargas actuantes.

Según la norma DIN 4019 (1987), en el diseño de una BCP se solía considerar principalmente la capacidad portante de los pilotes, despreciando la contribución de la balsa de fundación. Sin embargo, es evidente que tener en cuenta esta última colaboración resultará en proyectos más económicos, al permitir la reducción del número de pilotes, al tiempo que se aseguran asentamientos dentro de límites permisibles.

Aunque se ha estado investigando y siguiendo el comportamiento de la BCP durante varias décadas, aún no se comprende completamente el mecanismo de distribución de las cargas externas, así como su comportamiento bajo asentamiento. Esto se debe a la compleja interacción entre sus elementos. Los factores más importantes que afectan al comportamiento carga-asentamiento de una BCP son los siguientes:

1. Interacción entre los pilotes de un grupo: Existe una interacción significativa entre los pilotes en un grupo dentro de una BCP. Esta interacción puede afectar la rigidez y el comportamiento carga-asentamiento de los pilotes individualmente.
2. Efecto recíproco entre los pilotes y la balsa: Existe un efecto recíproco entre los pilotes y la balsa de la BCP. Esta interacción influye en el comportamiento global de la cimentación, tanto en términos de rigidez como

de capacidad portante límite.

La Figura 1 es un esquema que representa de manera visual la relación carga-asentamiento de un pilote individual, un pilote en un grupo y una balsa. Las interacciones entre los pilotes en un grupo y entre los pilotes y la balsa provocan, por un lado, una disminución de la rigidez de los pilotes en relación a su comportamiento carga-asentamiento y, por otro lado, un aumento de su capacidad portante límite.

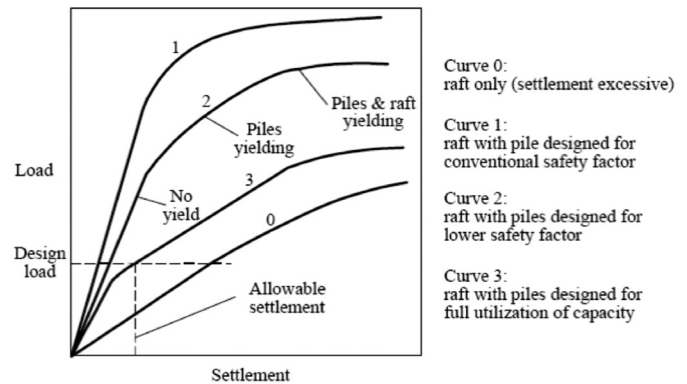


Figura 1: Curvas esquemáticas de carga y asentamiento (Poulos, 2001)

El análisis de estructuras cimentadas en BCP se ha abordado principalmente a través de la modelación numérica (Halder y Manna, 2020; Deb *et al.*, 2019; Ghalesari y Choobbasti, 2018; Abdel-Fattah y Hemada, 2016; Russo *et al.*, 2013).

## Cimentación en Balsa Combinada con Pilotes de una estructura industrial

A continuación, se presenta el cálculo de los asentamientos en una BCP perteneciente a una estructura industrial, donde actúan cargas superiores a los 15000 kN en diferentes áreas, alcanzándose una carga total de 67800 kN. La balsa tiene un espesor de 3 m y está apoyada sobre 32 pilotes de 1.2 m de diámetro. La cimentación a su vez soporta un segundo nivel con una losa de 0.8 m sobre la cual descansan otros equipos de dicha industria (ver Figura 2).

Diferentes autores como Sinha y Hanna (2017) e Ibáñez (2017) han trabajado en la modelación en tres dimensiones (3D) de las BCP, proponiendo recomendaciones prácticas. Para la modelación de la estructura de la BCP, es importante realizar un estudio exhaustivo de los suelos del lugar. Esto implica consultar con especialistas en geología y geotecnia

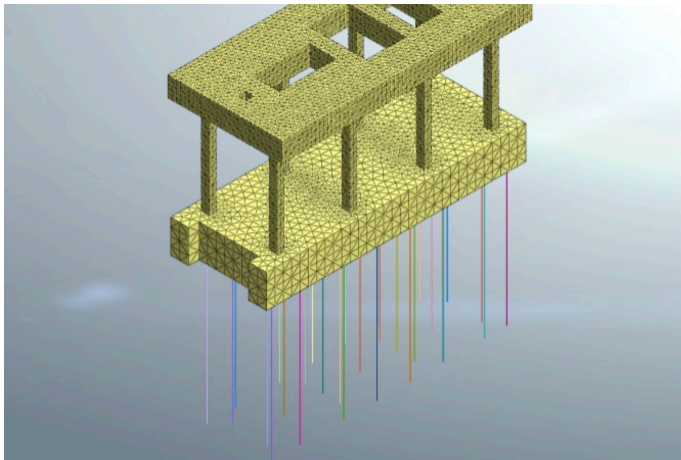
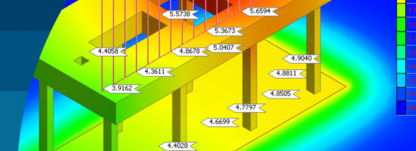


Figura 2: Representación de la cimentación y la superestructura.

para obtener información precisa sobre las características y propiedades de los suelos presentes en el sitio.

Para calcular los asentamientos en esta BCP, se deben considerar los siguientes pasos:

1. Determinar la carga transmitida por la balsa y a cada pilote: se aplican los métodos de análisis de BCP evaluando como se distribuye la carga total de 67800 kN entre la balsa y los 32 pilotes.
2. Calcular la capacidad portante de cada pilote: Utilizando las características del suelo y el diámetro de los pilotes, se puede determinar la capacidad portante de cada uno según las ecuaciones y métodos establecidos en el diseño geotécnico.
3. Evaluar la interacción entre los pilotes y la balsa: Es importante considerar la interacción entre los pilotes y la balsa para determinar cómo se distribuye la carga sobre ellos. Esto afectará los asentamientos.
4. Calcular los asentamientos esperados: Utilizando métodos de cálculo geotécnico, se determinarán los asentamientos individuales de cada pilote y los asentamientos totales de la balsa.

Es recomendable realizar un análisis geotécnico detallado considerando las características del suelo, la carga aplicada y la geometría de la BCP. Esto permitirá obtener resultados más precisos y confiables para el cálculo de los asentamientos (Ibáñez, 2017)

Según los informes del Ingeniero Geológico, se identifican

4 estratos de suelos bien definidos. Estos estratos proporcionan la información necesaria para realizar los cálculos y análisis en el diseño de la BCP. Utilizando esta información, se puede realizar un análisis de la interacción suelo-estructura, considerando las cargas aplicadas y las características de los elementos estructurales. Esto permite determinar la distribución de esfuerzos, los asentamientos esperados y evaluar la estabilidad y seguridad de la BCP.

Las Figuras 3 y 4 representan gráficamente de los estratos de suelos identificados, lo que es útil para visualizar la composición del subsuelo y comprender mejor la configuración geológica del lugar.

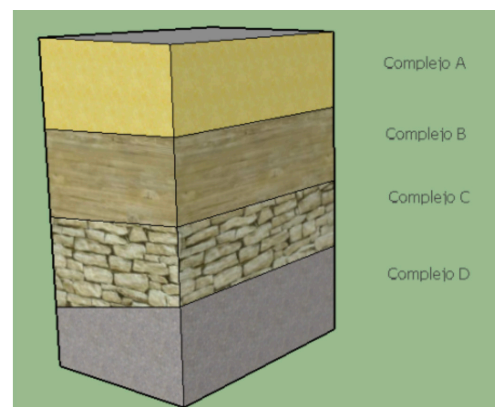


Figura 3: Perfil geológico de suelos

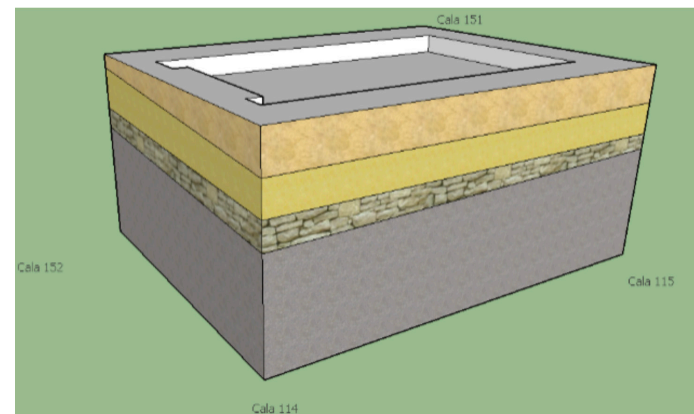
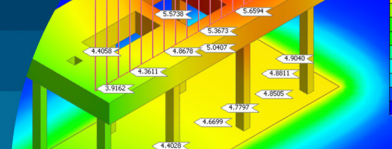


Figura 4: Calas en las esquinas de la cimentación

Después de conocer los estratos de suelo y obtener información geotécnica relevante, se procede a calcular la capacidad de carga de los pilotes, especialmente en las esquinas de la cimentación, para evaluar las posibles condiciones más desfavorables. Para este propósito, se utilizan diferentes formulaciones y métodos, que incluyen





normativas internacionales y la modelación por elementos finitos.

Los métodos utilizados para el cálculo de la capacidad de carga de los pilotes incluyen:

Análisis por ecuaciones de la teoría de la plasticidad utilizando softwares como GEOFine (norma Europea) y el método de Caquot Kerisel (norma Canadiense). Estos enfoques se basan en ecuaciones de la teoría de la plasticidad para determinar la capacidad de carga de los pilotes.

Análisis por elementos finitos utilizando softwares como MIDAS GTS (Ibáñez, 2000) y GeoSlope. Este enfoque utiliza la modelación por elementos finitos para analizar el comportamiento de los pilotes y calcular su capacidad de carga.

La Figura 5 proporciona una representación gráfica de la modelación por elementos finitos y los softwares utilizados en el análisis de la capacidad de carga de los pilotes.

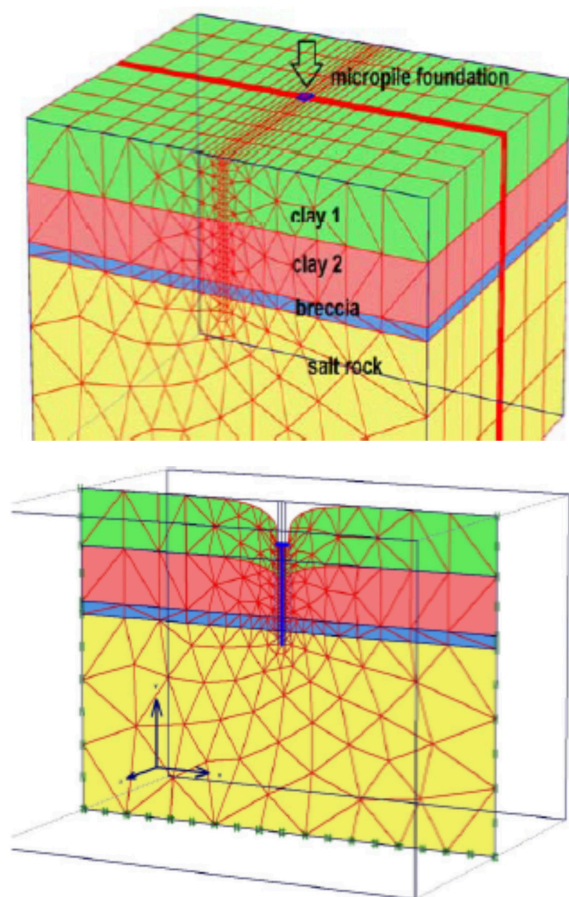


Figura 5: Modelación por elementos Finitos (MEF). Modelo en 3D

Una vez realizados los cálculos, se presenta de forma resumida la capacidad de carga del pilote aislado en la Tabla 1.

Tabla 1: Capacidad de carga última de pilote aislado en kN

Pilote en cala	Método				
	Caquot-Kerisel FS = 3	GeoFine FS =3	MIDAS GTS FS =2	Norma Cubana (1989). MEL	MEF (FS = 2)
152	2576.7	24000	3800.0	2550.0	3600.0
114	2283.3	20667	3410.0	2250.0	3120.0
115	2420.0	23000	3600.0	2300.0	3410.0
151	2296.7	22000	3425.0	2275.0	3375.0
Promedio	2394.2	22417	3558.8	2343.8	3376.3

FS: Factor de Seguridad; MEL: Método estados límites; MEF: Método de los elementos finitos

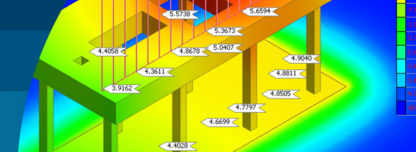
Según los resultados de los cálculos de capacidad de carga de los pilotes aislados, se observa que en todos los casos la capacidad de carga de trabajo promedio es superior a los 2350 kN. Esto es un buen indicador, ya que indica que la capacidad de carga de los pilotes es suficiente para soportar la carga total de los equipos, que asciende a 67800 kN, sin tener en cuenta la capacidad de carga de la losa de cimentación.

Además, al considerar la presencia de 32 pilotes en la balsa de cimentación, la suma total de la capacidad de carga de los pilotes es aún mayor, lo que proporciona un margen adicional de seguridad y estabilidad a la estructura.

El análisis de las cimentaciones en balsa combinadas con pilotes ha sido abordado mediante diferentes métodos, como se menciona en el trabajo de Poulos and Davis (1980).

Estos métodos se pueden clasificar en:

1. Métodos de cálculo simplificado: Estos métodos se basan en simplificaciones y suposiciones para determinar las capacidades de carga y comportamiento de las cimentaciones en balsa combinadas con pilotes. Estos métodos son más rápidos de aplicar, pero pueden tener limitaciones en términos de precisión y representación de la realidad.
2. Métodos computacionales aproximados: Estos métodos utilizan técnicas numéricas más avanzadas



para modelar y analizar el comportamiento de las cimentaciones en balsa con pilotes. Aunque son más precisos que los métodos simplificados, aún se basan en ciertas aproximaciones y suposiciones para simplificar el análisis.

3. Métodos computacionales rigurosos: Estos métodos se basan en el uso de técnicas avanzadas de análisis numérico, como el Método de Elementos Finitos (MEF), para modelar con precisión el comportamiento de las cimentaciones en balsa combinadas con pilotes. Estos métodos ofrecen resultados más precisos y detallados, pero requieren un mayor nivel de conocimiento y experiencia en el uso de herramientas de análisis computacional.

En este trabajo, se utiliza el software MIDAS GTS versión 2018, que se fundamenta en el Método de Elementos Finitos (MEF). Esta herramienta proporciona ventajas significativas, como la facilidad para generar la geometría de la estructura, la capacidad de trabajar con diferentes modelos de materiales y la capacidad de resolver rápidamente problemas de tensión y deformación. El uso de herramientas computacionales como MIDAS GTS (2018) permite realizar un análisis más detallado y preciso de la estructura, teniendo en cuenta las características geotécnicas y los elementos estructurales involucrados.

Para la modelación de la estructura, se utiliza una metodología basada en elementos sólidos tetraédricos. Se asegura que los nodos de cada zona de la estructura coincidan en el cambio de material, lo que permite una transición adecuada entre diferentes materiales. En las zonas más complejas de la estructura, se utilizan elementos híbridos para obtener mejor su comportamiento.

En cuanto a los suelos, se utiliza el modelo de Mohr-Coulomb, que es ampliamente utilizado para representar el comportamiento de los suelos bajo cargas. Este modelo tiene en cuenta la resistencia al corte y la cohesión de los suelos.

Para el hormigón y el acero, se utiliza un modelo elasto-plástico. Esto implica que se considera la respuesta elástica de estos materiales hasta que se alcanza un cierto nivel de deformación, momento en el cual se inicia el comportamiento plástico. Los parámetros que caracterizan el comportamiento elasto-plástico de cada material se

definen de acuerdo con las propiedades del hormigón y el acero utilizados en la estructura.

En el caso de los pilotes, se modelan como elementos tipo viga, lo que implica que se considera su comportamiento como una viga estructural. Se establecen propiedades geométricas equivalentes a las de los pilotes reales, como la longitud, el diámetro y capacidad de carga.

La Figura 2 proporciona una representación gráfica de la modelación de los pilotes como elementos tipo viga en el software MIDAS GTS (2018). El uso de elementos sólidos tetraédricos, junto con los modelos de comportamiento de los materiales y la representación de los pilotes como elementos tipo viga, permite una modelación detallada y precisa de la estructura. Sin embargo, es importante verificar y validar los parámetros y las propiedades utilizadas en el modelo con respecto a las características reales de los materiales y los pilotes. Una vez definida la geometría final del sistema se procedió al cálculo de tensiones y deformaciones, simulando el efecto de cada equipo sobre la losa superior (Figura 6).

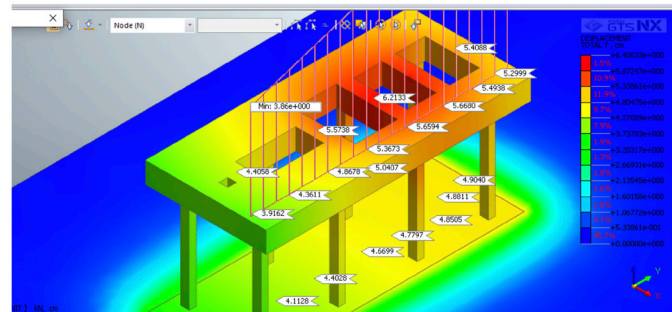
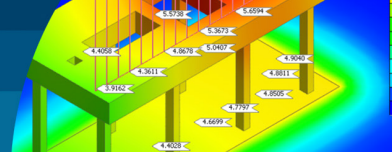


Figura 6: Desplazamientos en diferentes puntos de la estructura en cm

La comparación de los resultados del modelo numérico con las mediciones topo geodésicas realizadas en la industria durante los últimos 10 años es un paso importante para validar y verificar la precisión del modelo utilizado. Esto permite evaluar qué tan bien se ajusta el modelo a la realidad y si los resultados obtenidos son consistentes con las mediciones reales. Para el caso de la losa inferior, se cuenta con un plano referencial que incluye la posición de los ejes y los puntos instrumentados, así como las mediciones realizadas a lo largo del tiempo. La Figura 7 proporciona una representación gráfica de esta información.

Al comparar los resultados del modelo con las mediciones



topo geodésicas, se pueden identificar posibles discrepancias o diferencias entre ellos. Si los resultados del modelo se ajustan de manera precisa a las mediciones realizadas, esto indica una buena correlación entre el modelo y la realidad. Sin embargo, si existen diferencias significativas, se deben analizar las posibles causas, como errores en las mediciones, suposiciones simplificadas en el modelo, incertidumbre en las propiedades del suelo, entre otros factores.

Esquema en planta de la Losa Inferior:

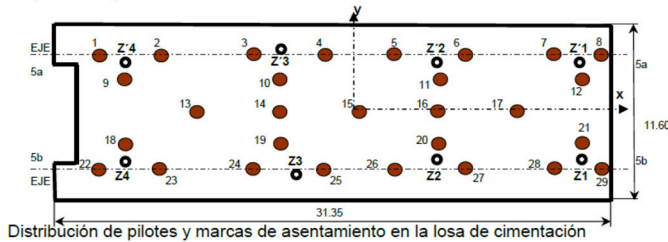


Figura 7: Esquema de distribución de pilotes y marcas de asiento en la balsa

Tabla 2: Desplazamientos verticales medidos versus estimados en la modelación

Desplazamiento, mm			
Nivel inferior			
Punto	Real	Modelo	% diferencia
Z1	56.80	55.00	2.05
Z2	55.80	56.40	1.08
Z3	59.80	59.10	1.17
Z4	62.90	61.40	2.38

Como puede apreciarse en la Tabla 2, los resultados obtenidos con las mediciones topo geodésicas y la modelación numérica presentan diferencias menores al 3% para el caso de la losa inferior. Esta similitud en los resultados indica que el modelo utilizado es válido y confiable para la cimentación de esta estructura.

La validez de la utilización de la combinación de balsa sobre pilotes (BCP) como método de cimentación se ve respaldada por la concordancia entre los resultados obtenidos en las mediciones reales y los resultados del modelo numérico. Esto sugiere que la BCP es una opción efectiva para mitigar los asentamientos y deformaciones en estructuras sometidas a cargas significativas. Es

importante destacar que el bajo porcentaje de diferencia entre los resultados también puede atribuirse a la precisión y calidad de las mediciones topo geodésicas realizadas. Un control adecuado y preciso de las mediciones es esencial para obtener resultados confiables y comparables con los del modelo numérico.

## Conclusiones y recomendaciones

Una vez realizado el trabajo y comparado los resultados de los modelos computacionales y las mediciones a escala real podemos plantear las siguientes conclusiones:

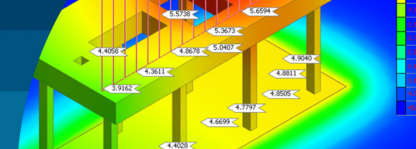
Se demuestra la validez del empleo de la combinación de balsa sobre pilotes (BCP) como una cimentación adecuada para soportar grandes cargas y lograr pequeños asentamientos. La comparación entre los resultados de los modelos computacionales y las mediciones a escala real muestra una similitud y una diferencia menor al 3%, lo que respalda la eficacia de la BCP en la reducción de asentamientos en estructuras sometidas a cargas significativas.

Se confirma la factibilidad del uso de modelación numérica y el empleo de software basado en el Método de los Elementos Finitos (MEF) para resolver problemas complejos en la Ingeniería Civil. La modelación numérica realizada con el software MIDAS GTS, que se basa en el MEF, proporcionó resultados que concuerdan con las mediciones a escala real. Esto demuestra que la modelación numérica y el uso de software especializado son herramientas efectivas en el análisis y diseño de cimentaciones y estructuras complejas.

Los resultados finales del trabajo indican que los desplazamientos en la base de la cimentación son menores a los valores permisibles. Esto implica que la industria puede seguir operando los equipos con pequeños ajustes en la base, lo que asegura la estabilidad de la estructura y la continuidad de las operaciones.

Estas conclusiones respaldan la elección y el diseño de la combinación de balsa sobre pilotes (BCP) como solución de cimentación para la industria en estudio, al tiempo que validan la utilización de la modelación numérica y el software basado en el Método de los Elementos Finitos como herramientas confiables en la Ingeniería Civil.





## Referencias

- Abdel-Fattah, T.T. and Hemada, A.A. (2016). Evaluation of the existing piled foundation based on piled-raft design philosophy. *Innovative Infrastructure Solutions* **1**, 1-11
- Cunha, R.P., Poulos, H.G. and Small, J. C (2000b). Parametric analysis of a piled raft case history in Uppsala, Sweden. *4º Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia*, São Paulo, Brasil, vol. 2, 380-387
- Cunha, R.P., Poulos, H.G. and Small, J.C. (2000a). Class C analysis of a pile raft case history in Gothenburg, Sweden. *Developments in Geotechnical Engineering*, Thailand, vol. 1, 271-280
- Deb, P. and Pal, S.K. (2019). Analysis of load sharing response and prediction of interaction behaviour in piled raft foundation. *Arabian Journal for Science and Engineering* **44**(10), 8527-8543
- DIN 4019 (1987). Baugrund, Setzungsrechnungen bei lotrechter, mittiger Belastung. Deutsches Institut für Normung DIN, Ernst & Sohn, Berlin, Germany
- Halder, P. and B. Manna, (2020). Performance evaluation of piled rafts in sand based on load-sharing mechanism using finite element model. *International Journal of Geotechnical Engineering* **15**(5), 574–591
- Ibáñez, L.O. (2000). *Modelación matemática de las cimentaciones sobre pilotes*. Tesis de doctorado, ISPJAE, La Habana. Cuba
- Ibáñez, L.O. (2017). Análisis de la influencia de la profundidad de cimentación en la disminución de asentamientos en losas de fundación combinadas con pilotes. *Obras y Proyectos* **22**, 42-49
- MIDAS GTS (2018). Software de elementos finitos para análisis geotécnicos en 2D y 3D. South Korea
- Norma Cubana (1989). Anteproyecto de Cimentaciones sobre pilotes. Métodos de cálculo para el dimensionamiento geotécnico. Ministerio de Educación. Editorial Pueblo y Educación, Cuba
- O'Neill, M.W., Caputo, V., De Cock, F., Hartikainen, J. and Mets, M. (2001). Case histories of pile-supported rafts. Rep. for ISSMFE Tech. Comm. TC18, Univ. of Houston, Texas, USA
- 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. and Davis, E.H. (1980). *Pile foundation analysis and design*. Wiley, New York, USA
- Russo, G., Abagnara, V., Poulos, H.G. and Small, J.C. (2013). Re-assessment of foundation settlements for the Burj Khalifa, Dubai. *Acta Geotechnica* **8**, 3-15
- Sinha, A. and Hanna, A.M. (2017). 3D numerical model for piled raft foundation. *International Journal of Geomechanics* **17**(2), 04016055
- Van Impe, W.F. and Lungu, I. (1996). Technical report on settlement prediction methods for piled raft foundations. Ghent University, Belgium
- Taghavi Ghalesari, A. and Janalizadeh Choobbasti, A. (2018). Numerical analysis of settlement and bearing behaviour of piled raft in Babol clay. *European Journal of Environmental and Civil Engineering* **22**(8), 978-1003