



RECOMENDACIONES DE DISEÑO PARA LA CONSTRUCCIÓN DE TABLESTACAS PARA REFUERZO DE PUERTOS MARÍTIMOS

Resumen

En este trabajo se presenta el cálculo estructural de una tablestaca cuya finalidad es evitar que se pierda material fino y se contenga de manera eficiente el suelo colindante al muelle de un puerto interno. El modelo empleado se basa en una pantalla cuyas características mecánicas se determinan por metro transversal de la misma. Se consideran las cargas del terreno, de los elementos de contención lateral y las cargas por peso propio. La discretización de la tablestaca se realiza a cada 25 cm y se obtiene para cada punto el comportamiento mecánico del terreno y de la estructura. Se incluyen los resultados numéricos del análisis estructural y se presentan las recomendaciones de diseño para la tablestaca.

Abstract

This paper shows the structural design of a contention wall, as a solution of the problem of fine material lost, in the underground of the yard in the harbor facilities of Manzanillo Port. Due the natural conditions Manzanillo Port has had several problems in its underground; earthquakes and poor resistant in the underground materials have been the mains problem. This work proposes to solve these problems with the construction of a contention wall called screen wall, a mathematical model will be show and the mechanicals conditions will be determined lineally.

■ **C. T. Méndez Ramírez, A. Ruiz Sibaja**

Universidad Veracruzana, Calle de La Pérgola s/n,
Facultad de Ingeniería, Xalapa, Veracruz, 91090,
México, Tel. 00.52.22.88.42.17.56,
Fax. 00.52.22.88.42.27.47, cmendez@uv.mx,
aleruiz@uv.mx

1. ANTECEDENTES

El puerto de Manzanillo ubicado en el estado de Colima en la costa del Pacífico Mexicano es el segundo puerto del país de acuerdo al volumen de mercancía manejada y es el principal puerto en el litoral del Pacífico. Es un puerto Interno que se encuentra en la laguna de San Pedrito. Su recinto portuario abarca una superficie de 437 hectáreas que incluye la infraestructura e instalaciones marítimas y terrestres para operar todo tipo de carga. Cuenta con nueve posiciones de atraque de longitud restringida distribuidas a lo largo de tres muelles o bandas denominadas, Banda A, Banda B' y Banda C, con longitudes de 450, 570 y 685 metros, respectivamente, y 12 metros de profundidad promedio cada una (Finura 1).



Figura 1. Localización del muelle "Banda A"

La Banda A del puerto de Manzanillo es el muelle de más antigüedad de este puerto. Es un muelle de tipo marginal dividido en tres tramos de atraque. Está construido a partir de pilotes de sección cuadrada de 50x50 cm, de concreto armado precolado, e hincados hasta el estrato resistente (-15 m) por lo cual se consideran pilotes de punta. El muelle consta de una losa plana de 65 cm de espesor, de concreto armado con varilla del número 6 @ 25 cm en ambos sentidos y en ambos lechos (Figura 2). Es importante destacar que este muelle fue afectado seriamente por el sismo del 9 de octubre de 1995, de forma tal que la estructura tuvo que reforzarse considerablemente.



Figura 2. Disposición de pilotes

Pese a este refuerzo se desarrollaron hundimientos en las áreas colindantes a la Banda A como consecuencia del sismo del 21 de enero de 2003. A partir de estos antecedentes se desprende la necesidad de desarrollar un refuerzo estructural del área afectada para evitar que se siga perdiendo material fino y se contenga de manera eficiente el suelo colindante al muelle. La propuesta de refuerzo se basa en la instalación de una tablestaca e incluye recomendaciones sobre el procedimiento constructivo y para el hincado del elemento estructural.

2. ANALISIS

2.1 Diagrama de presiones sobre la tablestaca

El sitio donde se construyó la tablestaca consiste en una serie de estratos arenosos, Por lo tanto se utilizó el método del soporte libre para tablestacas en suelo arenoso que consiste en suponer una viga vertical cuyas características mecánicas se obtienen por metro transversal de la misma. Sobre este elemento actúa el empuje del terreno, tanto en el trasdós como en el intradós, además de la carga por peso propio. El diagrama de presiones sobre la tablestaca y las profundidades iniciales de hincado se obtienen según las hipótesis adoptadas por Braja (2001) para tablestacas en suelo arenoso (Figura 3).

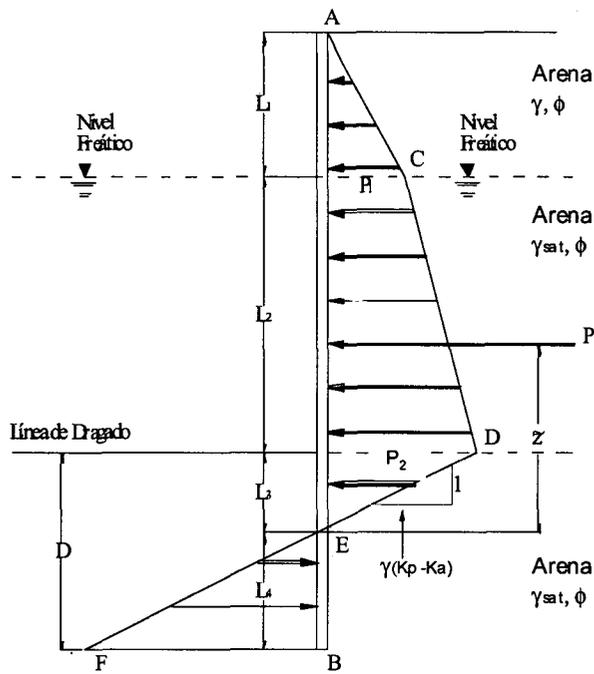


Figura 3. Diagrama de presiones sobre la tablestaca

La secuencia de cálculo para obtener el diagrama de presiones sobre la tablestaca y la profundidad inicial de hincado (D_a) se muestran en la Tabla 2 (Braja, 2001).

Tabla 1. Cálculo del diagrama de presiones sobre la tablestaca

Cantidad requerida	Ecuación de cálculo
1. Presión activa de Rankine K_a	$K_a = \tan^2\left(45 - \frac{\phi}{2}\right)$ (1)
2. Presión pasiva de Rankine K_p	$K_p = \tan^2\left(45 + \frac{\phi}{2}\right)$ (2)
3. Presión activa en L_1	$p_1 = \gamma L_1 K_a$ (3)
4. Presión activa en L_2	$p_2 = (\gamma L_1 + \gamma' L_2) K_a$ (4)
5. Profundidad L_3	$L_3 = \frac{p_2}{\gamma'(K_p - K_a)}$ (5)
6. Área del diagrama de presiones P	$P = \frac{1}{2} [p_1 L_1 + p_1 L_2 + (p_2 - p_1) L_2 + p_2 L_3]$ (6)
7. Centro de presión Z'	$Z' = \frac{\sum M_E}{P}$ (7)
8. Profundidad L_4	$L_4^3 + 1.5 L_4^2 (L_2 + L_3) - \frac{3P(L_1 + L_2 + L_3) - (Z' - 1)}{\gamma'(K_p - K_a)} = 0$ (8)
9. Profundidad teórica $D_{teórica}$	$D_{teórica} = L_3 + L_4$ (9)
10. Profundidad real D_{real}	$D_{real} = 1.30 \times D_{teórica}$ (10)

2.2 Análisis del sistema suelo-tablestaca

Una vez que se obtiene la profundidad de hincado se procede a realizar el análisis de la tablestaca de acuerdo con un modelo no lineal del suelo en que esta se encuentra. A partir de la secuencia de la Tabla 1 se encontró una profundidad inicial de hincado real $D_{real}=6.421$ m. A continuación se propuso la geometría preliminar de la tablestaca para estudiar su comportamiento, las dimensiones se basan en las recomendaciones de un estudio de mecánica de suelos (Correa Rodríguez, 2003).

El análisis se llevó a cabo con ayuda de un programa especializado en este tipo de estructuras (Cype Ingenieros, 2004). Se consideró que la tablestaca está sometida a una carga sísmica de 0.35g con las características del sismo de 1995 que afectó esa zona (Méndez, 2003).

El modelo de cálculo para el estrato arenoso y la tablestaca se muestra en la Figura 4. En esta figura se representa la carga que actúa sobre la tablestaca, esta acción es originada tanto por el movimiento de los contenedores en el patio del muelle como por las condiciones de trabajo de las grúas en el área de operaciones. La modelación del sistema se realizó mediante elementos finitos tipo lámina gruesa tridimensional (Cype Ingenieros, 2004).

El análisis se llevó a cabo mediante un método pseudo estático de equilibrio límite en el que deben realizarse una serie de iteraciones hasta obtener la convergencia hacia la solución. En la Tabla 2 y la Figura 5, se concentran los resultados para las fases de análisis considerando el suelo descrito por el sondeo SM-01 (Correa Rodríguez, 2003).

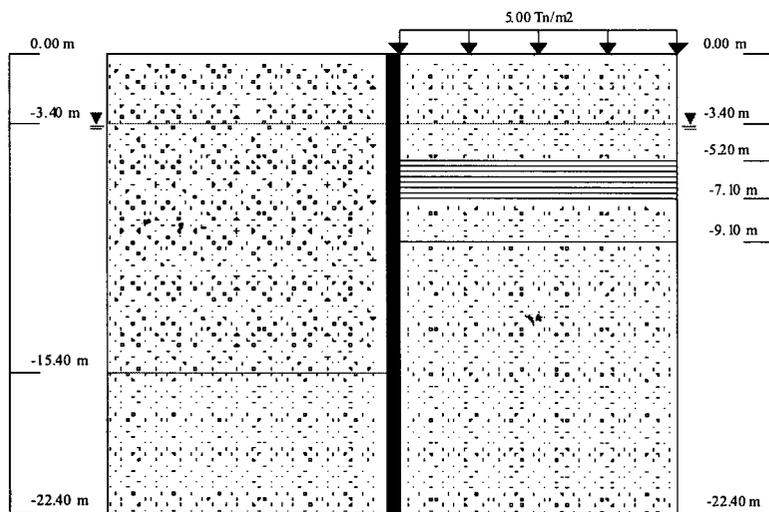


Figura 4. Modelo suelo-tablestaca utilizado.

Tabla 2. Resultados del análisis para el suelo descrito por el sondeo SM-01

Cota (m)	Desplazamiento (mm)	Axial (ton/m)	Cortante (ton/m)	Momento (ton-m/m)	Empuje total (ton/m ²)
0.00	-1.46	0.00	0.18	0.00	1.44
-2.27	-0.86	1.70	0.24	0.48	0.02
-4.53	-0.76	3.40	0.11	0.91	-0.10
-6.80	-1.53	5.10	-0.73	0.41	-0.84
-9.06	-2.58	6.80	0.20	-0.59	0.38
-11.33	-3.15	8.49	0.09	-0.11	-0.14
-13.59	-3.55	10.19	-0.13	-0.24	0.00
-15.86	-3.7	11.89	0.21	-0.19	-0.11
-18.12	-3.67	13.59	0.02	0.03	-0.04
-20.39	-3.65	15.29	-0.01	0.02	0.00
Máximos	-0.70 Cota: -3.78 m	16.80 Cota: -22.40 m	0.29 Cota: 9.31 m	0.95 Cota: 5.29 m	1.44 Cota: 15.40 m
Mínimos	-3.70 Cota: -15.86m	0.00 Cota: 0.00m	-1.18 Cota: -7.30m	-0.66 Cota: -8.56m	-0.96 Cota: 8.35 m

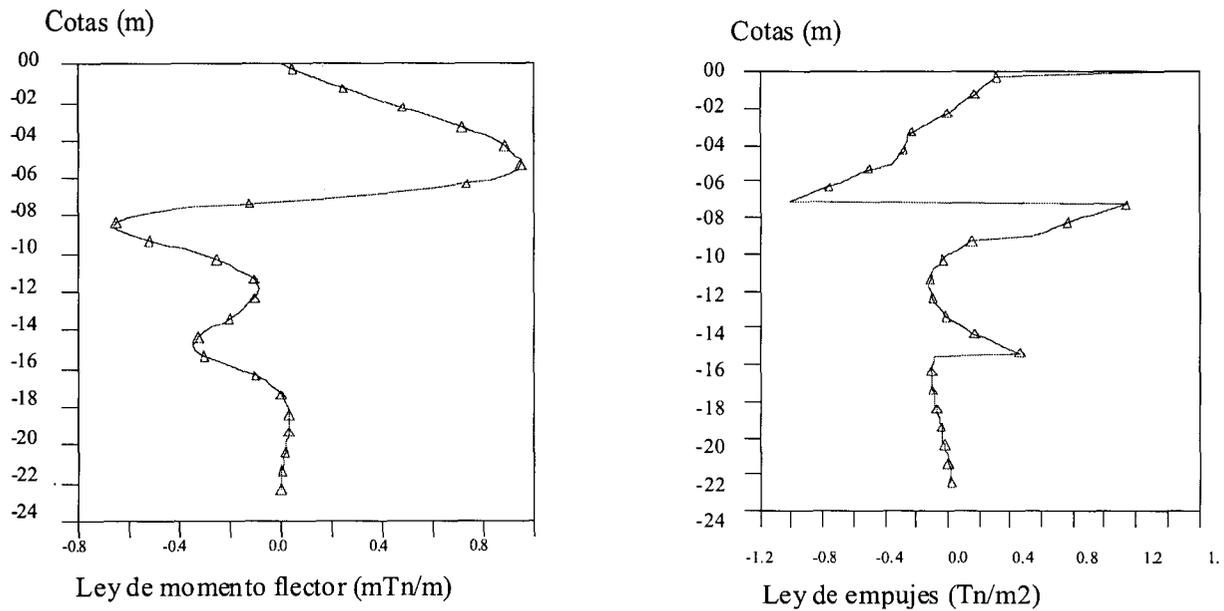


Figura 5. Leyes de Momento flector y Empuje.

3. DISEÑO Y ESPECIFICACIONES

Con los resultados obtenidos del análisis, se propusieron dos soluciones para este problema en particular. Las alternativas consideradas fueron: tablestacas de acero y tablestacas de concreto reforzado.

Para el diseño de las tablestacas de acero se propuso una sección Z de acero. Las dimensiones consideradas aparecen en la Figura 6. Esta sección se eligió debido a que tiene un comportamiento conveniente ante las cargas ejercidas en intradós y extradós. Además presenta una resistencia adecuada ante el fenómeno de corrosión si bien es necesario reemplazarlas cada cierto tiempo.

Ancho (b)	630.0 mm
Peralte (h)	427.0 mm
Espesor del alma (s)	12.2 mm
Area por unidad de longitud	198.0 cm ² /m
Inercia por unidad de longitud	55510 cm ⁴ /m

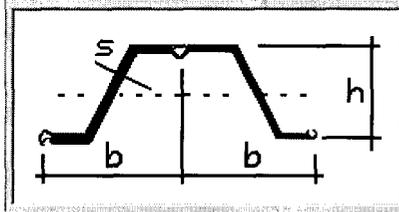


Figura 6. Sección Z de Tablestaca.

Las tablestacas de concreto reforzado se diseñaron según la sección que se muestra en la Figura 7. La resistencia de diseño, f_c , que se consideró fue 250 kg/cm. Se aceptó que el concreto es resistente a los efectos de la corrosión por agua de mar. Esta tablestaca se puede hincar en casi cualquier tipo de suelo incluso en aquellos con presencia de boleos de cierto diámetro (hasta 50 cm). Además este tipo de refuerzo ofrece la ventaja de que se puede construir *in situ* característica que no poseen las tablestacas de acero.

Básicamente el comportamiento estructural de ambos sistemas es parecido, por esta razón este aspecto no se consideró relevante para hacer una toma de decisiones. En consecuencia, los argumentos considerados para elegir entre una y otra tablestaca fueron el costo de los materiales, la fabricación de los elementos y el proceso constructivo.

Las normativas que se consideraron en el diseño fueron la NBE-EA-95 (para el acero estructural), la EHE-99 (para el concreto reforzado), y el RCDF-95. Se optó por utilizar los reglamentos NBEA-95 y EHE99 debido a que se consideró apropiado consultar una normativa en la que se dan lineamientos para el diseño de este tipo de construcciones. Además, el programa

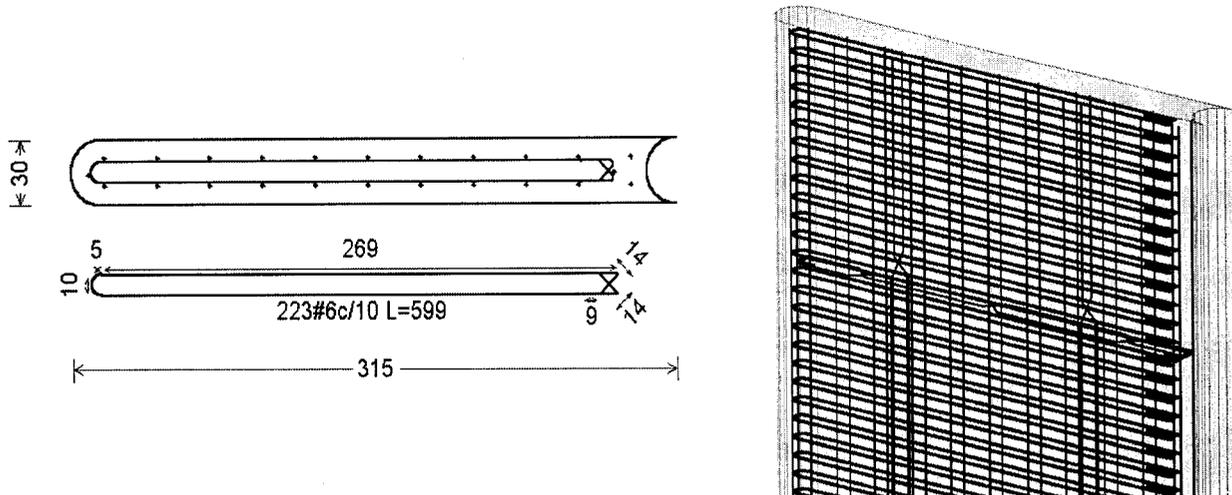


Figura 7. Tablestaca de concreto reforzado.

de cálculo que se utilizó incluye módulos en los que se revisa el diseño mediante estas normas (Cype Ingenieros, 2004).

Por otra parte, se utilizó el RCDF-95 porque contiene indicaciones acerca de los requerimientos necesarios tanto para materiales como para combinaciones de carga adecuadas a nuestro medio. Esta reglamentación, también se considera dentro de los módulos del programa que se utilizó (Cype Ingenieros, 2004).

El uso de estas normativas permitió establecer una comparación entre ellas, de manera tal que se

aprovechen las bondades de estas reglamentaciones y en consecuencia se obtenga un diseño óptimo de la tablestaca.

Para efectos de construcción se seleccionó la tablestaca de concreto reforzado. La sección definitiva fue de 0.30 x 3.00 m (el x b1) con una profundidad (H) de 22.40 m. En la Tabla 3 se muestra el armado de refuerzo definitivo de la tablestaca el cual cumple con todas las revisiones establecidas en ambas normativas. En la Figura 7 se representa la disposición de este armado para una sección tipo de la estructura.

Tabla 3. Disposición de armado de tablestaca

Concepto	Valores	Estado
Cantidad de refuerzo mínimo geométrico horizontal	Mínimo: 0.001 Calculado: 0.00944	Cumple
Cuantía mínima mecánica horizontal por cara	Mínimo: 0.00029 Calculado: 0.00944	Cumple
Separación libre mínima armados horizontales	Mínimo: 2 cm Calculado: 8.1 cm	Cumple
Separación máxima armados horizontales	Máximo: 30 cm Calculado: 10 cm	Cumple
Longitud de anclaje horizontal	Mínimo: 23 cm Calculado: 23 cm	Cumple
Cuantía máxima geométrica de armado vertical total	Máximo: 0.04 Calculado: 0.00283	Cumple
Comprobación a cortante	Máximo: 34.45 ton Calculado: 5.65 ton	Cumple
Comprobación de fisuración	Máximo: 0.3 mm Calculado: 0.14 mm	Cumple

4. PROCESO CONSTRUCTIVO

Una vez que se seleccionó la sección de tablestaca se estableció su proceso de construcción. Este consiste en describir las etapas que se deben desde la fabricación de cada elemento estructural hasta el hincado final de cada uno de estos.

Lo primero que se debe hacer es llevar a cabo el control de calidad de los materiales con que se va a construir la tablestaca (concreto y acero de refuerzo). La prueba de la resistencia a la compresión es una de las pruebas más importantes para verificar la calidad del concreto y es muy utilizada en el diseño de estructuras. Estas pruebas deben realizarse a los 28 días del colado de las piezas. La resistencia a la compresión es afectada fuertemente por la relación agua/cemento, la edad y el curado del concreto,

El transporte y manejo del tablestacado se deberán efectuar con el mayor cuidado posible, debido a la generación de elementos mecánicos que pueden causar el fallo de las piezas si no se toman las precauciones debidas durante estas maniobras,

El izaje de tablestacas debe llevarse a cabo cuando la pieza alcance su resistencia óptima. adoptando las medidas adecuadas para garantizar su integridad durante las etapas de transporte, manejo y colocación. Se tomarán en cuenta las especificaciones de diseño para la sujeción de la tablestaca (Figura 8) y establecer un plan de izaje de esta. Durante estas operaciones deben tener una velocidad constante, y con la cual no pueden salirse de control y, generar rotaciones y movimientos indeseados de la pieza. Tal situación originaría deformación, ranuras, quebraduras y astillado que se deben evitar. La operación debe ejecutarse con precisión y es conveniente utilizar cuerdas para conseguir un mejor posicionamiento de las piezas.

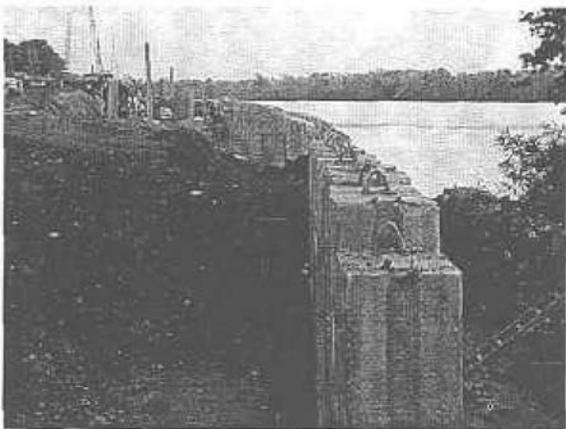


Figura 8. Collarines de izaje.

Las tablestacas deben almacenarse en sitios limpios, bien drenados y protegidos de los efectos de agua. Dentro del almacén deberán estibarse utilizando separadores de madera a manera de protección contra los desperfectos que se puedan presentar por el contacto directo entre ellas.

El tablestacado se hincará por martinete, mediante chorros de agua o combinando ambas técnicas, según resulte más conveniente en función de la presencia de boleos en el subsuelo. Cuando se recurre a los chorros de agua, se requiere como mínimo de dos equipos. El volumen y presión de agua en las boquillas deberá ser tal, que erosione libremente el material adyacente. En el caso de la presencia de boleos en el subsuelo, puede ser necesaria su extracción y la repetición del hincado.

El martinete a utilizar puede ser de gravedad o bien de cualquier tipo de acción que se use normalmente en el hincado de pilotes. Las tablestacas se construirán con un metro adicional de longitud (por ejemplo $22.40 + 1,00 = 23.40$ m), con el fin de que el efecto del impacto durante el hincado sea absorbida de manera adecuada y no disminuya la longitud establecida en el proyecto. También puede optarse por proteger las cabezas de las piezas por medio de accesorios adecuados para evitar su deformación o deterioro por efecto de los golpes.

EL hincado de la tablestaca se realizará hasta alcanzar la penetración o la capacidad de soporte del suelo especificados



Figura 9. Posible desvío por falta de control.

Es de gran importancia que durante el hincado se revise continuamente la precisión del alineamiento y las conexiones. Al mismo tiempo deben examinarse

5. CONCLUSIONES

el alineamiento y nivelación de las piezas para evitar desvíos de nivel y dirección (Figura 9). Después que se instale el tablestacado, las ranuras superiores deben limpiarse de arena, fango o escombros y rellenarse totalmente con un mortero.

El tratamiento de mortero se aplicará también para la corrección de desportilladuras del concreto a causa de la hinca. Debe considerarse la presencia de apuntalamiento temporal en caso de que sea necesario.

Se cortarán los extremos superiores de las tablestacas, de manera que sus cabezas queden alineadas según el perfil definido en los planos. El corte se efectuará con herramienta adecuada para el material de la tablestaca.

Las rutas y áreas de acceso deben vigilarse permanentemente para evitar la presencia de equipos, materiales o desechos que puedan entorpecer el proceso de instalación. Además, existe siempre el peligro de caída de alguna elemento. Deben tomarse todas las precauciones para garantizar la seguridad de los trabajadores.

En el caso del tablestacado para el Muelle A del Puerto de Manzanillo el posicionamiento de los anclajes (para el izaje de los elementos de concreto armado) requirió de la fabricación de un accesorio *ad hoc*. Este accesorio consistió en una serie de collares de izaje.

Para la instalación de los anclajes se utilizó una grúa telescópica, a continuación mediante la grúa se izó cada tablestaca y se colocó dentro de la perforación. A continuación se colocó la plantilla y los anclajes se colgaron de ella para poder moverlos en la perforación.

Se propuso que la colocación de las tablestacas se haga a partir de los extremos del Muelle A hasta encontrarse en el centro del mismo. El motivo por el cual el hincado debe realizarse a partir de los extremos es porque así se controla mejor el posible desvío ocasionado por el hincado. Este proceso se realizara por etapas, y en el orden que se indica en la Figura 10.

Se ha presentado el cálculo estructural de una tablestaca cuya finalidad es mejorar el comportamiento del suelo colindante al muelle de un puerto interno. El modelo utilizado para simular el comportamiento de la tablestaca se basa en suponer un comportamiento mecánico plástico del terreno de forma que se aproxime mejor la realidad física de la interacción entre ambos sistemas. El análisis implica el uso de un método pseudo estático de equilibrio límite en el que deben realizarse una serie de iteraciones hasta obtener la convergencia hacia la solución.

A partir de los resultados del análisis se propone la utilización de tablestacas de concreto reforzado. Esta elección es motivada por el hecho de que las tablestacas de concreto han mostrado deformaciones laterales menos importantes que aquellas construidas de acero. Esto se traduce en un mejor comportamiento del sistema ante la generación potencial de presión de poro durante un evento sísmico (McCullough, 1998). Adicionalmente la existencia de boleo en los diferentes estratos en que se desplantará la estructura justifica la elección de las tablestacas de concreto reforzado.

El diseño propuesto constituye la solución óptima del problema tanto desde el punto de vista estructural como económico y se ajusta a las recomendaciones de diseño establecidas por las normativas española y mexicana. Pese a la dispersión implícita en el comportamiento del suelo y en la variabilidad de los movimientos sísmicos la metodología utilizada proporciona una herramienta adecuada para el cálculo estructural de tablestacas en suelos susceptibles de licuefacción.

El proceso constructivo, es un aspecto importante porque un mal izaje y un hincado defectuoso pueden provocar deformaciones, ranuras, quebraduras y el astillado de las tablestacas.



Figura 10. Disposición de hincado de tablestacas.

6. REFERENCIAS

- Boletín Oficial del Estado R. D. 996/99 (1999), Instrucción de Hormigón Estructural (EHE), Ministerio de Fomento de España.
- Braja, M. Das (2001), Principios de ingeniería de cimentaciones, Thomson Editores.
- Correa Rodríguez, Eduardo (2003), "Estudio de mecánica de suelos para revisión de estructuras y pisos en la zona del muelle Banda A", Reporte interno, LANCO.
- Cype Ingenieros (2002), "Elementos de contención", Manual de usuario, Cype Ingenieros.
- Gaceta Oficial del D. F. (1995), Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de concreto, Departamento del Distrito Federal.
- Méndez Ramírez, Ce Tochtli (2003), "Elección de la solución más adecuada para el reforzamiento del Muelle Banda A del puerto interno San Pedrito", Reporte interno, MISA.
- McCullough, Nason J. (1998), "The seismic vulnerability of sheet pile walls", Thesis for the degree of Master of Science in Civil Engineering, Oregon State University.