

Ensayos de carga y modelación en una obra hidrotécnica

Dr. Luis Orlando Ibañez Mora.
Universidad Central Marta Abreu de Las Villas.
e-mail: ibanez@uclv.edu.cu

Dr. Cs. Gilberto Quevedo Sotolongo
Universidad Central Marta Abreu de Las Villas.
e-mail: quevedo@uclv.edu.cu

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 occidental 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 clave: cimentación, ensayo de carga, modelación, tablaestaca.

Load testing and modelling in a hydrotechnical structure

ABSTRACT

This paper describes an experience in the use of mathematical models and load tests on hydrotechnical structures. The results obtained from the load test performed on the sheet pile of a dock, located in the eastern part of Cuba, are presented. Horizontal and vertical deformations were measured. A comparison is made between the theoretical methods for deformation calculation and the mathematical methods based on the finite-element method. Finally, the coincidence of results obtained from the numerical model and those of a real-scale load test is proved, thus showing that deformations could not become a risk if the dock is subject to a new load system.

Keywords: foundation, load test, modeling, sheet pile.

INTRODUCCIÓN

Con el objetivo de reutilizar estructuras hidrotécnicas de mediados del siglo pasado se desea evaluar la deformación lateral de la viga de contención del atraque “Osvaldo Padrón” del puerto del Mariel ubicado en la zona occidental de Cuba. Dicho atraque servirá de base para el almacenamiento de cargas (tuberías y otros insumos), apoyados sobre dispositivos creados a dicho efecto (rack).

Inicialmente sobre la tablaestaca hincada existía una viga de frente de muelle anclada al relleno. Debido a las condiciones ambientales del lugar y la fuerte acción del agua marina estos anclajes fallaron, comportándose ahora la tablaestaca como una viga en voladizo.

DESARROLLO

Para la realización del trabajo se realiza el estudio de los informes ingeniero-geológicos realizados en el año 1977 y 1980, en los cuales se describen y caracterizan los suelos existentes en el sitio (tabla 1).

TABLA 1. Características de los suelos

capa	descripción	ángulo de fricción interna j° (grados)	cohesión C (kPa)	módulo general de deformación (kPa)	resistencia última (kPa)
1	Relleno de arcilla	-	-	-	-
	Relleno restos marinos	-	-	-	-
2	Cieno arenoso	8	5	2500	-
3	Arcilla Limosa	18	30	15000	190
4	Argilita	18	60	30000	400

Como se aprecia, se presentan 4 suelos identificados que son: el relleno, el cieno, la arcilla y la argilita. Respecto al relleno, los datos de estos informes solo sirven de referencia, teniendo en cuenta la edad del muelle y la fecha de realización de estos informes ingeniero-geológicos.

La tablaestaca utilizada en la construcción del muro de contención del muelle fue la KRup V.a. (Galabru 1974, Medina 1996) la cual ha sufrido desgaste por la acción de las aguas marinas. Para los cálculos se tuvo en cuenta un desgaste de 5,46 mm y uno pronosticado de 0,12 % anual.

Datos Utilizados de la tablaestaca

Módulo General de deformación:	$2,1 \times 10^8$ kPa
Área de la sección transversal:	$0,018$ m ²
Inercia:	$1,69 \times 10^{-6}$ m ⁴
Longitud:	17 m

Modelación del problema: estimación de la prueba de carga

Para la modelación de la prueba de carga se desarrollaron 2 etapas, una primera en la que se modeló el comportamiento de la tablaestaca, bajo la acción de las cargas permanentes (empuje de suelo y agua) y una segunda donde se evalúan las deformaciones bajo la acción de cargas externas (prueba de carga).

Como se muestra en las figuras 1 y 2, se definen 4 suelos en el perfil: el relleno, el cieno, la arcilla y la argilita. En todos los casos dichos estratos buzan en la misma dirección, apreciándose una disminución de espesor en la dirección de la tablaestaca. Se tiene en cuenta además que la profundidad de calado es de 7,5 m bajo el nivel medio del mar. Por otra parte se conoce que la separación mínima de la carga al borde del muelle es de 3 m y que esta actuará como una carga uniformemente distribuida. Por esta razón se modela la carga como presión actuante en la superficie del muelle sobre la losa de hormigón existente.

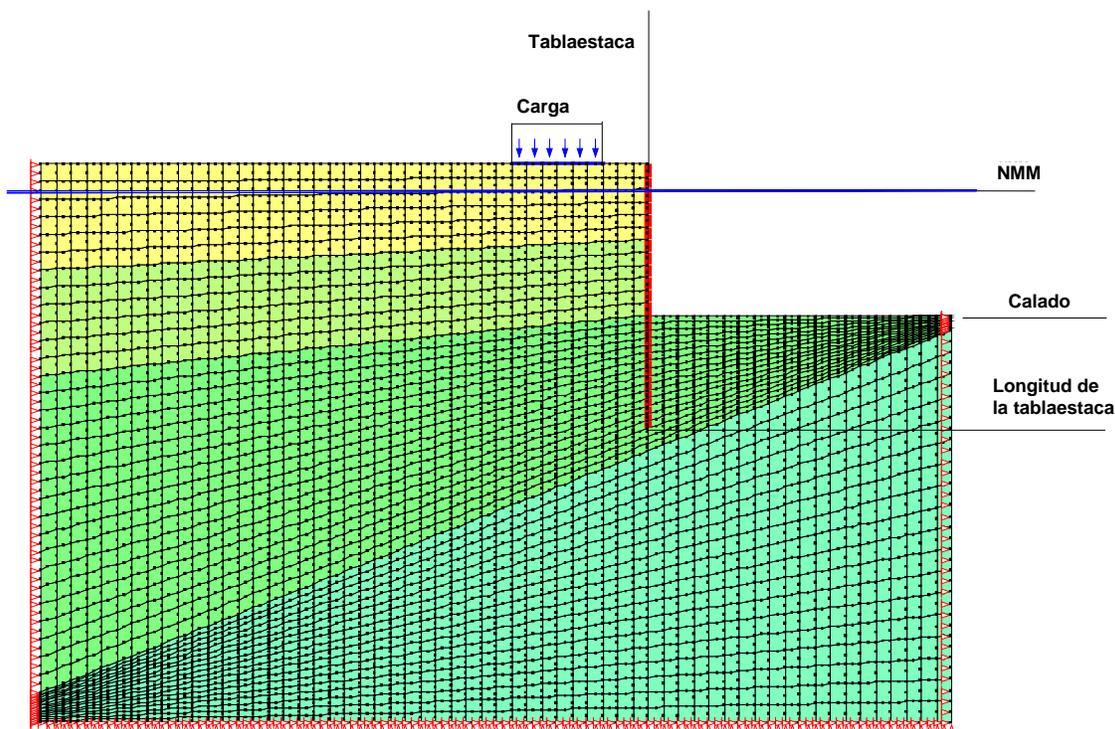


FIGURA 1. Modelo del problema real

Al existir dudas en cuanto a las propiedades reales del relleno (densidad, porosidad, módulo general de deformación) se desarrollan 4 modelos evaluando diferentes tipos del mismo variando sus propiedades físicas mecánicas. En la tabla 2 aparecen los tipos de relleno modelados.

TABLA 2. Propiedades del relleno utilizadas en la modelación

No	tipo de relleno	módulo general de deformación (kPa)	modelo
1	Pobre	3000	Modelo 1
2	Regular	5500	Modelo 2
3	Regular	6500	Modelo 3
4	Regular - Bueno	7500	Modelo 4

Nota: Se consideró una cohesión de 5 kPa

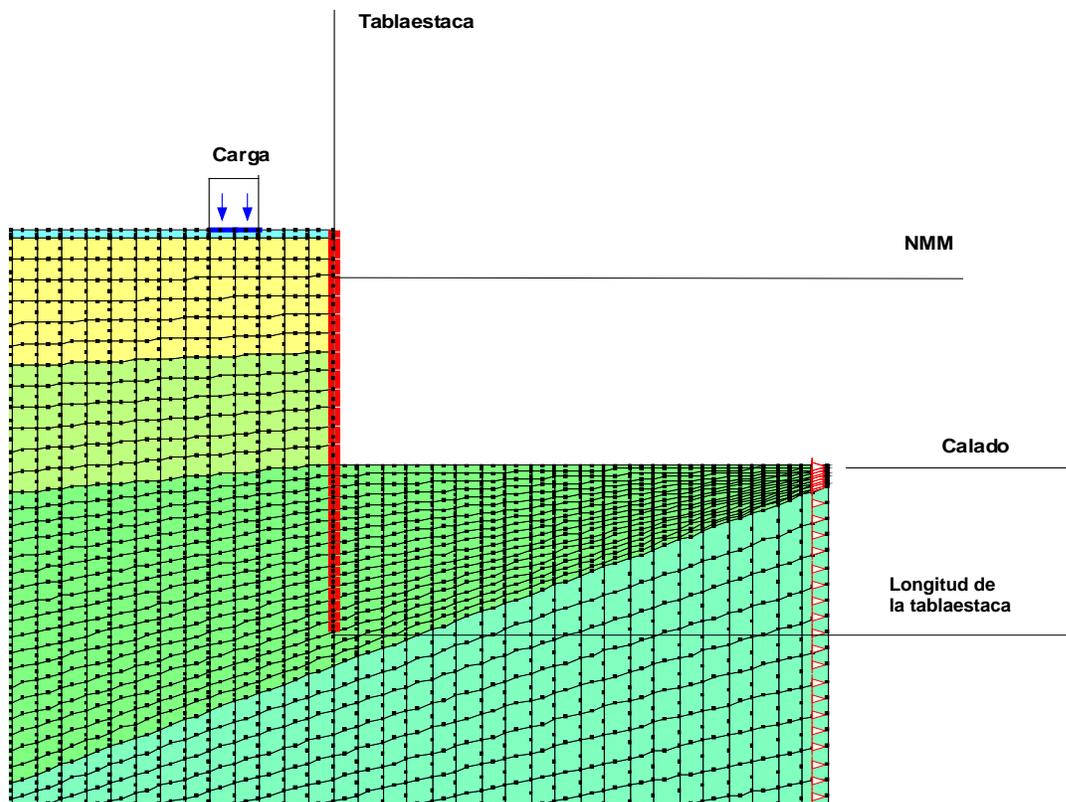


FIGURA 2. Esquema del modelo: detalles

Definidos los parámetros deformacionales del relleno se procede a determinar la deformación lateral de la tablaestaca bajo diferentes incrementos de carga. Para ello se aplican las expresiones clásicas de diseño (Das 1999, Delgado 1999, Jiménez 1986) y la modelación por elementos finitos. En la tabla 3 y figura 3 se muestran la respuesta deformacional de cada modelo para cada incremento de carga. Para la modelación por el método de elementos finitos se utiliza el software GeoSlope (GeoSlope 1995).

TABLA 3. Resultados de modelación: carga vs. deformación

Carga (kN)	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4
	Desplazamiento (mm)			
0,0	0,000	0,000	0,000	0,000
114	0,067	0,100	0,067	0,019
228	0,119	0,360	0,119	0,038
342	0,475	0,470	0,475	0,057
418	0,674	0,570	0,600	0,070
568	0,790	0,670	0,820	0,095
680	1,400	0,700	0,990	0,113

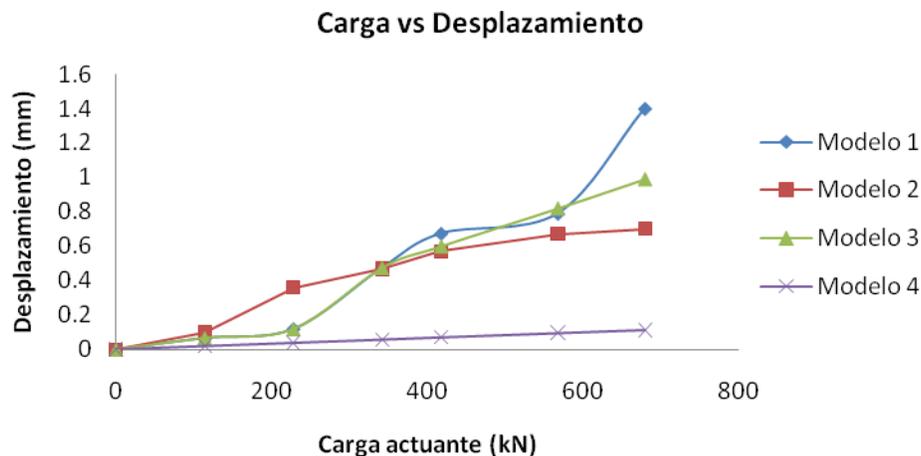


FIGURA 3. Carga vs. Deformación

Como se aprecia las deformaciones obtenidas no sobrepasan en ningún caso de un milímetro, solo para cuando se modela un suelo pobre (Modelo 1). Es válido señalar que la modelación realizada parte de un análisis plano del problema, lo que significa que se considera que la carga actúa constante en la profundidad, lo que sin duda alguna resulta imposible de realizar con una prueba de carga a escala real, pero que brinda una aproximación al problema real. Una vez obtenidos estos resultados se procede a la realización de la prueba de carga conociendo que las máximas deformaciones a ocurrir son del orden de 1,4 mm en la viga de cierre del muelle.

Resultados de la prueba de carga

Las pruebas de cargas se realizaron a 60 y 120 m del extremo del muelle, utilizando una plataforma de 6 m x 1,96 m (figura 4), que simula los racks de apoyo y sobre la misma se colocó el peso muerto y se midieron las deformaciones laterales. En las tablas 4 y 5 y figuras 5 y 6 aparecen los resultados obtenidos en la Prueba de Carga # 1, que es la más crítica de las dos que se realizan.



FIGURA 4. Ensayo de carga en el lugar (agosto 2003)

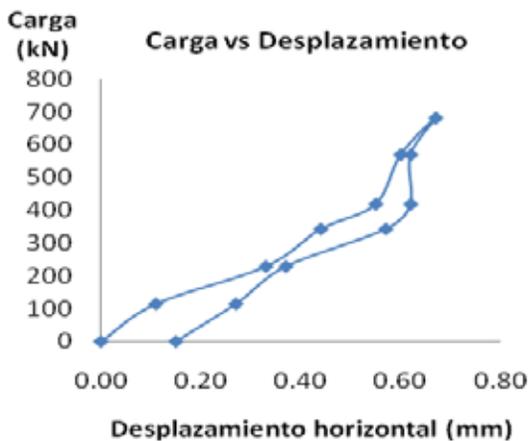
A continuación se muestran los resultados de cada prueba de carga.

**TABLA 4. Carga vs Deformación.
Ensayo I**

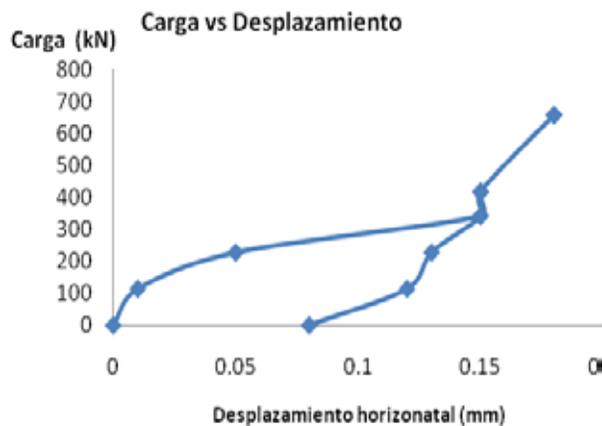
Ensayo I punto PS-1	
asiento (mm)	carga (kN)
0,00	0.0
0,11	114
0,33	228
0,44	342
0,55	418
0,60	568
0,67	680
0,62	568
0,62	418
0,57	342
0,37	228
0,27	114
0,15	0.0

**TABLA 5. Carga vs Deformación.
Ensayo II**

Ensayo II punto PS-1	
asiento (mm)	carga (kN)
0,00	0.0
0,01	114
0,05	228
0,15	342
0,15	418
0,16	568
0,18	658
0,18	658
0,15	418
0,15	342
0,13	228
0,12	114
0,08	0.0



**FIGURA 5. Carga vs Deformación.
Prueba I**



**FIGURA 6. Carga vs Deformación.
Prueba II**

Se aprecia una recuperación elástica de la tablaestaca, pero las deformaciones son despreciables tanto en la carga como en la descarga.

Correlación entre los resultados de la prueba de carga y los modelos

Con los resultados de las pruebas de carga se analizan los modelos utilizados, comprobándose que el Modelo 2 es el que mejor se ajusta a dichos resultados, el cual representa un suelo regular desde el punto de vista deformacional, que se corresponde en gran medida con el relleno existente en el muelle (tabla 6).

TABLA 6. Comparación entre la prueba de carga y el modelo

Asentamiento (mm)		% Diferencia
Prueba de Carga	Modelo	
0,00	0,000	0
0,11	0,100	- 9
0,33	0,360	+ 8
0,44	0,470	+ 6
0,55	0,570	+ 3
0,60	0,670	+ 10
0,67	0,700	+ 4

Teniendo en cuenta estos resultados y la validez del Modelo 2, se procede a modelar la acción de una carga distribuida de 6 m de ancho, perpendicular a la viga de cierre del muelle, como se muestra en la figura 7.

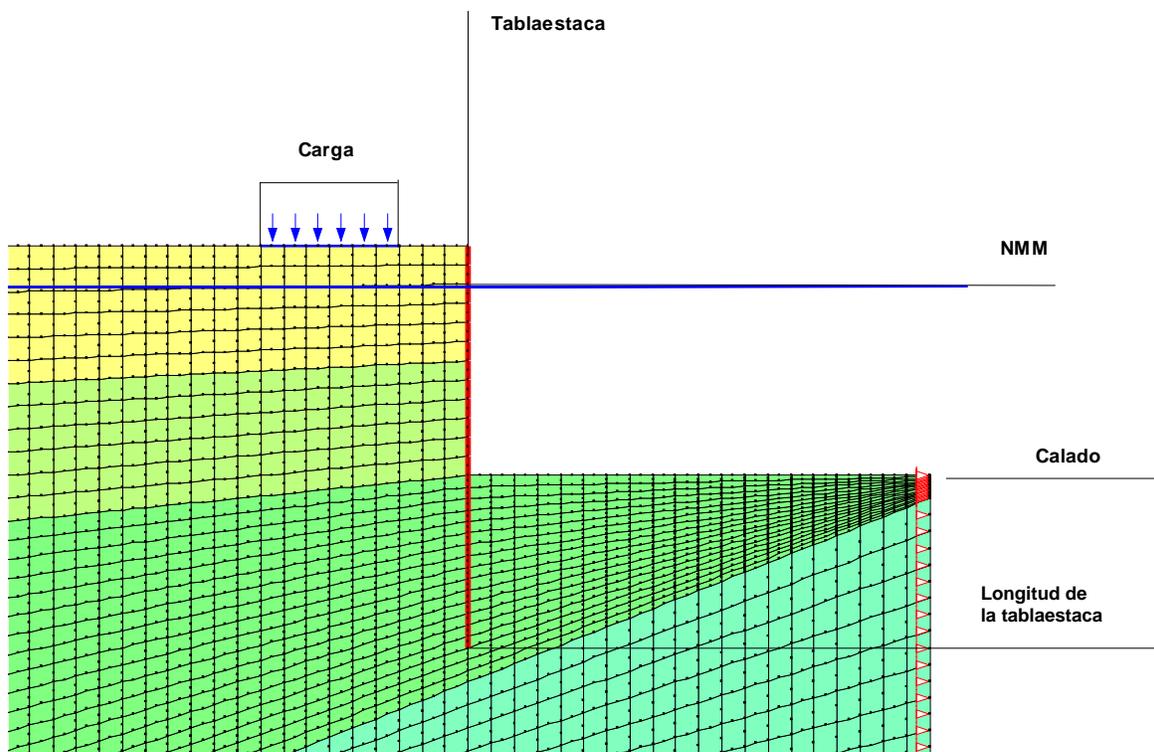


FIGURA 7. Modelo con carga distribuida perpendicular a la viga de cierre.

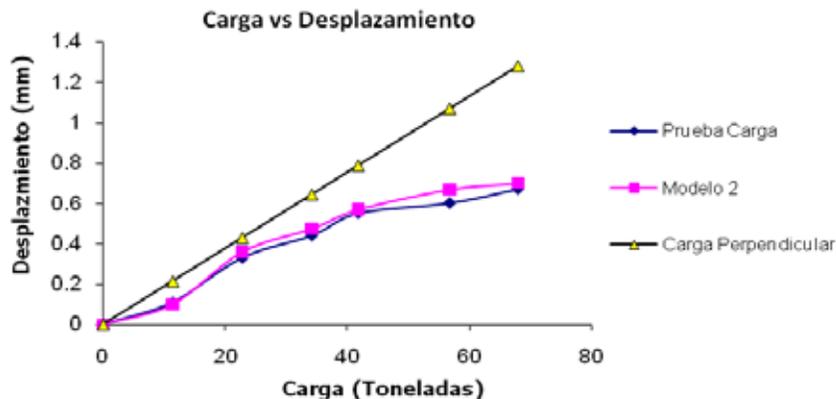


FIGURA 8. Carga vs. deformación: modelo y prueba de carga

En la figura 8 se aprecia la concordancia entre el modelo propuesto y la prueba de carga, así como las deformaciones para una carga distribuida perpendicular a la viga de cierre del muelle (Figura 7) que pudiera ser otro esquema de explotación del muelle. En todos los casos se demuestra que cargas inferiores a 650 kN actuando en un área de 6m x 1.96m, o presiones de 38 kPa, actuando paralelas o perpendiculares al muelle generan deformaciones laterales menores de 1,4 mm.

Modelación del problema para el estado de carga definitivo

Para la modelación del problema, con las cargas que definitivamente se plantea explotar el muelle, se parte de los resultados anteriores, en los cuales se llegó a obtener un modelo capaz de reproducir con gran precisión los resultados de la prueba de carga realizada en el muelle.

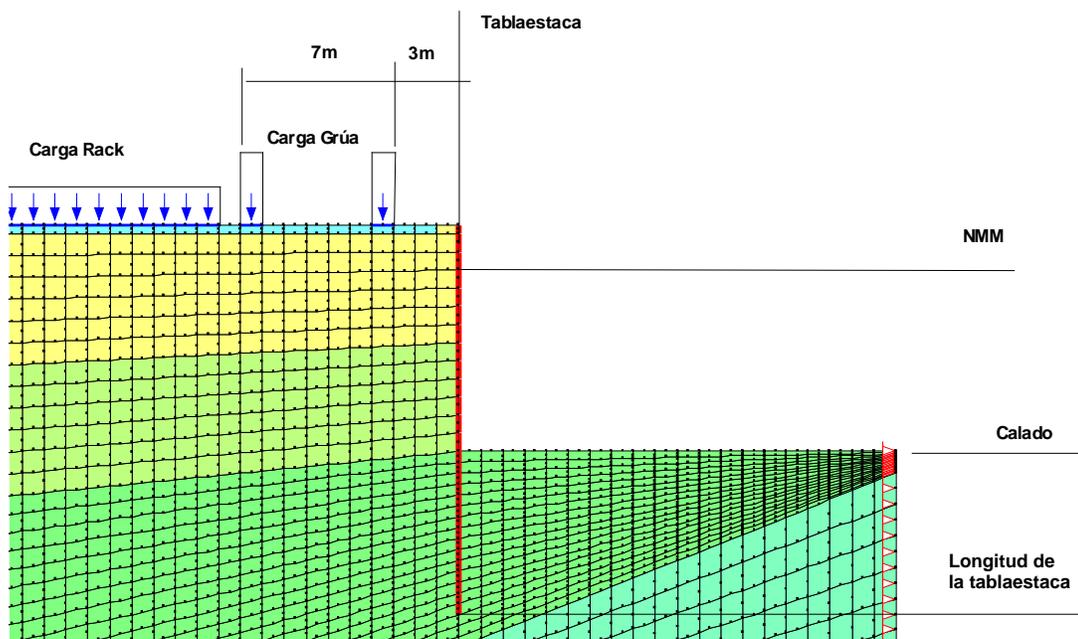


FIGURA 9. Esquema del modelo: detalles

En este caso se modela la acción de una grúa NK-80 (Medina 1996) trabajando a 3 m del borde del muelle, en un ancho de 7 m y a continuación los racks que sirven de apoyo a las tuberías. Los datos de los suelos y tablaestaca fueron los mismos utilizados en el análisis anterior y los referentes a la grúa fueron tomados de Medina (1996), según el fabricante de la misma.

Resultados de la modelación

Una vez definido el modelo a utilizar se analiza el efecto que provoca la carga que trasmite el apoyo de las grúas, tomando como máximo valor 250 kN. Se definen tres esquemas de cargas.

- A. Caso 1: Carga actuando en un ancho de 1 m (Figura 9)
- B. Caso 2: Carga actuando en un ancho de 50 cm (Figura 9)
- C. Caso 3: Carga concentrada. (Figura 10)

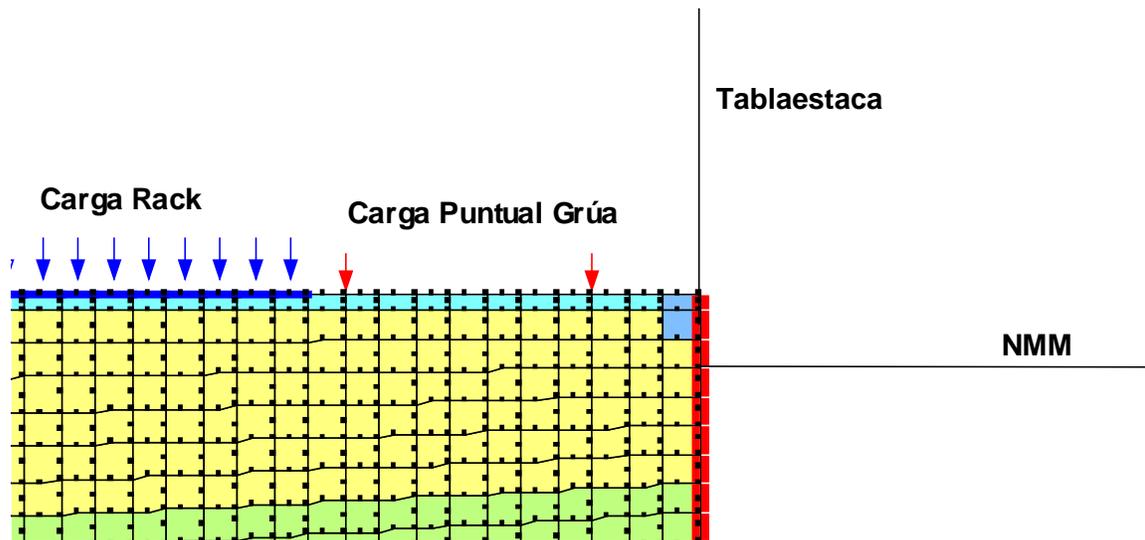


FIGURA 10. Modelación del apoyo de la grúa como carga concentrada

Con estos casos definidos se obtiene la respuesta del modelo bajo la acción de cargas externas, respetando siempre la distancia de 3 m al borde de la tablaestaca. En la tabla 7 aparecen los resultados para cada caso.

TABLA 7. Desplazamientos para la grúa a 3m de la tablaestaca

	caso 1	caso 2	caso 3
Desplazamientos horizontales (mm)	9,799	9,479	9,257
Desplazamientos verticales (mm)	-3,104	-2,715	-2,856

De estos resultados se puede comprobar que la influencia de la forma de aplicación de la carga es poco significativa, alcanzándose deformaciones de cerca de 1 cm, que es una deformación mayor que la obtenida en el primer análisis realizado y en la prueba de carga, pero que puede considerarse no excesiva, teniendo en cuenta sobre todo que el modelo utilizado es un modelo plano, lo que indica que la carga de la grúa la está tomando de la misma forma en toda la profundidad del muelle, lo que no es realmente cierto, pues en realidad existe una separación de

6,3 m entre cada apoyo de la grúa por donde se trasmite la carga, por lo que resulta evidente que los resultados obtenidos están sobredimensionados con respecto a la realidad.

CONCLUSIONES

Una vez realizadas las modelaciones y con los resultados de la prueba de carga se puede arribar a las siguientes conclusiones:

- Bajo la acción de una carga uniformemente distribuida paralela a la viga de cierre de 38 kN/m separada a 3 m de la misma, actuando en una longitud de 2 m, las deformaciones laterales en la viga de cierre son inferiores a un milímetro (1,0 mm).
- Bajo la acción de una carga uniformemente distribuida perpendicular a la viga de cierre, de 6 m de ancho, de 38 kN/m separada a 3 m de la misma, actuando en una longitud de 6 m, las deformaciones laterales en la viga de cierre son inferiores a 1,4 mm.
- Las deformaciones de la viga de cierre en todos los casos son pequeñas y no ponen en peligro la utilización del muelle.

REFERENCIAS

- Das, B.M.** (1999): “Principios de ingeniería de cimentaciones”. Editorial Thomson, México, 4ta edición, 855 pág.
- Delgado, M.** (1999): “Ingeniería de cimentaciones. Fundamentos e introducción al análisis geotécnico”. Editorial Alfaomega, Colombia, 500 pág.
- Galabru, P.** (1974). “Cimentaciones y túneles”. Editorial Reverté. Segunda Edición. 411 pág.
- GeoSlope** (1995). “SIGMA/W for finite element analys. User’s guide”. Geoslope International Ltd., Calgary, Alberta, Canada.
- Jiménez, S. J. A.** (1986). “Geotecnia y cimientos”. Editorial Rueda. Madrid. Tomo II. 569 pág.
- Medina, T. F.** (1996). “Cargas para edificaciones y obras de ingeniería”. Tomos I y II. Editorial Félix Varela, Habana..