

ANÁLISIS DE UN PROCEDIMIENTO PARA ACELERAR LA CONSTRUCCIÓN DE CIMENTACIONES PARA TANQUES DE 500 MBLS

R. Nava Castro **Especialista, Instituto Mexicano Del Petróleo**
E. Galvan García **Especialista, Instituto Mexicano Del Petróleo**

RESUMEN

En la Terminal Marítima de Dos Bocas, Tab., a la fecha se han construido 13 tanques de 500 MBLS de capacidad, pero el incremento de explotación de la Sonda de Campeche también requiere de un incremento de almacenamiento, razón por la cual en dicha terminal se tiene proyectado la construcción de más tanques de la misma capacidad; es por ello que en el presente trabajo se expone un procedimiento que se pretende aplicar para acelerar la construcción de las cimentaciones de dichos tanques en la misma Terminal, esto a través de la aplicación de un sistema que a su vez permite acelerar el proceso de consolidación de los estratos compresibles mediante el uso de bandas permeables actuando como drenes verticales, lo cual por ende, también permite reducir el tiempo de estabilización del suelo. En el documento se presentan los resultados obtenidos utilizando el tratamiento tradicional y el tratamiento con bandas permeables para acelerar el proceso de consolidación. Se describen los factores o efectos que intervienen en el diseño, instalación y operación de las bandas permeables; concluyéndose en una reducción del tiempo de construcción del tanque, lo que refleja un beneficio directo para PEMEX en cuanto a explotación y lo que ello implica, además de la disminución de costos en el movimiento de tierras al reducirse la magnitud de la precarga.

INTRODUCCION

Desde que PEMEX Exploración y Producción inició la explotación petrolera en la Sonda de Campeche, la terminal marítima de almacenamiento y distribución de Dos Bocas, Tabasco, se ha caracterizado por ser la terminal marítima de PEMEX con mayor capacidad de almacenamiento, esto debido a que desde esa fecha se inició la construcción de tanques de 500 MBLS.

Desde el inicio de la construcción de dichos tanques, PEP (en aquel tiempo SPCO) se enfrentó al problema del diseño y construcción de sus cimentaciones, esto debido a la presencia de estratos muy compresibles ubicados a diferentes profundidades y que al actuar sobre estos la carga de los tanques se generaban grandes asentamientos (más de 1 m) ocasionando deformaciones importantes a los tanques. El problema se resolvió mediante la aplicación de una precarga capaz de generar una preconsolidación que mejorara la deformabilidad de dichos estratos. El principal inconveniente del método fue el excesivo tiempo de construcción, esto debido a que, para generar una estabilización del suelo que permitiera un comportamiento estructural adecuado en el deslizamiento de la cúpula flotante y los asentamientos diferenciales radiales permisibles, se requería aplicar la precarga a través de la construcción de un terraplén y mantenerlo en el sitio por periodos de tiempo de hasta más de un año, además del tiempo necesario para la construcción y el retiro del terraplén y la construcción del tanque.

En el presente artículo, se presenta una nueva metodología, la cual ya ha sido probada y aplicada en diferentes países Europeos a otro tipo de estructuras y que posiblemente permita acelerar el proceso de preconsolidación, el método se basa en la inducción de un flujo horizontal del agua contenida en el subsuelo a través de la aplicación de una precarga de la misma forma que en el método tradicional; agua que se busca drenar con mayor eficiencia a través de pequeños conductos verticales y cuyo costo, comparado con el costo de espera en el método tradicional, redundaría en un ahorro de tiempo de más del 50%.

ANÁLISIS DEL PROCESO DE CONSOLIDACION

Un método que se emplea, cuando se requiere acelerar la consolidación de un suelo, es el de colocar una precarga sobre el terreno y permitir la consolidación con el tiempo, otro es instalando drenes verticales dentro del suelo, los cuales facilitan la consolidación del estrato compresible. El primer método se ha usado con bastante éxito, pero presenta el inconveniente de que se requiere demasiado tiempo de aplicación para generar un grado de consolidación adecuado en el suelo, en cambio el uso de drenes verticales prefabricados presenta la ventaja de que se reducen los tiempos de espera para lograr la consolidación requerida en el suelo.

El método empleado para acelerar el proceso de consolidación se basa en la teoría de Hansbo, en el cual se genera un flujo de agua en el suelo en sentido horizontal, o sea presentándose de esta forma un flujo radial alrededor de bandas verticales permeables (Figura 1), reduciendo así, por un lado, la longitud de la trayectoria del agua, y por otro aprovechando la mayor permeabilidad horizontal de los suelos, reduciéndose de esta forma el tiempo de aplicación de la precarga al lograrse una mayor consolidación en menor tiempo.

El análisis del fenómeno de consolidación que ocurre se puede considerar de tipo tridimensional y para su análisis se puede dividir en tres etapas las cuales son:

- a) Consolidación vertical
- b) Consolidación horizontal
- c) Consolidación total

Es posible considerar los dos primeros tomando en cuenta que, la definición de consolidación primaria dice que es un proceso de expulsión de agua de los poros del estrato de suelo.

a). Consolidación Vertical

Tanto en el proceso consolidación utilizando el método tradicional o acelerándola a través de drenes verticales prefabricados, se presenta flujo vertical en el estrato de suelo y el grado de consolidación dentro de la masa de suelo se determina por medio de la teoría o modelo de Terzaghi, o sea:

$$U_v = (100\%) \left\{ 1 - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{8}{(2n+1)^2 p^2} \exp \left(\frac{(2n+1)^2 p T_v}{4} \right) \right\} \dots\dots\dots (1)$$

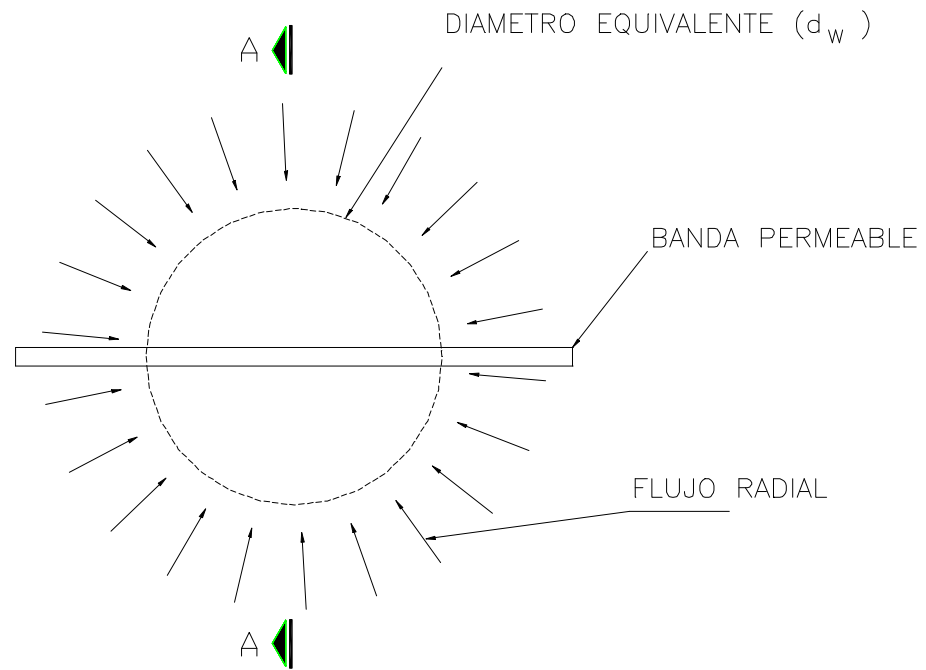
donde U_v es el grado de consolidación vertical y T_v ($T_v = \left(\frac{C_v t}{H^2} \right)$) es el factor tiempo, ambos valores son obtenidos a través de los resultados de la prueba de consolidación tradicional

b). Consolidación Horizontal.

Aplicando las modificaciones que realiza Hansbo a la teoría de Barron, en cuanto a las dimensiones físicas y características de las bandas permeables, el promedio del grado de consolidación horizontal, esta dada por:

$$U_h = 1 - \exp \left(\frac{-8 T_h}{F} \right) \dots\dots\dots (2)$$

Donde F expresa la adición del efecto debido al espaciamiento de las bandas permeables, F_n , el efecto smear, F_s , y la resistencia al flujo dentro de la banda permeable, F_r . Cada uno de ellos se explica a continuación.



VISTA EN PLANTA DEL FLUJO RADIAL

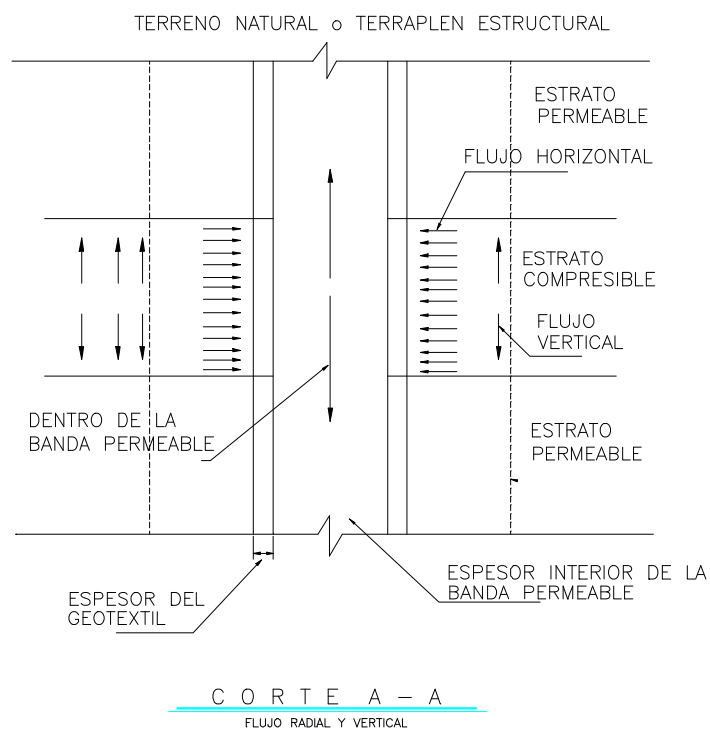


Figura 1. Flujo Radial y Vertical Dentro del Estrato de Suelo en el perímetro de las bandas permeables

➤ **Factor de Espaciamiento:**

El arreglo de las bandas permeables está en función de su separación y su diseño, que usualmente es arreglo cuadrado o triangular, tal como se esquematiza en la figura 2. En dicha figura se puede observar que la trayectoria del flujo radial está en función del área o del diámetro de influencia del dren (De), es decir, que el tiempo para alcanzar un determinado grado de consolidación está en función del diámetro de influencia. Esta variable es controlable puesto que está en función del espaciamiento y el diseño de las bandas permeables. El diámetro de influencia se establece a través de:

$De = 1.13S$ (Diseño cuadrado)

(3)

$De = 1.05S$ (Diseño triangular)

Donde S es la separación entre las bandas permeables.

El diseño cuadrado tiene la ventaja de facilitar la disposición y control. Por su parte el diseño triangular produce una consolidación más uniforme en sus zonas de influencia.

El factor de espaciamiento queda definido por:

$$Fn = \ln \left(\frac{De}{d_w} \right) - \frac{3}{4} \dots \dots \dots (4)$$

Donde d_w es el diámetro equivalente del dren.

➤ **Efecto Smear**

Este efecto se refiere a la alteración que sufre el suelo cuando se instalan las bandas permeables, tomando en cuenta las siguientes consideraciones:

- a) Métodos de Instalación.
- b) Equipo de Instalación.

- a). Métodos de Instalación.

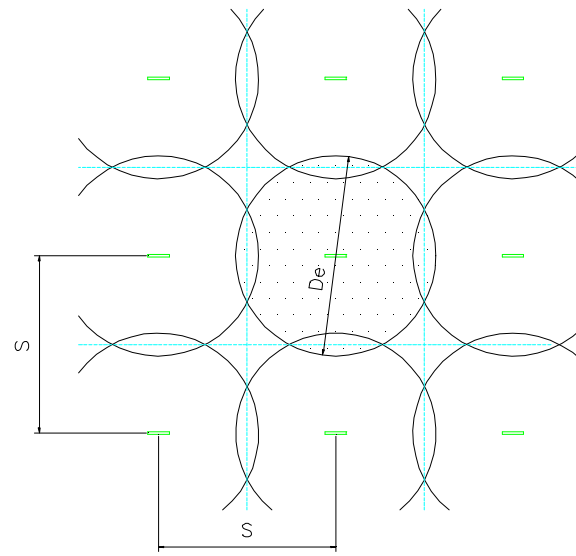
Los métodos empleados para la instalación son el estático y dinámico, pero los equipos más usados tienen bastantes rasgos en común, algunos de los cuales pueden influenciar directamente en el diseño de las bandas permeables.

- b). Equipos de Instalación.

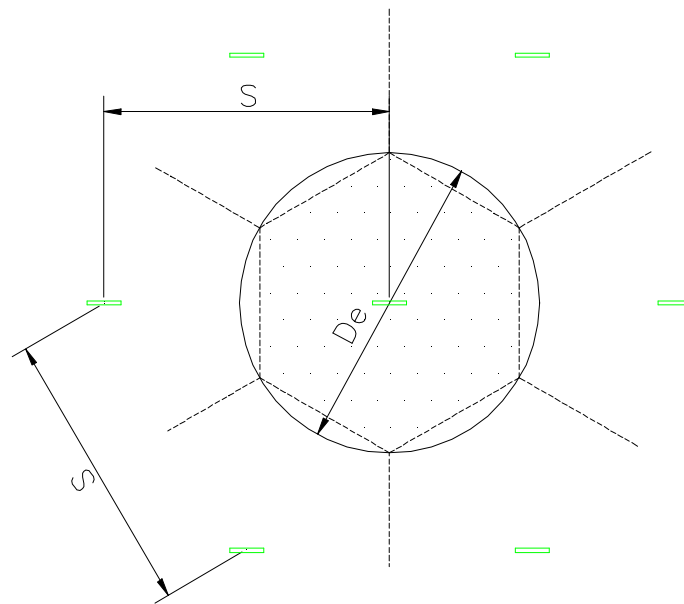
Las bandas permeables, alojadas dentro de un equipo protector es penetrado dentro del suelo por medio de fuerza estática o dinámica, durante la instalación esto crea espacios alrededor de la banda permeable por el desplazamiento del suelo.

La alteración depende más de la forma y tamaño del equipo de instalación, de la estructura del suelo y del procedimiento de instalación, esta alteración deber ser la mínima posible en el suelo, de aquí que se asuma alrededor de la banda permeable una zona de alteración con una reducida permeabilidad por medio de la relación:

$$Fs = \left[\frac{k_h}{k_s} - 1 \right] \ln \left(\frac{d_s}{d_w} \right) \dots \dots \dots (5)$$



DISEÑO CUADRADO



DISEÑO TRIANGULAR

Figura 2. Arreglo de las bandas permeables.

Donde d_s es el diámetro de la zona de alteración alrededor de la banda permeable y k_h es el coeficiente de permeabilidad en la dirección horizontal en la zona de alteración.

➤ **Factor por el efecto de resistencia al flujo dentro de la banda permeable.**

Este factor está enfocado a la disminución de la capacidad de descarga o drenaje de la banda permeable, que varía considerablemente dependiendo de:

- a) Tipo de banda permeable
- b) Presión lateral
- c) Deformaciones Verticales.
- d) Sedimentos finos.

a). El tipo de banda permeable está en función de la permeabilidad del material con que está fabricada, aunque la mayoría de ellos (para este análisis geotextil) presentan un buen drenaje.

b). La presión lateral influye en la compresión que ejerce hacia las bandas permeables provocando una reducción del área de sección transversal de los canales.

c). Las deformaciones verticales influyen en el plegamiento de los canales de las bandas permeables, lo que reduce su capacidad de drenaje.

d). Los sedimentos finos influyen en forma de partículas arrastradas que producen taponamiento de los canales de flujo.

Puesto que lo anterior limita la capacidad de drenaje, Hansbo desarrolló un factor de resistencia de la banda permeable al flujo vertical, en el cual se asume además que es válida la ley de Darcy a lo largo del eje vertical de la banda permeable y está dada por:

$$Fr = pz(L - z) \frac{K_h}{q_w} \dots\dots\dots (6)$$

donde z es la mitad del estrato a drenar, L la longitud del estrato a drenar, K_h es el coeficiente de permeabilidad horizontal en el suelo alterado y q_w la capacidad de descarga o drenaje de la banda permeable con gradiente hidráulico 1.

Los parámetros que influyen en todos estos factores se muestran en la figura 3.

Para seleccionar el tipo de banda permeable para un proyecto en particular se debe de contar con los siguientes parámetro: diámetro equivalente, capacidad de descarga o drenaje, condiciones del filtro y permeabilidad, fuerza del material, flexibilidad y durabilidad.

Se debe de garantizar una buena permeabilidad, pero al mismo tiempo se debe evitar que las partículas pequeñas pasen a través del filtro. Para aplicaciones críticas y condiciones severas:

$$K_{\text{geotextil}} \geq 10 K_{\text{suelo}}$$

Para situaciones menos críticas y menos severas

$$K_{\text{geotextil}} = K_{\text{suelo}}$$

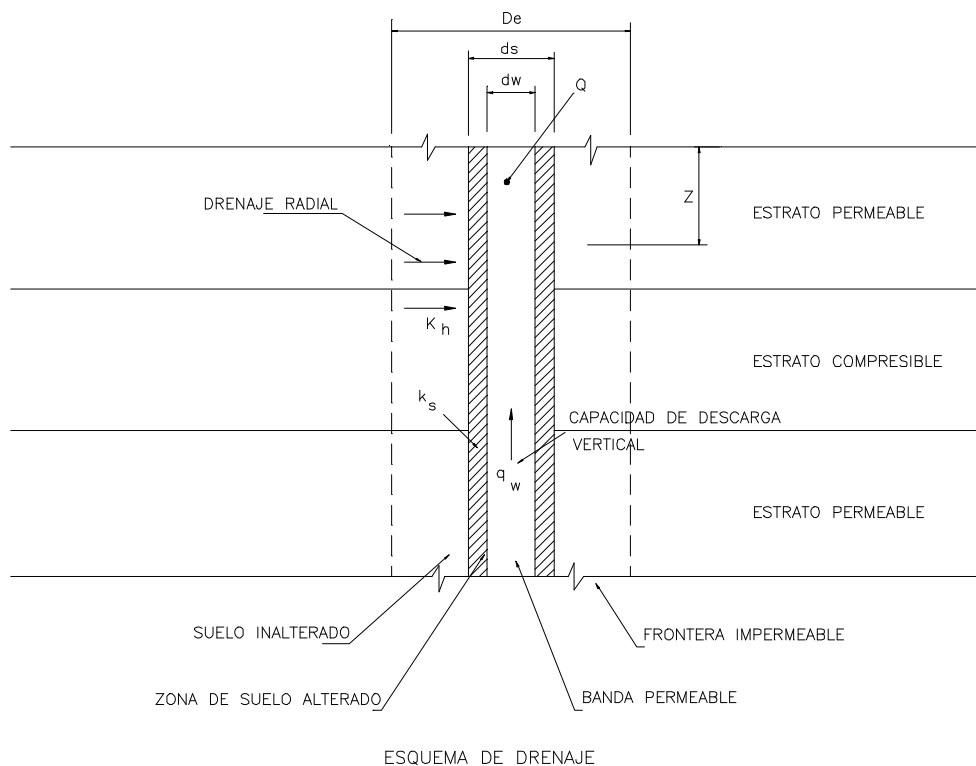


Figura 3. Esquema de flujo en la zona de influencia en la Banda Permeable.

c). Consolidación Total

El grado de consolidación alcanzado se determina en base a la teoría de Nabor Carrillo, la cual considera flujo horizontal y vertical a través de la siguiente formula:

$$U(\%) = 1 - (1 - U_h)(1 - U_v) \dots \dots \dots (7)$$

donde:

U = Porcentaje de consolidación total

U_h = Porcentaje de consolidación horizontal debida al drenaje horizontal.

U_v = Porcentaje de consolidación vertical debida al drenaje vertical.

BANDAS PERMEABLES

El material que constituye a la banda permeable (figura 4) utilizada en el análisis particular del suelo de Dos Bocas es el geotextil y tiene las siguientes características:

- a) Físicas
 - 1). Drenaje 100 %
 - 2). Filtro 100 % polipropileno
- b) Dimensiones
 - 1). Espesor 10 mm.
 - 2). Ancho 10 cm.
- c) Técnicas
 - 1). Capacidad de descarga o drenaje 150 cm³/año.

El proceso de instalación se hace por hincado a presión o percusión como se muestra en la figura 5.

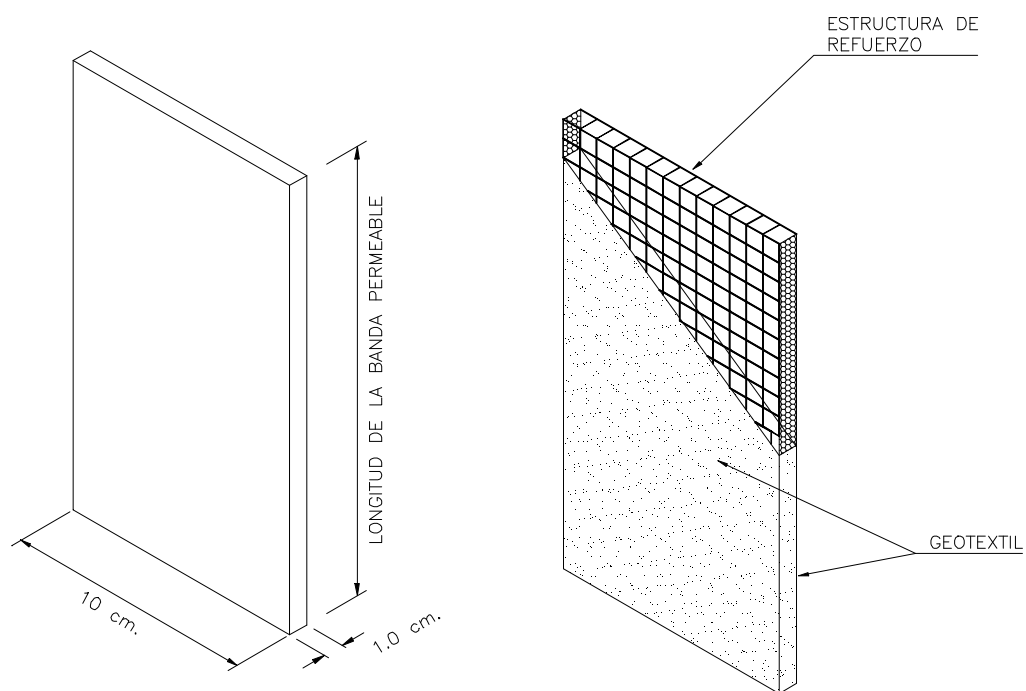


Figura 4. Esquematización de la banda permeable

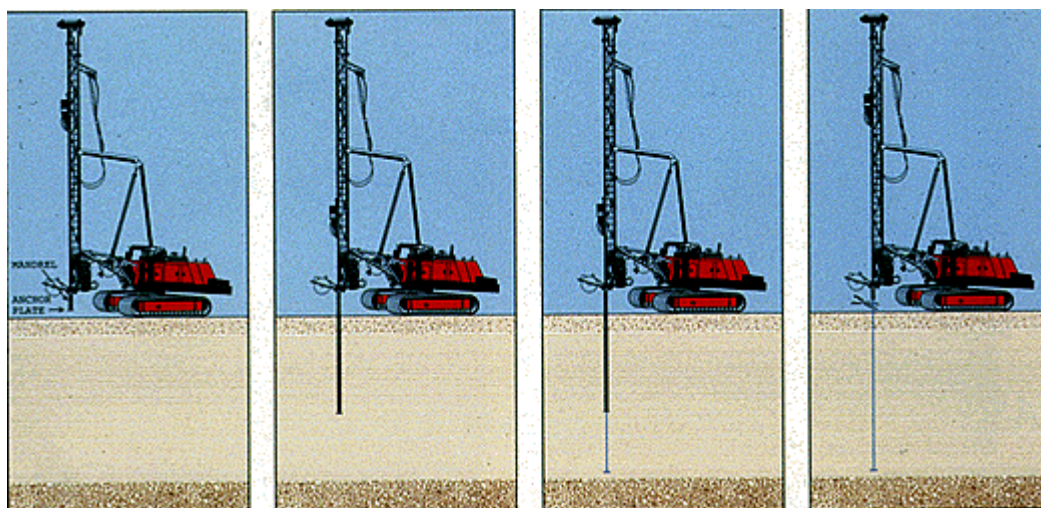


Figura 5. Instalación de las bandas permeables.

APLICACION

La aplicación se llevó a cabo en el diseño de la estabilización de los sitios donde se construirán los tanques TV-5019 y TV-5020, en la Terminal Marítima de dos Bocas, Tabasco.

Para la aplicación de la teoría se realizaron los siguientes análisis:

- Tiempo de aplicación de la precarga y grado de consolidación obtenido.
- Tiempo de aplicación de la precarga sobre el terreno acondicionado con las bandas permeables.
- Tiempo de aplicación de una precarga menor sobre el terreno acondicionado con las bandas permeables.
- Tiempo de consolidación utilizando los arreglos cuadrado y triangular.
- Tiempo de consolidación utilizando una separación entre drenes de 1.50, 2.00 y 2.50 metros.

A continuación se describen los análisis efectuados.

- Tiempo de Aplicación de la Precarga y Grado de Consolidación Obtenido.

El porcentaje de consolidación de cada análisis se evaluó a partir del asentamiento esperado en el tanque a los 20 años de operación, obteniendo un asentamiento aproximado de 106.05 cm., hundimiento que de ocurrir al tanque produciría asentamientos diametrales fuera de lo permitido por las normas de Pemex. En la figura 6 se presenta la curva asentamiento tiempo para esta condición.

En el diseño de los tanques existentes se aplicó la magnitud de una precarga de 1.5 veces la carga que transmitirá el tanque de almacenamiento, que para los tanques aquí considerados es de 40.05 T/m^2 .

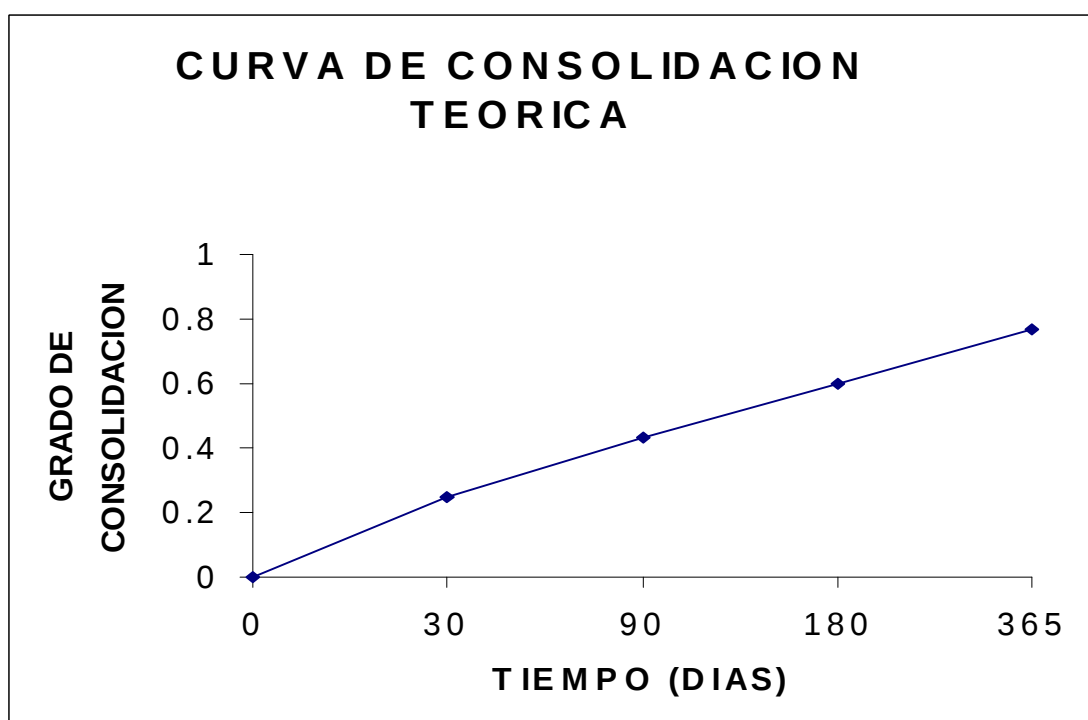
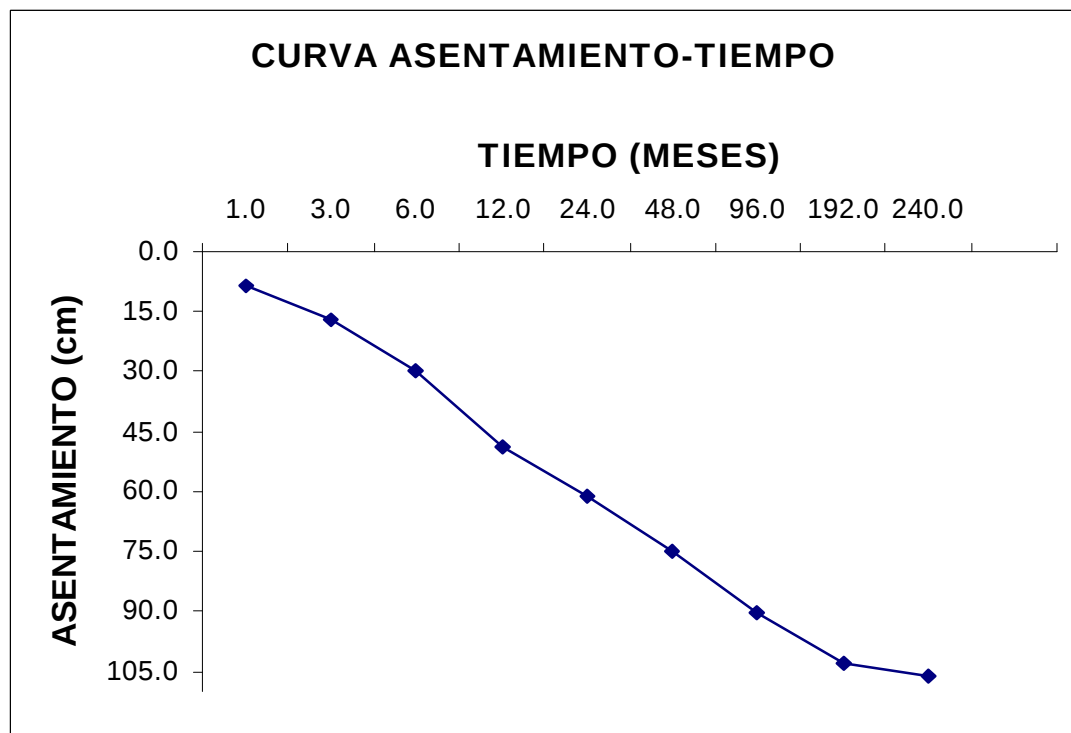


Figura 6. Curva Asentamiento-Tiempo generada por la aplicación única del tanque

Figura 7. Curva de Teórica de Consolidación, utilizando precarga de 40.05 T/m².



De la gráfica de la figura 7 se puede observar que para lograr el 76 % de consolidación, mediante la precarga se requieren 365 días.

b). Tiempo de aplicación de la precarga sobre el terreno acondicionado con las bandas permeables.

A continuación se analizó el proceso de consolidación aplicando la misma precarga de 40.05 T/m² pero considerando la adecuación del terreno con bandas permeables espaciadas a cada 2.50 m. y aplicando la teoría o método de Hansbo y se encontró que para alcanzar el 95 % de grado de consolidación se requieren 90 días, tal como se puede observar en la figura 8.

c). Tiempo de aplicación de una precarga menor sobre el terreno acondicionado con las bandas permeables.

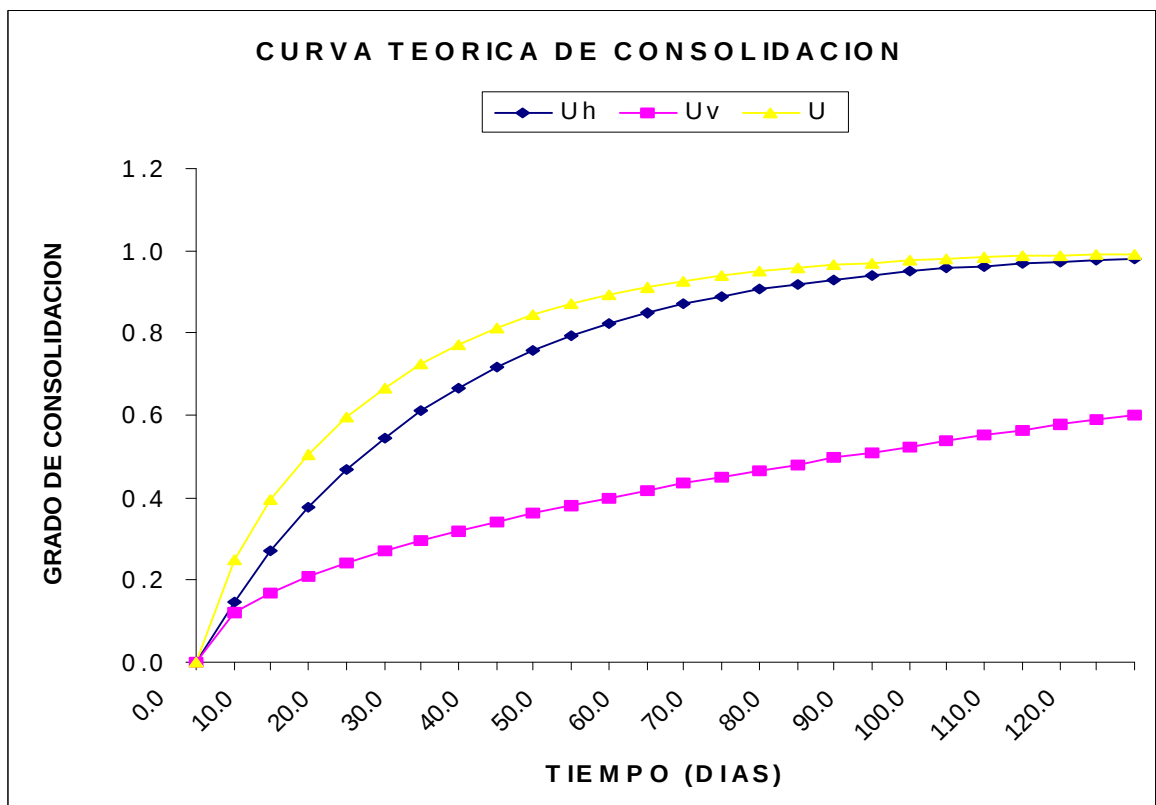
En el siguiente análisis, se hizo una reducción de la magnitud de la precarga a 30.0 T/m², se aplicó la misma teoría y se conservaron todas las condiciones del caso anterior, y se encontró que para alcanzar el 95 % de grado de consolidación, se requieren 195 días, tal como se observa en la figura 9.

d). Tiempo de consolidación utilizando los arreglos cuadrado y triangular.

En el siguiente análisis se consideró ya el arreglo en planta que podían tener la localización de las bandas, ya fuera cuadrado o triangular; así se encontró que el tiempo requerido era mayor en el diseño cuadrado que en el triangular, se eligió el arreglo triangular debido a que éste provee una consolidación más uniforme.

e). Tiempo de consolidación utilizando una separación entre drenes de 1.50, 2.00 y 2.50 metros.

El siguiente análisis consistió en modificar la separación de las bandas permeables en el arreglo triangular a 1.50, 2.00 y 2.50 m, de donde se encontró que la máxima separación permitirá establecer un mejor control de la deformación y resistencia del suelo, esto debido a que aparentemente el tiempo de



consolidación en las dos separaciones menores es muy corto y podría propiciar un descontrol de la deformación del suelo.

Figura 8. Curva Teórica de Consolidación, utilizando precarga de 40.05 T/m² y bandas permeables con una separación de 2.50 m.

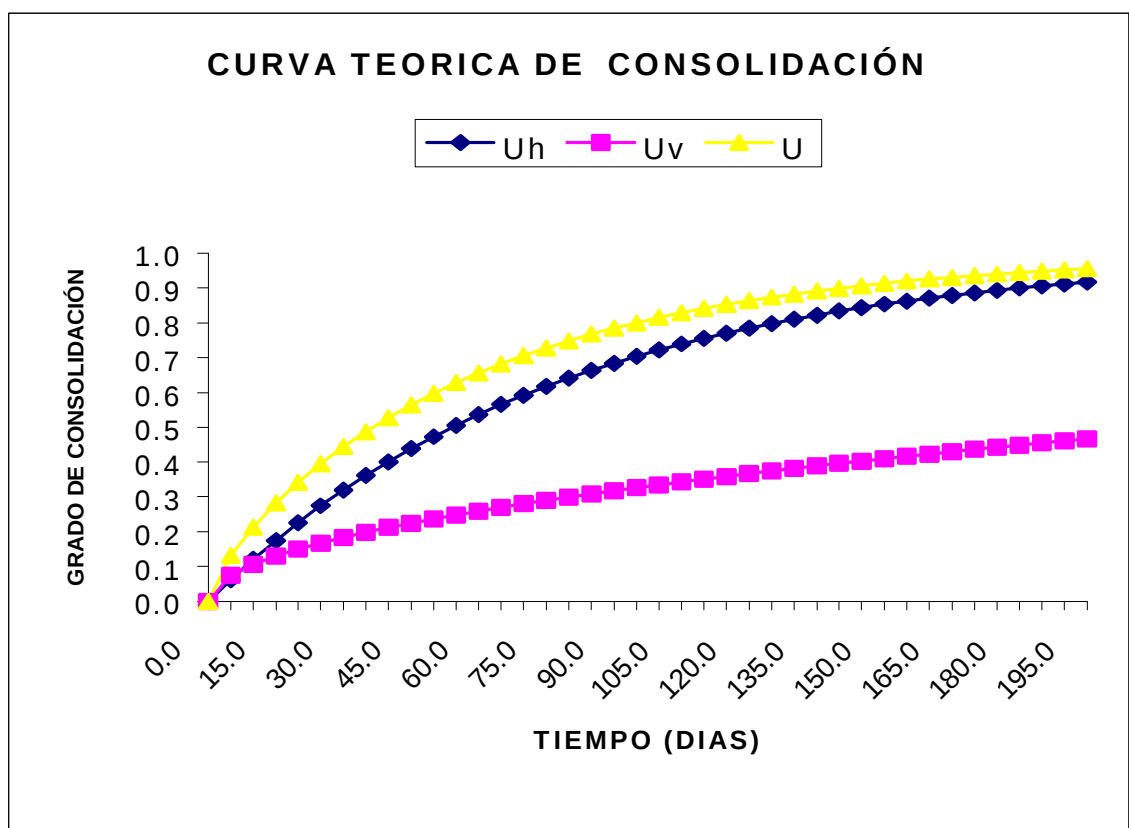


Figura 9. Curva Teórica de Consolidación, utilizando precarga de 30.00 T/m² y bandas permeables con una separación de 2.50 m.

En la siguiente tabla se resumen los resultados obtenidos en las diferentes condiciones analizadas, donde se puede observar que la última condición presentada en la tabla es la más recomendada.

PRECARGA O CARGA (T/m ²)	PORCENTAJE DE CONSOLIDACION	TIEMPO DE ESTABILIZACION	ESPACIAMIENTO ENTRE BANDAS (m)	ARREGLO ENTRE BANDAS
40.05	76	365	-----	-----
40.05	95	90	2.50	Triangular
30.00	95	30	1.50	Triangular
30.00	95	125	2.00	Triangular
30.00	95	195	2.50	Triangular

Tabla 1. Resultados obtenidos bajo las diferentes condiciones de carga y utilizando bandas permeables.

CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos en la aplicación del método de Hansbo para reducir el tiempo de tratamiento del terreno de apoyo para futuros tanques en la terminal de referencia, se presentan las siguientes conclusiones:

- El método permite reducir el tiempo de estabilización de los estratos compresibles hasta en un 50 % o más.
- Igualmente el método permite reducir la magnitud y por ende la altura de la precarga que se requiere aplicar para generar la consolidación de los estratos mencionados.
- Por lo anterior el método también permite: reducir el tiempo de construcción de la precarga; reducir el volumen de material acarreado, tanto para la construcción como para el retiro, de la precarga y por lo tanto su costo.
- También el método permite alcanzar un mayor grado de consolidación o estabilización del suelo, lo cual redundará en un mejor comportamiento de la obra, tanto del tanque como de las instalaciones auxiliares; esto en cuanto a hundimientos totales y diferenciales.
- Finalmente el método en general permite reducir el tiempo de construcción de este tipo de tanques.

CONTRIBUCION TECNICA

La técnica empleada para acelerar la consolidación en los suelos blandos de la Terminal Marítima de dos Bocas, Tabasco, permitió reducir el tiempo de aplicación de la precarga y como consecuencia mejorar en un menor tiempo las características mecánicas del suelo; lográndose un porcentaje de consolidación favorable del 95% por el flujo radial alrededor de las bandas permeable. Debido a la aplicación de este procedimiento es posible cubrir las necesidades de almacenamiento de hidrocarburos requeridas por Pemex.

El empleo de esta técnica es un inicio, para implementar un procedimiento más eficaz y económico que el tradicionalmente usado; aunque dista de ser un método establecido,

La aplicación de esta metodología fue para acelerar la construcción de la cimentación de dos tanques que se construirán en dicha Terminal; los resultados que se obtengan servirán para corroborar o ajustar la teoría utilizada para análisis posteriores.

NOMENCLATURA

$C_v \Rightarrow$ Coeficiente vertical de consolidación.

$D_e \Rightarrow$ Diámetro de influencia de la banda permeable.

$d_s \Rightarrow$ Diámetro de la zona de alteración (smear)

$d_w \Rightarrow$ Diámetro equivalente de la banda permeable.

$F \Rightarrow$ Factor que expresa la adición de los efectos F_n , F_s y F_r .

$F_n \Rightarrow$ Factor de espaciamiento.

$F_r \Rightarrow$ Factor de resistencia al drenaje dentro de la banda permeable.

$F_s \Rightarrow$ Factor del efecto smear (Alteración del suelo).

$H \Rightarrow$ Altura del estrato a consolidar.

$K \Rightarrow$ Coeficiente de permeabilidad.

$K_h \Rightarrow$ Coeficiente horizontal de permeabilidad

$K_s \Rightarrow$ Coeficiente horizontal de permeabilidad en la zona de alteración.

$L \Rightarrow$ Longitud de la banda permeable.

$q_w \Rightarrow$ Capacidad de descarga o drenaje de la banda permeable.

$S \Rightarrow$ Espaciamiento entre las bandas permeables.

$t \Rightarrow$ Tiempo

$T_h \Rightarrow$ Factor tiempo horizontal.

$T_v \Rightarrow$ Factor tiempo Vertical.

$U \Rightarrow$ Grado de consolidación debido al efecto combinado de drenaje horizontal y vertical.

$U_h \Rightarrow$ Promedio del grado de consolidación debido al drenaje horizontal.

$U_v \Rightarrow$ Promedio del grado de consolidación debido al drenaje vertical.

$z \Rightarrow$ Distancia de drenaje al final de la banda permeable.

BIBLIOGRAFIA

1. Bergado, D. T. Murkherjee., Alfaro. M.C. & A.S. Balasubramanian (1993), Prediction of Vertical-Band-Drain Performance by the Finite-Element Method. Geotextiles and geomembranes, 12, 567-586.
2. Barron, R. A. (1948). Consolidation of fine-grained soils using vertical drains. Trans. ASCE, 116 (Paper 2346), 718-54.
3. Bergado, D.T. Asakami, H., Alfaro, M.C. Balasubramanian, A. S. (1991). Smear effects of vertical drains on soft Bangkok clay, J. Geotech. Div., ASCE, 117, 1509-30.
4. Hnasbo, S. (1979). Consolidation of clay by band-shaped prefabricated drains. Ground Engineering, 12 (5), 16-25.
5. Jamiolkowsky, M. & Lancellota, R. (1981). Consolidation of vertical drains: uncertainties involved in the prediction of settlement rates. Panel Discussion en 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm.
6. Bergado, D. T., Alfaro M.C. Balasubramanian, A.S. (1993). Improvent of Soft Clay Using vertical Drains. Geotextiles and Geomembranes, 12, 615-663.
7. Carrillo, N. (1942), Simple two-and three-dimensional cases in the theory of consolidation of soils. J. Math. Phys., 21(1), 1-5.
8. Choa, V., Karunaratne, G. P., Ramaswamy, D. D., Vijaratnam, A. & Lee, S. L. (1981). Drain performance in Changi marine clay. In Proceedings of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm.

9. Hansbo, S. (1981). Consolidation of fine-grained soils by prefabricated drains. In Proceedings of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm (1981)
10. Holtz, R.D. (1987). Preloading with prefabricated vertical strip drain. Geotextiles and Geomembranes, 6, 109-131.
11. Nicholls, R.A. (1981). Deep vertical installation. Ground Engineering, 17(4), 31-35.
12. Zeng, G. X., Xioe, K.H. (1989). In Proceeding of the 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Brazil, pp. 1435-