

Ensayo de carga en tablestacas. Instrumentación y modelación del ensayo

Luis Orlando Ibáñez Mora

correo electrónico: ibanez@uclv.edu.cu

Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Villa Clara, Cuba

Artículo Original

Resumen

En el presente trabajo se abordan las experiencias en la utilización de la modelación matemática y la realización de pruebas de carga en estructuras hidrotécnicas. Para ello se exponen los resultados obtenidos en pruebas de carga en la cortina de un muelle en la zona oriental de Cuba, evaluando las deformaciones horizontales y verticales que se producen en la misma. Se establecen comparaciones entre los métodos teóricos de cálculo de las deformaciones 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, demostrando que las deformaciones en el muelle objeto de estudio no ponen en peligro el funcionamiento del mismo bajo la acción de un nuevo sistema de carga.

Palabras claves: cimentación, modelación, ensayo de carga, tablestaca

Recibido: 11 de marzo del 2016 Aprobado: 8 de julio del 2016

INTRODUCCIÓN

En el trabajo se muestran los resultados del estudio de una obra hidrotécnica con el objetivo de evaluar la capacidad resistente de la misma. Dicha estructura es un muelle ubicado en la Ciudad de Santiago de Cuba, conformado por una pared de tablestaca que data su construcción de la década de 1940, ancladas a través de un tensor, el cual en algunos casos, según inspecciones al lugar, han fallado. La estructura geológica del sitio se caracteriza por la presencia de un relleno que descansa sobre dos estratos de arcilla y limo, y un último estrato de arcilla resistente en el cual se supone hincada la tablestaca. La superficie del muelle tiene una losa no estructural de 15 cm de espesor, además de encontrarse en explotación dos grúas sobre carriles a una distancia de 10 m del frente del muelle.

Se desea conocer la respuesta estructural del sistema bajo la acción de diferentes sistemas de cargas generados por la explotación de camiones Belaz y la grúa de 450 kN

de peso total en la descarga de cemento y clinker. Una vez realizada una modelación por elementos finitos, la prueba de carga in situ; ajustado y calibrado dicho modelo se estará en condiciones de definir el rango de explotación de la estructura de los diferentes sistemas de carga.

En la literatura internacional varios autores han abordado la rehabilitación de puertos [1-3], en algunos casos evaluando el estado de la estructura y en otros realizando pruebas de carga a escala real. De estos estudios es válido señalar el trabajo de Del Valle, donde se combina la inspección visual, el estudio en laboratorio de las propiedades de los materiales y los ensayos de carga a escala real.

MATERIALES Y MÉTODOS

Como parte de la realización de los trabajos de gabinete se efectúa un estudio de las condiciones geológicas del lugar y una inspección visual de la zona de estudio.

Revisados los Informes Ingeniero-Geológicos del año 1972 y 2006 [4,5] se confirma la presencia de cuatro estratos de suelos cuyas características se muestran en la tabla 1.

Cálculo de la capacidad resistente de la tablestaca por métodos numéricos

Para la modelación por elementos finitos se utiliza el programa de cómputo PLAXIS [6], un programa por ordenador de elementos finitos bidimensionales diseñado específicamente para la realización de análisis de deformación y estabilidad de problemas geotécnicos. Las situaciones modeladas corresponden a problemas de deformación plana o con axisimetría. En la literatura consultada [7] se modelan situaciones similares a través del software Abaqus.

En el modelo se tiene en cuenta la presencia de los 4 estratos de suelo, la tablestaca (Laursen IVa) y el tensor (63 mm de diámetro). El mallado es generado automáticamente por el propio programa con una cantidad total de 987 elementos y 11 738 nodos, realizando varios análisis, hasta obtener un mayado óptimo desde el punto de vista ingenieril y computacional. Para la modelación del suelo se utiliza el modelo Morh-Coulomb y para la tablaestaca un modelo elástico.

Los resultados obtenidos del programa PLAXIS proponen que la estructura es segura [8]. En este caso la deformada de dicho elemento alcanza valores máximos de 4,9 cm a una profundidad de 5 m. La tensión actuante en la tablestaca es de 0,63 kPa, trabajando con un factor de seguridad global $FS = 1,7$, valor seguro para este tipo de obras [9-11]. Para el caso del tensor la fuerza es de 4,16 kN para un $FS = 2,16$. Estos valores demuestran la seguridad de la estructura (sin la acción de sistemas de cargas externas) y están corroborados por el estado actual del muelle.

A continuación se presenta la deformada de la geometría modelada, incluyendo las dimensiones de la misma y los elementos que la conforman (figura 1). Esta misma geometría será utilizada en todos los análisis, ya que demostró ser la más adecuada en cuanto a precisión de los resultados y tiempo empleado en la solución.

Los valores máximos de deformación (figura 2 y tabla 2) se alcanzan en un punto intermedio entre el anclaje y el fondo de la entibación, resultado acorde con las teorías clásicas de deformadas de tablestaca [9,13], trabajando como elemento empotrado-articulado. Puede apreciarse la presencia de zonas de plastificación alrededor del anclaje, por lo que ha de prestarse adecuada atención en la misma durante la inspección y comprobar la presencia de los elementos estructurales que garantizan el anclaje de los tensores.

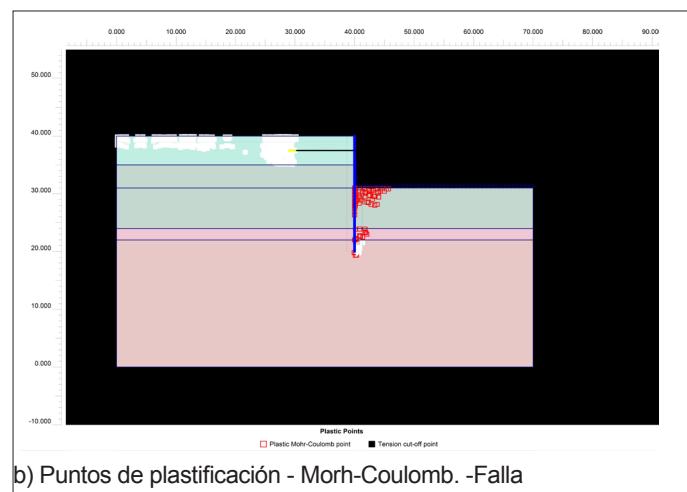
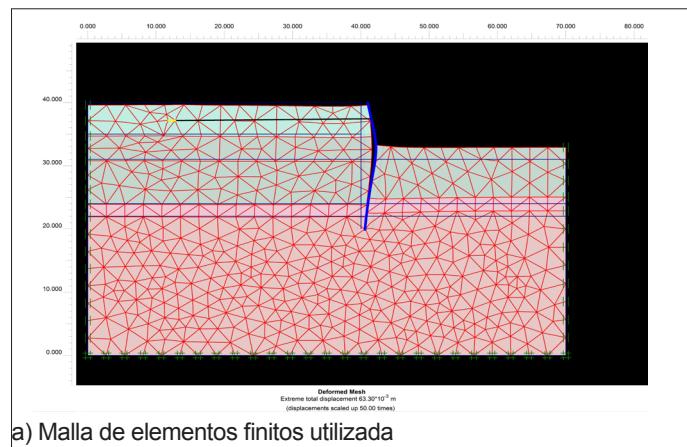


Fig.1. Malla por elementos finitos utilizados.

Tabla 1
Datos de los suelos en el lugar

	Densidad humedad (kN/m ³)	Densidad seca (kN/m ³)	Humedad (%)	Cohesión (kPa)	Ángulo de fricción interna (grados)	Módulo general de deformación (kPa)
Estrato 1	17,8	12,48	53	8	18	20 000
Estrato 2	16,5	10,79	53	20	8	15 000
Estrato 3	17,0	12,59	35	30	6	25 000
Estrato 4	19,7	16,8	22,5	80	12	50 000

La tablestaca se corresponde con la Laursen IVa de acero [12] cuyos datos principales son:

Módulo general de deformación: $2,1 \cdot 10^8$ kPa

Área de la sección transversal $0,018 \text{ m}^2$

Inercia $1,69 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$



Fig. 2. Deformada y momentos en la tablestaca.

Tabla 2	
Valores notables de deformación	
Altura (m)	Deformación (m)
40	0,020
35	0,040
31	0,042
24	0,020
20	0,011

Con el objetivo de verificar la capacidad estructural de la tablestaca y los tensores, se realiza la instrumentación en los puntos señalados a continuación (Punto A, B, C, y D, de la figura 3), los cuales estarán fijados a la pared de la tablestaca, 3 de ellos bajo el agua. Se proponen estos puntos pues se corresponden con puntos notables en la tablaestaca (A - punto superior, B - apoyo del tensor, C – cambio se suelo, D – punto inferior). En todas las mediciones el error permisible se consideró menor a 0,1 mm [14,15].

Descripción de la prueba de carga in situ

Para la correcta realización de la prueba de carga y la instrumentación de las deformaciones de la tablestaca se decidió considerar como válidas las siguientes hipótesis para los cálculos:

- Se instrumentará el punto bajo el agua, con dos proyecciones del mismo en la horizontal, midiendo la verticalidad y el desplazamiento angular con respecto a un punto fijo figura 4.

- Los pesos de cuchara del cargador se determinaron en función del volumen del mismo, considerando la densidad del suelo de 18 kN/m³, por lo que cada carga es de 70 kN por cuchara

- Se consideran puntos fijos, los bolardos cimentados sobre pilotes existentes en el muelle (los tres existentes. Ver figura 5.

- Una vez terminada la instrumentación se comprobará si los puntos fijos sufrieron algún movimiento, en caso contrario se dan por válidas las mediciones realizadas.

- Se permite un error topográfico de 8 s.

A partir de las condiciones del lugar, las posibles cargas a utilizar y las hipótesis iniciales se realizó el ensayo de carga, utilizando la siguiente secuencia de carga (tabla 3).

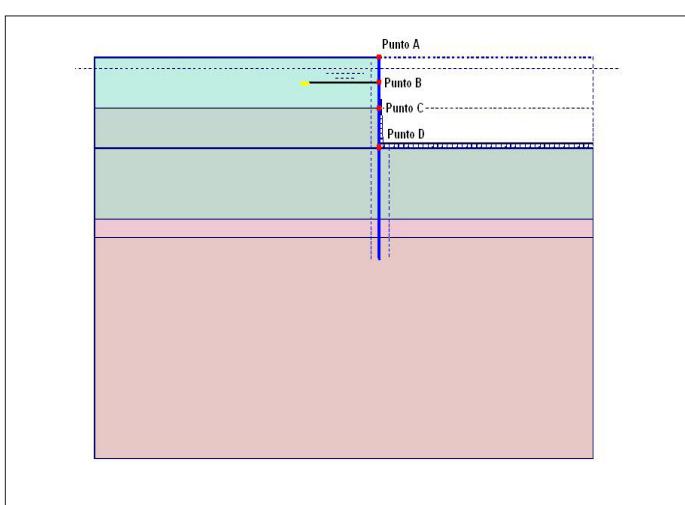


Fig.3. Puntos a instrumentar.

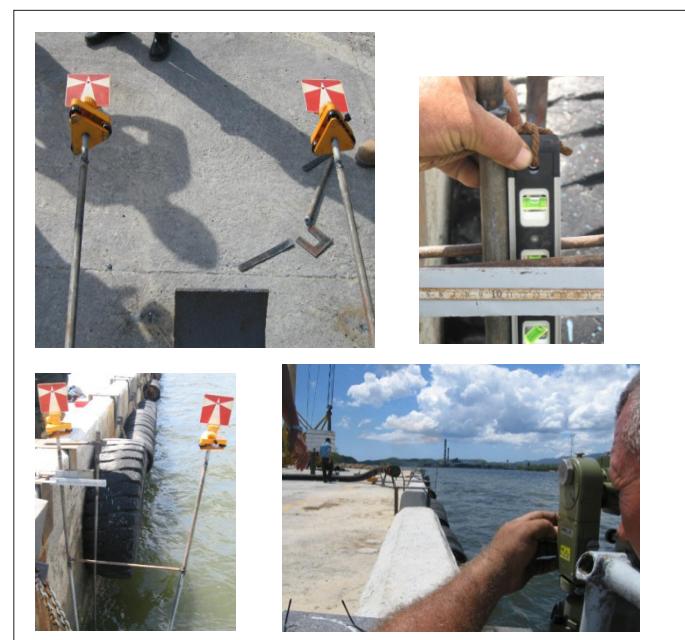


Fig.4. Mediciones y puntos de instrumentación.

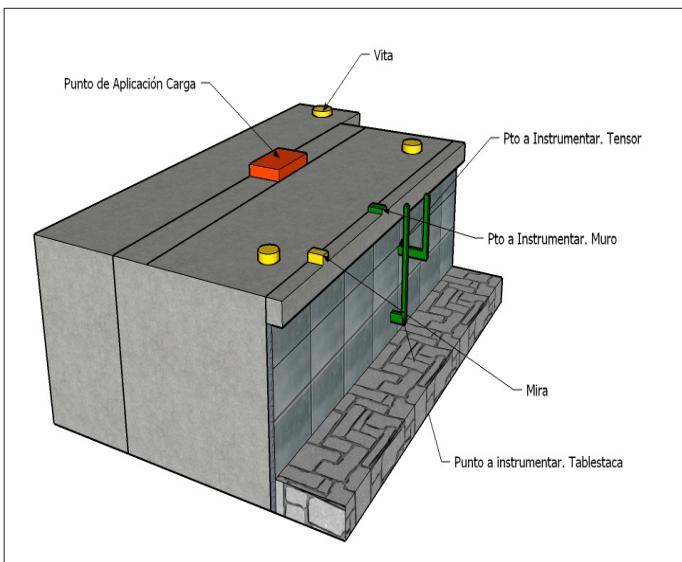


Fig.5. Croquis del levantamiento topogeodésico.

Estas cargas siempre se colocaron en la zona entre los rieles de la grúa carrilera que opera en el lugar, simulando el comportamiento de la grúa en operaciones de carga y buscando la condición más crítica. Se destaca que el máximo valor obtenido es de 930 kN, superior a la carga de las grúas en operaciones, que solo alcanza 400 kN. (figuras 6 y 7). En [16] se realiza una calibración del modelo estructural, instrumentación, monitoreo y simulación numérica, evaluando el efecto del tráfico de vehículos para un puente en Colombia, metodología similar a la que se realizó en este trabajo.



Fig. 7. Prueba de carga con camión Belaz, carga de dos camiones.

RESULTADOS

La instrumentación realizada reportó deformaciones horizontales en los tres puntos medidos, destacándose que la deformación no fue la misma en estos, lo que evidencia la correcta instrumentación de los puntos desde la mira. A continuación se exponen las curvas carga-deformaciones obtenidas en los días de medición, realizadas en el muelle (tabla 4). En el caso del modelo se considera que la carga actúa como carga puntual por cada eje del camión.

En la tabla 4 y la figura 8 se comprueba la correspondencia entre los valores obtenidos con la prueba de carga y la modelación matemática, fundamentalmente para el último escalón de carga lo que permite avalar la veracidad de la modelación matemática para esta situación. En todos los casos se consideró que el modulo general de deformación del suelo es constante con la profundidad.

Tabla 3

Cargas utilizadas

No	Identificación	Carga (kN)	Descripción
1	Carga 1	120	Camión Román
2	Carga 2	0	Sin carga
3	Carga 3	219	Camión Belaz
4	Carga 4	350	Camión Belaz + 2 Paladas
5	Carga 5	420	Camión Belaz + 3 Paladas
6	Carga 6	930	Camión Belaz : 420 kN + Camión Belaz con 510 kN
7	Carga 7	420	Camión Belaz
8	Carga 8	0	Retiro de la carga



Fig. 6 Prueba de carga con camión Belaz, carga de un camión.

Tabla 4
Desplazamientos horizontales del muro

No	Identificación	Carga (kN)	Desplazamiento horizontal	
			Modelo (mm)	Prueba de carga (mm)
1	Carga 0	0	0	0
2	Carga 1	120	2,45	0,3
3	Carga 3	219	2,49	0,3
4	Carga 5	350	2,53	1,64
5	Carga 6	420	2,55	2,53
6	Carga 7	930	2,93	2,8
7	Carga 8	420	2,55	2,53
8	Carga 9	0	0	0

Resultados de las mediciones al muro. Punto A

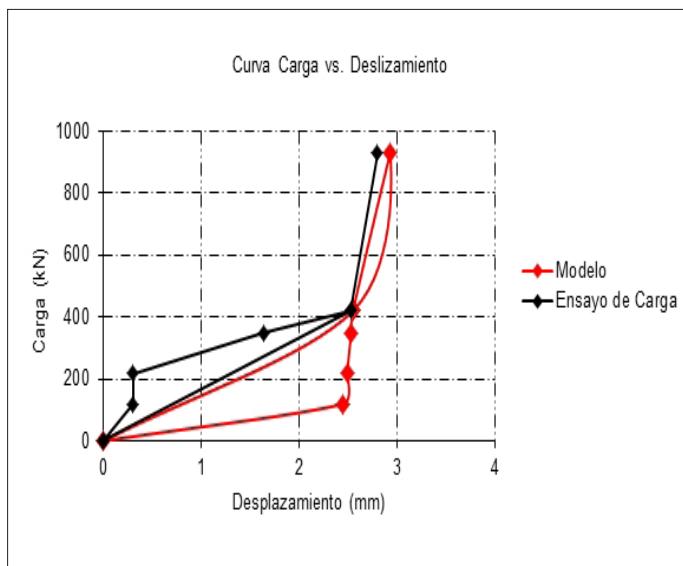


Fig. 8. Desplazamientos horizontales del muro. Punto A.

Los valores de deformación reflejados en el tensor están en el orden de los 3 cm que represente un valor seguro. En el caso que se coloque una carga entre los rieles y el frente del muelle se incrementarían las deformaciones de dicho elemento y por consecuencia llegaría a la falla, por lo que no resulta seguro la colocación de cargas entre las grúas y el frente del muelle.

Los resultados obtenidos en el punto medio de la tablestaca (Punto C) se corresponden con el modelo inicial considerando la aplicación de una carga entre las grúas y el frente de muelle.

Como se aprecia tanto de la modelación como de los resultados de los ensayos de carga se generan deformaciones del orden de los 10 cm por lo que fallaría el muelle, demostrándose una vez más la no factibilidad de las operaciones con cargas entre las grúas y el frente de muelle. Ver figuras 9 y 10

Resultados de las mediciones al tensor. Punto B.

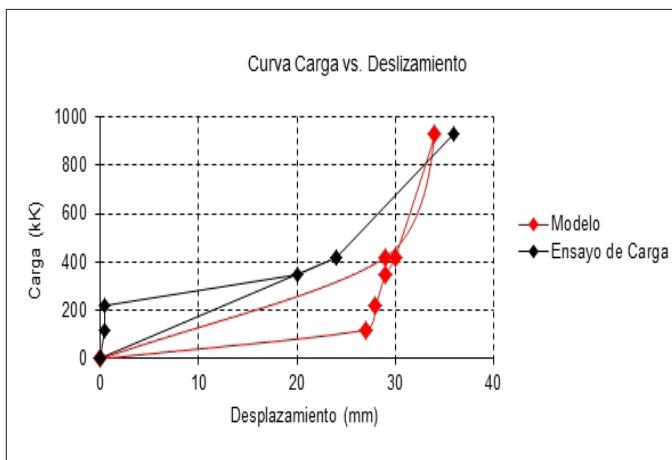


Fig.9. Desplazamientos horizontales del tensor. Punto B.

Resultados de las mediciones en el punto medio de la tablestaca. Punto C

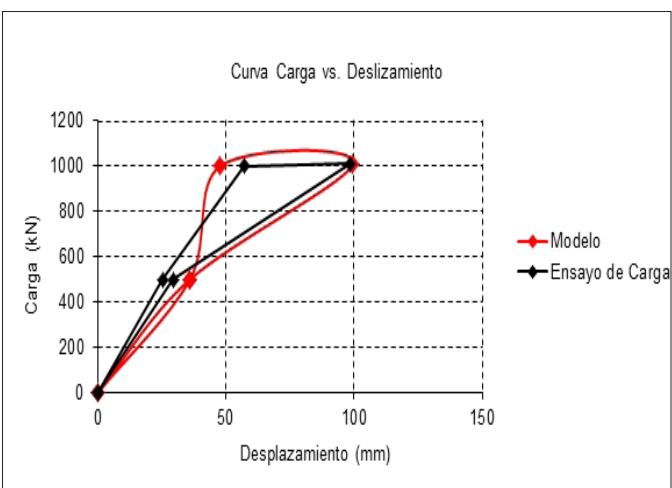


Fig.10. Desplazamientos horizontales punto medio de la tablestaca. Punto C

CONCLUSIONES

Una vez realizadas las diferentes modelaciones y pruebas de cargas se concluye que:

1. No se recomienda la explotación del muelle con sistemas de cargas superiores a los que se opera actualmente (una sola grúa).
2. Se comprueba la validez de la modelación matemática para la solución de problemas de mecánica de suelos

REFERENCIAS

1. CARMONA, Antonio. "Reparación de Muelles para Garantía de su Seguridad y Durabilidad". *Revista de la Construcción*. Pontificia Universidad Católica de Chile, 1997, pp.90 -97. ISSN: (Versión impresa) 0717-7925.
2. PRIETO TERCERO, L. "Mejora del atraque del muelle de trasatlánticos del Puerto de Vigo". *Revista Técnica Cemento Hormigón*. 2011, núm. 947, noviembre-diciembre 2011, pp. 68-77. ISSN: 0008-8919.
3. DEL VALLE MORENO, Angélica et. al. "Determinación del estado de corrosión y capacidad de carga de los muelles del puerto de Guaymas". Publicación Técnica. No. 336, Sanfandila, Qro, 2011. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Instituto Mexicano del Transporte. ISSN: 0188-7297.
4. Informe Ingeniero Geológico. *Muelle Fábrica de Cemento, José Mercerón Allen de Santiago de Cuba*, 2 de diciembre de 1972.
5. Informe Ingeniero Geológico. *Muelle Fábrica de Cemento, José Mercerón Allen de Santiago de Cuba*, 6 septiembre del 2006.
6. PLAXIS. *Manual de Usuario*. Ver 8.0. <http://www.plaxis.nl>.
7. JIEJING, Wu Fei. "Finite Element Analysis of Sheet Pile Wharf with Separated Relieving Platform". *Applied Mechanics & Materials*. 2014, vol. 744-746, pp.137-140. Disponible en: DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.744-746.137. Base de datos: Applied Science & Technology Source.
8. RUGGERI, Paolo. "Sheet Pile Quay Wall Safety: Investigation of Posttensioned Anchor Failures". *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, Sep.2013, vol. 139, Issue 9, pp.1567-1574, 8p, 3 Color Photographs, 7 Diagrams, 1 Chart, 7 Graphs. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000886. Base de datos: Applied Science & Technology Source.
9. JIMÉNEZ, J. A. *Geotecnia y Cimientos*. Madrid: Editorial Rueda, t. II y III, 1986.
10. XIONG, Xia. "Analysis about Bending Moment of Sheet Piles Retaining Structure". *Advanced Materials Research*. 2014, Issue 1051, pp. 701-705. Disponible en: DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1051.701, Applied Science & Technology Source.
11. ZHOU, Hongxing. "Research on the deformation of the steel piles on the soft soil". *Applied Mechanics & Materials*, 2014, vol. 724, pp.111-116. Disponible en: DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.724.111. Base de datos: Applied Science & Technology Source, (2014).
12. GALABRU, P. *Cimentaciones y Túneles*. Editorial Reverté. 2da. ed., 1974, 411 pp.
13. BOWELS, J. E. *Foundation Desing and Analysis*. New York: McGraw-Hill, 1982.
14. GALLEGOS FABELA, M. de Jesús. "La extensometría como técnica de medición experimental". Artículo 3, Boletín IMT Notas núm. 92. Instituto Mexicano del Transporte. Sanfandila, Qro, febrero 2005.
15. GARCÍA MÁRQUEZ, Fernando. *Curso Básico de Topografía*. México: Editorial Pax, 1994, 306 pp. ISBN: 968-860-673-1.
16. MUÑOZ, E. "Confiability estructural apoyada en monitoreo e instrumentación: aplicación en un puente en acero". *Revista de la Construcción*. Pontificia Universidad Católica de Chile, 2006. ISSN: (Versión impresa) 0717-7925.

AUTOR

Luis Orlando Ibáñez Mora

Ingeniero Civil, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Titular, Facultad de Construcciones, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Villa Clara, Cuba

Load Test in Sheet Pile

Abstract

In this work, are discussed experiences in the use of mathematical modeling and testing in hydraulic engineering structures. For this purpose the results of load tests in sheet pile, evaluating horizontal and vertical deformations that occur in the same exposed. Comparisons between theoretical methods for calculating deformations and mathematical models based on the Finite Element Method are established. Finally, the coincidence between the numerical model and the results of the load test full-scale checks showed that deformations in the sheet pile under study do not use for operation under action of a new charging system.

Key words: foundation, modeling, load test, sheet pile