

Bearing capacity of embedded piles in rocks considering their contribution to friction

Capacidad portante de pilotes empotrados en rocas considerando su aporte a fricción

Gilberto Quevedo^{1*}

* Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Villa Clara. CUBA

Fecha de Recepción: 07/06/2014

Fecha de Aceptación: 17/05/2015

PAG 189-199

Abstract

This article has the objective to show a study of different existing theories that consider the friction contribution of embedded piles in rock. It initially summarizes the adopted criteria for such theories and the coefficient ranges considered for the application of their basic expressions. The results of these theoretical analyses were applied in the solution of the foundations of a hotel, and its marine, built on the beach in the city of Varadero, Cuba. The study area presented a high geologic and engineering complexity, with highly variable stratification characteristics together with distinct soil and rock properties, where the presence of a calcareous stratum stands out in the deposit. The calcareous layer is found in a variable depth within the strata and has a quality ranging from very poor to good, where all the pile tips were founded. In order to obtain the bearing capacities from the designed piles, it was necessary to take into account their friction contribution within the rock, which was done by validating the existing theories through the execution of in situ pile load tests, combined with the use of theoretical models. This exercise allowed the establishment of practical coefficient values that were required by the theories in such particular site conditions. It was finally possible to yield design solutions for the deep foundations of this case history, which comprised over 2000 driven piles..

Keywords: Piles in rock, bearing capacities, friction contribution, situ pile load tests

Resumen

Este artículo tiene como objetivo mostrar el estudio realizado de diferentes teorías existentes para considerar el aporte a fricción de pilotes empotrado en roca. Para ello se resume inicialmente los criterios considerados en dichas teorías y los intervalos de los coeficientes que las mismas consideran para la aplicación de sus expresiones básicas. Los resultados de este análisis teórico fueron aplicados en la solución de las cimentaciones sobre pilote de un hotel y su marina construido en la playa de Varadero, Cuba. La zona de estudio presentaba una alta complejidad ingeniero geológica, con una estratificación muy variables y propiedades de los suelos y las rocas de la misma igualmente variable, destacándose la presencia de un estrato de calcarenita, que aparece a una profundidad variable y con una calidad desde buena hasta muy mala, donde siempre se empotraron los pilotes. Para la obtención de la capacidad portante de muchos de los pilotes, fue necesario tomar en cuenta el aporte a fricción en la roca, validándose las teorías existente a partir de la realización de pruebas de carga in-situ, combinadas con el empleo de los modelos teóricos, llegando a establecer los valores de los coeficientes que las mismas utilizan para las condiciones del caso de estudio. A partir de todo ello fue que se pudo dar solución a las cimentaciones sobre pilotes del caso de estudio, la comprendía más de 2000 pilotes hincados.

Palabras clave: Pilotes en rocas, capacidad resistente, aporte a fricción, pruebas de carga

1. Introducción

Como es conocido las teorías clásicas de la Mecánica de Suelos y Cimentación plantea que cuando un pilote se logra empotrar en la roca como mínimo una vez su diámetro ese pilote trabajará con aporte solo en punta y no se considerará su aporte a fricción, sobre la base que se considera que los desplazamientos del pilote en la punta serán despreciable y por tanto no se generará la fricción pilote-roca. La afirmación anterior es cierto cuando los pilotes se apoyan en rocas de buena calidad, pero para los casos donde los pilotes se apoyan en rocas de mala calidad, donde el mismo puede empotrarse en la roca varias veces su diámetro, la anterior afirmación no es cierta y resulta necesario tomar en cuenta a la hora de la determinación de la capacidad de carga última del pilote su aporte a fricción dentro de la roca.

En la literatura internacional aparecen varios trabajos que estudian esta problemática, pudiéndose mencionar entre los más recientes los de Serrano (2008), Pérez Carballo (2010) y Olmo (2011), todos estos trabajos coinciden que existen dos grupos de teorías para establecer la resistencia última a fricción del pilote en la roca τ_{ult} , siendo las mismas las siguientes:

- Teorías que consideran la τ_{ult} como una función lineal de la resistencia a compresión simple de la roca R_c
- Teorías que consideran la τ_{ult} como una función cuadrática de la resistencia a compresión simple de la roca R_c

En el trabajo se estudiaron todas estas teorías, estableciendo sus expresiones básicas y los intervalos de los coeficientes que las mismas proponen. Este estudio fue necesario aplicar en la solución de las cimentaciones sobre pilotes de un hotel en la playa de Varadero, Cuba. Las condiciones ingeniero-geológicas de la zona eran muy complejas y variables, así como las propiedades de los suelos y las rocas existentes, pudiéndose simplificar la misma en una estratificación compuesta por una serie de suelos blandos, con espesores variables de relleno, turba, cieno, y otros suelos muy sueltos, ninguno de los cuales aportan a la

¹ Autor de correspondencia:

Ingeniero Civil en 1977 en el Instituto Politecnico "José A. Echeverría" Habana, Cuba. Doctor en ciencias técnicas (PhD) en 1887 en el Instituto de la Construcción de Moscú. Doctor en Ciencias (Dr.Sc) en la Habana en 2002. Profesor titular desde el 1992, Investigador Titular desde 1999. Decano de la Facultad de Construcciones de la UCLV desde 2008
E-mail: quevedo@uclv.edu.cu



SPANISH VERSION.....

capacidad de carga de los pilotes, y un estrato de calcarenita, que aparece a distintas profundidades y con una calidad muy variable, desde buena hasta muy mala, donde los pilotes logran longitudes de embebimiento LE desde apenas 1.5 veces su diámetro hasta más de 14 veces su diámetro, en función de la calidad de la roca.

Para la determinación de la capacidad portante de los pilotes, se combinó la determinación de las misma por los modelos existentes, incluyendo las teorías analizadas que consideran el aporte a fricción dentro de la roca en los casos necesarios, con la realización de pruebas de cargas in-situ, que sirvieron para calibrar los modelos y establecer el intervalo en que variaban los coeficientes que las mismas consideran para las condiciones del caso de estudio. Se logró una muy buena calibración ingenieril de los modelos y a partir de los mismos establecer las capacidades resistentes de los pilotes, para las distintas condicionales de apoyo, lográndose una reducción apreciable de la longitud de los mismos, con el consiguiente ahorro económico en la construcción.

2. Caracterización de ingeniero-geológica de la zona de estudio

Para poder realizar la caracterización de las condiciones ingeniero-geológica de la zona de estudio,

necesaria para la determinación de la capacidad portante de los pilotes, se contó con varios estudios de suelos realizados en el lugar por las empresas GeoCuba (2008) y ENIA (2010, 2011), donde se detallaban los estudios de sondeos, descripción de los estratos, realización de estudios geofísicos y de laboratorio para la obtención de las principales propiedades físicas y mecánicas de los suelos y las rocas.

En general en la zona aparecen, con distintos espesores, posiciones y propiedades ingenieriles los siguientes tipos de suelos y rocas:

- Estrato de relleno, que siempre está en la superficie pero con distinta potencia.
- Estrato de turba, con espesores pequeños.
- Estrato de cieno, con espesores pequeños
- Estrato compuesto por la combinación de distintos suelos sueltos, que puede aparecer o no en las distintas zonas de la edificación.
- Estrato de calcarenita, que aparece a una profundidad muy variable y con una calidad muy variable, desde buena a muy mala.

En la Figura 1 se muestran dos fotos de estos suelos durante el proceso de obtención de muestra en el campo, donde se puede observar las características del relleno y sobre todo las distintas calidades de la calcarenita, la que se recupera con valores de RDQ muy variable como se observa.



Figura 1. Fotos de las muestras del relleno y la calcarenita obtenidas durante la exploración



Para los fines que interesan al trabajo realizado se puede simplificar la estratificación a dos zonas, una primera formada por el relleno, la turba, el cieno y los demás suelos sueltos que pueden aparecer o no, que está formada por suelos blandos que no aportan a la capacidad portante de los pilotes y una segunda zona formada por la calcarenita, con sus distintos espesores y calidad, que es la que en realidad aporta, tanto en punta como a fricción, según sea el caso. Como se había planteado la calidad de la calcarenita es muy variable, pudiéndose agrupar, a partir del estudio de todas las investigaciones ingeniero-geológicas realizadas, en tres grupos que son:

- Calcarenita de calidad buena, con un valor medio de $R_c=9000$ kPa
- Calcarenita de calidad mala, con un valor medio de $R_c=1650$ kPa
- Calcarenita de calidad muy mala, con un valor de $R_c=1000$ kPa

Los pilotes analizados siempre fueron empotrados, con distintas longitudes de embebimiento LE, en la calcarenita, con una de las calidades anteriores, resultando que cuando se empotraban en la de calidad mala o muy mala, era necesario considerar su aporte a fricción, mientras cuando se empotraban en la de calidad buena, solo se consideraba su aporte en punta.

3. Análisis de las distintas teorías para considerar el aporte a fricción en pilotes empotrados en roca

Como fue planteado en la introducción del artículo, en la literatura internacional aparecen varios trabajos que estudian esta problemática, pudiéndose mencionar entre los más recientes los de Serrano (2008), Pérez Carballo (2010) y Olmo (2011), todos estos trabajos coinciden que existen dos grupos de teorías para establecer la resistencia última a fricción del pilote en la roca τ_{ult} , siendo las mismas las siguientes:

- Teorías que consideran la τ_{ult} como una función lineal de la resistencia a compresión simple de la roca R_c .

La expresión general que plantea esta teoría para la obtención de la resistencia última a fricción del pilote en la roca, es la definida por la Fórmula 1.

$$\tau_{ult} = \alpha \cdot \sigma_c \quad (1)$$

Según Pérez Carballo (2010), las expresiones propuestas por los principales autores son las que se muestran en las siguientes fórmulas a continuación:

- Thorne $\tau_{ult} = (0.05\sim 0.1) \cdot \sigma_c$ (2)
- Poulos y Davis $\tau_{ult} = 0.15 \cdot \sigma_c$ (3)
- Código Australiano $\tau_{ult} = 0.15 \cdot \sigma_c$ (4)
- Hooley y Lefroy $\tau_{ult} = 0.3 \cdot \sigma_c$ (5)
- Código técnico Español $\tau_{ult} = (0.1\sim 0.4) \cdot \sigma_c$ (6)
- Teorías que consideran la τ_{ult} como una función cuadrática de la resistencia a compresión simple de la roca R_c .

La expresión general que plantea esta teoría para la obtención de la resistencia última a fricción del pilote en la roca, es la definida por la Fórmula 7.

$$\tau_{ult} = \alpha \cdot \sigma_c^k \quad (7)$$

Todos los autores estudiados coinciden en considerar $k=0.5$, por lo tanto lo que varía en cada uno de ellos es el intervalo de valores de α que consideran, según Pérez Carballo (2010), las expresiones propuestas por los principales autores son las que se muestran en las siguientes fórmulas a continuación:

- Rosenberg y Journaux $\tau_{ult} = 0.4 \cdot \sigma_c^{0.5}$ (8)
- Hovarth y Hovarth $\tau_{ult} = (0.2\sim 0.3) \cdot \sigma_c^{0.5}$ (9)
- Fleming $\tau_{ult} = 0.45 \cdot \sigma_c^{0.5}$ (10)
- Hooley y Lefroy $\tau_{ult} = 0.15 \cdot \sigma_c^{0.5}$ (11)
- Manual de la AASHO $\tau_{ult} = (0.21\sim 0.26) \cdot \sigma_c^{0.5}$ (12)
- Carubba $\tau_{ult} = (0.10\sim 0.25) \cdot \sigma_c^{0.5}$ (13)

Todas las teorías anteriores pueden ser expresadas por la Fórmula 7, considerando los siguientes intervalos de variación de las variables k y α .

Si $K=1$ entonces α toma los valores de $\alpha=0.05\sim 0.4$

Si $K=0.5$ entonces α toma los valores de $\alpha=0.10\sim 0.45$

4. Determinación de la capacidad portante de los pilotes

El procedimiento para la determinación de la capacidad portante de los pilotes, dada la complejidad de la zona de estudio, es la que se establece en la Figura 2.



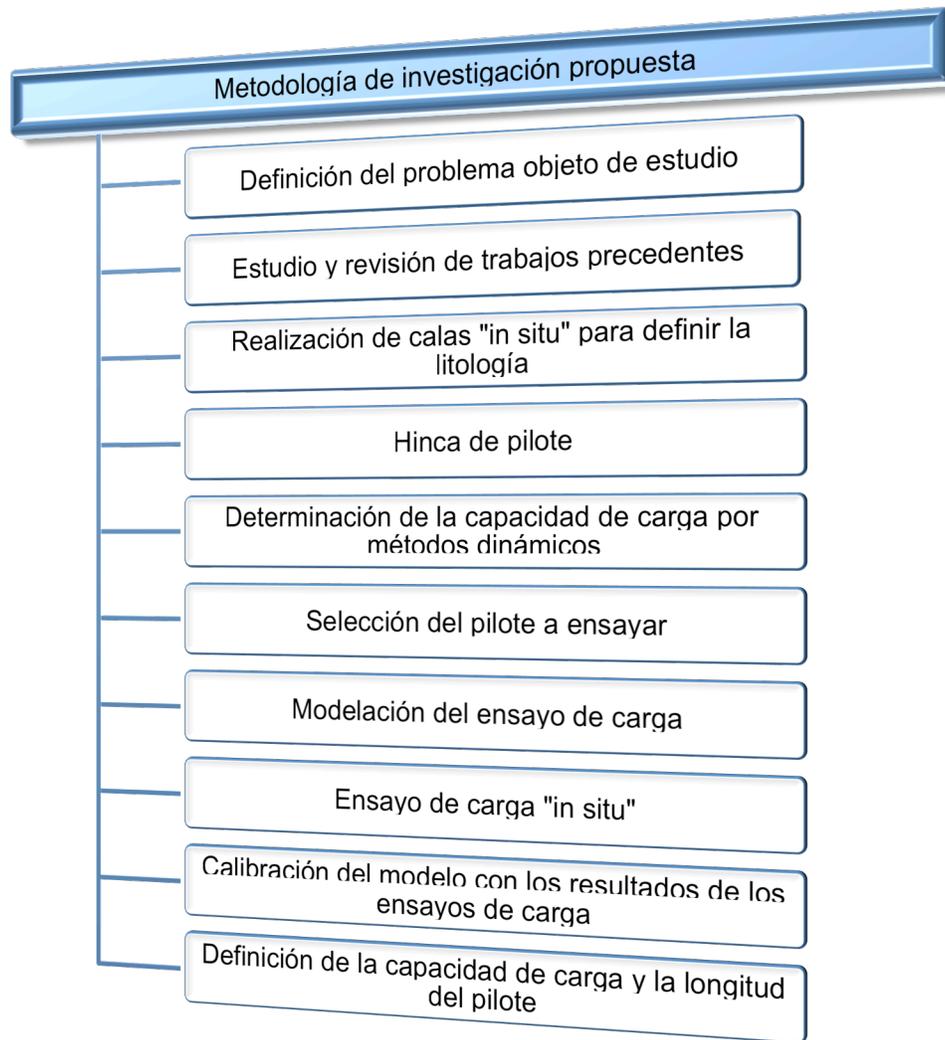


Figura 2. Metodología propuesta para la determinación de la capacidad portante de los pilotes

De la metodología anterior ya se realizó un resumen muy general de los 3 primeros pasos en los epígrafes 1 y 2 del presente artículo, mientras los relacionados con los pasos 4 y 5 no lo analizaremos, debido a la extensión del artículo, solo mencionando que se realizaron 36 ensayos de hinca controlados inicialmente, para distintas condiciones de longitud de pilote y características de la estratificación, a partir de cuyos resultados fue posible tener una aproximación inicial de la capacidad portante de los pilotes, con la aplicación de distintas fórmulas de los métodos dinámicos, y de conjunto con la caracterización ingeniero-geológica de la zona realizada inicialmente se pudo establecer los pilotes a los que se le debían realizar las pruebas de cargas in-situ.

4.1 Realización de las pruebas de cargas in-situ a los pilotes elegidos.

A partir de los análisis de los resultados obtenidos con

la realización de los 5 primeros pasos de la metodología definida en la Figura 2, se determinó la necesidad de la realización de 8 pruebas de cargas in-situ a pilotes de diferentes longitudes y empotrados con distintas longitudes de embetimiento, LE, en las calcarenitas de distintas calidades. En el artículo analizaremos los resultados de 5 pruebas de cargas, una de un pilote empotrado en la calcarenita de muy mala calidad, dos de pilotes empotrados en calcarenitas de mala calidad y dos en pilotes empotrados en calcarenitas de buena calidad.

Las pruebas de cargas se realizaron al pilote individual, aplicando carga por 3 celdas de carga de 1000 kN de capacidad cada una, y colocando una reacción encima de ellas siempre mayor que la carga a suministrar al pilote. En la Figura 3 se muestran 2 fotos sobre las particularidades de las pruebas de carga.



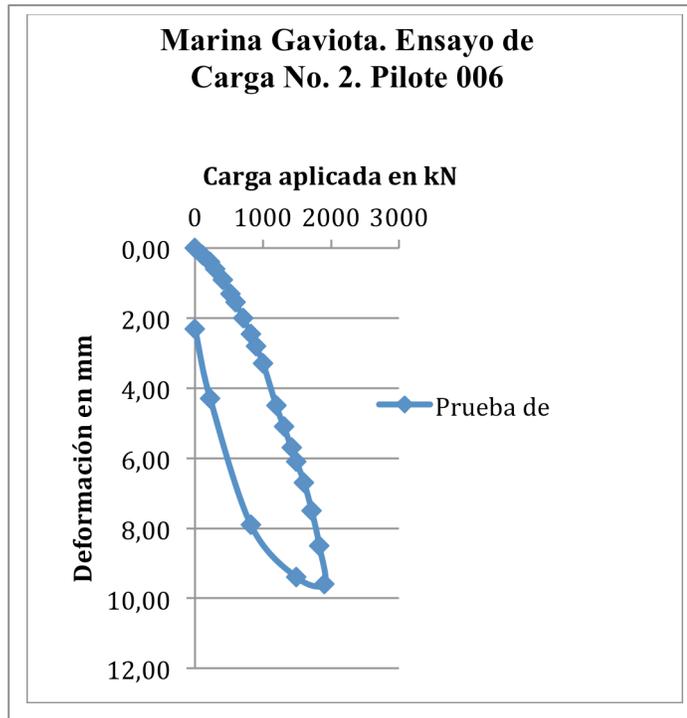


Figura 5. Resultados de la prueba de carga al pilote 006

Para poder obtener la carga última de falla del pilote 006 fue necesario aplicar el método gráfico-analítico definido en la Propuesta de Norma Cubana para el diseño de

cimentaciones sobre pilotes, (Ibañez, Quevedo 2011), llegándose a estimar la capacidad de carga última del pilote de 2300 kN, tal y como se muestra en la Figura 6.

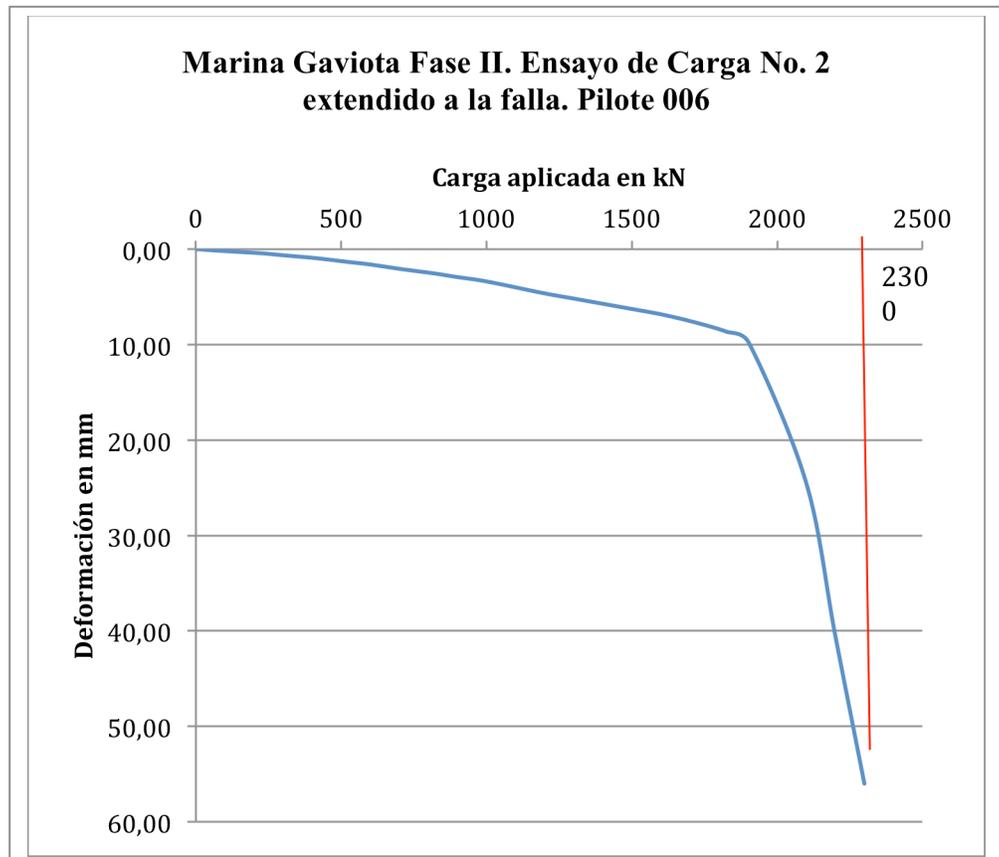


Figura 6. Resultados de la prueba de carga al pilote 006, llevado a la falla

4.2 Determinación de la capacidad portante de los pilotes aplicando los modelos teóricos.

Para la determinación de la capacidad portante del pilote se emplearon las expresiones definidas en la Propuesta de Norma Cubana para el diseño de cimentaciones sobre pilotes, (Ibañez, Quevedo 2011). Como lo que se está determinando es la capacidad portante vertical última del pilote, Q_{vult} , se trabajó para todos los casos con los factores de seguridad igual a la unidad. La capacidad portante última del pilote por tanto queda definida por la Fórmula 14, que mostramos a continuación:

$$Q_{vult} = Q_{pvult} + Q_{fvult} \quad (14)$$

donde:

Q_{pvult} : Capacidad de carga vertical última en punta.

Q_{fvult} : Capacidad de carga vertical última a fricción

Para el caso del aporte en punta se aplica la Fórmula 15, considerando solo este aporte cuando el pilotes está empotrado en la roca de buena calidad, mientras que en el caso de que este empotrado en la roca de calidad mala o muy mala, se considerará el aporte a fricción dentro de la roca.

$$Q_{pvult} = A_p \cdot R_c \cdot k_{sq} \cdot d_r \quad (15)$$

donde:

A_p : Área del pilote.

R_c : Resistencia media a compresión simple de la roca.

k_{sq} : Factor que toma en cuenta la calidad de la roca, determinado en función del RQD.

d_r : Factor que toma en cuenta el efecto de la longitud de embebimiento LE del pilote en la roca, determinado a partir de la Fórmula (16).

$$d_r = \left(1 + 0.4 \frac{LE}{D}\right) \leq 3.5 \quad (16)$$

donde:

D: Diámetro del pilote

Para el caso del aporte a fricción en la roca, Fórmula 17, se incluirá a la hora de obtener el τ_{ult} todo lo analizado en el epígrafe 3 del presente artículo.

$$Q_{fvult} = P_p \cdot \tau_{ult} \cdot LE \quad (17)$$

donde:

P_p : Perímetro del pilote.

Aplicando estas expresiones y determinando las deformaciones de la cimentación sobre pilotes, por las expresiones clásicas, para los mismos intervalos de la prueba de carga, se puede llegar a calibrar los modelos teóricos con los valores de la prueba de carga. En las Figuras 7 y 8 se muestran los resultados de dichos ajustes para las pruebas de carga a los pilotes 026 y 006 respectivamente.

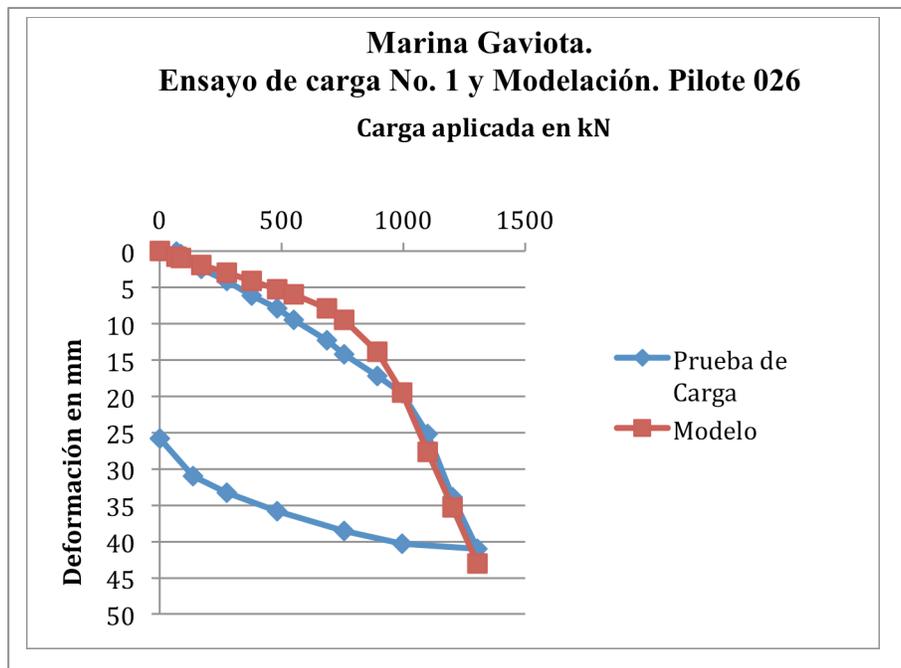


Figura 7. Resultados de la prueba de carga y la modelación del pilote 026



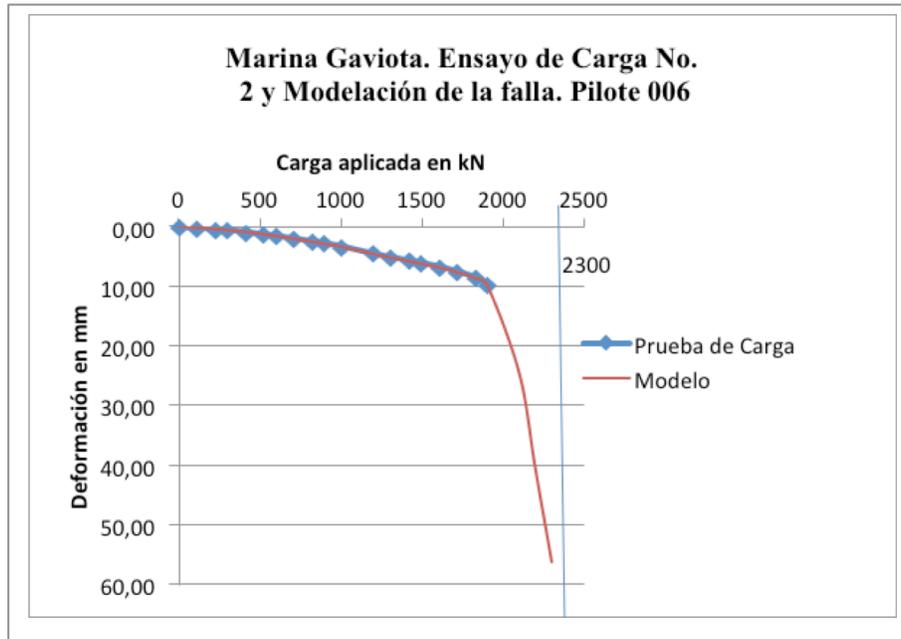


Figura 8. Resultados de la prueba de carga y la modelación del pilote 006

Como se puede observar en las Figuras 7 y 8, los ajustes obtenidos entre los modelos teóricos y las pruebas de cargas fueron muy buenos desde el punto de vista ingenieril.

En la Tabla 1 aparece los resultados numéricos de ajuste de los valores de α , tanto para los métodos que consideran la relación lineal con R_c como los que consideran cuadrática, para la determinación de Q_{fvult} .

En la Tabla 2 se muestran los resultados numéricos obtenidos en la determinación del aporte en punta de todos los pilotes analizados.

En la Tabla 3 se muestran los resultados numéricos obtenidos en la determinación de la Q_{vult} por los modelos teóricos, considerando los métodos lineales como los cuadráticos a la hora de determinar la Q_{fvult} , y los valores de la capacidad portante última obtenida de la prueba de carga Q_{vultpc} .

En la Tabla 3 se pueden observar la buena calibración que se logra entre los valores de Q_{vult} obtenidos por los modelos teóricos y los valores de Q_{vultpc} obtenidos de las pruebas de carga. Para el caso de los pilotes 010,026 y 037, donde se consideró el aporte a fricción en la roca no resulta posible establecer qué tipo de método, el que considera la función lineal o el que considera la función cuadrática, es el que mejor se ajusta al caso analizado, pero en general ambos se ajustan muy bien.

En la Tabla 4 se muestran los intervalos de los valores de α obtenidos en los ajustes realizados a la hora de determinar la Q_{fvult} , por ambos métodos, y los intervalos obtenidos del análisis de la literatura internacional. Como se puede apreciar los intervalos de α obtenidos en la investigación están dentro de los mencionados en la literatura, ajustándose a los límites inferiores de estos.

Tabla 1. Valores de α y Q_{fvult} obtenidos para los pilotes que tienen aportes a fricción

Pilote	LE (m)	Calidad de la roca	R_c (kPa)	Formula lineal de Q_{fvult}		Formula cuadrática de Q_{fvult}	
				α	Q_f (kN)	α	Q_f (kN)
010	5.4	Muy mala	1000.00	0.1	864.00	0.1	864.00
026	5.0	Mala	1650.00	0.09	1188.00	0.12	1233.00
037	5.7	Mala	1650.00	0.12	1806.00	0.15	1757.00

Tabla 2. Valores de Q_{pvult} obtenidos para todos los pilotes analizados

Pilote	LE (m)	Calidad de la roca	R_c (kPa)	Q_{pvult} (kN)
010	5.4	Muy mala	1000.00	56.00
026	5.0	Mala	1650.00	92.40
037	5.7	Mala	1650.00	92.40
006	1.2	Buena	9000.00	2376.00
007	0.6	Buena	9000.00	1728.00



Tabla 3. Valores de Q_{vult} y Q_{vultpc} para los pilotes analizados

Pilote	LE (m)	Calidad de la roca	Q_{pvult} (kN)	Q_{fvult} (kN)		Q_{vult} (kN)		Q_{vultpc} (kN)
				Formula lineal	Formula cuadrática	Formula lineal	Formula cuadrática	
010	5.4	Muy mala	56.00	864.00	864.00	920.00	920.00	900.00
026	5.0	Mala	92.40	1188.00	1233.00	1280.40	1325.40	1305.00
037	5.7	Mala	92.40	1805.00	1757.00	1898.40	1850.40	1850.00
006	1.2	Buena	2376.00	0.00	0.00	2376.00	2376.00	2300.00
007	0.6	Buena	1728.00	0.00	0.00	1728.00	1728.00	1700.00

Tabla 4. Intervalos de valores de α obtenidos en la investigación y los propuestos en la literatura

Tipo de fórmulas para la obtención de τ_{ult} en función de R_c	Fórmula	Valores de α de la literatura	Valores de α obtenidos.
Lineales	$\tau_{ult} = \alpha \cdot R_c$	0.05~0.40	0.09~0.12
Cuadrática	$\tau_{ult} = \alpha \cdot R_c^k$ (k=0.5)	0.10~0.40	0.10~0.15

4.3 Definición de la capacidad portante de trabajo y la longitud de los pilotes.

Siguiendo la metodología presentada en la Figura 2 y realizando análisis similares a los enunciados en el presente artículo para todas las condicionales de los pilotes en la edificación, combinando para ello los resultados de la aplicación de los modelos teóricos calibrados, de las formulas dinámicas a partir de los resultados de las pruebas de hinca controladas y los resultados obtenidos de todas las pruebas de cargas realizadas, y aplicando los coeficientes de seguridad correspondientes, fue posible determinar la capacidad soportante de trabajo a todos los pilotes para todas

las zonas definidas, su longitud y la cantidad de golpes en el último pie que se debe garantizar durante la hinca para asegurar dicha capacidad portante de trabajo.

En la Figura 9 se muestra una planta de la edificación y las distintas zonas definidas como típicas para los pilotes, a partir de las condiciones ingeniero-geológicas de las mismas, la capacidad portante de trabajo Q_{vtrab} y la longitud de los pilotes.

De igual forma en la Tabla 5 se resumen los valores de Q_{vtrab} , longitud de los pilotes y el número de golpes en el último pie que debe garantizarse durante la hinca, de cada una de las zonas establecidas.

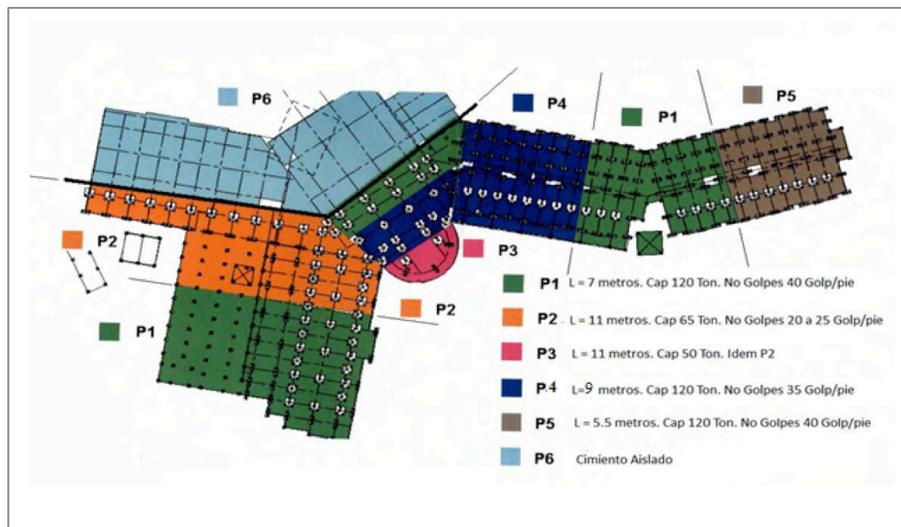


Figura 9. Zonificación de la solución de los pilotes, con su Q_{vtrab} y su longitud



Tabla 5. Valores de Q_{vtrab} , longitud de los pilotes y el número de golpes en el último pie que debe garantizarse durante la hinca, de cada una de las zonas establecidas

No	Identificador	Longitud (m)	Q_{vtrab} (kN)	Número Golpes/Pie
1	P1	7	120	40
2	P2	11	65	20 a 25
3	P3	11	50	20 a 25
4	P4	9	120	35
5	P5	5.5	120	40

Los resultados anteriores trajeron consigo una racionalidad en la solución de la cimentación sobre pilotes para la edificación analizada, con el consiguiente ahora económico, pudiéndose comprobar durante la hinca de todos los pilotes que los resultados obtenidos eran válidos, teniéndose una pérdida de pilotes muy baja, menor del 3%, con un comportamiento en cada zona según lo establecido en la investigación.

5. Conclusiones

- Se establece una metodología general para abordar la solución de las cimentaciones sobre pilotes en condiciones ingeniero-geológicas muy complejas y variables, donde se combina una correcta caracterización de las diferentes estratificaciones existentes y de las propiedades físico y mecánicas de los suelos y las rocas que lo componen, con el empleo de métodos teóricos de determinación de la Q_{vult} , donde se incluye los que consideran el aporte a fricción en la roca, con la utilización de las formulas dinámicas a partir de los resultados de las pruebas de hincas, con las pruebas de cargas in-situ, de forma que se pueda proponer de Q_{vult} lo más cercano a la realidad.
- Del estudio en la literatura de los métodos para considerar el aporte a fricción en los pilotes empotrados en la roca, se pudo concluir que existen dos grupos de métodos, uno que considera una relación lineal entre τ_{ult} y R_c a partir del coeficiente α , encontrándose que dicho valor, según los diferentes autores consultados, toma valores en el intervalo de $0.05 \leq \alpha \leq 0.4$, y otro que considera una relación cuadrática entre τ_{ult} y R_c a partir del coeficiente α , encontrándose que dicho valor, según los diferentes autores consultados, toma valores en el intervalo de $0.1 \leq \alpha \leq 0.4$.
- Se logró a partir de los resultados de las pruebas de carga realizar una calibración de las teorías y coeficientes empleados para considerar el aporte a fricción en la roca, obteniéndose que para los métodos que consideran la relación lineal entre τ_{ult} y R_c el intervalo de variación α era de $0.09 \leq \alpha \leq 0.12$, mientras que para los métodos que consideran la relación cuadrática el intervalo fue de $0.1 \leq \alpha \leq 0.15$, estando ambos dentro de los definidos en la literatura, tendiendo siempre para sus valores inferiores.
- Se logró a partir de la determinación de Q_{fvult} , incluyendo en la misma el aporte a fricción en la roca por los métodos analizados, y la Q_{pvult} por los métodos clásicos, obtener un satisfactorio ajuste ingenieril entre las curvas carga-deformación obtenidas por las pruebas de cargas y las propuestas por los métodos teóricos, demostrando la validez de estos últimos.
- Con la aplicación de la metodología general propuesta en la solución de las cimentaciones sobre pilotes de la edificación analizada se lograron resultados racionales de la cimentación, proponiéndose una zonificación, en función las características ingeniero-geológicas, que permitió definir para cada una de las zonas el valor de la Q_{vtrab} , la longitud de los pilotes y el número de golpes mínimo a garantizar en el último pie durante la hinca de los pilotes, todo lo cual fue corroborado de forma satisfactoria durante la hinca de todos los pilotes.



6. Referencias

- Del Olmo D., Melentijevc S., Prieto L. y Olalla C. (2011)**, Ensayo a escala real e interpretación del comportamiento de un pilote por fuste en roca. Revista Ingeniería Civil No 161, 2011, ISSN: 0213-8468, pag. 73-81
- ENIA (2010)**, Informe geotécnico. Marina Gaviota Fase II. Empresa de Investigaciones Aplicada, Habana, Cuba, 2010, 36 pag.
- ENIA (2011)**, Informe geotécnico. Marina Gaviota Fase III. Empresa de Investigaciones Aplicada, Habana, Cuba, 2011, 48 pag.
- GeoCuba (2008)**, Informe ingeniero-geológico. Marina Gaviota Fase I. GeoCuba, Habana, Cuba, 2008, 29 pag.
- Geotechnical Engineering Office. (2006)**, Foundation design and construction. Civil Engineering Development Department the Government of de Hong Kong. Hong Kong 2006. 376 pag.
- Ibañez L. (2002)**, Análisis del comportamiento geotécnico de las cimentaciones sobre pilotes sometidas a carga axial mediante la modelación matemática. Tesis en opción al grado de Doctor en Ciencias Técnicas. Tutor: Dr. Sc. Gilberto Quevedo Sotolongo. UCLV. Cuba, 112 pag.
- Ibañez L. y Quevedo G. (2011)**, Propuesta de Norma Cubana para el diseño de cimentaciones sobre pilotes. Oficina Nacional de Normalización. Habana. Cuba. 29 pag.
- Paulos H. G (2000)**, Pile load test methods – applications and limitations. Libro de homenaje a Jiménez Salas. CEDEX p. 101-111.
- Pérez Carballo P. (2010)**, Implementación informática para el cálculo de pilotes de hormigón “in-situ” según el código técnico de edificación. Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla, marzo 2010.
- Randolph M.F. y Wroth (1980)**, Application of the failure state in undrained simple shear to the shaft capacity of driver of piles. Revista Geotechnique. Vol 31. No 1 p. 143-157
- Randolph M.F. (1994)**, Design methods for pile groups and piled rafts. Proceedings of the 13th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. New Delhi: 1-21.
- Serrano A., Olalla C. y Ríos Aguilar D. (2008)**, Resistencia por fuste de pilotes empotrados en roca. Estudio comparativo entre distintos métodos de cálculo y normativas. Revista Ingeniería Civil No 150, 2008, ISSN: 0213-8468, pag. 35-48
- Shakhirev V. (1996)**, Estudio experimental del suelo durante la hincada de pilotes. Francia. Boletín de laboratorio de mecánica de suelo # 206 (Nov-Dic), p. 95-116
- Sung-Min Ch. (2010)**, Foundation Design of the Incheon bridge. Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA. Vol 41, December 2010. ISSN 0046-5828, 16 pag.

