

Título: “Estudio de la capacidad de carga de los muelles en Cuba. Aplicación de la modelación matemática.”

Autores: Dr. Luis O. Ibáñez Mora. (Universidad Central de Las Villas).

Dr. Gilberto Quevedo Sotolongo. (Universidad Central de Las Villas).

Palabras claves: Cimentación, Pilotes, Modelación.

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 200 Toneladas, 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, así como los resultados de la pruebas de carga a escala real.

Key words: foundation, modelling, pile

Abstract:

Experiences using mathematical modelling and non-destructive load testing of pile foundations in docks are presented in order to evaluate their bearing capacity. The results obtained in load tests with more than 200 tons are presented, as well as load distribution for a dock structure and the assessment of its bearing capacity. Comparisons are made between theoretical calculation methods, mathematical models for calculating the bearing capacity of isolated piles, as well as the results obtained from load testing using a real scale.

Introducción.

En este trabajo se exponen los resultados obtenidos durante varios años de investigación en la temática del diseño geotécnico de cimentaciones sobre pilotes y su aplicación en proyectos reales. Como consecuencia de la explotación de las instalaciones portuarias bajo nuevos regímenes de cargas, se puso de manifiesto una problemática real, de carácter técnico, científico y económico; que hasta el momento no había sido notable: revisar desde el punto de vista estructural y geotécnico las cimentaciones de los puertos existentes en Cubas, para comprobar su capacidad resistente y la explotación bajo nuevos sistemas de cargas, adecuándose a los requerimientos y especificidades de esta problemática a nivel internacional.

Partiendo de este planteamiento y el análisis de la solicitud realizada por las empresas inversionistas se decidió que era necesario trabajar en cuatro líneas fundamentales: 1.- La modelación tridimensional de (3D) de las estructuras que conforman el puerto, 2.- La estimación del comportamiento de las pruebas de carga a través de la modelación matemática 3.- La realización de pruebas de carga a escala real y 4.- La calibración del modelo y conclusiones finales. Para esto se realizó el estudio del comportamiento de las cimentaciones sobre pilotes a través de la modelación matemática y métodos clásicos de diseño. Para el caso de la distribución de esfuerzos en los elementos estructurales (Vigas, losas, pilotes) se utilizan programas como el STAAD III modelando la estructura considerando la interacción cabezal – terreno. De forma similar con el empleo de la modelación matemática se estudia el fenómeno de la fricción negativa y la influencia de diferentes factores en su desarrollo.

Por último, se proponen recomendaciones prácticas y se clasifica la capacidad resistente de los puertos estudiados para su posible reutilización, limitando la carga de trabajo en función del

equipo de izaje o el tren. La aplicación de estos resultados trae consigo una respuesta rápida a la demanda de inversionistas nacionales y extranjeros sobre la posible utilización de nuestras instalaciones portuarias y un considerable ahorro de materiales y recursos al no ser necesario hacer nuevas inversiones.

Aplicación de modelación matemática a los muelles en Cuba.

En los años actuales, el transporte marítimo se caracteriza por el uso de contenedores de gran capacidad, y la tendencia a establecer rutas marítimas con puertos como base de almacenamiento, a partir de los cuales se intercambia las mercancías, todo ellos con el empleo de contenedores, dejando atrás el trasiego a granel de productos. Por otra parte, los puertos construidos en las décadas de los 50 al 80, fueron diseñados para cargas pequeñas y el uso del ferrocarril para el trasiego a granel de nuestras producciones.

Esta situación, precisó la necesidad de resolver el siguiente Problema Científico: Existe la necesidad de evaluar la capacidad resistente de las cimentaciones de los puertos y determinar la carga máxima a la cual pueden ser explotados. Por otra parte en nuestro país varias de las instalaciones portuarias fueron diseñadas para sistemas de cargas de bajo tonelaje, las cuales no se usan hoy en día a nivel internacional.

Después de valorar estos factores, se decidió realizar este trabajo partiendo de la siguiente Hipótesis: Utilizando la modelación matemática basada en métodos numéricos como el Método de los Elementos Finitos (MEF), se pueden modelar los elementos estructurales que conforman un puerto, y estimar su resistencia estructural, todo lo cual queda avalado por la realización de pruebas de carga a escala real, lo cual permite definir las cargas de trabajo de un puerto. Para lo cual se enunció como Objetivo central: Verificar y/o definir a través de la modelación matemática la capacidad resistente de las cimentaciones de los puertos objetos de estudio, a partir del cual se centró el desarrollo y los resultados de esta investigación.

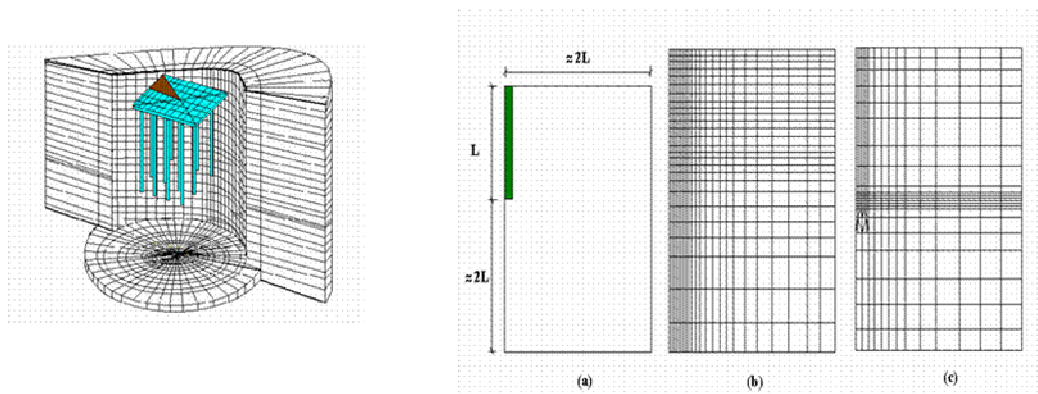


Figura 1. Modelación de la Cimentación. Modelo axial-simétrico.

A través de la modelación matemática basada en el Método de los Elementos Finitos (MEF) se estableció un modelo en el cual se cuantificó y evaluó la capacidad de carga de las cimentaciones sobre pilotes. La modelación en 3D de cada estructura permitió determinar la redistribución de cargas en un muelle en función de su configuración (Figura 1). Se estudió la cimentación de dos puertos, con una variada estratificación, y donde no se conocía la longitud real del pilote, por lo que se analizaron más de 120 casos determinado la capacidad de carga y se establece la respuesta de la cimentación bajo los diferentes sistemas de cargas, así como el comportamiento de las pruebas de carga que se realizaría en el lugar. Se modela además el fenómeno de la distribución de esfuerzos en la cimentación (interacción suelo - estructura), estableciendo recomendaciones prácticas para evaluar este fenómeno.

Por otra parte, se aportan nuevos criterios y coeficientes, basado en la modelación matemática, lo que significará una reducción de los gastos de investigación ya que prácticamente se eliminará el uso de los costosos ensayos de laboratorio y/o campo, utilizando las pruebas de cargas para la calibración del modelo.



Figura 2. Prueba de Carga Puerto del Mariel. 250 Toneladas.

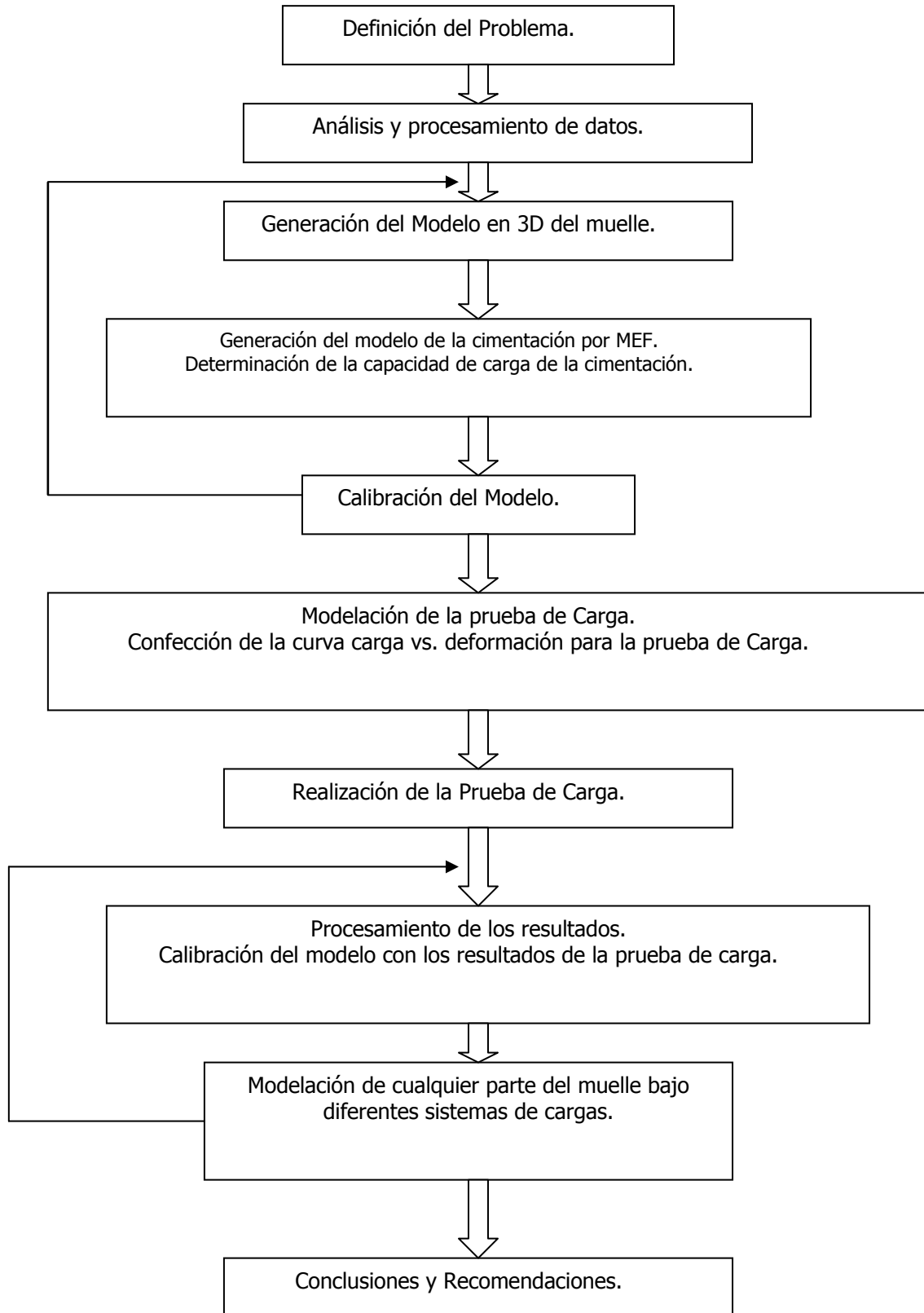


Figura 3. Prueba de Carga en el Puerto de Pastelillo. Nuevitas. Camaguey.



Figura 4. Pruebas de Carga Puerto del Mariel. Base de almacenamiento.

En el siguiente gráfico se representa la metodología utilizada de forma general en la solución de cada proyecto:



Con los resultados obtenidos en el trabajo se demostró la racionalidad de la modelación matemática en la revisión de los puertos, siendo de gran significado práctico el establecimiento de un enfoque único para su empleo en los distintos problemas abordados, permitiendo colocar a Cuba dentro de los de avanzada en el ámbito mundial en la temática. Por otro lado se demuestra que es factible con la aplicación de la modelación matemática, a partir de la

metodología general propuesta, obtener resultados de gran impacto teórico aplicables con facilidad en la práctica ingenieril, lo que en realidad han logrado muy pocos investigadores internacionalmente. Por último a partir de la valoración de las obras estudiadas, donde se aplicaron los principales resultados obtenidos, se demostró la efectividad económica de los mismos, en comparación con los procedimientos tradicionales utilizados en el país. Es importante destacar que la modelación de las pruebas de carga a nivel de computadora, permite que en su realización a escala real se cuente con un pronóstico estimado de su comportamiento evitando así llevar la prueba de carga hasta la rotura de la estructura o la cimentación, lo que inhabilitaría al puerto y su posible utilización.

Por otra parte el empleo de la modelación espacial de los puertos (3D), del Método de los Elementos Finitos (MEF) y de la modelación matemática en su conjunto, permite obtener un real comportamiento de los elementos que conforman el muelle, lo que a través de métodos tradicionales de análisis y revisión es imposible realizar. Por esta razón, muelles que analizados por métodos tradicionales tendrían que ser reconstruidos o limitar su carga de explotación, a través del empleo de la modelación matemática en su análisis, se puede establecer la verdadera carga resistente del mismo, pudiendo ser explotados sin ninguna reconstrucción, lo cual esta avalado por los resultados de las pruebas de carga realizadas "in - situ"

A continuación, a manera de resumen se destacan los procedimientos y métodos utilizados en cada proyecto, pudiéndose ampliar en los anexos de los informes finales de cada uno de ellos:

Proyecto de estudio de la capacidad de carga del Muelle del Puerto del Mariel.

Las entidades ASPORT y la Empresa de Servicios Portuarios Mariel del MITRANS solicitaron a la ENIA – Facultad de Construcciones -CIDEM la ejecución de un Ensayo de Carga a Escala Real para evaluar la capacidad actual de carga de la cimentación del Atraque No. 8 del Puerto del Mariel. En dicho atraque se valora la posibilidad de realizar operaciones de carga y descarga de contenedores con la grúa LHM 400 Litronic. La instalación de este equipo incrementará la capacidad de manipulación de carga del puerto y el intercambio comercial con otros países, pero también incrementará la carga aplicada sobre dicho atraque y se necesita evaluar si dicho incremento puede ser soportado por la estructura y la cimentación del muelle.

Con el objetivo de evaluar la capacidad resistente de la cimentación sobre pilotes del muelle del "Puerto del Mariel" se realiza el proyecto de estudio, partiendo de los siguientes datos:

1. Modelación de la carga actuante a nivel de cada pilote (Influencia de la rigidez del cabezal, espaciamientos y acción de las cargas móviles).
2. Cálculo de la capacidad resistente del pilote aislado (carga de rotura y de carga de trabajo)
3. Cálculo de la capacidad resistente por métodos basados en la teoría de la plasticidad (Métodos estáticos)
4. Modelación por Elementos Finitos de la capacidad de carga del pilote.
5. Chequeo estructural del pilote.
6. Cálculo de la capacidad resistente del pilote en grupo
7. Cálculo de la capacidad de carga del pilote bajo la acción de cargas horizontales
8. Cálculo de los asentamientos de la cimentación:
9. Pilotes aislado
10. Pilote en grupo
11. Estimación del comportamiento de la curva de Carga vs. Deformación de la prueba de carga estática (Modelación por el MEF).
12. Verificación del comportamiento real de la curva de Carga vs. Deformación obtenida de la prueba de carga, con respecto a la estimada en la modelación.
13. Conclusiones y recomendaciones sobre la capacidad resistente de la cimentación.

Una vez realizada las tareas 1, 2, 3, 4 y 5, y previa visita al lugar y coordinación con los especialistas de la ENIA, se establecen algunas recomendaciones sobre el lugar y características de la prueba de carga estática. Las tareas 6, 7 y 8 se complementarán con el Ensayo de Carga

a escala real a realizar en el lugar y con los resultados de la hinca obtenidos en la etapa de construcción de la cimentación.

Finalmente se comprueba de forma definitiva que el muelle y por tanto sus elementos componentes trabajan de forma espacial lo que garantiza una redistribución óptima de la carga que coincide desde el punto de vista ingenieril con la modelación realizada.

Los pilotes fueron comprobados que en todos los casos llegan al estrato de argilita y que por tanto se puede considerar una carga resistente de trabajo de 60 T, suficiente para soportar las solicitaciones que transmite una (1), Litronic LHM -400 de 900 T de carga total, trabajando con una distancia entre ejes de 10.8 m que coinciden con las vigas carrileras del muelle y que se apoya en cuatro (4) bases de dimensiones de 5.5 m x 1.8m, distribuyendo una carga de 225 T por cada apoyo.

A partir de quedar demostrado el trabajo espacial del muelle la viga cumple satisfactoriamente los estados límites últimos y el de servicio por fisuración lo cumple sin gran holgura por lo este aspecto debe ser controlado a lo largo del tiempo del período de explotación del muelle.

A partir de trabajo espacial del muelle se comprueba que la losa puede soportar satisfactoriamente la grúa objeto de análisis. De todo el trabajo realizado de modelación y prueba de carga se concluye que es factible la explotación en el muelle de la grúa Litronic LHM -400 de 900 T de carga total, trabajando con una distancia entre ejes de 10.8 m que coinciden con las vigas carrileras del muelle y que se apoya en cuatro (4) bases de dimensiones de 5.5 m x 1.8m, distribuyendo una carga de 225 T por cada apoyo.

Proyecto de estudio de la capacidad de carga del Muelle de Pastelillo. Camaguey.

En el muelle de pastelillo, por su grado de deterioro y explotación, se pretende aprovechar su cimentación en la construcción de un nuevo espigón. Este será el encargado del trasiego de mercancía del MINAZ para la región oriental del país. Se decide determinar la capacidad de carga de la cimentación existente, y corroborar dicho valor con la realización de 2 pruebas de cargas. Por la edad de este muelle se desconocía la longitud real de cada pilote y la estratificación existente. A través de la modelación por el Método de los Elementos Finitos y con el apoyo de investigaciones ingeniero geológico en el lugar, se desarrolla varios modelos, que en función de la longitud de los pilotes permiten conocer la capacidad de carga de los mismos. Una vez comprobada la longitud de cada pilote en las zonas de estudio, se realizan las pruebas de cargas, teniendo en cuenta las recomendaciones de la modelación. Para el caso de la prueba número 1 existió coincidencia total entre el modelo y la prueba, no siendo así para la prueba de carga número 2, donde se acude a un método gráfico analítico. Por las condiciones propias del lugar e inestabilidad de los gatos hidráulicos del ensayo se detiene la prueba de carga sin alcanzar la carga de rotura real del pilote. Una vez aplicado el método gráfico analítico se alcanza la correspondencia entre el modelo y la prueba de carga. Con estos resultados define la carga de trabajo de los pilotes aislados de la cimentación y se estima la capacidad del conjunto.

Diseño del Muelle de Pastelillo. MINAZ. Camaguey.

Como parte de la etapa de proyecto, se decide reconstruir el puerto de Pastelillo, introduciendo nuevos pilotes en la estructura existente y determinar los efectos de la circulación de un vehículo de transporte (ferrocarril), totalmente cargado sobre el mismo. A través de la generación en ordenador de la estructura en tres dimensiones (3D) se utiliza un modelo interacción suelo estructura, para determinar la carga actuante en cada pilote de la cimentación y su capacidad resistente, así como la redistribución de esfuerzo en cada elemento del muelle. Para ellos se utiliza los Softwares profesionales de análisis y diseño. Posteriormente se determina el comportamiento integral de la estructura, analizando la posible falla de algún elemento, la transmisión de esfuerzos, hasta determinar cual es la máxima carga a explotar el muelle. Se analizan además variantes de carga y descarga en el muelle, con diferentes materiales y tipos de locomotoras y vagones.

Estudio del atraque # 8 del puerto del Mariel para base de la Compañía petrolera.

En este caso se realiza la modelación por ordenador de la prueba de carga en el muelle # 8 del Mariel, para determinar la deformación lateral de la viga de cierre (tablestaca). Para ello fue necesario generar varios modelos de la geometría del muelle y procesar estadísticamente las propiedades físico mecánicas de los suelos del lugar. Una vez obtenido un modelo calibrado en la computadora, se estima el comportamiento de la prueba de carga a realizar, definiendo los escalones de carga y las deformaciones a obtener, cuidando siempre que no se ponga en peligro la estructura, pues dejaría de cumplir con su función estructural actual. Posteriormente, con las recomendaciones anteriores se realiza la prueba de carga a escala real y se comprueba la validez o no de la modelación por computadora. Con estos resultados y los del modelo se pasa a una fase final donde se calibran los resultados del modelo, lo que posibilita estimar el comportamiento del muelle para cualquier valor de carga y en cualquier posición del mismo. Con esta herramienta computacional, avalada por los resultados de la prueba de carga se certifica la capacidad resistente de la tablestaca y las deformaciones que esta puede sufrir en función del sistema de carga actuante en el muelle.

Análisis técnico-económicos de las aplicaciones de los resultados obtenidos.

Se muestran las principales aplicaciones de los resultados obtenidos en la revisión y/o diseño de los puertos estudiados, valorando la influencia de cada una de las modificaciones introducidas y cuantificando los ahorros económicos obtenidos.

Desde el punto de vista económico y social con la aplicación del resultado se logra reutilizar las instalaciones portuarias existentes y que estaban fuera de explotación, reactivando el funcionamiento de las mismas y permitiendo a la economía del país un considerable ahorro de recursos, al activar instalaciones para la importación y exportación de mercancías. Por otra parte la reconstrucción de estas instalaciones o construcción de nuevas, requiere de grandes inversiones, no solo en tecnología por la complejidad de la construcción, sino por los altos volúmenes de materiales a utilizar.

Conclusiones.

Con la culminación de esta investigación, de más de 2 años de trabajo, la presentación de artículos y la aplicación en problemas reales donde se recogen los aspectos más importantes que se han profundizado en la misma, se pueden señalar algunas conclusiones importantes al respecto:

1. Se comprueba la validez de la aplicación de la modelación matemática en obras geotécnicas,
2. Se propone una metodología y criterios prácticos para el diseño y/o revisión geotécnico de las cimentaciones de los puertos,
3. Se establece un procedimiento para determinar las solicitaciones en las cimentaciones de los puertos y se comprueba la redistribución de esfuerzos,
4. Se comprueba la validez de la modelación, llegando a recomendaciones prácticas sin la necesidad de realizar un gran número de costosas pruebas de carga, recurriendo a la modelación por Elementos Finitos,
5. Con la introducción práctica de los resultados de este trabajo, se logra reutilizar las instalaciones portuarias existentes en el país bajo un nuevo régimen de carga, sin la necesidad de costosas inversiones, permitiendo el ahorro a la economía del país de más de 11 340 000 pesos, en concepto de reutilización de las capacidades portuarias existentes.

Bibliografía.

1. Bowels, J.E. (1982): Foundation Design and Analysis. McGraw-Hill, New York.
2. Calavera (1990): Diseño estructural de cimentaciones. Editorial Limusa. España. 145p.

3. Código del American Petroleum Institute. API (1984)
4. Das, Braja M. (1999): Principios de ingeniería de Cimentaciones. Braja M. Das. Editorial Thomson. México. 4ta edición. 855 pág.
5. Delgado M. (1999): Ingeniería de Cimentaciones. Fundamentos e introducción al análisis geotécnico. Manuel Delgado Vargas. Editorial Alfaomega. Colombia 1999. 500 pág.
6. Ibañez M, L. (1997): Modelación del las cimentaciones sobre pilotes. Tesis de Doctorado .2001
7. Jiménez S., J. A. (1986): Geotecnia y Cimientos. Editorial Rueda. Madrid. Tomos II y III.
8. Juárez B., E.; Rico R., A. (1969): Mecánica de suelo. Edición Revolucionaria, La Habana. 1969. Tomo I y II.
9. Medina T, F. (1996): Cargas para edificaciones y obras de Ingeniería. Tomo I y II. La Habana. 1996.
10. 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.