**12no SIMPOSIO INT. ESTRUCTURAS, GEOTECNIA Y MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN**

**Título**

Aplicación de los ensayos de integridad de pilotes combinado con la modelación matemática.

***Title***

Application of piles integrity tests combined with mathematical modeling

**Nombre y Apellidos1**

1-Luis Orlando Ibáñez Mora. Universidad Central Marta Abreu de Las Villas. Cuba. Ibanez@uclv.edu.cu

**Resumen:** En el presente trabajo se abordan los ensayos de integridad en pilotes (PIT), utilizando el método de baja deformación, que es uno de los más utilizados hoy en día para la comprobación de la integridad de pilotes y la determinación de su longitud, debido a que los pilotes son inaccesibles prácticamente en su totalidad, ya que no se puede comprobar que los mismos se han ejecutado correctamente y que satisfaga las exigencias para las que ha sido diseñado. Se explica el funcionamiento del método de ensayo, la modelación matemática y los resultados obtenidos a escala real. Finalmente, mediante métodos analíticos y la modelación con el software PLAXIS 3D, correlacionando los resultados de los ensayos de integridad y la modelación se determina la capacidad de carga de cimentaciones sobre pilotes pertenecientes a los puentes del pedraplén Jigüey - Cayo Romano, en Cayo Cruz.

**Palabras Clave:** *Ensayos; Pilotes; Modelación.*

**Abstract*:*** At the present work the integrity tests in piles (PIT) are addressed, using the low deformation method, which is one of the most used today for the verification of the integrity of piles and the determination of their length, due to that the piles are practically inaccessible in their totality, since it cannot be verified that they have been correctly executed and that they meet the requirements for which they were designed. The operation of the test method, the mathematical modeling and the results obtained on a real scale are explained. Finally, by means of analytical methods and modeling with the PLAXIS 3D software, correlating the results of integrity tests and modeling, the load capacity of foundations on piles on the Jigüey – Key Romano highway bridges in Key Cruz is determined.

**Keywords:** *Test, Piles; Modeling*

**1. Introducción**

Los pilotes como una forma de cimentación profunda son utilizados cuando las primeras capas del suelo presentan poca capacidad de apoyo. En la ejecución de los pilotes fundidos in situ pueden llegar a existir anomalías en cuanto a su integridad estructural, al no alcanzarse la continuidad del pilote. Las pruebas de integridad de pilotes permiten verificar la longitud del elemento, para calcular su capacidad de carga y garantizar las condiciones del proyecto. En este trabajo se abordan las investigaciones relacionadas con las cimentaciones sobre pilotes existentes en los Puentes 1 y 3 pertenecientes a la vía de categoría I de carácter nacional denominada Pedraplén Jigüey - Cayo Romano en Cayo Cruz, la cual está sometida a un proceso de reconstrucción, donde se propone utilizar la cimentación sobre pilotes existente, como cimentación de los estribos de nuevos puentes a construir en el lugar, capaces de resistir una carga de 1500 kN.

La cimentación de los puentes que se dirigen a Cayo Cruz está apoyada en roca (Martínez, 2010). Para la determinación de la capacidad de carga, se propone utilizar los métodos estáticos basados en la teoría de la plasticidad. Estos están basados en principios teóricos y ensayos, que procuran determinar la capacidad máxima de carga que es capaz de resistir un pilote o grupo de estos en el medio. Sowers (1977), Juárez (1975), Jiménez (1986) y (1994), L´ Herminier (1968), Norma Cubana (1989), Ibáñez (2001), Paulos and Davis (1980), etc. entre otros coinciden en que la capacidad de carga se obtiene de la suma de la resistencia por la punta y por la fricción lateral en el instante de carga máxima:

Qtotal = Qpunta + Qfricción Expresión 1

En aquellos casos que lo amerite se propone calcular el aporte a fricción, aunque en la mayoría de las normativas no lo tienen en cuenta.

Torne (1977) propone los siguientes valores mínimo y máximo para el cálculo de la resistencia por fuste:

Expresión 2

Poulos y Davis (1980) establecen una resistencia admisible por fuste de 0.05 σc. Suponiendo un coeficiente de seguridad de 3, se obtiene una resistencia última de 0.15 σc, proporcionándose además una resistencia última de 0.45 MPa para el caso de rocas que no estén meteorizadas:

Expresión 3

Tanto en esta teoría como en las formuladas a continuación, se considera un coeficiente de seguridad de 3. Aunque se trata de un valor elevado respecto del coeficiente de seguridad de 2.5 usado tradicionalmente para la evaluación de la resistencia por fuste, en el análisis comparativo la resistencia última por fuste se ha obtenido siempre multiplicando el valor de la carga admisible por 3.

La resistencia aportada por el fuste de un pilote a lo largo de su empotramiento en roca puede ser también obtenida como función de la raíz cuadrada de la resistencia a compresión simple:

) Expresión 4

Tabla 1: Resistencia por fuste de pilotes en roca. Fuente: elaboración propia.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Resistencia por fuste de pilotes empotrados en roca como función de la raíz cuadrada de la resistencia a compresión simple: f(σc1/2)  τult = α·σc0.5 | | | | |
| Autores | Fecha | Coeficiente α | Limitaciones | Observaciones |
| Rosenberg & Journaux | 1976 | 0,375 | En pilotes de diámetro entre 210 · 610 mm, empotrados en pizarras. | - |
| Horvath et al. | 1983 | 0,2 / 0,3 | En pilotes de 710 mm de diámetro (aprox). en argilitas o similares. | Si la pared del pilote presenta cierta rugosidad, se considera un coeficiente de 0,3 |
| Rowe & Armitage | 1987 | 0,45 / 0,6 | - | Si la superficie de contacto pilote – terreno es muy rugosa, se considera un coeficiente de 0,6 |
| Wyllie | 1991 | 0,4 → 0,6 | - | Establece un límite inferior y otro superior. |
| Fleming et al. | 1992 | 0,4 | σc < 0,50 MPa | Aplicable solo a rocas suficientemente blandas |
| Hooley & Lefroy | 1993 | 0,15 → 0,4 | 0,25 < σc < 3,00 MPa en pizarras, lutitas y argilitas. | Aplicable sobre rocas alteradas y blandas |
| Kulhawy & Phoon | 1993 | 0,22 → 0,67 | - | El coeficiente superior, para superficies de contacto pilote – terreno muy rugoso.  El inferior, para rocas blandas. |
| Carubba | 1997 | 0,13 → 0,25 | - | Establece un límite inferior y otro superior. |
| Zhang & Einstein | 1998 | 0,4 → 0,8 | - | Establece un límite inferior y otro superior. |

Para el caso del aporte en punta, la Propuesta de Norma Cubana (1989) establece para los tipos de pilotes: hincados, encamisados, rellenables y perforados, los cuales se apoyan en suelos rocosos o poco compresibles (Eo > 100000 kPa) la fórmula:

Q\*V=R\*·Ap en (kN) Expresión 5

donde:

Ap: área de apoyo del pilote (m2) que se asume para los casos de pilotes de sección transversal constante e igual al área neta de la sección transversal para pilotes encamisados, huecos, cuando estos no son rellenados con hormigón. Si hay relleno con hormigón será igual al área bruta de la sección transversal, siempre que dicho relleno alcance una altura mayor o igual a 3D.

R\*: resistencia a compresión no confinada de los núcleos de roca (kPa), que se asume de la forma siguiente:

 Expresión 6

donde:

: valor promedio de la resistencia límite a compresión axial del suelo rocoso en condiciones de humedad natural (en relación con el diámetro: altura de la muestra igual a dos, 2).

γgR: coeficiente de seguridad para los suelos igual a γgR=1.6.

 Expresión 7

LE: profundidad de embebimiento del pilote obturado en la roca. Se asume igual a la profundidad de empotramiento (m).

D: diámetro exterior de empotramiento en el suelo rocoso.

***Ensayos de Integridad en Pilotes. Métodos no destructivos.***

Son tres los métodos utilizados con más frecuencia para comprobar la integridad estructural de pilotes mediante sistemas no destructivos:

a) El método sónico mediante martillo de mano.

b) El método de cross-hole ultrasónico.

c) El método es el ensayo dinámico.

Los ensayos de Integridad de Pilotes (PIT) son métodos que le posibilitan al constructor conocer cómo se presentan sus características bajo el suelo luego de su ejecución y comprobar si puede ser utilizado para una posterior construcción sobre este tipo de cimiento sin dañar el pilote. (García 2010).

***Ensayo de integridad por el método sónico***

Es el método más usado internacionalmente y consiste en golpear la cabeza del pilote con un martillo de mano y obtener mediante un acelerómetro el movimiento de la cabeza del pilote como consecuencia de la onda de tensión generada. Este método se denomina generalmente “método sónico”, aunque también puede llamarse “sísmico”, “ensayo de integridad de baja deformación” o “sonic echo” (eco sónico). Se aplica a cualquier tipo de pilote, no requiere ninguna especificación técnica, ni necesita equipo pesado, por lo que resulta económico y de gran rendimiento. Para pantallas, pilotes, o en general elementos que no su geometría no sea cilíndrica o prismática, no se asegura el correcto funcionamiento del ensayo para su posterior interpretación, debido a que no sabemos ciertamente si la onda de compresión que generamos, desciende verticalmente, o se producen rebotes de onda que nos darían interpretaciones equívocas de la realidad.



Figura 1: Equipo para el ensayo mediante el método sónico. Martillo, acelerómetro y ordenador.

Fuente: elaboración propia.

Estos ensayos de integridad de pilotes constituyen una potente herramienta de trabajo para poder determinar experimentalmente la existencia de defectos en los pilotes. El método ultrasónico "cross-hole" está siendo empleado en el control de pilotes de gran diámetro, siendo la única preparación previa necesaria el dejar tubos embebidos en el hormigón del pilote. Los modernos ensayos rápidos de carga permiten abaratar un método de diseño y comprobación, que hasta ahora estaba reservado para obras de elevado presupuesto. Tanto los ensayos de integridad estructural como los ensayos rápidos de carga disminuyen el margen de incertidumbre existente en la construcción de cimentaciones profundas. (García 2010)

***Empleo de Modelación Matemática en la determinación de capacidad de carga sobre pilotes.***

A través de la modelación matemática basada en el Método de los Elementos Finitos (MEF) se establece un modelo en el cual se cuantifica y evalúa la capacidad de carga de las cimentaciones sobre pilotes. La modelación en 3D de cada estructura permite determinar la redistribución de cargas en un puente en función de su configuración. Se estudia la cimentación de los puentes, fijándonos en la estratificación presente, y por el tiempo que lleva construido esta obra de infraestructura no se conoce con exactitud la longitud real de los pilotes, por lo que se analizan una cantidad considerable de casos, determinado la capacidad de carga.

Estudio de los pilotes del puente No 3 en Cayo Cruz, Camagüey utilizando las PIT para determinar la longitud y los cambios de impedancia pertinente.



Figura 2: Aplicación de las PIT en Cayo Cruz, Camagüey.

Fuente: elaboración propia.

Estas pruebas mostraron que la mayoría de los pilotes se encontraban en buen estado y empotrados en roca, por lo que pueden ser usados como base en la reconstrucción de los puentes, además de comprobar su longitud verdadera.



Figura 3: Reflectograma del pilote No 21, puente 1. Fuente: elaboración propia.

Se realizaron 256 registros en los 16 pilotes del Puente No 1

**2. Metodología**

Según el análisis de los informes ingeniero geológicos en la zona existen varios suelos y rocas que están en contacto con los pilotes, en una primera cala se verifica la presencia de un relleno de 5.6 metros con arcilla y roca caliza por debajo del mismo. El puente 1 al presentar una sola luz de 20m consta de 2 estribos donde el perfil de suelo cambia bruscamente (Figura 4).

Las características del suelo que está en contacto con los pilotes se pueden describir como una primera capa de arcilla de color amarillo de plasticidad media a alta con una cohesión de 100 kPa y una segunda capa de roca caliza que es donde algunos de los pilotes están apoyados con σc=18 MPa.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| Figura 4: Configuración de un estribo.  Fuente: elaboración propia. | Figura 5: Perfil geológico.  Fuente: elaboración propia. |

Teniendo en cuenta la complejidad del perfil geológico del lugar a continuación se presentan los perfiles de cada pilote según el Informe Ingeniero geológico.



Figura 6: Columna estratigráfica Pilote 1. El pilote apoya en roca (estribo izquierdo).

Fuente: elaboración propia.

**3. Resultados y discusión**

A continuación, se estudia el efecto del espesor de la roca bajo la punta del pilote para el cálculo de la capacidad de carga. De los informes ingeniero geológicos se destaca que varios pilotes atraviesan el estrato de roca, pero no se logra más de 3D por debajo de la punta del pilote, por lo que se determina la capacidad de carga como pilotes a fricción.

Para el problema que se aborda se propone modelar en PLAXIS 3D (2016) tres casos donde se varíe el espesor de la roca bajo la punta del pilote y evaluar el efecto del mismo. Para ello se decidió modelar la roca como un suelo con cohesión y ángulo de fricción interna. Con los datos ofrecidos por las pruebas de integridad de pilotes (longitud) realizadas a la cimentación sobre pilotes de los puentes 1 del pedraplén Jigüey - Cayo Romano en Cayo Cruz se calculó la capacidad de carga de dicha cimentación.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| Figura 8: Esquema para la modelación | Figura 9: Estribo izquierdo (Pilotes del 1 al 6) |

Los pilotes de 1 al 6 todos penetran en la roca más de 1D por lo que la capacidad de carga se calculó como aporte a fricción en la roca (Martínez, 2010). Se aplican tres métodos diferentes para determinar la capacidad de carga de los pilotes: Torne (1977); Rowe & Armitage (1987) y según la Norma Cubana (1988).

Tabla 2 Cálculo de la capacidad de carga de los pilotes del 1 al 6. Fuente: elaboración propia.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Pilote | Qf (Torne (1977)) en kN | Qf (Rowe & Armitage (1987)) (kN) | Qf (NC) en kN |
| 1 | 1509.1 | 112.5 | 101.2 |
| 2 | 1560 | 116.3 | 104.6 |
| 3 | 1780.4 | 132.7 | 119.4 |
| 4 | 2085.6 | 155.5 | 139.9 |
| 5 | 2272.1 | 169.4 | 152.4 |
| 6 | 1865.2 | 139 | 125.1 |
| Total | 11072.4 | 825.4 | 742.6 |

A este estribo también le pertenecen los pilotes 7 y 8 que no se calcularon por mostrar posibles defectos en las pruebas de integridad de pilotes. (mala calidad y longitudes muy pequeñas)

Como puede apreciarse los valores propuestos por Torne (1977) son muy altos, siendo los más conservadores los propuestos por la Norma Cubana (1988), los cuales no presentan diferencias significativas con Rowe & Armitage (1987).

En la siguiente tabla se le añadirá el aporte a fricción del suelo arcilloso existente sobre el estrato de roca, considerando su posible aporte.

Tabla 3. Aporte total en el estribo izquierdo. Fuente: elaboración propia.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Pilote | Qf (Roca) en kN | Qf (Arcilla) en kN | Q total en kN |
| 1 | 101.2 | 105.3 | 206.5 |
| 2 | 104.6 | 105.3 | 209.9 |
| 3 | 119.4 | 105.3 | 224.7 |
| 4 | 139.9 | 105.3 | 245.2 |
| 5 | 152.4 | 105.3 | 257.7 |
| 6 | 125.1 | 105.3 | 230.4 |
| Total | 742.6 | 631.8 | 1374.4 |

Como puede apreciarse este valor es más lógico que el obtenido anteriormente y se acerca al valor de capacidad de carga de un estribo.

En la Tabla 4 se le añadirá también el aporte en punta del suelo arcilloso existente debajo del estrato de roca, considerando su posible aporte. En la bibliografía consultada (Serrano (2012), Tomlison (1980)) se propone la siguiente solución para cimentaciones superficiales que adaptaremos a pilotes:

Como debajo de las puntas de estos pilotes no hay más de 3D se convertirá la roca (valores típicos de parámetros de resistencia para rocas) en un suelo cohesivo de C = 10000 kPa y se obtendrá el valor del coeficiente Nc según (Juárez Badillo, 1967).

La relación C2/C1 = 0.01 y la relación d/B varía entre 0.1 y 0.85 por tanto los valores de Nc varían entre 0.5 y 2.1 aproximadamente.

Según la Norma Cubana (1989) el aporte en punta en suelo cohesivo se calcula:

 Expresión 8.

Tabla 4. Aporte en el estribo izquierdo (kN). Fuente: elaboración propia.

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Pilote | Longitud de empotramiento Le en la roca (lente) (kN) | Espesor de roca bajo la punta(m) (kN) | Qf en la roca (kN) | Qf en la arcilla (kN) | Qp según (Juárez Badillo, 1967) (kN) | Qp (Arcilla homogénea) (kN) |
| 1 | 0.89 m | 0.51 | 101.2 | 105.3 | 78.8 | 196 |
| 2 | 0.92 m | 0.48 | 104.6 | 105.3 | 75.04 | 196 |
| 3 | 1.05 m | 0.35 | 119.4 | 105.3 | 71.3 | 196 |
| 4 | 1.23 m | 0.17 | 139.9 | 105.3 | 41.3 | 196 |
| 5 | 1.34 m | 0.06 | 152.4 | 105.3 | 18.8 | 196 |
| 6 | 1.10 m | 0.30 | 125.1 | 105.3 | 45.1 | 196 |
| Total |  |  | 742.6 | 631.8 | 330.4 | 1176 |

Analizando estos resultados se propone considerar el aporte a fricción del pilote en roca y el aporte en punta tomando el suelo como una arcilla homogénea, pudiendo existir la reserva del aporte a fricción de la arcilla sobre la roca.

Una vez realizados los cálculos por expresiones clásicas y la modelación matemática se resumen en la siguiente tabla los resultados finales:

Tabla 6: Resultados finales de esta etapa de la investigación. Fuente: elaboración propia.

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Estribo Izquierdo | | | | | | |
|  | Roca | | Arcilla | |  |  |
| Pilote | Qp (kN) | Qf (kN) | Qp (kN) | Qf (kN) | Qt(kN) | Observaciones |
| 1 | - | 101.2 | 196 | - | **297.2** | Trabaja a fricción / Punta |
| 2 | - | 104.6 | 196 | - | **300.6** | Trabaja a fricción / Punta |
| 3 | - | 119.4 | 196 | - | **315.4** | Trabaja a fricción / Punta |
| 4 | - | 139.9 | 196 | - | **335.9** | Trabaja a fricción / Punta |
| 5 | - | 152.4 | 196 | - | **348.4** | Trabaja a fricción / Punta |
| 6 | - | 125.1 | 196 | - | **321.1** | Trabaja a fricción / Punta |
| 7 | - | - | - | - | - | Pilotes con defecto |
| 8 | - | - | - | - | - | Pilotes con defecto |
| Total | **0** | **742.6** | **1176** | **0** | **1918.6** |  |
|  |  |  |  |  |  |  |

Como se observa los valores de capacidad de carga total garantizan el posible funcionamiento del estribo del futuro puente, mayor a los 1500 kN.

**4. Conclusiones**

Una vez realizado el cálculo de la capacidad de carga de los pilotes en los estribos del puente No1 del pedraplén Jigüey - Cayo Romano en Cayo Cruz se establecen las siguientes conclusiones parciales:

* La capacidad de carga del estribo izquierdo es de 1918.6 kN, lo que soporta la nueva estructura
* La propuesta simplificada, de suelos equivalente, para el caso de suelos estratificados, parece válida para pilotes en el caso de pilotes que penetran roca que descansa sobre un suelo.
* El empleo combinado de ensayos de integridad de pilotes con la modelación matemática permite estimar la capacidad de carga en este tipo de cimentación.

**5. Referencias bibliográficas**

1. Badillo, J., 1967. Mecánica de suelos. Tomo II. s.l. s.n.

2. García, D. G., 2010. Estudio sobre ensayos de integridad estructural de pilotes: métodos y ejemplos de interpretación de resultados. Catalunya: s.n.

3. Ibañez Mora, L (2001): Modelación matemática de las cimentaciones sobre Pilotes. Aplicaciones. ISPJAE. Cuba. Tesis de Doctorado. 98 p.

4. Informes emitidos por la ENIA Nacional

5. Jiménez S., J. A. (1986): Geotecnia y Cimientos. Editorial Rueda. Madrid. Tomos II y III.

6. Jiménez S., J. A. (1994): Curso sobre pilotajes y cimentaciones especiales. CEDEX. Madrid. Tomo I y II.

7. Juárez B., E.; Rico R., A. (1969): Mecánica de suelo. Edición Revolucionaria, La Habana. 1969. Tomo I y II.

8. L' Herminier, R. (1968): Mecánica de suelos y dimensionamiento de firmes. Versión al español de José Luis Ortiz. Madrid. Editorial Blume, 208 p.

9. Martínez, E. C., 2010. Estudio de la capacidad portante de los pilotes de la Marina Gaviota en Varadero. Varadero: s.n.

10. Poulos, H. G. and Davis, E.H. (1980): Pile foundation analysis and design. Chichester: Wiley.

11. Propuesta de norma cubana de cimentaciones sobre pilotes (1988).

12. Serrano, 2012. Carga de hundimiento por puente de pilotes en roca: Estudio corporativo. s.l. Revista Ingeniería Civil 160.

13. Sowers, G y Sowers F. (1977): Introducción a la mecánica de suelo y cimentaciones. La Habana. Editorial Pueblo y Educación, 677 p.

14. Thorne, 1977. Capacidad de carga de pilote en suelos arenosos. Sídney (Australia): Simposio internacional de geotecnia Australia.

15. Tomlinson, 1980. Deep foundations design. s.l. CEng, FICE. ISBN 072101013x.