

# Pruebas de carga no destructivas en pilotes

## Load testing in pile foundations

Luis O. Ibañez Mora  
Gilberto Quevedo Sotolongo  
Miguel A. Maestre

### Resumen

En el presente trabajo se abordan las experiencias en la utilización de la modelación matemática y la realización de pruebas de carga no destructivas en cimentaciones sobre pilotes para evaluar su capacidad de carga. Para ello se exponen los resultados obtenidos en pruebas de carga de más de 2000 kN, y la distribución de cargas en una estructura portuaria, evaluando su capacidad resistente. Se establecen comparaciones entre los métodos teóricos de cálculo de la capacidad de carga del pilote aislado y modelos matemáticos basados en el Método de los Elementos Finitos. Finalmente se comprueba la coincidencia entre el modelo numérico y los resultados de la prueba de carga a escala real demostrado que el muelle tiene continuidad estructural lo que permite un trabajo espacial del mismo que garantiza una mejor redistribución de las cargas que sobre él actúan.

**Palabras claves** Cimentación / pilotes / modelación

### Abstract

This paper presents experiences using mathematical modelling and non-destructive load testing in pile foundations in order to assess their bearing capacity. Results obtained with tests using more than 2000 kN and load distribution are discussed. Comparisons are made between theoretical calculation methods and mathematical models based on the finite elements method to estimate the bearing capacity of an isolated pile. Finally, it is proved that the results obtained with the numerical model and load test results are similar. Thus, it is proved that the structure has structural continuity, which allows a better redistribution of the acting loads.

**Key words** Foundation / pile / modelling

## Luis O. Ibañez Mora

Dr. Ing.  
Departamento de Ing. Civil  
Facultad de Construcciones  
UCLV Cuba

## Gilberto Quevedo Sotolongo

Dr. C. Ing.  
Centro de Investigación y Desarrollo de las Estructuras  
y los Materiales  
CIDEM-UCLV Cuba

## Miguel Ángel Maestre

MSc.  
Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA)  
Cuba

## 1 Introducción

El acelerado desarrollo tecnológico ha traído consigo el surgimiento de nuevos equipos de izaje y transportación, por lo que instalaciones portuarias que fueron diseñadas para un sistema de carga deben ser evaluadas para su explotación bajo nuevos regímenes de mayor magnitud. Este es el caso del espigón No. 8 del Puerto del Mariel, Cuba, construido a finales de 1980. En el mismo se pretende poner en la explotación un equipo de izaje, grúa Litronic-900, capaz de transmitir hasta 2250 kN por uno de sus apoyos, mucho mayor a las dos grúas de 400 kN con las que se explota dicho puerto. Por tal motivo se hace necesario evaluar la capacidad de carga de los pilotes, y demás elementos estructurales, para comprobar si el muelle es capaz de soportar las nuevas solicitaciones. Para dar cumplimiento a dicha tarea especialistas de la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicada (ENIA) y de la Universidad Central de Las Villas (UCLV), proyectaron, modelaron y ejecutaron pruebas de carga no destructivas a los pilotes de la estructura.

## 2 Desarrollo

El espigón No. 8 del Puerto del Mariel, es una estructura portuaria conformada por pilotes y una pared de tablestaca, que forman la cimentación, sobre la cual descansa un reticulado espacial conformado por vigas cabezales y la losa del muelle como se muestra en la Figura 1. Además están presentes otros elementos estructurales, como bolardos y pilotes inclinados para tomar los efectos de cargas horizontales.

El hecho de poner en explotación una grúa de 9000 kN de capacidad, con cuatro puntos de apoyo de 1.2 m x 5.4 m espaciados a 12 metros cada uno, generará solicitaciones muy superiores para las cuales fue diseñada la estructura.

En el caso que nos ocupa, la revisión de la cimentación, se evidencia que las cargas a nivel de pilotes se incrementan considerablemente, lo que imposibilitaría la explotación de la grúa Litronic-900. Realizar un análisis plano para el cálculo de las solicitaciones, conduciría a resultados engañosos, pues por la forma y magnitud de la carga, y el reticulado, viga - losa, las solicitaciones a nivel de pilotes deben distribuirse en los pilotes bajo la el área cargada.

Por ello se realiza una modelación espacial de muelle, en tres dimensiones (3D), donde se tienen en cuenta todos los elementos componentes del muelle, con su geometría, (área e inercia), propiedades mecánicas (Módulo General de Deformación), trabajando de forma conjunta, por lo que se modelan las vigas y pilotes como elementos lineales y la losa del muelle como elemento tipo "shell". Los apoyos se modelan como elementos tipo muelle (caracterizados por el coeficiente de balasto), para tener en cuenta la interacción suelo estructura.

Además se analizan las diferentes posiciones de la grúa y su desplazamiento sobre la estructura. En la Tabla 1 se muestran la reacción máxima por pilote en función de la carga por apoyo de la grúa.

El acelerado desarrollo tecnológico ha traído consigo el surgimiento de nuevos equipos de izaje y transportación, por lo que instalaciones portuarias que fueron diseñadas para un sistema de carga deben ser evaluadas para su explotación bajo nuevos regímenes de mayor magnitud. Este es el caso del espigón No. 8 del Puerto del Mariel, Cuba, construido a finales de 1980. En el mismo se pretende poner en la explotación un equipo de izaje, grúa Litronic-900, capaz de transmitir hasta 2250 kN por uno de sus apoyos, mucho mayor a las dos grúas de 400 kN con las que se explota dicho puerto.

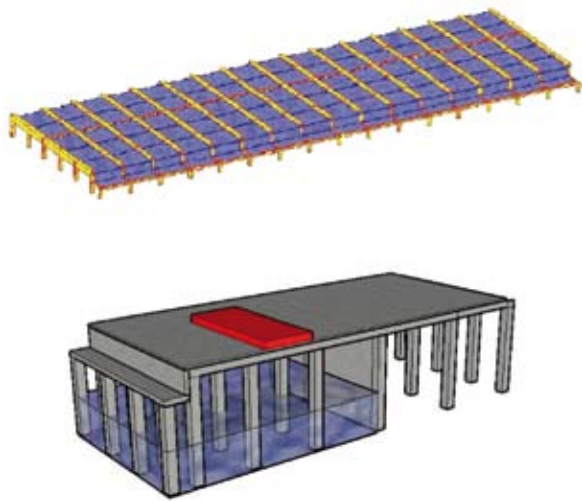


Figura 1 Esquema del muelle y la posición de la carga

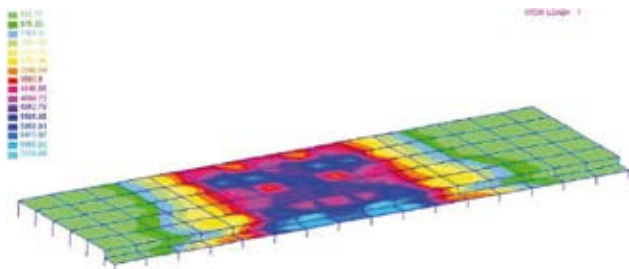


Figura 2 Distribución de esfuerzos principales en la losa del muelle

Tabla 1 Determinación de la carga máxima a nivel de pilote

No.	Carga actuante (kN)	Presión (kPa)	Reacción por pilote (kN)
1	550	55.0	240
2	1100	111	310
3	1650	166	380
4	2200	222	450
5	2750	277	520
6	3300	333	590

Se aprecia un trabajo espacial de la estructura (Figura 2), generándose concentración de esfuerzos en los puntos bajo el apoyo de la grúa, sin influir un apoyo sobre otro cercano. Estos resultados arrojan que para las solicitaciones que genera el equipo, el pilote más esforzado estará sometido a una carga en el orden de las 500 kN.

### 3 Características de la estratificación

Los resultados de las Investigaciones Ingeniero Geológicas realizadas por la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA) [2][3], muestran la presencia de varios estratos de cieno, arcilla y argilita en el lugar, variando el espesor de los mismos en toda la dirección del puerto, como se muestra en la Figura 3. Estos trabajos de perforación y toma de muestra se realizaron con una maquina perforadora Mark III, utilizando el método a percusión y el método a rotaria con y sin inyección de agua. Se empleó el tubo dividido (cuchara cubana) a intervalos de 60 cm, para el conteo de los números de golpes cada 30 cm, NSPT (Ensayo de Penetración estándar), la cual penetra mediante un martillo de 300 libras con caída libre a la altura de 18 pulgadas en los suelos hasta el rechazo y el porta testigo simple tubo, en el caso de que la cuchara no penetre. Se realizaron además, los ensayos físicos de granulometría, limite de atterberg y densidad. En la Tabla 2 se muestran las características físico-mecánicas de los suelos estudiados:

Tabla 2 Características físico-mecánicas de los suelos

	Esfuerzos totales	Esfuerzos efectivas	
Arcilla	$\phi = 15^\circ$ $C = 30 \text{ kPa}$	$\phi = 0^\circ$ $C = 80 \text{ kPa}$	$\gamma_f = 18.3 \text{ kN/m}^3$ $E_o = 15 \text{ 000 kPa}$
Argilita	$\phi = 12^\circ$ $C = 160 \text{ kPa}$	$\phi = 0^\circ$ $C = 180 \text{ kPa}$	$\gamma_f = 18.7 \text{ kN/m}^3$ $E_o = 30 \text{ 000 kPa}$

C - Cohesión,  $\phi$  - Angulo de Fricción Interna,  $\gamma_f$  - Densidad húmeda,  $E_o$  - Modulo General de deformación

Conociendo que los pilotes hincados en el lugar tienen una longitud mínima de 22 metros y un sección transversal de  $0.4 \times 0.4$  metros, se define como condición más crítica la cala C-2 donde el estrato de argilita se encuentra a una profundidad de 21 metros, por lo que el pilote atraviesa 14 metros de arcilla y penetra 1 metro en la argilita. A partir de estos datos se procede al cálculo de la capacidad de carga del pilote, por métodos clásicos y la modelación por el método de los elementos finitos (MEF).

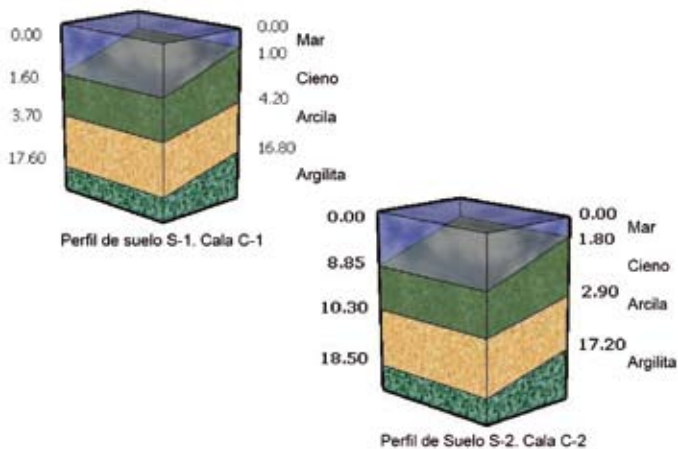


Figura 3 Perfiles de suelo

#### 4 Modelación con el Método de los Elementos Finitos

En el caso de la modelación por MEF se realizada teniendo en cuenta las recomendaciones siguientes propuestas por Mesat [6]:

- i) Los límites verticales de la malla deben ser fijados al menos dos veces la altura o el largo (L) del pilote y el límite vertical inferior al menos dos veces el lado L debajo del punto (3L desde la superficie), porque las condiciones límites de los desplazamientos no influyen sobre el comportamiento del pilote.
- ii) La interacción entre el pilote y el suelo (cara y el punto) son representados por los elementos finitos de interacción compatibles con los elementos más utilizados para describir el suelo (Elementos de interfase).
- iii) La malla de un pilote aislado debe ser relativamente estrecha cuando se acerca a las interacciones, quiere decir, a la punta del pilote y a lo largo de la cara del mismo.
- iv) La relación entre la forma (relación de la menor dimensión de un elemento con la mayor dimensión) de los elementos cerca del pilote deberá estar limitado a 1/5.
- v) El lado B (según la dirección horizontal) del primer elemento directamente adyacente al pilote debe ser al menos tal que  $B=0.1D$  donde  $D$  es el diámetro del pilote. En la Figura 4 se puede apreciar lo anterior expuesto.

A partir de estas recomendaciones se realizó el análisis de la cimentación por elementos finitos (MEF). La discretización del continuo siempre trae consigo una aproximación a la solución del problema, por ese motivo, y cuantificando estas aproximaciones, se realizaron varios modelos utilizando el sistema SIGMA/W [4], hasta alcanzar un modelo cuyo incremento en la densificación de la malla no tuviera cambios significativos con respecto a un mallado inicial y la solución no requiriera un gran tiempo de ejecución en el ordenador. El modelo propuesto utiliza una malla compuesta por 7400 elementos (ver Figura 5), densificando la misma en la zona alrededor del pilote y en la punta del mismo. La fricción pilotes suelo

se modela a través de una superficie de interfase, con un factor de reducción de las propiedades del material de interfase  $R = 2/3$  (arena - hormigón) y  $R = 1/2$  (arcilla - hormigón). Se utilizaron elementos rectangulares de 4 nodos. El suelo fue modelado como un material elasto plástico, con criterio de rotura Mohr Coulomb y el pilote como un material elástico.

En la Tabla 3 se exponen los resultados obtenidos en el diseño de la capacidad de carga del pilote aislado utilizando diferentes formulaciones y normas.

Como se aprecia la carga última de los pilotes esta en el orden de las 1500 kN, para una carga de trabajo de 602 kN que en todos los casos es superior a la carga a soportar por el pilote más esforzado, según los resultados de la modelación estructural vista anteriormente. Corresponde comprobar a través de la Prueba de Carga la validez de estos resultados.

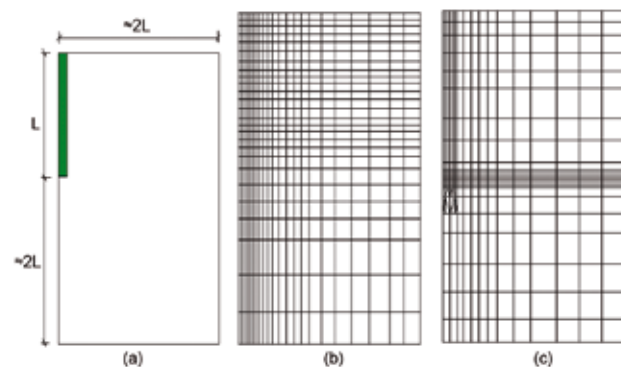


Figura 4 Representación del modelo axial-simétrico para el caso del pilote simple

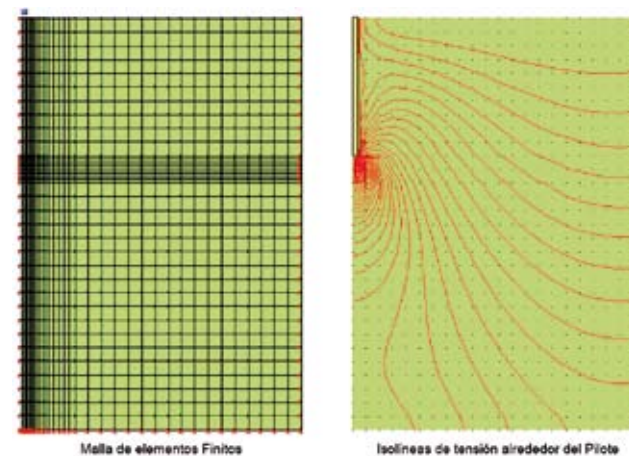


Figura 5 Modelación por Elementos Finitos

**Tabla 3** Capacidad de carga por diferentes métodos

Normativa	$Q_{\text{última}}$ (kN)	$Q_{\text{trabajo}}$ (kN)	Factor Seguridad
Propuesta de Norma [7]	1296	614	Estados límites
Sowers [8]	1706	568	3
Caquot, Kerisel [1]	1708	569	3
MEF [5]	1312	656	–
Promedio	1505	602	–

## 5 Ensayos y resultados de la prueba de carga.

Una vez determinada experimentalmente la capacidad de carga última y de trabajo del pilote, se realiza la modelación de la prueba de carga en el ordenador, estimando la curva Carga vs. Deformación (Tabla 4). Con estos resultados se orienta y ejecuta la prueba de carga, prestando especial atención a las deformaciones que se generan.

**Tabla 4** Carga vs. Deformación del pilote

Punto	Carga (kN)	Deformación (mm)	
		Modelo	Prueba de Carga
1	0.0	0.00	0.00
2	200	0.65	0.40
3	300	0.68	0.50
4	618	0.86	0.90
5	678	0.87	1.00
6	900	1.23	1.20
7	1070	1.24	1.30
8	1420	1.58	1.60
9	1433	1.60	1.70

La prueba de carga se realizó en el mes de noviembre del año 2002, logrando una carga total de 1700 kN de reacción, aprovechando algunos bultos existentes en el lugar. (ver Figura 6)

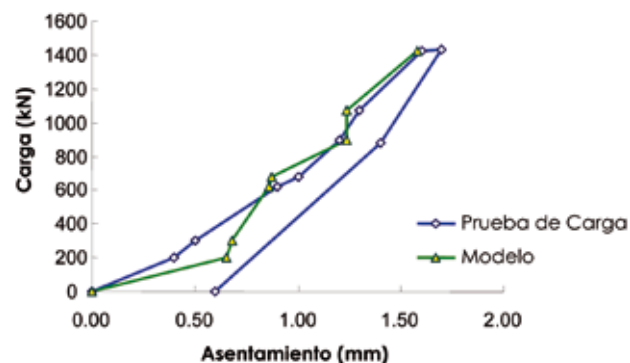
Una vez realizada la prueba de carga se plotean los resultados del ensayo y el modelo, observándose la coincidencia entre ambos resultados.

Para los primeros escalones de cargas existen pequeñas diferencias entre las deformaciones reales medidas y las obtenidas a través de la modelación ya que el suelo se encuentra trabajando en un rango elástico y pueden existir diferencias entre los valores reales del módulo general de deformación y el utilizado en el modelo. Para los valores cerca de la carga de rotura, se aprecia una coincidencia entre los resultados de la prueba de carga y la modelación los que avalan la veracidad del modelo propuesto.

A partir de los resultados obtenidos se comprueba que la cimentación es capaz de soportar las nuevas solicitaciones a la que será sometida, generándose deformaciones del orden de los 2 mm, además de que no fue dañada la estructura durante la prueba de carga, por lo que se garantiza su posterior funcionamiento.



**Figura 6** Prueba de carga “in situ”



**Figura 7** Curva carga vs. Asentamiento de la Prueba de Carga y la Modelación.

## 6 Conclusiones

Una vez realizado todos los cálculos se arriban a las siguientes conclusiones:

- 1 A partir de los resultados obtenidos de la modelación y de la prueba



de carga queda demostrado que el muelle tiene continuidad estructural lo que permite un trabajo espacial del mismo que garantiza una mejor redistribución de las cargas que actúan sobre él,

- 2 Las deformaciones obtenidas a partir de la prueba de carga coinciden ingenierilmente con el modelo que considera que los mismos están apoyados en el estrato de argilita por lo que no existe dudas de que serán pilotes trabajando en punta, con capacidad de carga obtenida a partir del análisis de diferentes métodos de 600 kN,
- 3 A través de la modelación y la instrumentación se pueden realizar pruebas de cargas no destructivas en elementos estructurales, en este caso los pilotes, garantizando la utilización posterior de los mismos.

## 7 Bibliografía

- [1] Caquot, A; Kerisel, J. (1964) – *Tratado de Mecánica de Suelos*. 1ed en castellanos. Gaunthier-Villars, Paris, France.
- [2] Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas – *Informe Ingeniero Geológico*. 7 de mayo de 1980. "Atraque de carga general." ENIA. 20 p.
- [3] Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas – *Informe Ingeniero Geológico*. "Atraque de carga general" # 2. 20 de marzo de 1982. ENIA. 14 p.
- [4] GeoSlope (1995) – *SIGMA/W. For finite element analysis. User's guide*. Geoslope International Ltd. Calgary, Alberta, Canada.
- [5] Ibañez Mora, L (2001) – *Modelación matemática de las cimentaciones sobre Pilotes. Aplicaciones*. ISPJAE. Cuba. Tesis de Doctorado. 98 p.
- [6] Mesat, P. (1993) – "Combinaciones de elementos finitos para las obras geotécnicas. Consejos y recomendaciones". Francia. *Boletín de laboratorio de mecánica de suelo* # 212 (Julio- Agosto), pp. 39-64
- [7] Ministerio de Educación. Anteproyecto de Norma Cubana (1989) – *Cimentaciones sobre pilotes. Métodos de cálculo para el dimensionamiento geotécnico*. Ministerio de Educación. Cuba. Editorial Pueblo y Educación, 50 p.
- [8] Sowers, G.; Sowers F. (1977) – *Introducción a la mecánica de suelo y cimentaciones*. La Habana. Editorial Pueblo y Educación, 677 p.