

APLICACIÓN DE LA MODELIZACIÓN MATEMÁTICA EN LA REALIZACIÓN DE PRUEBAS DE CARGA EN CIMENTACIONES SOBRE PILOTES

Luis O. Ibañez Mora, Gilberto Quevedo Sotolongo y Miguel A. Maestre *

Introducción

El acelerado desarrollo de ciencia y la técnica ha traído consigo el surgimiento de nuevos equipos de izaje y transportación, por lo que instalaciones portuarias que fueron diseñadas y proyectadas en la primera mitad del siglo XX, deben ser evaluadas para su explotación bajo nuevos regímenes de cargas. Éste es el caso del espigón del puerto de Pastelillo ubicado en la Bahía de Nuevitás. Este espigón fue construido a finales de 1940, y en la actualidad se pretende aprovechar la cimentación existente, para dar vida a un nuevo espigón para el trasiego de mercancías de la industria azucarera. Por tal motivo se hace necesario evaluar la capacidad de carga de los pilotes, para comprobar si es factible su reutilización o es necesario construir una nueva cimentación. 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, modelizaron y ejecutaron pruebas de carga a los _____ pilotes del viejo espigón de Pastelillo.

Investigadores de la Universidad Central
Las Villas "Martha Abreu", Cuba.

Desarrollo

El espigón del muelle de Pastelillo está conformado por una losa de hormigón armado a dos niveles diferentes y apoyados sobre pilotes con una distribución de 36 filas y 8 columnas. La unión entre pilotes es a través de vigas longitudinales en la dirección de las filas. Debido a la época de construcción se desconoce la longitud real de los pilotes hincados en el lugar y existen referencias del perfil de suelo, por investigaciones geológicas realizadas en épocas recientes. Estas investigaciones en la zona [ENIA (1966), (1982)] señalan la presencia de estratos de cieno, arcilla y argilita que buzan en la dirección del muelle, por lo que se destacan dos zonas fundamentales, una primera en la entrada del muelle (Zona 1), con poco espesor de cieno y el estrato resistente a poca profundidad y una segunda (Zona 2), donde los espesores de cieno son de más de 14 metros y por lo que el estrato resiste se encuentra a gran profundidad.

De dichos informes ingeniero-geológicos [ENIA (1966), (1982)] se conoce la presencia de:

Cieno: Color gris oscuro, muy compresible, de consistencia muy blanda. Aparece en profundidades entre 7.00 y 10.5m.

Arcilla color grisáceo: Consistencia media a blanda, muy compresible. Clasificación por el SUCS tipo OH, espesor promedio de 6.0 metros.

Argilita: Consistencia media que aumenta con la profundidad. Clasificación por el SUCS suelo tipo CL.

Aleurolita: Consistencia media a dura. Alcanza espesores mayores a los 3 metros. Clasificación por el SUCS suelo tipo CL.

Características de los suelos

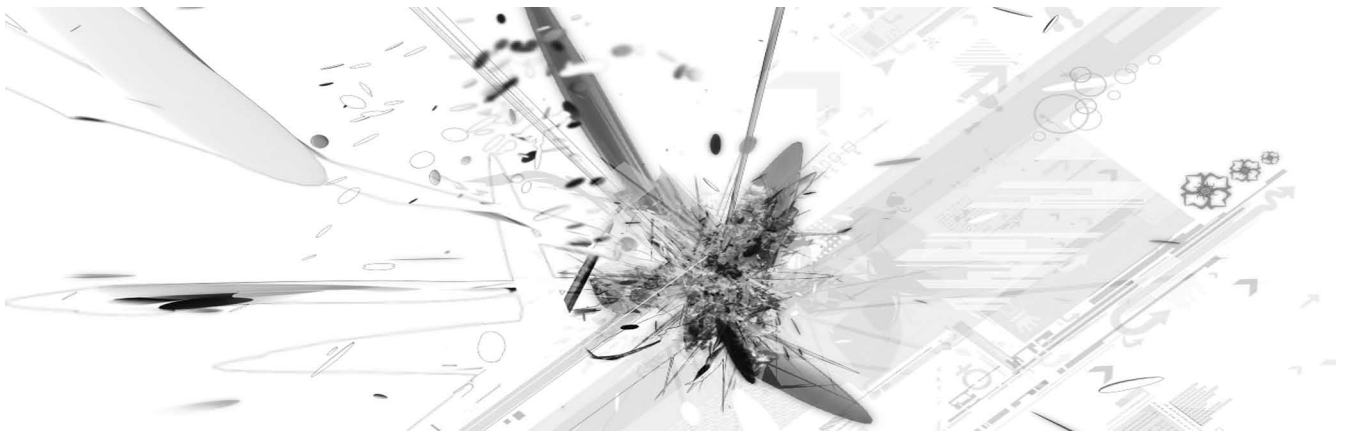
Capa	Descripción	ϕ°	C KPa	Eo kPa	qu (kPa) Ensayo Compresión Simple
1	Cieno	-	1.5	-	-
2	Arcilla grisacea verdosa	7	24	5000	-
3	Argilita	17	67	24000	200-400
4	Aleurolita	19	200	21000	200-500

Tabla 1. Características de los suelos del lugar de emplazamiento

Una vez estudiada la litología del lugar se decide estimar la longitud de los pilotes, de los cuales sólo se conocen las dimensiones de la sección transversal (50cm x 50cm) y que son de hormigón armado, ubicados en el lugar de forma hincada. A pesar de indagaciones en el lugar y consulta con constructores de experiencia se desconocía la longitud real de los pilotes, existiendo criterios de que fueron hincados al

rechazo, por lo que deben existir diferentes longitudes de pilotes.

Conociendo los resultados de 4 calas realizadas en la franja del muelle a inicios de la década del 80[ENIA (1982)], se decidió establecer dos zonas de estudio que fueran representativas de la litología del lugar y contribuyeran al ahorro de tiempo y recursos al realizar las pruebas de carga.



Pilote Zona 1 (Eje 6): Según el perfil geológico de la cala 3 que se corresponde con la posición del pilote a ensayar se definen los siguientes casos:

Caso	Longitud pilote (m)	Descripción
P-1A	12	Pilote atravesando 4 metros de arcilla (o relleno), hincado 1 metro en la argilita.
P-2A	15	Pilote atravesando 4 metros de arcilla (o relleno), hincado 3 metros en la argilita.
P-3A	17.5	Pilote atravesando 4 metros de arcilla (o relleno), 6 metros de la argilita e hincado 0.5 metros en la aleurolita.
P-4A	18	Pilote atravesando 4 metros de arcilla (o relleno), 6 metros de la argilita e hincado 1 metro en la aleurolita.

Tabla 2. Casos para la determinación de la capacidad de carga en la Zona 1.

Pilote Zona 2 (Eje 33): Según el perfil geológico de la cala 2 que se corresponde con la posición del pilote a ensayar se definen los siguientes casos:

51

Caso	Longitud pilote (m)	Descripción
P-1B	25	Pilote atravesando 13.6 metros de cieno, hincado 2.4 metros en la arcilla
P-2B	30	Pilote atravesando 13.6 metros de cieno, hincado 7.4 metros en la arcilla.
P-3B	32	Pilote atravesando 13.6 metros de cieno, 7.6 metros de arcilla e hincado 1 metro en la argilita
P-4B	35	Pilote atravesando 13.6 metros de cieno, 7.6 metros de arcilla e hincado 4 metros en la argilita
P-5B	38	Pilote atravesando 13.6 metros de cieno, 7.6 metros de arcilla, 4 metros en la argilita e hincado 1 metro en la aleurolita.

Tabla 3. Casos para la determinación de la capacidad de carga en la Zona 2.

Teniendo en cuenta el tiempo de construcción del muelle el estrato de cieno debe estar completamente consolidado, pudiéndose generar una fricción negativa de 60 kN, que puede ser significativo para pilotes de corta longitud (menores de 35 metros).

Definidas las longitudes de los pilotes y conociendo los estratos de suelos que atraviesa y sobre el cual apoya se procede a calcular la capacidad de carga

última por diferentes normativas, teniendo especial atención para el pilote de la zona 2, donde los efectos de la fricción negativa son considerables. Como parte de la investigación se determina la carga última del pilote utilizando la modelización por elementos finitos, siguiendo las recomendaciones al respecto de varios autores [Mesat, P. (1993a, b), Ibañez(2001), Sales (1998)]. El uso de la modelización por métodos nu-

méricos nos permite además estimar el valor de las deformaciones que se producirán en la realización de las pruebas de carga y servirá de elemento de peso a tener en cuenta durante su realización.

A manera de ejemplo se muestran los resultados del cálculo de la capacidad de carga para el caso P-2A y P-3B

Para el Pilote P-2A

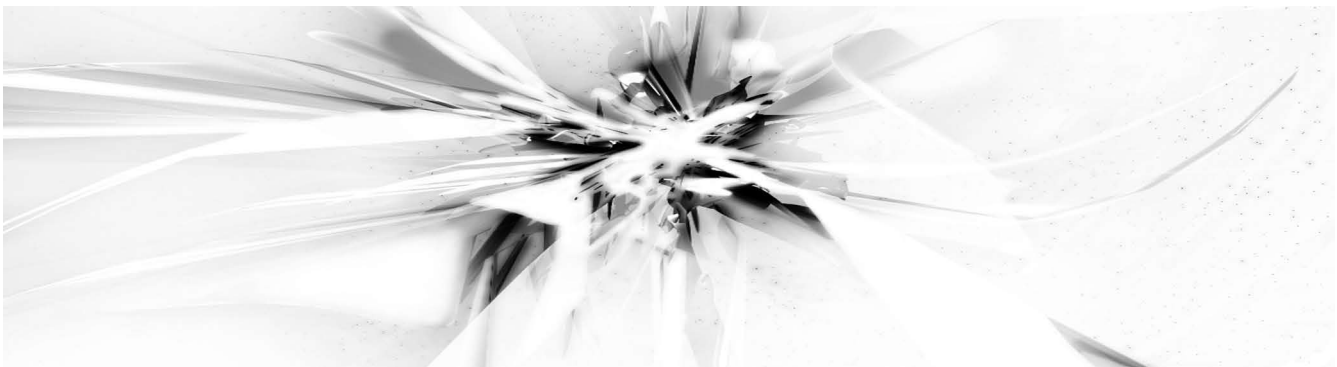
Normativa	Q ULTIMA (kN)	Q TRABAJO (kN)	Factor de Seguridad
Sowers[1977]	60.6	20.2	3
Tomilson , Randolph y Wroth, API[1984]	70.0	23.3	3
Burland[1968]	71.5	23.7	3
Vijaynergina y Focht[1968]	72.1	24.3	3
Propuesta de Norma[1989]	60.0	23.4	Estados Límites
Caquot Kerisel[1964]	78.0	26.2	3
Método Elementos Finitos (Modelación) [Das (2000), Ibañez (2001)]	68.4	27.8	2.5
Promedio	68	24.7	-

Tabla 4. Cálculo de capacidad de carga para el caso P-2A.

De manera similar se realiza el análisis para los diferentes casos citados en la Tabla 3, obteniéndose los siguientes resultados.

Caso	L (m)	Q ULTIMA (kN)	Q TRABAJO (kN)	Observaciones
P-1A	12	46.25	16.70	-
P-2A	15	68.65	24.71	-
P-3A	17.5	127.00	45.90	-
P-4A	18	139.50	50.30	-

Tabla 5. Capacidad de carga para las diferentes longitudes.



Para el Pilote P-3B

Normativa	Q ULTIMA (kN)	Q TRABAJO (kN)	Factor de Seguridad
Sowers[1977]	50.03	16.6	3
Tomilson , Randolph y Wroth, API[1984]	51.3	17.1	3
Burland[1968]	52.3	17.4	3
Vijaynergina y Focht[1968]	48.1	16.1	3
Propuesta de Norma[1989]	48.9	23.9	Estados Límites
Caquot Kerisel[1964]	78.5	26.8	3
Método Elementos Finitos (Modelación) [Das (2000), Ibañez (2001)]	57.1	24.6	2.5
Promedio	57.8	19.3	-

Tabla 6. Cálculo de capacidad de carga para el caso P-1b.

53

De manera similar se realiza el análisis para los diferentes casos citados en la Tabla 8, obteniéndose los siguientes resultados.

Caso	L (m)	Q ULTIMA (kN)	Q TRABAJO (kN)	Observaciones
P-1b	25	19.95	7.25	-
P-2b	30	47.75	17.12	-
P-3b	32	65.80	23.63	-
P-4b	35	97.95	35.08	-
P-5b	38	134.25	48.40	-

Tabla 7. Casos para la determinación de la capacidad de carga en la Zona 2.

A partir de este estado de la investigación es necesario validar los resultados obtenidos con los de la prueba de carga, comprobando la longitud real de los pilotes.

Ensayos y resultados de la Prueba de Carga.

Una vez conocidas los valores estimados de carga última de la cimentación, se procedió a realizar calas

para determinar las propiedades físico-mecánicas reales de los suelos y con ayuda de barrenos se obtuvo la longitud real de los pilotes de la zona de estudio. Para caso de la zona 1 la longitud del pilote era de 15 metros, y para la zona 2 se estima en el orden de los 31.5m.

Prueba de carga Pilote Zona 1: Para este caso se obtiene una carga de rotura de 670 kN (Ver figura 1) que se corresponde con las 687 kN obtenidas a través

de la modelación, para el pilote de 15 m de longitud. En los resultados experimentales se utilizó un Modulo Gral de deformación de $E_o = 24000$ kPa, valor que

se considera grande para este suelo, por lo que las deformaciones obtenidas son inferiores en el modelo que en la prueba de carga.

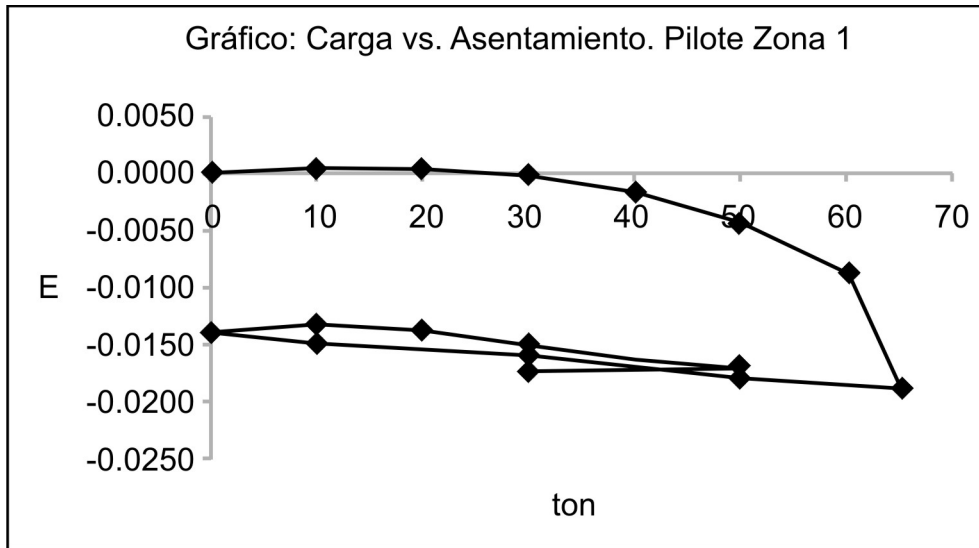


Figura 1. Curva carga vs. asentamiento Prueba de carga Pilote Zona1

54



Pilote Zona 2: Para este caso no existe correspondencia entre la prueba de carga y la modelación, destacándose las grandes deformaciones que se generan a partir de la carga de 25T, lo que obligó a detener la prueba de carga y llegar hasta una carga de 30T. Este pilote tiene una longitud de 31.5 según las mediciones “in - situ”, existiendo dudas en cuanto a si alcanza o no el estrato de argilita. Además, en caso de que alcanzara dicho estrato su penetración en el mismo sería menor a los 50 cms, diámetro de la cimentación, por lo que no se cumplirá el criterio de diseño referente a la longitud de empotramiento ($L_e > D$)(Vesic [1977], Jiménez [1994]). Teniendo en cuenta lo anteriormente expresado, se asume que dicho pilote no alcanza dicho estrato, por lo que es necesario realizar una interpretación de los resultados de la prueba de carga.

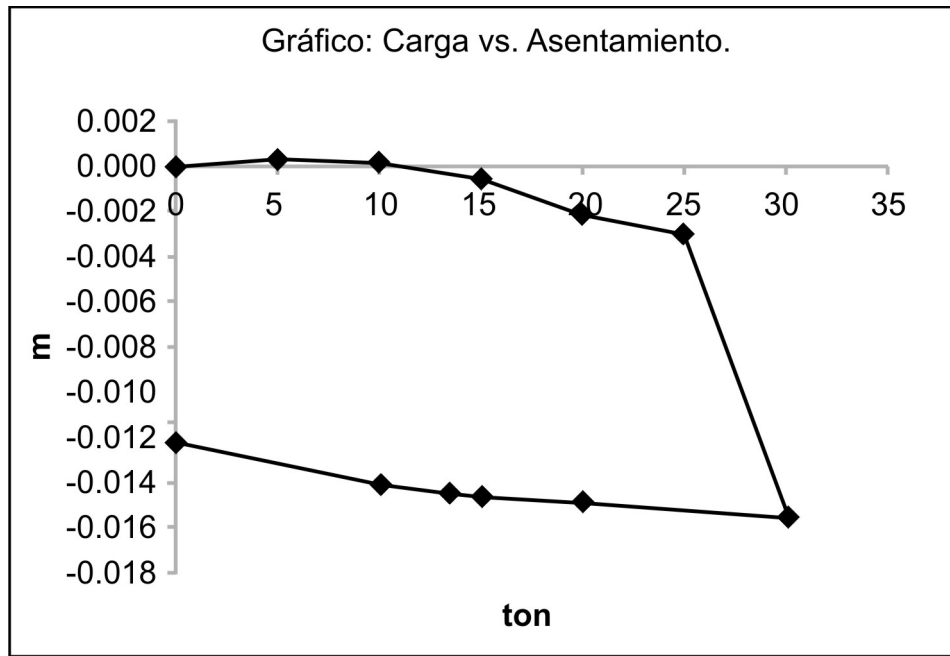


Figura 2. Curva carga vs. asentamiento Prueba de carga Pilote Zona 2

Debido a las diferencias entre los resultados de la prueba de carga y de la modelación se propone definir la carga de rotura de la prueba, extrapolando los resultados de la curva Carga/Deformación [Q vs Δ], y aplicar un método gráfico - analítico propuesto

por varios autores (Vesic [1977], Das [2000], León [1980]). En este método se determina la deformación elástica del pilote (δ_e), la deformación límite del pilote (δ_o), y partir de ellas la carga de rotura.

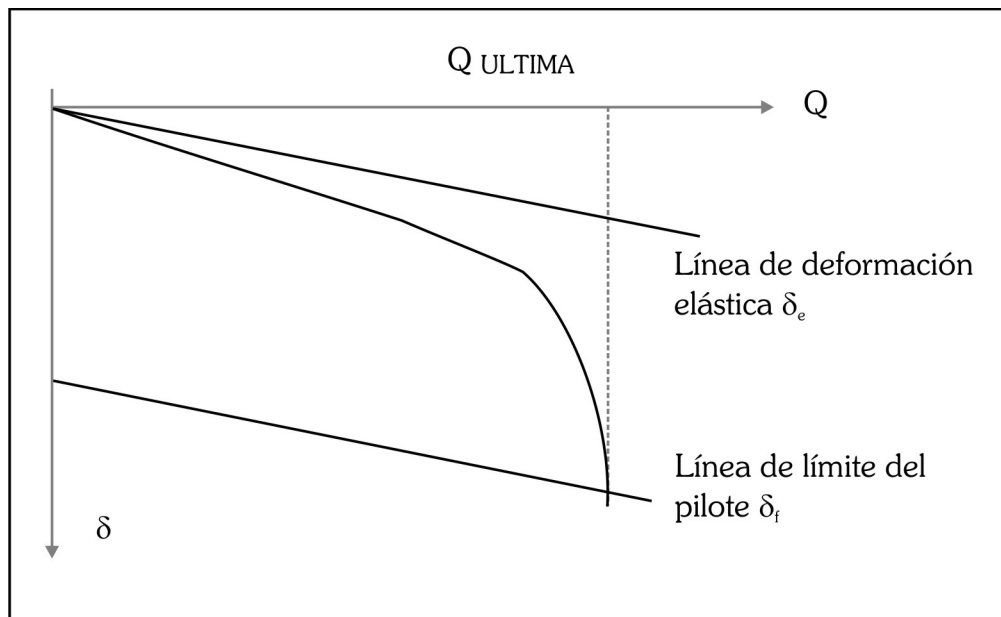


Figura 3. Curva para determinar la carga última. (Método Gráfico)

Donde:

$$\delta_E = \frac{Q \cdot L}{A_p \cdot E_p}$$

$$\delta_F = \delta_O + \delta_E$$

$$\delta_O = a + 10\% \text{ Diámetro} \quad a = 6\text{mm (para pilotes hincados)}$$

Q - carga actuante

L - longitud del pilote

A_p - área del pilote

E_p - Módulo general de deformación del material del pilote

D - Ancho del pilote

Aplicando dicho método, partiendo de la curva de la prueba de carga obtenemos una carga última del orden de los 500 kN a los 600 kN, que se corresponde con los resultados de la modelación, corroborando la validez del modelo utilizado.

56

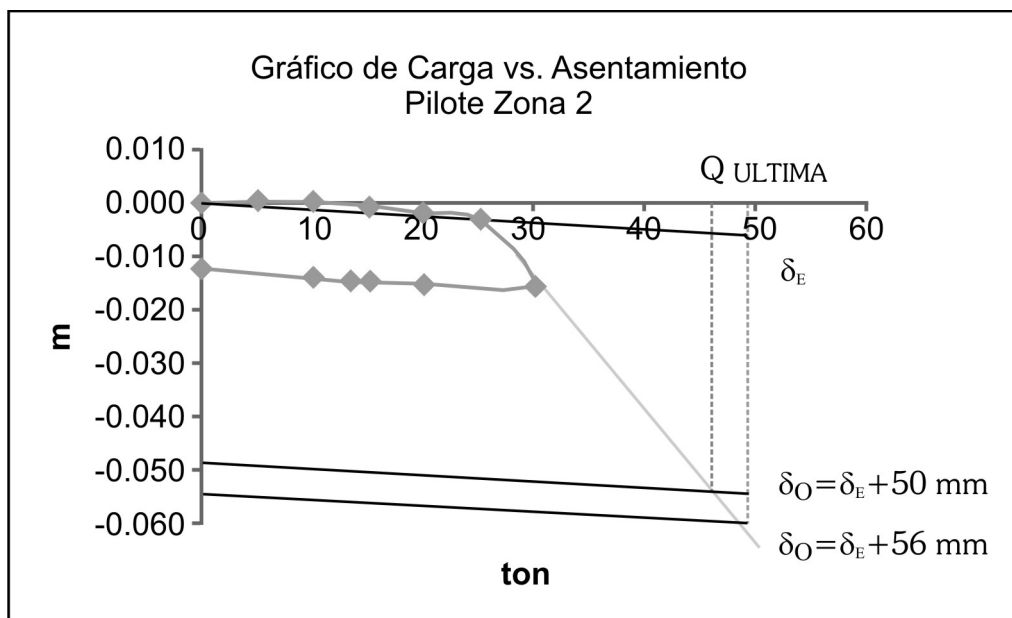


Figura 4. Curva carga vs. asentamiento. Prueba de carga Pilote Zona 2, método gráfico.

Conclusiones

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

1. Las deformaciones que ocurren para la carga de trabajo son del orden de los 5mm, por lo que no deben ocasionar problemas estructurales en la losa del muelle.
2. Se demuestra la validez de la modelación matemática como herramienta de trabajo en obras geotécnicas de gran complejidad.
3. Los resultados obtenidos de la confección de la curva Q vs Δ definiendo las deformaciones elásticas y límite del pilote demuestran la validez del modelo propuesto.
4. Por no existir certeza en cuanto a la longitud real de todos los pilotes del muelle, se define como carga de trabajo las 200 kN, (570 kN de carga de rotura), valor representativo del caso más crítico, cuando el pilote no alcance el estrato de argilita (Zona 2).



Bibliografía:

1. Caquot, A and Kerisel, J. (1964). *Tratado de Mecánica de Suelos*. 1ed en Castellanos. Gaunther-Villars, Paris, France.
2. *Código del American Petroleum Institute*. API (1984).
3. Das, Braja M. (1999). *Principios de ingeniería de Cimentaciones*. Braja M. Das. Editorial Thomson. México. 4ta edición. 855 pág.
4. Ibañez Mora, L (2001). Modelación matemática de las cimentaciones sobre Pilotes. Aplicaciones. ISPJAE.Cuba. Tesis de Doctorado. 98 pág.
5. Informe Ingeniero Geológico (16-9-1966). ENIA "Adaptación Espigón # 4. Puerto Pastelillo. Nuevitas"
6. Informe Ingeniero Geológico para Proyecto Ejecutivo(26-8-82). ENIA No 5. "Modernización Puerto de Nuevitas"
7. Jiménez S., J. A. (1994). *Curso sobre pilotajes y cimentaciones especiales*. CEDEX. Madrid. Tomo I y II.8.
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. León, M (1980). *Mecánica de suelos*. Editorial Pueblo y Educación. s.a. 40 p.
10. Mesat, P. (1993a). "Combinaciones de elementos finitos para las obras geotécnicas. Consejos y recomendaciones", en *Boletín de laboratorio de mecánica de suelo*. n. 212 (Julio- Agosto), p. 39-64, Francia.
11. Mesat, P. (1993b). "Modelos de elementos finitos y problemas de convergencia en el comportamiento no lineal", en *Boletín de laboratorio de mecánica de suelo*, n. 214 (Nov-Dic), p. 34-56, Francia.
12. 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.
13. Sales, M.M. y Cunha R. (1998). "Importancia del dominio en el análisis numérico de asentamiento de pilotes aislados". *Proceeding XI Congreso Brasileño de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotecnica*, p 237-244.
14. Sowers, G y Sowers F.(1977) *Introducción a la mecánica de suelo y cimentaciones*. La Habana. Editorial Pueblo y Educación, 677 p.
15. Vesic, A.S. (1977). *Design of pile foundations*, National Cooperative highway Reseach Program. Synthesis of Practice No. 42, Transportation Reseach Board, Washington, DC.