

# Mejoramiento de suelos por medio del sistema de aceleración de la consolidación por vacío con membrana (Menard Vacuum), en el marco del NAIM

Luis David JUÁREZ VELÁZQUEZ<sup>a</sup> y Alfredo CIRIÓN ARANA<sup>b,1</sup>

<sup>a</sup>Ingeniero de proyecto - MENARD México

<sup>b</sup>Gerente de Ingeniería - MENARD México

**Resumen.** En este artículo se presentan el sistema de mejoramiento de suelos de consolidación atmosférica o de vacío para suelos arcillosos creado por Menard a finales de los años 80's, se sientan las bases teóricas de su funcionamiento, y se describen los principios de aplicación constructiva. Como parte de los trabajos de construcción del Nuevo Aeropuerto Internacional de México (NAIM), Menard participó en la construcción, instrumentación, operación, monitoreo e interpretación de resultados de un Panel de Prueba en el que se aplicó el Sistema de Consolidación Acelerada con Vacío que implica el uso de una membrana hermética con la que se logra aplicar una depresión uniforme en el terreno y que, por ende, se provoca una eficiente consolidación de los suelos arcillosos. En este artículo se describen la geometría del panel de prueba, las generalidades de su construcción, el tipo de suelo existente en el sitio y los resultados de su mejoramiento, obtenidos del monitoreo de la instrumentación rigurosa de todo el panel, antes, durante y después de la aplicación del vacío producido bajo la membrana hermética y transmitido a la masa de suelo. Se presentan, finalmente, las conclusiones y experiencias obtenidas de la realización de esta prueba en las arcillas del ex lago de Texcoco.

**Palabras Clave.** Arcilla, cohesivo, consolidación acelerada, consolidación atmosférica, consolidación con vacío, DVP, Drenes Verticales Prefabricados, impermeable, mejoramiento de suelos, membrana, MENARD, NAIM, NAICM, panel de prueba, precarga, Prefabricated Vertical Drains, PVD, suelos blandos, suelos saturados, terraplén, Texcoco, vacío, vacuum.

## 1. Introducción

### 1.1. Aceleración de la consolidación como técnica de mejoramiento de suelos

Una forma de asegurar que el suelo sobre el que se va a desplantar un proyecto se comporte, a corto y largo plazo, dentro de criterios establecidos de deformabilidad y resistencia, es la aplicación de técnicas que mejoren sus características propias. Una técnica de mejoramiento de suelos de este tipo, que es utilizada de forma recurrente en suelos cohesivos arcillosos, consiste en generar su consolidación de forma anticipada

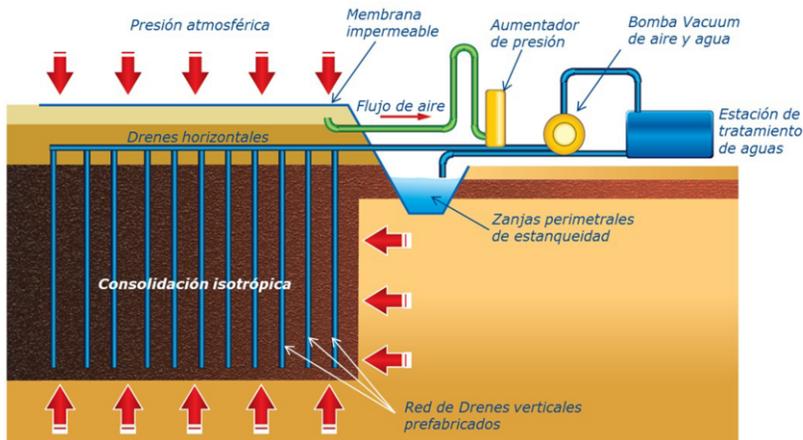
---

<sup>1</sup> Alfredo Ciri3n, Gerente de Ingenier3a en Menard M3xico, Mejoramiento de Suelos Menard M3xico - Ciudad de M3xico; E-mail: cirion.alfredo@menard.com.mx

con la ayuda de la instalación masiva de una serie de Drenes Verticales Prefabricados (DVP), y una precarga provocada con el peso de un terraplén temporal instalado en la superficie hecho de material de gran densidad (el peso normalmente deberá ser mayor que la descarga de servicio que ocurrirá durante la operación del proyecto), con el objetivo de generar todos los asentamientos posibles del suelo antes de comenzar a construir el proyecto en un corto tiempo, y que, durante la vida útil del mismo, tan solo se presenten pequeños asentamientos residuales controlados que cumplan con los requerimientos de funcionalidad del proyecto. La precarga se instala en la magnitud y tiempo requerido para obtener un porcentaje elevado de consolidación (generalmente entre 80 y 95%) y después se retira para dar paso a la construcción del proyecto.

*1.2. Mejoramiento de suelos mediante la técnica de consolidación acelerada por vacío con membrana - MENARD VACUUM*

El procedimiento convencional de la técnica de mejoramiento por consolidación acelerada consiste en la colocación del terraplén de precarga superficial, el cual genera un incremento en los esfuerzos totales ( $\Delta\sigma_T$ ) en la masa de suelo, que implica, en primera instancia, el aumento de la presión de poro intersticial ( $\Delta U$ ), y luego en la disipación de ésta a través del tiempo ( $t$ ) – de forma acelerada gracias a los drenes verticales -, logrando así el incremento en los esfuerzos efectivos ( $\Delta\sigma'$ ) del suelo y dando como resultado la consolidación del mismo. En el caso de la consolidación acelerada con vacío, al suelo arcilloso que se mantiene dentro de un recinto impermeable se le reduce directamente la presión intersticial existente, al inducirse un vacío o depresión (presión negativa) dentro del medio cerrado ( $-\Delta U$ ), generando de forma paralela y en la misma magnitud, el incremento en los esfuerzos efectivos ( $\Delta\sigma'$ ) que producen la consolidación del suelo. En este caso, los esfuerzos totales iniciales no se modifican ( $\Delta\sigma_T=0$ ), la precarga que actúa en el suelo es proporcional a la presión atmosférica existente en el sitio, y ésta se aplica de forma isotrópica (misma magnitud en todas direcciones) y al mismo tiempo en toda la masa de suelo, lo cual redundará en una mayor eficiencia en el proceso de consolidación en comparación con el sistema de precarga convencional con terraplén que produce distribuciones irregulares de presiones [1]. La Figura 1 muestra una representación esquemática del sistema.



**Figura 1.** Representación esquemática del sistema de consolidación por vacío MENARD VACUUM.

## 2. Descripción del panel de prueba del sistema de consolidación acelerada por vacío con membrana MENARD VACUUM para el NAIM

### 2.1. Antecedentes y estratigrafía del sitio

Como parte de la serie de pruebas de técnicas de mejoramiento de suelos que se realizaron en el marco de la construcción del Nuevo Aeropuerto Internacional de México (NAIM), se realizó, en una zona estratégica, al sur de la zona del edificio terminal, un panel de prueba de la técnica de aceleración de la consolidación por vacío con membrana, MENARD VACUUM, con el fin de conocer el comportamiento del suelo arcilloso del Ex Lago de Texcoco al ser inducido a este tratamiento.

La estratigrafía del sitio de la prueba es la típica encontrada en el Valle de México, consistente en una Costra Superficial (CS) de 1.0 m de espesor, formada por arcilla desecada, seguida de la Serie Arcillosa Superior (SAS), hasta 30 metros de profundidad, que es extremadamente compresible y con grandes contenidos de agua ( $w_{m\acute{a}x} = 300\%$ ,  $N_{SPT} = 0$ ,  $E_{ced} < 1.50 \text{ MPa}$ ,  $3.0 \leq e_0 \leq 13$ ). Este estrato es el que se mejoró con el sistema de consolidación por vacío. Subyaciendo a la SAS se encuentra una Capa Dura (CD) formada por material limo arenoso de consistencia media a dura y de hasta 2.0 m de espesor y, finalmente, por debajo se extiende la Serie Arcillosa Inferior (SAI), formada nuevamente de material blando que persiste hasta más allá de los 45 m de profundidad. (Ver Figura 2 a continuación)

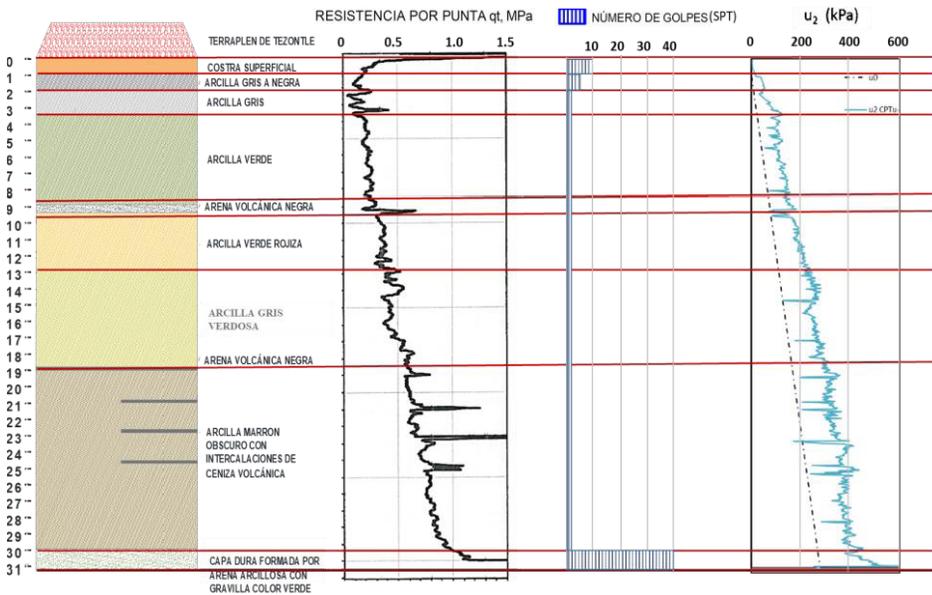


Figura 2. Perfil estratigráfico típico del Ex lago de Texcoco, sondeos CPTu y SPT.

### 2.2. Descripción del panel de prueba

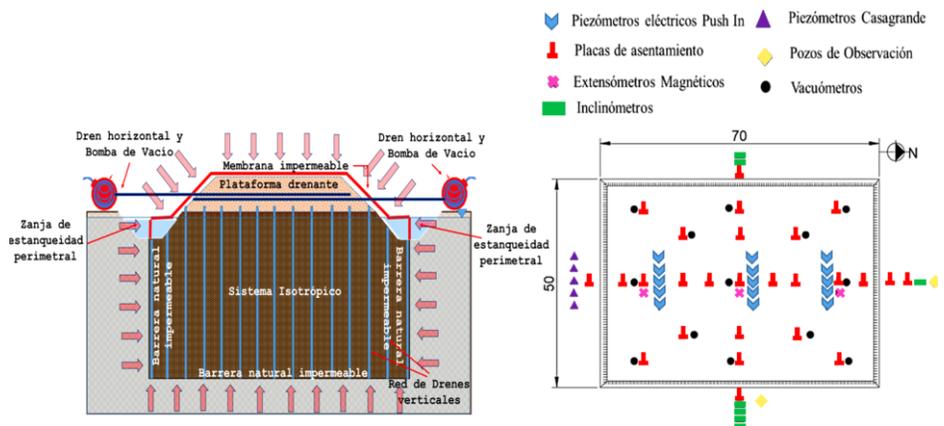
El panel de prueba consistió en un terraplén hecho de tezontle (piedra volcánica porosa y de bajo peso volumétrico) de 50 m x 70 m de dimensión en planta y de 2.0 m de altura total. La instalación de los DVP se realizó en una malla regular de arreglo

triangular (1.2 m x 1.2 m). Los drenes atravesaron la SAS hasta los 27.0 m de profundidad (sin tocar el estrato permeable - CD - subyacente a 30 m de profundidad). Los drenes horizontales se instalaron dentro del terraplén de tezontle, sin realizar conexión mecánica con los DVP, generando una malla regular que atravesó el panel de lado a lado y conectándose directamente a dos bombas de vacío instaladas en los extremos norte y sur del panel. Una zanja de estanqueidad recorría el perímetro del panel y una membrana impermeable que se ‘ancló’ en esta zanja y que recubría toda la superficie, sirvieron para aislar al suelo de la atmósfera. Es importante mencionar que la presión atmosférica en el Valle de México (a 2440 m.s.n.m. aprox.) es de 78 kPa, lo cual representa el límite máximo de presión de vacío en el sistema.

Se colocaron una cantidad importante de instrumentos geotécnicos diferentes para monitorear las diferentes etapas de la prueba y verificar el comportamiento del suelo (ver Figura 3) [2].

De forma general, la prueba consistió en las siguientes fases:

1. Construcción del terraplén e instalación del sistema de vacío
2. Operación del sistema de vacío durante 6 meses
3. Apagado de bombas de vacío sin abrir las válvulas de salida, con el fin de dejar ‘atrapado’ el vacío dentro del recinto, seguir el proceso de consolidación sin operación de bombas y verificar cómo variaba la depresión bajo la membrana durante 15 días.
4. Apertura de válvulas para dejar escapar el vacío y finalizar el proceso de consolidación.



**Figura 3.** Izquierda: Figura esquemática que muestra la distribución de las presiones atmosféricas isotrópicas que genera el sistema de vacío con membrana del panel de prueba. Derecha: Figura en planta que muestra el número y ubicación de los instrumentos de medición utilizados para el monitoreo geotécnico.

### 3. Resultados de la prueba [3]

#### 3.1. Carga de vacío

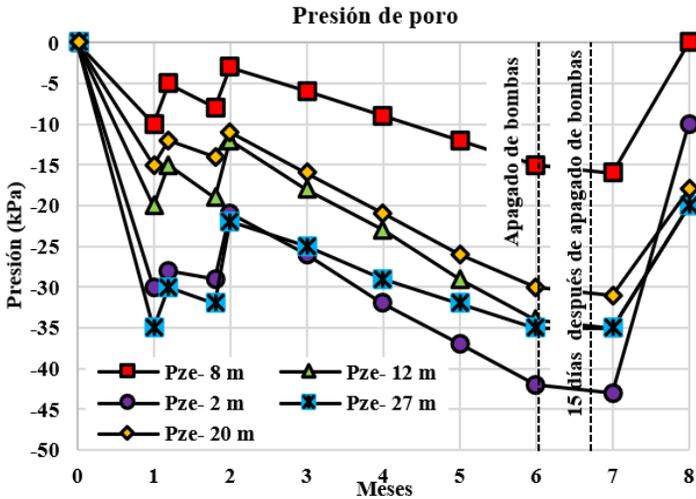
La presión atmosférica actuante en el terreno durante toda la prueba se monitoreó mediante sensores de vacío que estaban instalados bajo la membrana impermeable y distribuidos en toda la superficie del panel. En las primeras semanas de operación de las bombas de vacío, se midieron presiones de hasta 72 kPa de los 78 kPa disponibles

en la atmósfera (eficiencia de más del 92% del sistema). En las semanas subsiguientes, conforme avanzó la prueba, los valores medidos tendieron disminuir, estabilizándose hacia una carga homogénea en toda la plataforma de alrededor de 63 kPa.

### 3.2. Presiones de poro

Los piezómetros eléctricos (tipo ‘Push In’) permitieron monitorear la presión intersticial en la zona de tratamiento, notificándose la disminución de ésta con el tiempo durante la operación de las bombas de vacío. Esta disminución,  $-\Delta U$ , representa el incremento de los esfuerzos efectivos ( $\Delta\sigma'$ ) del suelo en la misma magnitud.

Es de notarse que, en la etapa de apagado de bombas, manteniendo cerradas las válvulas de salida de los drenes horizontales (conservación de la presión de vacío durante 15 días después del mes 6), la presión de poro intersticial continuó disminuyendo, siendo esto una muestra de que el sistema instalado era impermeable, que era capaz de mantener atrapado el vacío bajo la membrana, y de que se continuaba consolidando el suelo. Ver Figura 4.



**Figura 4.** Historia de presiones de poro intersticiales (diferencia del valor medido con respecto al inicial) en sensores ubicados a diferentes profundidades.

### 3.3. Asentamientos

El asentamiento superficial máximo alcanzado fue de 2.95 m en 6 meses (incluyendo el efecto de los 15 días sin operación de bombas y con las válvulas cerradas). El asentamiento diferencial máximo medido en superficie, entre el centro del panel y una esquina de éste, fue de tan solo 63 cm. Este resultado demuestra que la carga de vacío aplica una presión homogénea en la masa de suelo. Ver Figura 5.

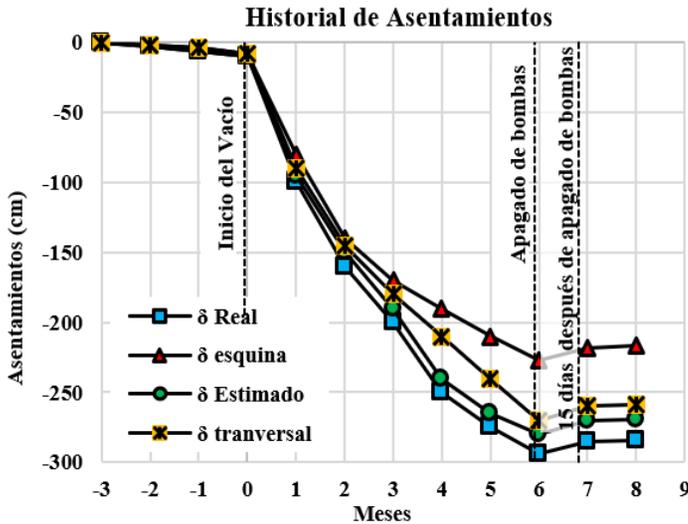


Figura 5. Historia de asentamientos superficiales.

### 3.4. Desplazamientos laterales

Los inclinómetros instalados en la periferia del panel registraron los movimientos laterales ocurridos en todas las etapas de la prueba. Fue evidente que, al instalar el terraplén de tezontle para conformar la plataforma de trabajo (P.Tr.) y más tarde el relleno final de compensación (R.C.) hasta 2.0 m de altura, los inclinómetros registraron movimientos laterales con sentido hacia afuera del panel, lo cual es el comportamiento natural esperado para un suelo cargado con un terraplén en su superficie. Por el contrario, durante la aplicación del vacío, las deformaciones registradas fueron con sentido hacia adentro del panel, lo que deja de manifiesto que la carga de vacío actúa de tal forma que contrae la masa de suelo en todas direcciones.

### 3.5. Variación de las presiones intersticiales y grados de consolidación

Conocer el grado de consolidación de la arcilla tratada es fundamental para saber qué tanto ha sido preparado el suelo para soportar cargas futuras de largo plazo (valor efectivo de precarga). La carga que se aplicó a la arcilla durante el tiempo que duró la prueba, corresponde al peso propio del terraplén de tezontle, más la presión atmosférica del sitio que actuó bajo la membrana gracias a la aplicación del vacío. La magnitud de esta última carga es un dato registrado a través de los vacuómetros instalados y el peso del terraplén se obtiene con la medición del peso volumétrico del tezontle instalado ( $P.V.= 13 \text{ kN/m}^3$ ); por otro lado, durante el proceso constructivo del panel y la operación del sistema de vacío, hubo un crecimiento real en el esfuerzo efectivo en la arcilla ( $\Delta\sigma'$ ), el cual corresponde a su vez al decremento del exceso de la presión de poro ( $-\Delta U$ ) en todas las etapas constructivas y de operación del vacío. Este último dato, se conoce con la lectura de los piezómetros instalados.

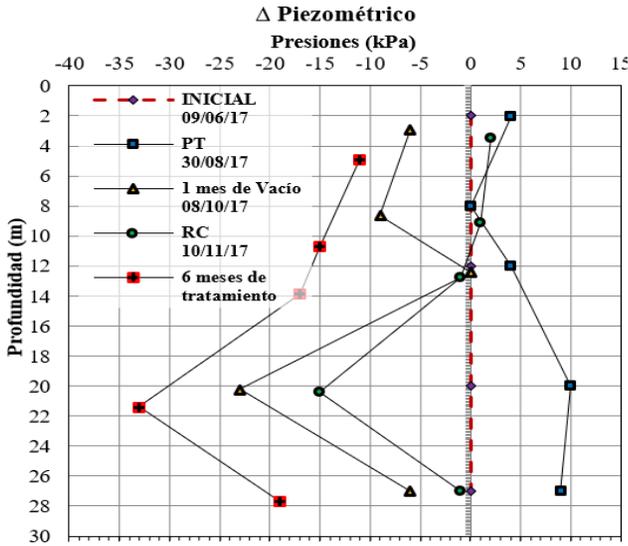


Figura 6. Presiones intersticiales medidas en las diferentes etapas del tratamiento (PT = Plataforma de Trabajo; RC = Relleno de Compensación).

En la Figura 6 se observan los valores de presión intersticial registrados a diferentes profundidades y a diferentes etapas de la prueba. Una forma de estimar entonces el grado de consolidación alcanzado en la arcilla ( $U$  (%)) para el tiempo de la prueba es a través del cálculo del cociente  $-\Delta U / (\Delta\sigma_{total})$  alcanzado con la carga total real aplicada.

Tabla 1. Grado de Consolidación ( $U$ %) y magnitud de Precarga aplicada obtenidos a partir de la piezometría.

Tiempo (meses)	Vacío (kPa)	Terraplén (kPa)	$\Delta\sigma_{total}$ (kPa)	Asentamiento (cm)	$U$ (%)	Precarga (kPa)
6	63	27.4	90.4	294	46.33 *	41.88

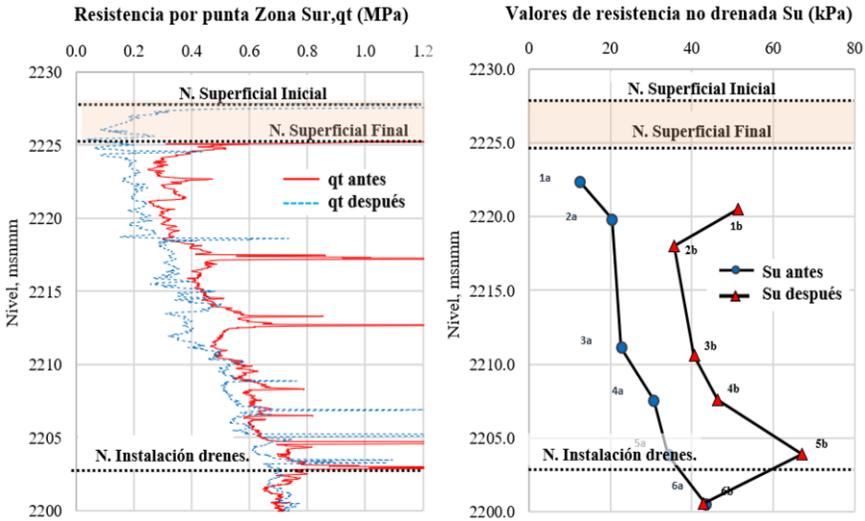
(\*) Promedio de todos los piezómetros medidos

#### 4. Propiedades del suelo antes y después del tratamiento

Se realizaron sondeos de exploración geotécnica y pruebas de laboratorio de algunas muestras de suelo obtenidas antes y después de la prueba, con el fin de conocer las condiciones iniciales del suelo y verificar el mejoramiento de sus propiedades generado con el sistema de consolidación con vacío Menard Vacuum.

##### 4.1. Sondeos de cono (CPTu) y pruebas de Veleta

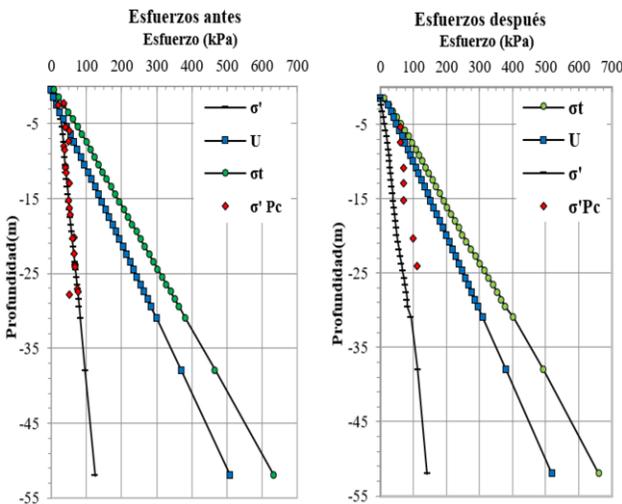
La Figura 7 muestra la comparación de los registros de los sondeos CPTu realizados. Como puede observarse, en toda la profundidad del tratamiento se presentan incrementos en la resistencia a la penetración por punta del cono ( $q_t$ ) de hasta un 200% con respecto a la resistencia inicial. Por otro lado, con las pruebas de veleta es posible estimar el cambio en las resistencias no drenadas,  $S_u$ , y comparar los valores obtenidos de este parámetro al aplicar el tratamiento.



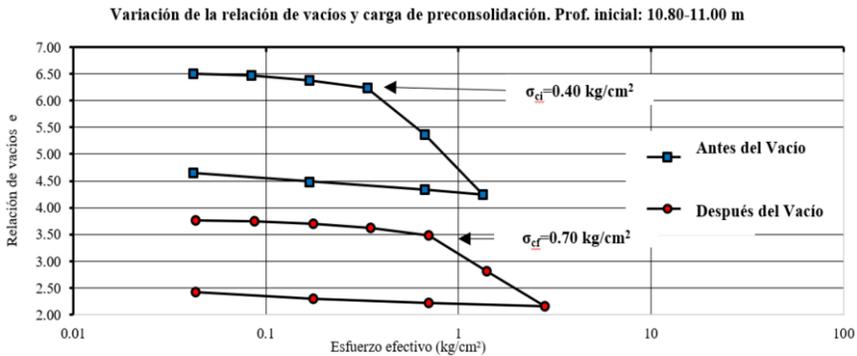
**Figura 7.** Comparación de la resistencia a la penetración por punta ( $q_t$  - CPTU) y resistencia no drenada antes y después del tratamiento con MENARD VACUUM.

4.2. *Pruebas de consolidación*

Las curvas de compresibilidad construidas a partir de las pruebas de consolidación realizadas a muestras de suelo extraídas en las mismas profundidades antes y después de la prueba, evidencian que la carga atmosférica genera una disminución importante de la relación de vacíos ( $e$ ) de la arcilla, y que sus cargas de pre-consolidación ( $P_c$ ) tuvieron un evidente crecimiento en toda la profundidad del tratamiento. También se comprueba que los coeficientes de consolidación vertical ( $C_v$ ) disminuyen debido a la reducción de la permeabilidad del suelo que ocurre al reducirse también su relación de vacíos original. Ver Figuras 8 y 9.



**Figura 8.** Comparación de los diagramas de esfuerzos antes y después del tratamiento con MENARD VACUUM.



**Figura 9.** Comparación de dos curvas de compresibilidad obtenidas a la misma profundidad equivalente, antes y después del tratamiento con MENARD VACUUM.

## 5. Conclusiones

El sistema de vacío con membrana, Menard Vacuum, utiliza la presión atmosférica existente en un sitio para precargar un suelo arcilloso saturado con el fin de anticipar deformaciones superficiales de largo plazo activando su proceso de consolidación y preparando al terreno para recibir las cargas de servicio del proyecto [4].

En el panel de prueba realizado en Texcoco, las presiones de vacío alcanzadas debajo de la membrana variaron entre 70 kPa al inicio de la prueba (92 % de eficiencia del sistema), y 60 kPa al finalizar los seis meses de aplicación del vacío. El asentamiento total máximo alcanzado antes del apagado de las bombas de vacío fue 2.90 m, medido en el centro del panel, mientras que el más pequeño fue 2.31 m en una de las esquinas, esto nos da una razón del asentamiento más pequeño al máximo de 0.78, lo cual representa un valor bastante grande en comparación con lo que se obtendría con una precarga clásica o un bombeo, demostrando que la carga aplicada es isotrópica dentro del recinto cerrado. Terminado el periodo de operación del sistema, se decidió apagar las bombas, pero mantener cerradas las válvulas de salida de agua y aire durante 15 días con el fin de observar cómo era la disipación de la depresión existente dentro del sistema hermético. Bajo esta condición, se observó que el vacío se mantuvo relativamente estable y que el suelo continuó su proceso de consolidación aun sin consumo de energía eléctrica, logrando así aumentar el asentamiento total a 2.95 m.

Debido a que el fenómeno de consolidación produce cambios en las propiedades intrínsecas de la arcilla, se obtuvo una reducción evidente en la relación de vacíos, el contenido de agua, la permeabilidad y el coeficiente de consolidación; mientras que se obtuvieron aumentos en los valores de resistencia al esfuerzo cortante, módulos de rigidez a la deformación, pesos volumétricos y en las cargas de pre-consolidación. Según los datos obtenidos, al término del tratamiento, el suelo es capaz ahora de soportar cargas uniformes de más de 40 kPa con asentamientos residuales limitados.

En cuanto a los aspectos constructivos, cabe mencionar que los drenes horizontales no poseen una conexión mecánica directa uno a uno con los drenes verticales, sino que la conexión entre estos drenes se realiza mediante el estrato drenante que se coloca en la parte superior, lo cual permite libertad de movimiento en todos los componentes sin riesgo de desconexiones. El conjunto hermético creado con la membrana ofrece la ventaja de poder hacer una distribución real del vacío en el suelo.

El panel de prueba demuestra que la consolidación por vacío con membrana (Menard Vacuum) es una técnica que produce un mejoramiento global de las arcillas blandas saturadas, que tiene amplias ventajas constructivas y económicas, y que puede utilizarse en áreas extensas sin necesidad de pantallas impermeables.

## **Referencias**

- [1] Chatte Rémi, Cirión Alfredo., Sistema de consolidación acelerada con la aplicación de vacío (Menard Vacuum). Generalidades y caso histórico. Simposio Inter. Cimentaciones Profundas., noviembre, 2017
- [2] Juárez Luis., Comportamiento del suelo arcilloso del Ex Lago de Texcoco al aplicarle un mejoramiento con el método de consolidación acelerada por vacío con membrana (MENARD VACUUM) en un panel de prueba para el NAICM. Tesis de Licenciatura, UNAM., marzo, 2018
- [3] Grupo Aeroportuario de la Ciudad de México S.A. de C.V Resultados obtenidos en la operación del sistema de consolidación acelerada por vacío con membrana (Menard Vacuum) en un panel de prueba realizado para el Nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (NAICM – NAIM). Reporte Final, NAICM., mayo 2018.
- [4] Páginas de internet de Menard: [www.menard.com.mx](http://www.menard.com.mx); [www.menard-group.com](http://www.menard-group.com)