



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

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 NAI CM.

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Civil

P R E S E N T A

Luis David Juárez Velázquez

DIRECTOR(A) DE TESIS

Mtro. Juan Luis Umaña Romero



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	2
1.1. GENERALIDADES	3
1.2. OBJETIVOS.....	4
1.3. ALCANCES	4
2. NUEVO AEROPUERTO INTERNACIONAL DE LA CIUDAD DE MÉXICO.....	6
2.1. PROYECTO NAICM.....	7
2.2. CARACTERÍSTICAS DEL SUELO DEL EX LAGO DE TEXCOCO.....	10
2.2.1. Historia geológica.....	10
2.2.2. Estratigrafía y propiedades	12
3. MEJORAMIENTO DE SUELOS ARCILLOSOS SATURADOS.....	17
3.1. TEORÍA DE CONSOLIDACIÓN	17
3.2. ANALOGÍA DE TERZAGHI (JUÁREZ, 2014).....	21
3.3. MÉTODOS CONVENCIONALES DE MEJORAMIENTO DE SUELOS ARCILLOSOS.....	23
3.3.1. Precarga convencional.....	23
3.3.2. Precarga con drenes verticales	25
3.4. CONSOLIDACIÓN ACELERADA POR VACÍO CON MEMBRANA.....	27
3.4.1. Introducción y fundamentos de la técnica.....	27
3.4.2. Análisis y principios teóricos	28
3.4.3. Analogía Menard.....	30
4. PANEL DE PRUEBA APLICANDO UN MEJORAMIENTO CON EL MÉTODO DE CONSOLIDACIÓN ACELERADA POR VACÍO CON MEMBRANA (MENARD-VACUUM) EN EL EX LAGO DE TEXCOCO PARA EL NAICM	36
4.1. PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO	38
4.2. EXPLORACIÓN GEOTÉCNICA	42
4.3. INSTRUMENTACIÓN GEOTÉCNICA	45
5. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL SUELO CON BASE AL MONITOREO DE LA INSTRUMENTACIÓN GEOTÉCNICA	49
5.1. MONITOREO DE DEPRESIONES	49
5.2. EXTRACCIÓN DE AGUA.....	52
5.3. PIEZÓMETROS ELÉCTRICOS PUSH IN	54
5.4. PLACAS DE ASENTAMIENTO	56
5.5. EXTENSÓMETROS MAGNÉTICOS	61
5.6. INCLINÓMETROS	66
5.7. POZOS DE OBSERVACIÓN Y PIEZÓMETROS CASAGRANDE.....	71
5.8. CELDAS DE PRESIÓN.....	74
6. CÁLCULO DE ASENTAMIENTOS Y GRADO DE CONSOLIDACIÓN AJUSTANDO EL MODELO GEOTÉCNICO CON BASE EN EL ANÁLISIS DEL MONITOREO Y A LAS PRUEBAS DE LABORATORIO	76
6.1. MODELO DE CÁLCULO.....	76
6.2. PRUEBAS DE LABORATORIO Y OBTENCIÓN DE LAS PROPIEDADES	84

6.2.1.	Determinación de la carga de preconsolidación, índice de compresibilidad e índice de abultamiento	89
6.2.2.	Determinación del coeficiente de consolidación	92
6.3.	CALCULO DE ASENTAMIENTOS EN DIVERSAS CONDICIONES Y POR ETAPAS CONSTRUCTIVAS.....	96
6.3.1.	Asentamientos estimado considerando una precarga convencional (sin PVD's) proporcional a la carga de vacío.....	97
6.3.2.	Asentamientos estimado considerando la influencia de los drenes verticales y la aplicación del vacío con membrana pero sin provocar un remoldeo en la arcilla	100
6.3.3.	Asentamiento estimado considerando la aplicación del vacío y la afectación por el remoldeo al instalar los drenes verticales (PVD's)	103
6.4.	AJUSTE DEL MODELO GEOTÉCNICO CON BASE A LOS RESULTADOS DE LA INSTRUMENTACIÓN	107
6.5.	GRADO DE CONSOLIDACIÓN	112
6.5.1.	OBTENCIÓN DEL GRADO DE CONSOLIDACIÓN A PARTIR DE LA INSTRUMENTACIÓN.	112
7.	CONCLUSIONES.....	119
8.	APORTACIONES Y RECOMENDACIONES PARA BENEFICIO DE LA TECNICA Y EL PROYECTO DEL NAICM.....	122
9.	REFERENCIAS	126

Resumen

El proyecto más grande de México (El Nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México), se lleva cabo en una de las zonas geotécnicas más complicadas del mundo, El Ex Lago de Texcoco. Es por ello que se requiere aplicar técnicas de cimentación y mejoramiento de suelos de alto nivel tecnológico. Para esto, se necesita realizar pruebas en el sitio de diversas técnicas con el fin de elegir aquella que cumpla con las expectativas técnicas y de solución a los problemas de asentamientos y facilite el proceso constructivo del conjunto aeroportuario.

Es por eso que por primera vez en toda América Latina, se realiza un panel de prueba aplicando el método de aceleración de la consolidación por vacío con membrana (Menard Vacuum). Y así conocer el comportamiento del suelo arcilloso del Ex Lago de Texcoco al ser sometido a dicha técnica.

En el presente trabajo se analiza e interpreta el comportamiento del suelo con base a la instrumentación geotécnica instalada en el panel de prueba, con el fin de dar a conocer el funcionamiento del sistema Menard Vacuum en un suelo tan característico.

Abstract

The bigger project in Mexico (the New International Airport of Mexico City), takes place in one of the most complicated geotechnical areas in the world, the Ex Lake of Texcoco. That is why it is required to apply techniques of foundation and improvement of soils of high technological level. For this, it is necessary to perform on-site tests of various techniques in order to choose the one that meets the technical expectations and solution to the settlement problems and facilitate the construction process of the airport complex.

That is why for the first time in all of America, a test panel is made applying the acceleration method of vacuum consolidation with membrane (Menard Vacuum). And so know the behavior of the clay soil of the Ex Lake of Texcoco to be subjected to this technique.

In the present work, the behavior of the soil is analyzed and interpreted based on the geotechnical instrumentation installed in the test panel, in order to make known the functioning of the Menard Vacuum system in such a characteristic soil

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

El aumento de la población, el crecimiento de industrias y la alta demanda de sistemas de comunicación y transporte han llevado al ingeniero civil a buscar soluciones que satisfagan estas necesidades sociales por medio de infraestructura. Las obras civiles que se construyen hoy en día, exigen retos cada vez mayores para ejecución, ya que se tendrán que desplantar en sitios con características geológicas y geotécnicas, consideradas de riesgo; como son los terrenos extensos constituidos por las arcillas saturadas de alta compresibilidad. Este tipo de suelos conlleva a tener asentamientos importantes provocados por el proceso de consolidación, generando asentamientos diferenciales a las estructuras, cuyas magnitudes podrían no cumplir con los límites de servicio que exige el reglamento de construcción.

Los ingenieros geotecnistas, para disminuir las deformaciones de estos suelos finos saturados han ideado y ejecutado diversos métodos de tratamiento o mejoramiento de suelos arcillosos, con el fin de acelerar el proceso de consolidación y así tener asentamientos residuales mínimos, los cuales no afecten a las estructuras desplantadas.

Los métodos más comunes para el mejoramiento de suelos arcillosos son la precarga convencional y la precarga con drenes verticales, dichos sistemas consisten en el mismo criterio, el cual es generar un exceso de presión de poro. Pero la eficiencia es diferente ya que los drenes permiten disipar la presión de poro con mayor velocidad. Más adelante, en el presente trabajo, se mostrarán las bases teóricas de ambos métodos.

Sin embargo Jean-Marie Cognon desarrolló un sistema de aceleración del proceso de consolidación generando en el suelo un vacío. Dicha técnica ha sido aplicada en diferentes zonas de Europa y Asia desde el año de 1988, en plataformas de prueba de $1\ 000\ m^2$ en Francia hasta superficies de $296\ 000\ m^2$ en Corea del Sur en el año de 2003 y la más reciente en 2012 fue tratada una zona de $30\ 000\ m^2$ en Hamburgo; teniendo así, más de 35 obras donde se ha aplicado esta técnica de mejoramiento. Sin embargo, es en el año 2017 cuando se realiza dicho método por primera vez en América y en las arcillas más deformables y particulares a nivel mundial, Las arcillas del ex lago de Texcoco, México. Con el fin de proponer un sistema de mejoramiento de suelo para el proyecto más importante del país y uno de los más grandes del mundo, El Nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (NAICM).

Con base a estudios realizados y de acuerdo a los sondeos de exploración, ensayos de campo y laboratorio realizados en el Ex Lago de Texcoco, se decidió aplicar una prueba de mejoramiento utilizando la técnica de Aceleración de la consolidación por vacío con membrana (Menard Vacuum). Instalando instrumentación que permita conocer el comportamiento del suelo a través del tiempo antes durante y después del tratamiento.

A continuación se muestran y comentan los capítulos que conforman esta tesis, con el fin de conocer los aspectos generales.

En el capítulo II se describe a grandes rasgos el proyecto del Nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, sus dimensiones y la infraestructura proyectada, así como sus ubicación y planificación. Además se habla del Grupo Aeroportuario de la Ciudad de México (GACM) quien lleva a cabo la administración de proyecto.

De igual manera se muestra la historia geológica, estratigrafía y las condiciones hidrológicas, las cuales nos permiten dar una introducción al tipo de suelo y complejidad para realizar proyectos civiles en dicha zona.

El capítulo III presenta la teoría de consolidación (Terzaghi) con el fin de analizar el comportamiento de suelos finos saturados al sufrir un incremento en su estado de esfuerzos. Esto nos permitirá entrar al tema de mejoramiento de suelos y conocer las técnicas más utilizadas. Principalmente las técnicas que se han aplicado como solución para el mejoramiento de suelo en zonas del NAICM y su eficiencia como sistema.

Principalmente, en este capítulo, se explica la parte teórica del sistema de consolidación acelerada por Vacío y se dan algunos ejemplos y criterios que permiten comprender de mejor manera la técnica.

En el capítulo IV se describe la exploración geotécnica, la instrumentación y la construcción del panel donde se realiza la prueba del método de mejoramiento por consolidación acelerada por Vacío con membrana (Menard Vacuum).

En el capítulo V se muestran los resultados de la instrumentación, las gráficas representativas y la interpretación geotécnica del comportamiento del suelo tratado con la técnica de Vacío tipo Menard particularmente en la zona de Prueba. Dicha interpretación se analiza durante el procedimiento constructivo y los primeros tres meses de aplicación del sistema de Vacío tipo Menard.

El capítulo VI presenta el cálculo de asentamientos con base a las propiedades del suelo obtenidas de las pruebas de laboratorio, y se obtiene un modelo geotécnico particular modificado de acuerdo a la interpretación de la instrumentación y a las etapas constructivas. Así mismo dando un grado de consolidación teórico (Calculado) y práctico (Dado por la instrumentación) para conocer la eficiencia del sistema.

Finalmente en los capítulos VI y VII se presentan las conclusiones del sistema aplicado en la zona de prueba, la aportación del modelo de cálculo y la eficiencia del sistema. También, se dan recomendaciones respecto a la ejecución del proyecto del NAICM con base a la interpretación del método de consolidación acelerada por Vacío.

1.1. GENERALIDADES

En el ámbito de la Geotecnia, tratar con suelos finos saturados es un reto y todo un campo de investigación. Ya que al realizar obras de infraestructura sobre este tipo de suelos, es procedente a tener grandes deformaciones. Lo cual es un riesgo para cualquier obra civil. En el caso del diseño de aeropuertos, el mejoramiento del suelo para las pistas de rodaje, plataformas u áreas abiertas es una de las soluciones más utilizadas y el caso del Nuevo Aeropuerto Internacional de México no es una excepción.

El principio fundamental para aplicar este tipo de mejoramiento de suelo, es el principio de consolidación. El cual consiste en la disipación de las presiones intersticiales provocando la transferencia de los esfuerzos a la fase sólida (granos).

Los métodos convencionales de mejoramiento de suelos finos saturados consisten en la aplicación de una precarga, y generalmente se realiza también la colocación de un sistema de drenaje, el cual pueden ser drenes de material extraído de un banco (arena o grava) o materiales prefabricados (PVD's), esto para facilitar la disipación de las presiones intersticiales y aumentar la velocidad del proceso de consolidación, y como resultado del proceso de consolidación se genera la deformación del suelo y la magnitud de esta deformación depende directamente de la magnitud de la sobrecarga aplicada.

En este trabajo se presenta un método de mejoramiento de suelos finos saturados, el cual es más sofisticado que los métodos convencionales utilizado en proyectos aeroportuarios y portuarios en algunos lugares de Asia y Europa. Y en el año 2017, dicho método se realiza por primera vez en América Latina y en un panel de prueba en el Ex Lago de Texcoco.

También se muestran los aspectos teóricos del método y su finalidad, así como los resultados interpretados de la instrumentación geotécnica instalada en el panel para conocer el comportamiento del suelo al ser tratado con la técnica de Vacío.

Se realiza un análisis del modelo de cálculo de predicción de asentamientos y grado de consolidación donde se lleva a cabo un ajuste con base a los resultados de las pruebas de laboratorio y comportamientos registrados por la instrumentación, con el fin de obtener un modelo geotécnico particular del sitio y conocer la eficiencia del sistema al ser aplicado a un suelo arcilloso tan particular como lo es el del Ex Lago de Texcoco.

1.2. OBJETIVOS

El objetivo general del presente trabajo es mostrar el comportamiento del suelo Arcilloso del Ex Lago de Texcoco al ser sujeto a un mejoramiento por el método de aceleración de la consolidación por vacío con membrana (Menard Vacuum).

Determinar un modelo geotécnico que nos permita estimar el asentamiento al final del tiempo de tratamiento y conocer el grado de consolidación. Basándonos en los resultados de laboratorio y en mediciones obtenidas de la instrumentación geotécnica.

Identificar los factores importantes que afectan a la eficiencia del sistema y dar recomendaciones que ayuden a mejorar el funcionamiento de la técnica, con base en el proceso constructivo empleado y los parámetros medidos en campo.

1.3. ALCANCES

Con base a la exploración geotécnica, pruebas de laboratorio, pruebas en sitio y la instrumentación geotécnica, se analizan e interpretan las deformaciones verticales, horizontales y cambios piezométricos obtenidos en la prueba. Y así mismo poder cuantificar la factibilidad de la aplicación del sistema en el depósito salobre del Ex Lago de Texcoco, haciendo notar las propiedades del suelo arcilloso más importantes que influyen su comportamiento.

CAPÍTULO 2

Nuevo Aeropuerto Internacional de la ciudad de México

2. NUEVO AEROPUERTO INTERNACIONAL DE LA CIUDAD DE MÉXICO

El Aeropuerto internacional de la Ciudad de México, oficialmente llamado Aeropuerto Internacional Benito Juárez inició operación en el año de 1928, teniendo ya, 90 años en actividad. El AICM (Benito Juárez) es el punto nodal y clave que conecta al País con el resto del mundo. Es la principal puerta de entrada al turismo y viajes de negocio, atendiendo a una tercera parte de los pasajeros en México. En aspectos comerciales. Concentra el 65% de las mercancías que se distribuyen vía aérea cal resto del mundo llevándolo a ser un punto clave para la competitividad.

Desde hace prácticamente 40 años es evidente la necesidad de ampliar la capacidad del Aeropuerto para que sea acorde al crecimiento del país. Dicho crecimiento ha generado que la capacidad sea insuficiente.

Es así que se realiza el proyecto del Nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (NAICM), el cual será uno de los tres proyectos de infraestructura aeroportuaria más grandes a nivel mundial.

Es así que se formó una empresa de participación estatal mayoritaria responsable de construir, administrar, operar y explotar el Nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (NAICM), conforme al título de concesión otorgado por el Gobierno Federal y publicado en el Diario Oficial con fecha 26 de Enero de 2015. Dicha empresa se le llamo Grupo Aeroportuario de la Ciudad de México, S.A. de C.V. y tiene el objetivo principal de asegurar su adecuada gestión, maximizando el potencial del aeropuerto y contribuyendo al desarrollo de la región y del país

El proyecto contará en su etapa de máximo desarrollo con 6 pistas y dos terminales. Y podrá transportar cerca de 120 millones de pasajeros al año, incrementando cuatro veces la capacidad del AICM Benito Juárez.

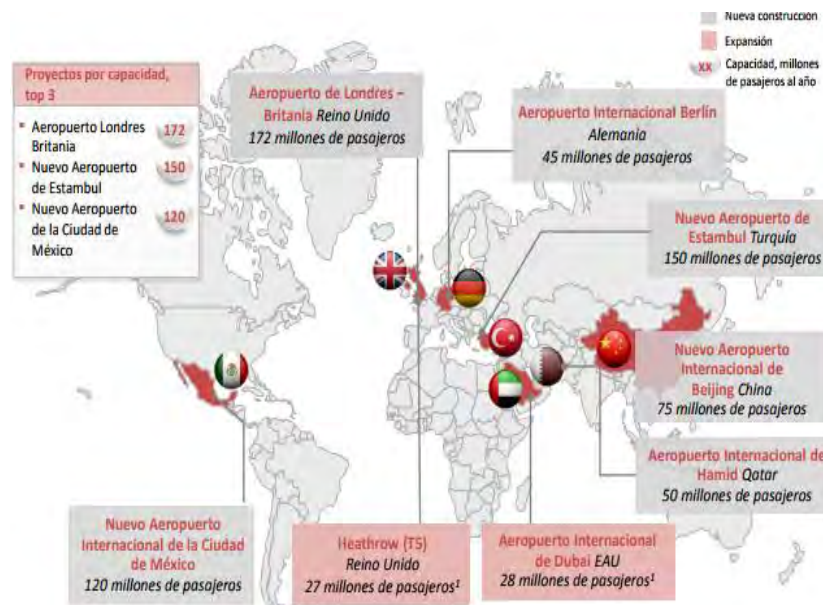


Figura 01.- “Mayores proyectos de infraestructura aeroportuaria a nivel mundial”. **Fuente:** Airport technology;UGlobal(2014).

2.1. **PROYECTO NAICM**

El Nuevo Aeropuerto Internacional de México será desarrollado con el principal propósito de cubrir la demanda actual y la estimada a futuro, de acuerdo al crecimiento Social, Turístico y Comercial. Ya que debido a la saturación y baja eficiencia del AICM Benito Juárez, desde hace 40 años, México ha limitado su potencial de crecimiento como una de las 15 mayores economías del mundo. Ocupando el lugar 49 en infraestructura aeroportuaria y el lugar 55 en competitividad por debajo de las principales economía del mundo.

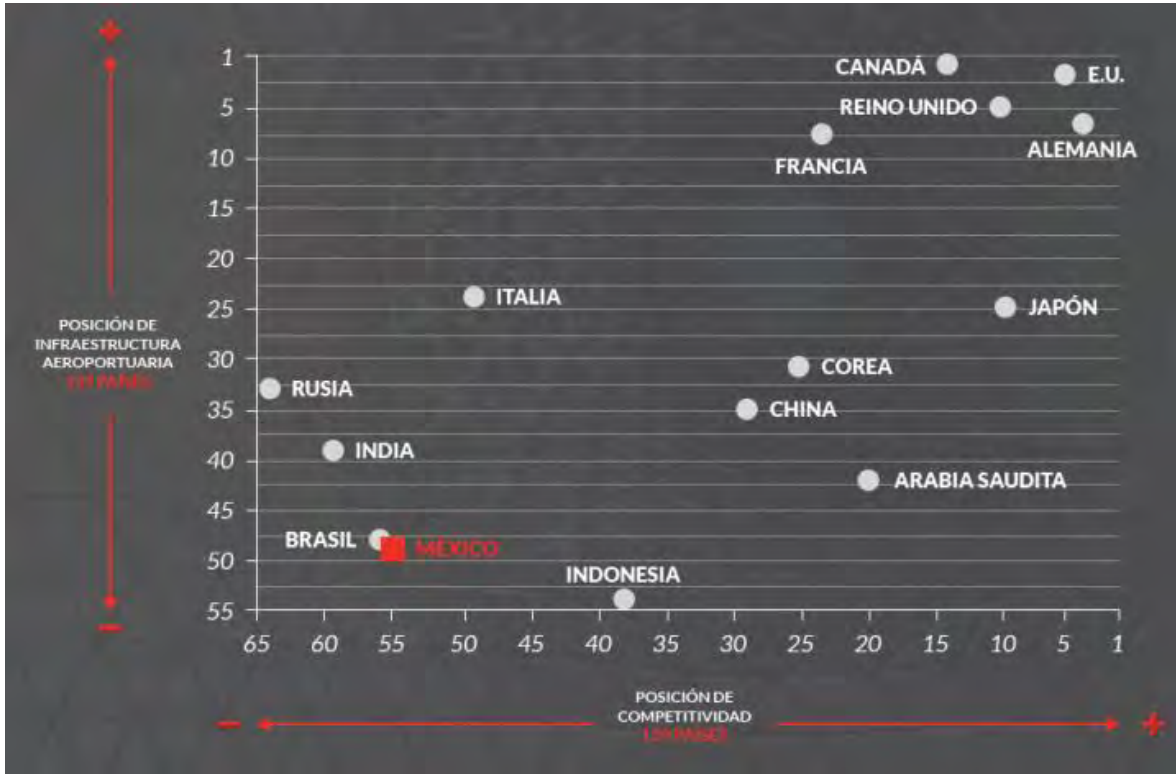


Figura 02.- “Relación de competitividad con Infraestructura de las 15 primeras economías del mundo”. Fuente: DGAC.

Es fundamental e indispensable la realización de un proyecto aeroportuario que permita mantener la actividad comercial y de pasajeros y no se fugue a otros nodos logísticos. La ciudad de México tiene una localización estratégica para conectar flujos entre países y regiones de América, Europa y Asia. Sin embargo la saturación del AICM Benito Juárez provoca que el comercio y los pasajeros circulen por otros nodos, generando derrama económica en otros países.



Figura 03.- “México, nodo estratégico para conectar flujos comerciales y de pasajeros con todo el mundo”. Fuente: OAG;Flight Global Airport.

Es así, que de acuerdo a estos estudios y análisis, el día 3 de Septiembre de 2014 se presentó el proyecto del Nuevo Aeropuerto Internacional de México, para dar solución a las necesidades aeroportuarias del centro del país y fomentar el crecimiento económico.

Será construido en un terreno de aproximadamente 4,430 hectáreas de propiedad federal, ubicada en el Ex Lago de Texcoco, a 14 km al Noreste del AICM Benito Juárez. El sitio está limitado al Norte con el depósito de evaporación solar “El Caracol”, al Sur por la carretera Peñón – Texcoco, al Oriente con Atenco y al Poniente con El Circuito Exterior Mexiquense.



Figura 04.- “Ubicación y colindancias del NAIM”. Fuente: GACM.

Para llevar a cabo la ejecución del proyecto es indispensable realizar una planeación o Plan Maestro el cual consiste en identificar los componentes necesarios y requisitos de instalaciones para su desarrollo, así como proporcionar un marco para el diseño que cumpla los objetivos definidos.

Es así como se tienen una serie de estudios de diversas índoles donde destacan Los estudios Geológicos, de mecánica de suelos y de cimentación de Pistas, Plataformas y Rodajes. Los cuáles son el punto de partida para cumplir el objetivo del presente trabajo de Tesis.



Figura 05.- “Estudios del Plan de Control para el NAICM”. Fuente: GACM.

Una vez realizados los estudios preliminares, se toma decisión para realizar la ejecución de obra civil de acuerdo a las etapas planeadas.

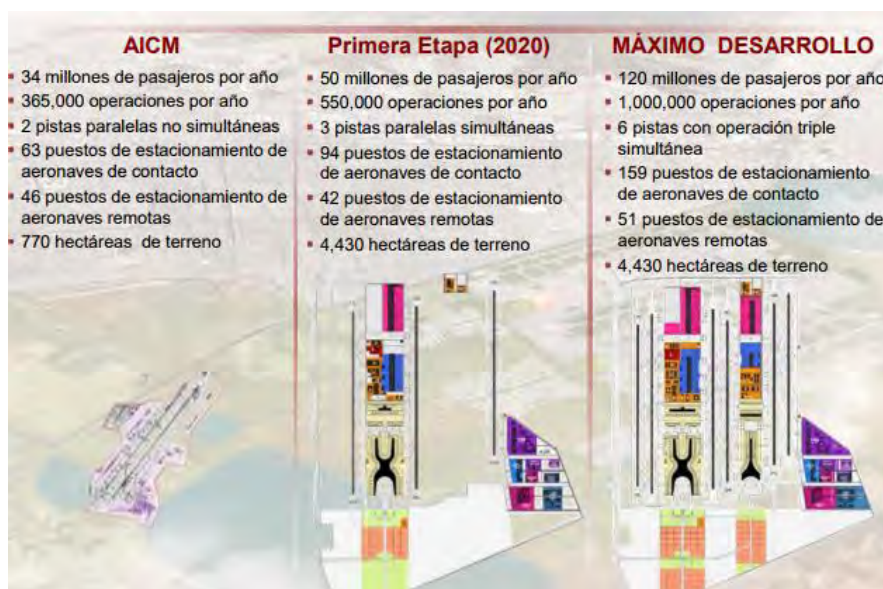


Figura 06.- “Etapas del NAICM y comparativa en eficiencia y capacidad con el AICM”. Fuente: GACM.

2.2. CARACTERÍSTICAS DEL SUELO DEL EX LAGO DE TEXCOCO

2.2.1. Historia geológica

La Cuenca del Valle de México se formó debido a que La sierra de Guadalupe y el cerro Chimalhuache emergieron durante el período cuaternario, formando así el vaso mismo del lago. La península de Iztapalapa, la sierra de las Cruces y el valle de Teotihuacan son regiones geológicas más antiguas ya que emergieron durante el período terciario. Las dos primeras están formadas por volcanes inactivos, por lo que están compuestas por rocas ígneas. Por su lado, la superficie del valle de Teotihuacan está formada por rocas sedimentarias.

El suelo que conforma el Lago de Texcoco es altamente soluble debido a los sedimentos arrastrados en un principio por los ríos; los sedimentos se depositan a lo largo de la rivera, particularmente en su desembocadura, donde forman abanicos aluviales o deltas que se extienden al interior del lago. Los sedimentos más gruesos (boleos, gravas y arenas) se depositaron en las riveras cuando la pendiente disminuye drásticamente y el río pierde fuerza, mientras que los limos y arcillas en suspensión pueden alcanzar mayores distancias y llegar al centro del lago.

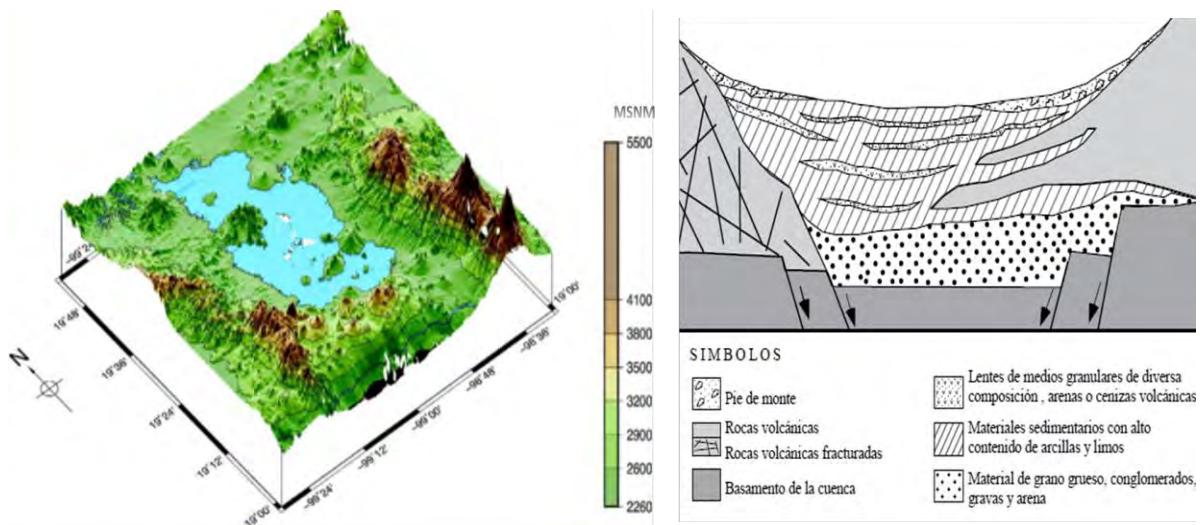


Figura 07.- “Elevación topográfica y estructura esquemática del Lago de Texcoco”. **Fuente:** Sociedad Geológica Mexicana.

Una buena parte de los sedimentos lacustres provienen de la emisión de tobas. Las cuales se mezclan con minerales lacustres y varios materiales con diferentes estructuras y grados de cristalización, logrando con el paso del tiempo una descomposición química la cual forma las arcillas. No obstante, dichas arcillas tienen contenidos de bentonitas, monmorilonitas, carbonatos de calcio, diatomeas, ostrácodos e intercalaciones de cenizas y pómez, también se han registrado otros componentes como ilitas, caolinitas, plagioclasas, micas y óxidos de silicio producidos por erupciones volcánicas.

Durante el período terciario, la cuenca del lago tenía desagüe hacia la cuenca del Balsas. Pero durante el siguiente período geológico, la salida de aguas fue cerrada por la emergencia de la sierra de Ajusco-

Chichinautzin. Provocando un vaso de almacenamiento únicamente con entrada de agua proveniente de las Sierras.

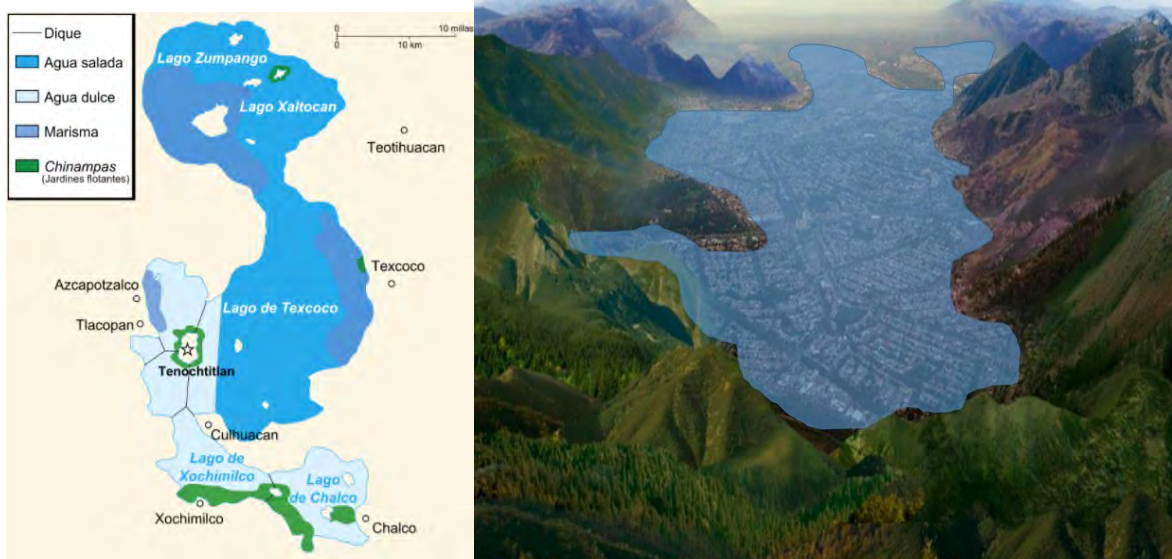


Figura 08.- “Cuenca del Valle de México y Solubilidad del agua existente”. **Fuente:** INAH.

A la llegada de las primeras civilizaciones a la zona del Lago de Texcoco, se empezaron a implementar técnicas de sembradío y vivienda sobre el mismo lago, las cuales consisten en clavar varias estacas de ahuejote que sujetan un petate de tule, sobre el que se deposita cieno del fondo de la laguna hasta que sobre el petate y entre las estacas quedara un montículo de tierra. Con el tiempo, las estacas producen retoños y raíces que ayudan a consolidar el suelo cultivable, de modo que se forma una isla artificial llamada Chinampa.

Y es así que en el siglo xv, en la zona central de la cuenca se estableció una gran parte de la población. Además, debido al Albarradón o diques de Nezahualcóyotl, quedó dividida en el Lago de México y el Lago de Xochimilco. Dichos diques cumplían la función de regular el agua para evitar inundaciones en las zonas civilizadas y poder clasificar el agua dulce de la salada.

Durante la Conquista, el agua de ambos lagos disminuía por los asentamientos humanos y la deforestación de la cuenca. Se construyó el Albarradón de San Lázaro y esto formó un semicírculo que rodeaba la ciudad por el lado oriente. Y así mismo se empezaron las obras de desagüe de la Ciudad de México.



Figura 09.- “Cuenca del Valle de México, civilización, albarradón o dique y chinampas”. **Fuente:** INAH.

2.2.2. Estratigrafía y propiedades

El crecimiento urbano continúa en desarrollo y hoy día se siguen implementando técnicas que permitan realizar proyectos civiles para satisfacer las necesidades de vivienda, económicas, comerciales y de comunicación en la Cuenca del Valle de México.

Por ello, al tener conocimiento de la historia geológica, es posible analizar e interpretar los comportamientos del suelo sobre el cual se desplanta la infraestructura.

Con el fin de desarrollar nuevos proyectos se han realizado estudios geotécnicos para conocer la estratigrafía, las propiedades índices y mecánicas de cada estrato. Se ha realizado una clasificación general la cual está formada por cinco unidades estratigráficas:

- Costra Superficial (CS).
- Formación Arcillosa Superior (FAS).
- Capa Dura (CD).
- Formación Arcillosa Inferior (FAI).
- Depósitos Profundos (DP).

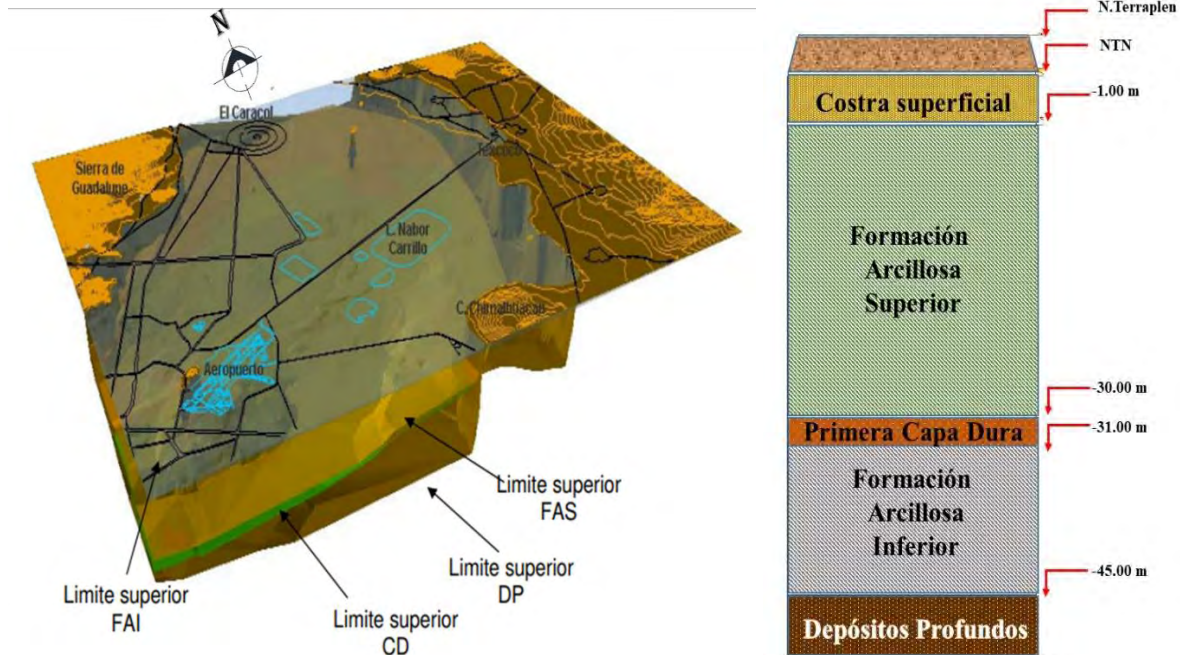
La costra superficial está compuesta por material orgánico y limo arcilloso, el cual se encuentra en su mayor parte seco por falta de vegetación.

Las dos formaciones arcillosas se correlacionan con la secuencia lacustre que predomina la columna estratigráfica de la cuenca de México y está separada por la famosa capa dura formada a partir de las últimas erupciones volcánicas provenientes del cerro de San Miguel en la región central de la Sierra de las cruces. Los depósitos profundos se correlacionan con la secuencia aluvial que rellena parcialmente la cuenca y que se formó del cierre de la misma.

Intercaladas con las formaciones arcillosas se encuentran horizontes más duros que se correlacionan con las emisiones volcánicas más recientes, son cenizas y pómez, pero también pueden corresponder

a capas de arenas limosas, estas intercalaciones son más importantes a medida que se acercan a la zona de transición. El espesor de las formaciones arcillosas compresibles (FAS y FAI) que sobre yacen a los Depósitos Profundos, aumenta de Norte a Sur, y en sentido transversal incrementan de Oriente a Poniente.

Lo cual es consistente con la historia geológica del Lago de Texcoco, es decir, como los depósitos profundos se van formando en función de la secuencia aluvial, el espesor debe incrementarse en sentido del depósito.



bj

Figura 10.- “Estratigrafía de la zona oriente del Ex Lago de Texcoco”. Fuente: II UNAM.

Al realizar el estudio del suelo del Actual Ex Lago de Texcoco se obtienen propiedades generales de cada unidad estratigráfica, las cuales van de la mano con su historia geológica. Las propiedades más conocidas y que generalizan al suelo de esta zona son:

- Baja resistencia al esfuerzo cortante
- Alta deformabilidad

Los valores que caracterizan a cada estrato se han obtenido gracias a las grandes campañas de exploración geotécnica realizada y publicada a lo largo de la historia de la investigación.

El rango de resistencia al esfuerzo cortante de los estratos que caracterizan al suelo de la cuenca del Valle de México, se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 01.- “Resistencia al esfuerzo cortante de los estratos típicos de la Cuenca del Valle de México”. Fuente: II UNAM.

Estrato	τ resistencia al corte (kPa)	τ resistencia al corte (t/m^2)
Costra superficial (CS)	300-400	30-40
Formación Arcillosa Superior (FAS)	20-40	2-4
Capa Dura (CD)	700-800	70-80
Formación Arcillosa Inferior (FAI)	100-180	10-18

Los valores mostrados en la tabla anterior, también dependen del periodo de estudio, la zona de muestreo y la profundidad de la muestra, pero los rangos presentados son los más comunes y representativos.

Además de conocer el parámetro de resistencia, se ha observado y estudiado la gran deformabilidad que puede llegar a tener el suelo. Y dicha deformación se provoca por el cambio al estado de esfuerzos del suelo, provocando una consolidación la cual reduce la relación de vacíos del suelo, y genera un asentamiento superficial.

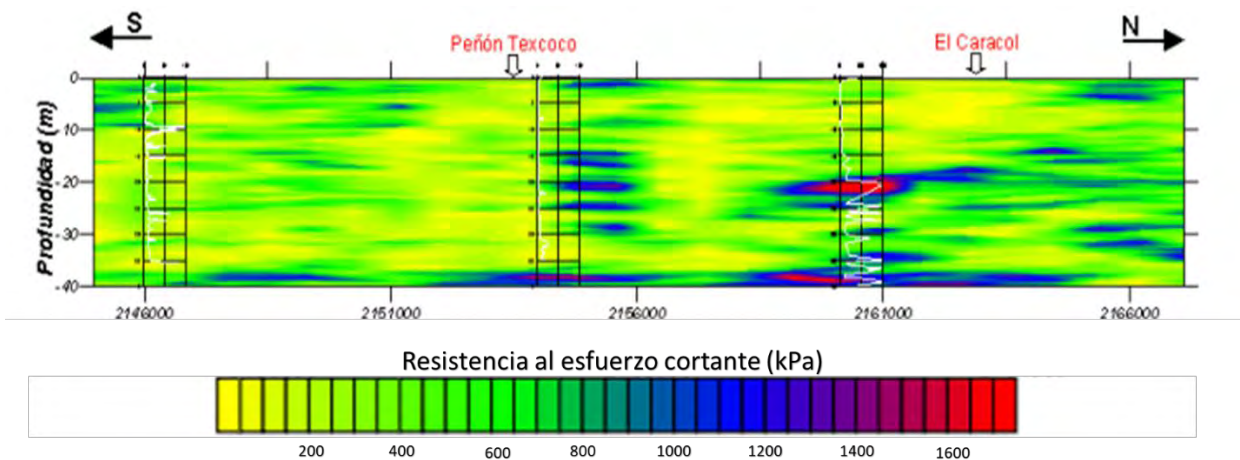


Figura 11.- “Resistencia al esfuerzo cortante del suelo arcilloso del Ex Lago de Texcoco”. **Fuente:** FI UNAM.

La menor resistencia al esfuerzo cortante se localiza en la zona del Ex Lago de Texcoco, en cambio, las zonas cercanas a la Sierra de Guadalupe y la carretera a Chinconcuca se tiene una mayor resistencia. Esto indica que los estratos más resistentes se presentan de forma ascendente en las direcciones Sur-Norte y Poniente-Oriente, de acuerdo a la secuencia de los depósitos aluviales.

Otra de las características emblemáticas del suelo del Valle de México es su alto contenido de agua el cual coincide con secuencia estratigráfica basada en los depósitos aluviales, y así mismo concuerda con los valores de su resistencia al esfuerzo cortante.

La baja resistencia se debe a las propiedades particulares del estrato y entre ellas está su alto contenido de agua y viceversa, con un bajo contenido de agua su resistencia es mayor.

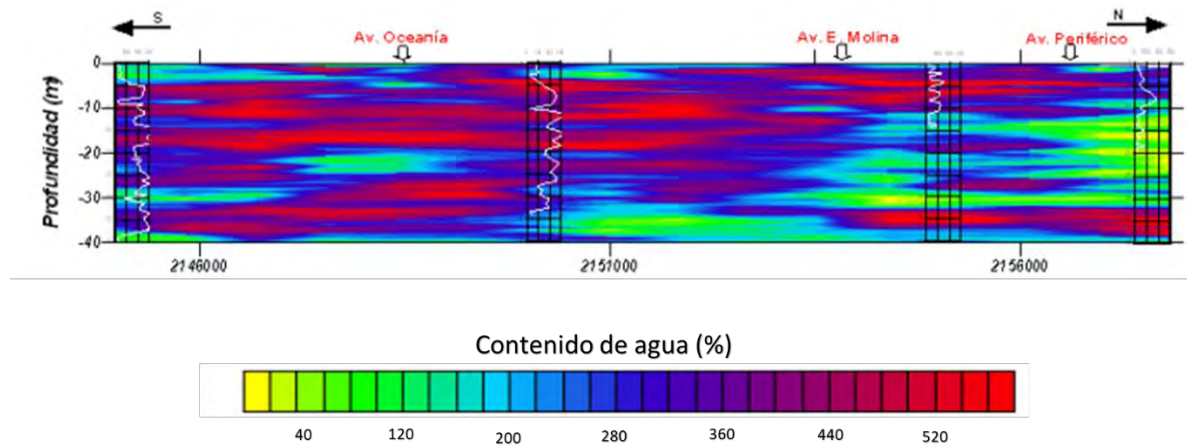


Figura 12.- “Contenido de agua del suelo arcilloso del Ex Lago de Texcoco”. **Fuente:** FI UNAM.

CAPÍTULO 3

Mejoramiento de suelos arcillosos saturados

3. MEJORAMIENTO DE SUELOS ARCILLOSOS SATURADOS

Los problemas de ingeniería de suelos en los cuales se necesita información entre la relación de esfuerzo-deformación y esfuerzo-deformación-tiempo, son de dos tipos. El primero incluye todos los casos en los cuales hay la posibilidad de que los esfuerzos superen la resistencia al corte perdiendo su estabilidad. El segundo caso es el cual los esfuerzos no sean lo suficientemente grandes para sobrepasar la resistencia del suelo al corte, pero en los cuales la deformación llega a ser de una seria magnitud en los desplazamientos o asentamientos dentro de la masa de suelo.

La deformación de la mayoría de los suelos, aun bajo cargas pequeñas, es significativa; además esa deformación no se produce, usualmente, en forma simultánea a la aplicación de la carga, sino que se desarrolla en el transcurso del tiempo. Así, cuando un estrato de material fino saturado soporta una edificación, pueden ser necesarios muchos años para que se complete la deformación de suelo. Por lo que la afectación a la estructura puede ocurrir años más tarde.

El realizar proyectos de infraestructura en zonas donde las unidades estratigráficas están formadas por suelos finos saturados, es sumamente importante considerar la baja resistencia y las grandes deformaciones que presenta al incrementar su estado de esfuerzos.

Es así que se ha estudiado el proceso de consolidación que sufre este tipo de suelos y el cual es inevitable. Por ello se han desarrollado metodologías que permiten acelerar dicho proceso y poder reducir las deformaciones una vez ejecutada la obra civil.

3.1. TEORÍA DE CONSOLIDACIÓN

Todos los materiales experimentan deformaciones cuando están sujetas a un cambio en sus condiciones de esfuerzos. Las características de esfuerzo-deformación de materiales estructurales como son el acero y el concreto, son muy conocidas debido a las aplicaciones prácticas y pueden determinarse en laboratorio con alta confiabilidad. Sin embargo, la deformación en suelos es muy particular. La deformación en materiales estructurales es principalmente por un cambio de forma, mientras que en los suelos se presenta simultáneamente cambios volumétricos.

Un suelo puede considerarse como un esqueleto o arreglo de granos sólidos y entre ellos puede haber aire, líquido o de una combinación de ambos. Y si una muestra de suelo es puesta bajo un incremento de esfuerzos de tal forma que su volumen disminuya, se tendrán tres factores a los cuales se pueda atribuir esta disminución.

- Una compresión del agua y el aire que está dentro de los vacíos
- Un escape del aire y agua de los vacíos
- La compresión de la materia sólida

O así mismo llevase a cabo los tres factores en diferentes etapas.

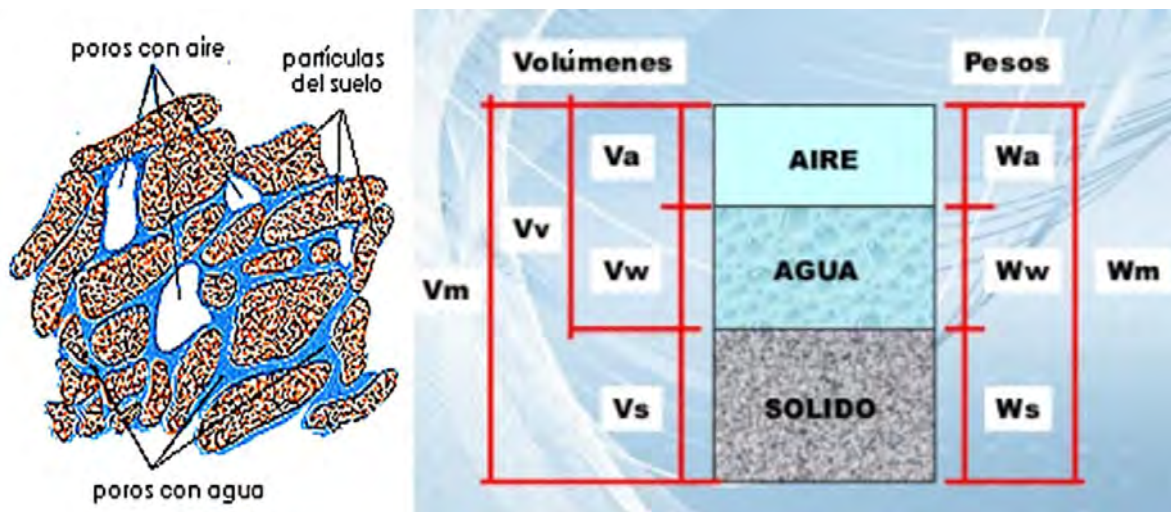


Figura 13.- “Relación de Fases de un Suelo”. Fuente: Juárez, *Mecánica de Suelos*.

Es así que un incremento de esfuerzos provocado por la construcción de una estructura, provoca una deformación la cual se genera a partir de los factores mencionados anteriormente. Y a su vez abarcan tres amplias categorías:

- Asentamientos inmediatos: provocado por la deformación elástica del suelo sin ningún cambio en el contenido de agua.
- Asentamientos por consolidación primaria: Es el resultado en un cambio de volumen en un suelo fino saturado debido a la expulsión de agua que ocupa los espacios de vacío.
- Asentamiento por consolidación secundaria. Se presenta en suelos finos saturados y es resultado del ajuste plástico de la estructura del suelo. Éste sigue a la consolidación primaria bajo un esfuerzo efectivo constante.

La consolidación se presenta cuando un estrato de suelo fino saturado está sometido a un incremento de esfuerzos y esta origina que la presión de intersticial aumenta repentinamente. Si se trata de suelos granulares (arenosos altamente permeables), el drenaje o disipación causada por el incremento de la presión intersticial, se lleva a cabo de manera inmediata; este mismo va acompañado por una reducción en el volumen de la masa de suelo, generando, simultáneamente un asentamiento. Sin embargo, no es el caso para los suelos finos, ya que estos tienen una baja permeabilidad y el proceso de drenaje o disipación de la presión intersticial está en función del tiempo.

La consolidación en suelos finos se puede explicar de la siguiente manera de acuerdo a Braja M. Das:

Si tenemos un estrato de suelo fino saturado, como lo es la arcilla, de espesor H y confinado por dos estratos de arena, los cuales cumplen la función de las caras drenantes. Posteriormente estos son sometidos a un incremento de esfuerzos instantáneo lo cual provoca un incremento en los esfuerzos totales. Sabiendo que los esfuerzos totales es la adición entre los esfuerzos efectivos y la presión de poro.

$$\sigma_T = \sigma' + U \quad (3.1)$$

Donde: σ_T = Esfuerzos totales

σ' = Esfuerzos efectivos

U = Presión de poro o presión intersticial

Como la arcilla tiene muy baja permeabilidad y el agua es incompresible comparada con el esqueleto del suelo, en el tiempo $t=0$, el esfuerzo incrementado total, $\Delta\sigma_T$, será tomado por el agua ($\Delta\sigma_T = \Delta U$) a toda la profundidad. Ningún esfuerzo será tomado por el esqueleto o granos del suelo, es decir, el incremento del esfuerzo efectivo será igual a cero ($\Delta\sigma' = 0$).

Después de la aplicación del incremento de esfuerzo $\Delta\sigma_T$, al estrato de arcilla, el agua que se encuentra en los espacios vacíos empezará a ser expulsada y se drenará en ambas direcciones hacia las caras drenantes o estratos de arena. Por medio de este proceso, el exceso de la presión de poro o intersticial irá decreciendo o disipándose gradualmente dando lugar al incremento de esfuerzos tomado por los granos del suelo ($\Delta\sigma' \neq 0$). Así entonces en el tiempo $0 < t < \infty$.

$$\Delta\sigma_T = \Delta\sigma' + \Delta U \quad (\Delta\sigma' > 0 \text{ y } \Delta U < \Delta\sigma_T) \quad (3.2)$$

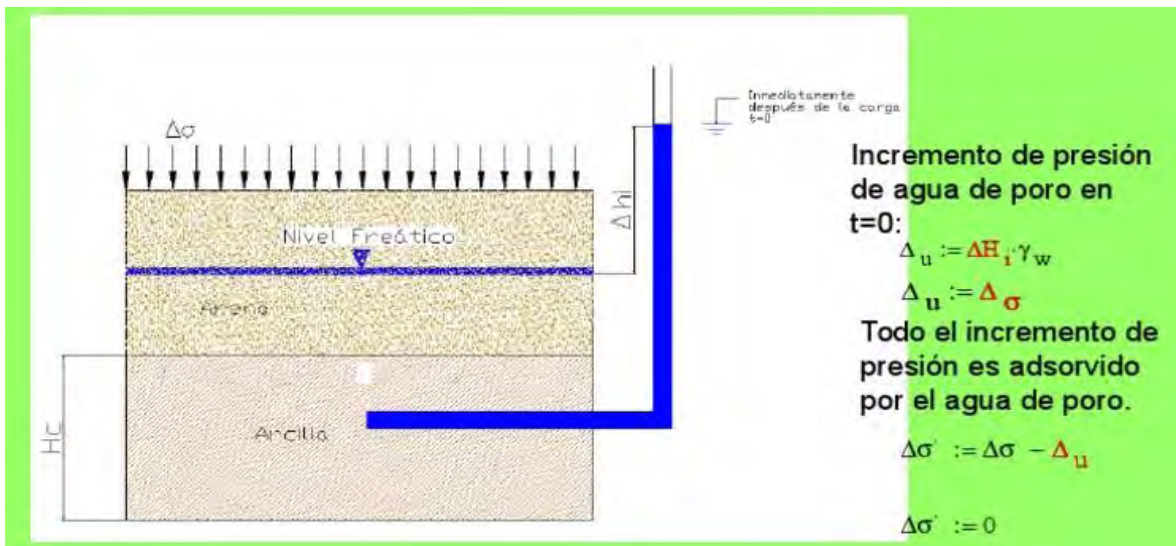


Figura 14.- “Incremento en la presión de poro debido a un incremento en el estado de esfuerzos en el suelo.”. Fuente: Juárez Badillo, Mecánica de Suelos.

Sin embargo, las magnitudes de $\Delta\sigma'$ y ΔU a diversas profundidades cambia dependiendo de la distancia mínima de la trayectoria de drenaje a cualquiera de los estratos o caras permeables.

Teóricamente, en el tiempo $t=\infty$, el exceso de la presión de poro o intersticial, se disipara por drenaje desde todos los puntos del estrato de arcilla, donde $\Delta U = 0$. El incremento de esfuerzo total ($\Delta\sigma_T$) se tomará por la estructura o granos del suelo, por lo que:

$$\Delta\sigma_T = \Delta\sigma' \quad (3.3)$$

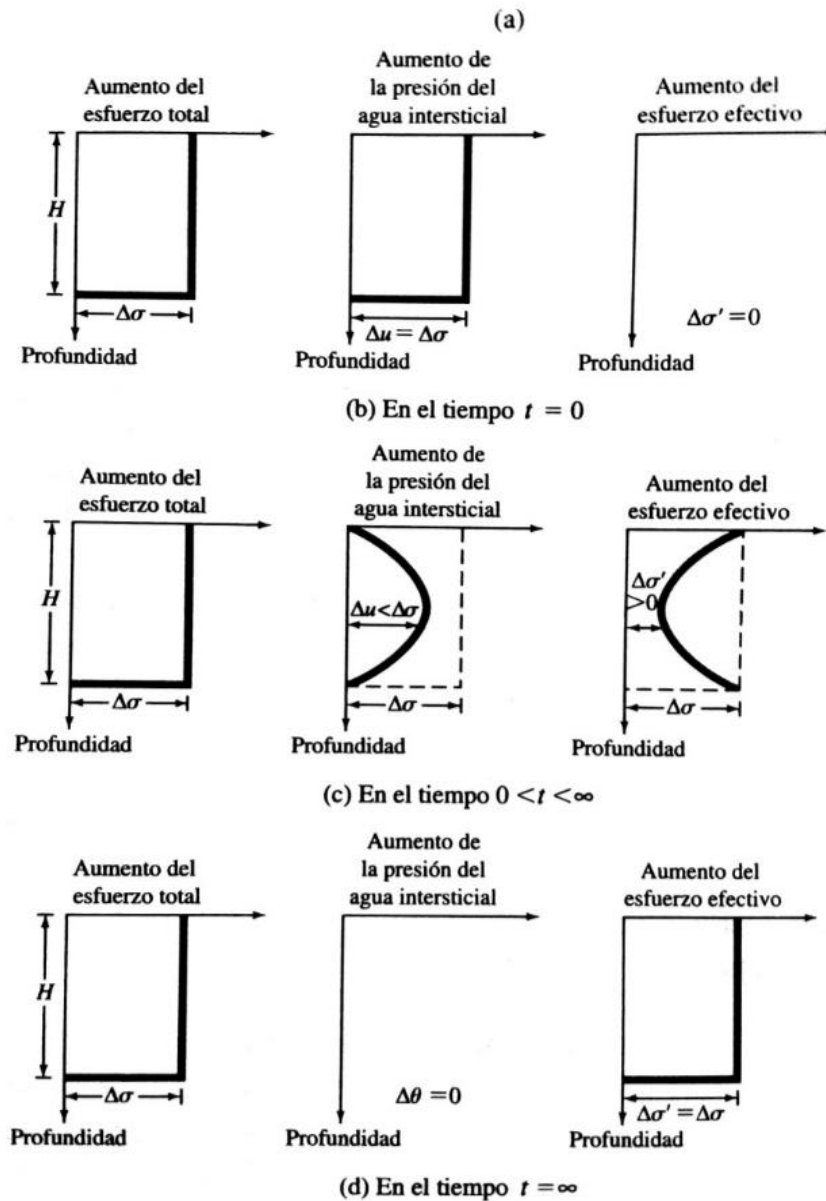


Figura 15.- “Variación del esfuerzo total, la presión intersticial y los esfuerzos efectivos durante un proceso de consolidación.”. Fuente: Braja Das, Fundamentos de ingeniería geotécnica.

Este proceso gradual de drenaje, bajo la aplicación de una carga adicional y la transferencia asociada de presión de poro en exceso al esfuerzo efectivo, ocasiona e asentamiento dependiente del tiempo en el estrato arcilloso.¹ Es decir, la consolidación es prácticamente el incremento de los esfuerzos efectivos”.

¹ (Das, 2013)

3.2. ANALOGÍA DE TERZAGHI (JUÁREZ, 2014)

Con el fin de tener una concepción objetiva y clara del proceso de consolidación unidimensional de suelos finos saturados, Karl Terzaghi propuso un modelo mecánico que permite observar con claridad dicho fenómeno.

Dicho modelo consiste en un cilindro de área de sección recta A provisto de un pistón sin fricción, con una pequeña perforación en él. El pistón está soportado por un resorte unido al fondo del cilindro y este está totalmente lleno de un fluido incompresible.

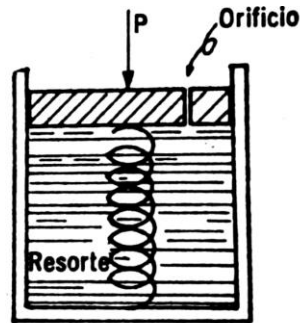


Figura 16.- “Esquema del modelo mecánico de Terzaghi para la comprensión del fenómeno de la consolidación.”. Fuente: Juárez Badillo, *Mecánica de suelos Tomo I*.

Si se coloca sobre el pistón una carga P manteniendo el orificio cerrado, es evidente que el resorte no puede deformarse en lo absoluto, y así, toda la carga estará soportada por el fluido.

Pero si se permite que el flujo salga por el orificio, también es evidente que habrá una transferencia gradual de la carga del fluido al resorte; en efecto, entre el interior y el exterior del cilindro, en el orificio, habrá una diferencia de presión igual a P/A , que genera el gradiente necesario para que el fluido salga por el orificio, permitiendo la deformación del resorte que tomará la carga. La velocidad de transferencia depende del tamaño del orificio y de la viscosidad del fluido. Es claro que si se permite que el resorte tenga una deformación suficientemente grande, se logrará que la totalidad de la carga P quede soportada por él, volviendo al fluido a sus condiciones anteriores a la aplicación de la carga.

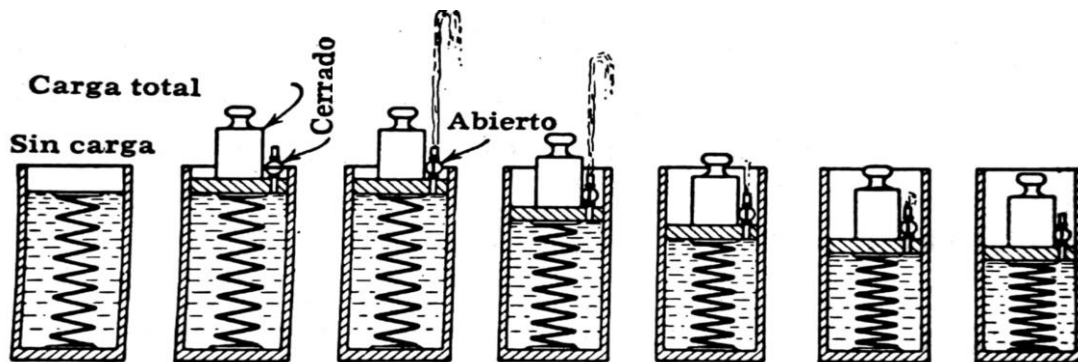


Figura 17.- “Esquema del modelo mecánico de durante las fases de la consolidación.”. Fuente: Taylor, Fundamentos de la mecánica de suelos.

Si en lugar de un cilindro se considera una serie de cilindros comunicados entre sí, la distribución inicial de presiones en el agua será lineal.

No habrá ninguna tendencia en el flujo a moverse, si se desprecia el peso propio de los pistones y resortes o si se considera que el dispositivo llegó al equilibrio desde el comienzo del experimento. Si se aplica bruscamente una carga P al primer pistón, en el primer momento en flujo deberá soportar la carga totalmente, generándose en él una presión en exceso de la hidrostática que se transmite con igual valor a cualquier profundidad. Pero al abrir la válvula, la diferencia de presiones en dicho orificio (P/A), crea un gradiente hidráulico que produce un flujo del fluido, hacia afuera de la primera cámara; tan pronto como se inicia ese flujo, la presión la presión en el fluido de la primera cámara disminuye, transigiendo simultáneamente una parte de la carga al resorte. La reducción de la presión del flujo de la primera cámara causa, por diferencia de la segunda, un desnivel de presiones en el segundo orificio, por lo cual el fluido tenderá de pasar de la segunda a la primera cámara. Como consecuencia disminuye también la presión del flujo de la segunda cámara, transmitiéndose así la tendencia al flujo a las cámaras inferiores. El fin del proceso será cuando la presión en el flujo regrese a las condiciones hidrostáticas, estando la carga P soportada por los resortes.

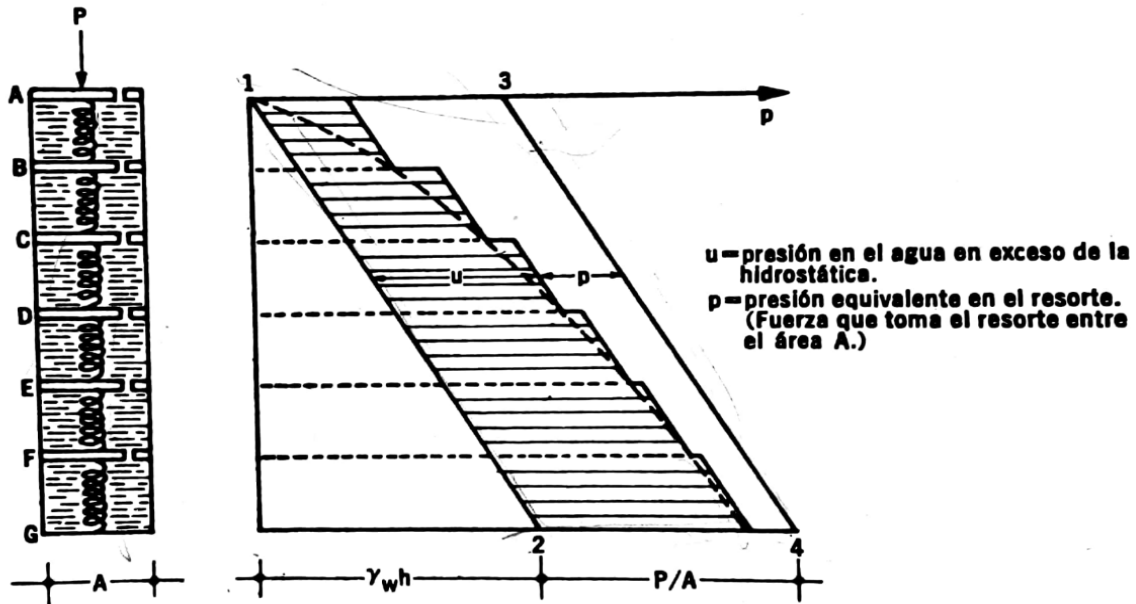


Figura 18.- “Esquema del modelo mecánico de durante las fases de la consolidación, considerando varias cámaras.”. Fuente: Juárez Badillo, Mecánica de suelos Tomo I.

Si se considera el volumen de las cámaras muy pequeño y el número de ellas muy grande, el modelo se acercará a las condiciones que prevalecen en el suelo. Ya que en el suelo, la estructuración de las partículas puede considerarse representada por los resortes del modelo, el agua intersticial libre por el fluido incompresible de las cámaras y la permeabilidad del suelo por los orificios de los émbolos.

Es así que se puede representar y comprender con mayor facilidad el comportamiento de los esfuerzos durante un proceso de consolidación.²

3.3. MÉTODOS CONVENCIONALES DE MEJORAMIENTO DE SUELOS ARCILLOSOS

Como se ha mencionado con anterioridad, si se requiere realizar algún proyecto de infraestructura sobre un suelo con unidades estratigráficas compuestas por material fino saturado. Es sumamente importante e indispensable contemplar un mejoramiento o tratamiento a dicho suelo.

El fenómeno de consolidación provoca asentamientos a corto, mediano y largo plazo, siendo así un suceso inevitable. Es por ello que se han implementado métodos y técnicas que permiten acelerar el proceso de consolidación.

Las técnicas más usuales y conocidas son:

- Precarga convencional.
- Precarga con drenes verticales.

Estas técnicas funcionan a base del mismo principio, el cual es colocar una carga temporal que sea mayor o igual a la carga de servicio, con lo cual se podrá variar algunos factores que influyen en la consolidación y lograr acelerar dicho fenómeno.

Al realizar alguna técnica para acelerar la consolidación y provocar los asentamientos de manera controlada, no quiere decir que a largo plazo no se generen asentamientos residuales. Estos serán mucho menores a los que se hubieran tenido sin un tratamiento, pero deben de ser considerados para el diseño de la obra civil de acuerdo a los asentamientos permitidos por reglamento de construcción

3.3.1. Precarga convencional

La precarga convencional consiste en colocar un material directamente sobre la masa de suelo que ejerza una carga mayor a la carga de servicio.

Con ello, tras generarse una consolidación anticipada en el suelo, antes de la construcción de la infraestructura del proyecto propiamente dicha, se había preparado al terreno para no consolidarse más, o lo que es equivalente, para no deformarse más (o muy poco) durante la vida útil del proyecto.

De esta manera se presentará un incremento de los esfuerzos totales lo que provoca que toda la carga soportada inicialmente por el agua, es decir, un incremento en la presión de poro. Y de acuerdo a los parámetros del suelo fino saturado y las caras drenantes, la presión intersticial comenzará a disiparse. Provocando que después de cierto tiempo la carga se transmita gradualmente a los granos del suelo (incremento de los esfuerzos efectivos). El tiempo de consolidación depende directamente de la permeabilidad del estrato arcilloso y la cercanía de las caras drenantes.

² (Juárez, 2014)

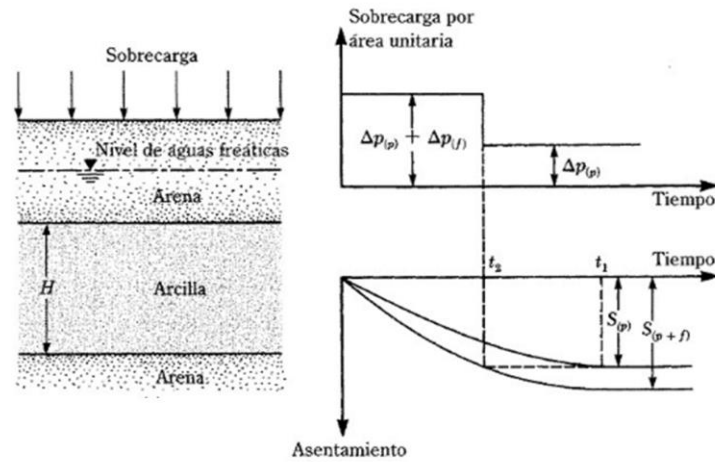


Figura 19.- “principio y comportamiento de esfuerzos al aplicar una precarga al suelo.” **Fuente:** Braja Das, Fundamentos de mecánica de suelos

Esta técnica permite generar un asentamiento controlado durante la aplicación de la precarga, pero debido a los parámetros mencionados anteriormente, este proceso puede ser muy lento. Sin duda es un proceso acelerado a comparación de una consolidación natural.

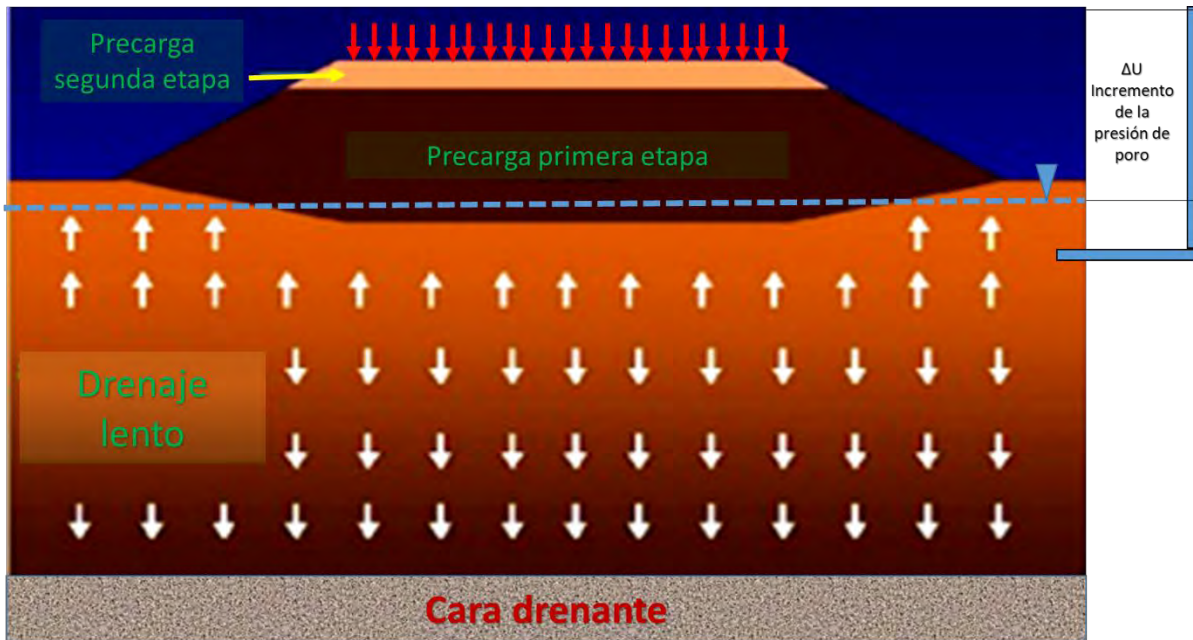


Figura 20.- “incremento de la presión de poro en el suelo y drenaje para proceso de consolidación.” **Fuente:** Menard México.

El aumento de la tensión efectiva en el suelo incrementa la resistencia al corte. Es así que esta resistencia puede aumentarse construyendo el terraplén gradualmente por etapas. Para ello debe transcurrir un tiempo suficiente para poder disipar las presiones intersticiales entre cada aumento de

la altura del terraplén y permitir que el suelo subyacente adquiriera la resistencia al corte necesaria para poder resistir las cargas que se van aplicando.

Este método es aplicable cuando la permeabilidad del suelo subyacente al terraplén es bastante elevada o cuando el espesor de la capa compresible es pequeño. De no cumplirse estas condiciones, este método conllevaría mucho tiempo de espera.

3.3.2. Precarga con drenes verticales

Esta técnica consiste en el mismo principio que una precarga común, el cual es acelerar el proceso de consolidación, solo que en este caso, se coloca una serie de drenes verticales que conectan las caras drenantes superior e inferior, ya sean de material proveniente de banco como grava y arena o material prefabricado como geotextil. Esto con el fin de facilitar y agilizar la disipación de la presión de poro la cual ha sido incrementada por la precarga.

La técnica de drenes verticales es aprovechar el proceso de consolidación horizontal el cual surge con mayor velocidad que la consolidación vertical, y así lograr acelerar el asentamiento que es provocado por la reducción de la relación de vacíos (consolidación).

Es decir, como se había mencionado, en las arcillas saturadas la permeabilidad es muy baja y se debe esperar mucho tiempo para producir la consolidación bajo una precarga. Así para acelerar esta consolidación y reducir el tiempo de precarga, puede resultar económico mejorar el drenaje del terreno, instalando drenes verticales para reducir los caminos del agua hacia zonas más permeables. El objetivo de este método es alcanzar un grado de consolidación suficiente en un periodo aceptable de tiempo.

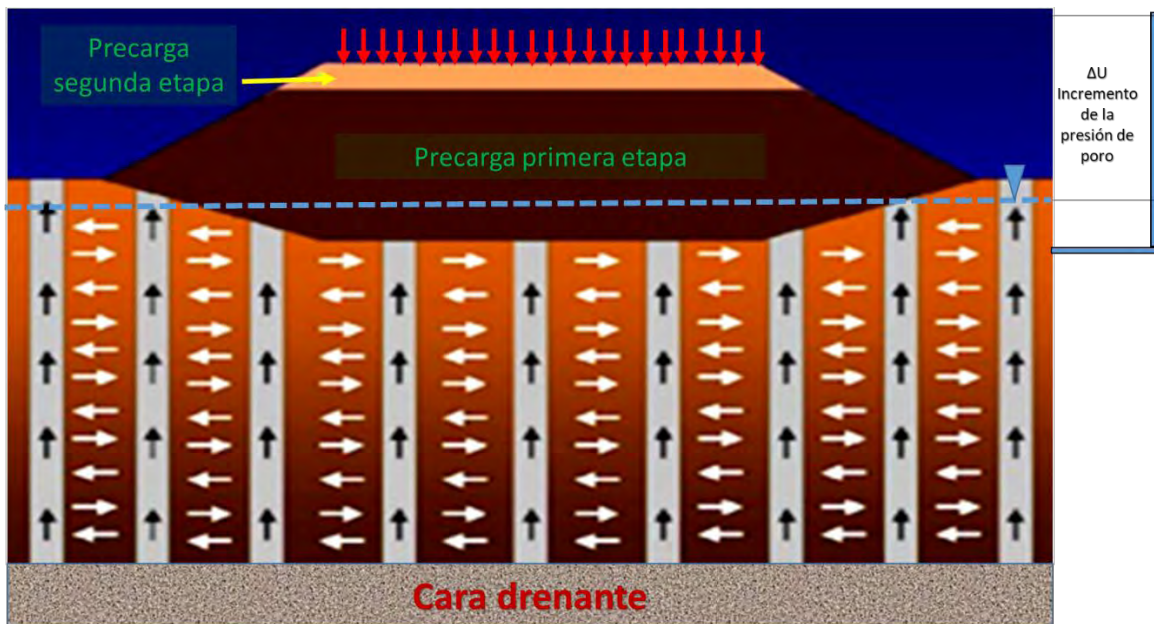


Figura 21.- “incremento de la presión de poro en el suelo y drenaje para proceso de consolidación por medio de drenes verticales.” **Fuente: Menard México.**

Los drenes verticales son instalados para añadir un drenaje radial al terreno. Este drenaje radial es el que domina en el proceso de consolidación debido a que la separación entre drenes es menor que la distancia del drenaje vertical. Además el coeficiente de consolidación horizontal (C_r) es mucho mayor que el coeficiente de consolidación vertical (C_v).

Sin embargo es importante considerar el remoldeo de la arcilla al realizar la instalación o hincado de los drenes verticales, ya que esta provoca un cierre en la estructura de la arcilla disminuyendo su permeabilidad.

Ambas técnicas (precarga convencional y precarga con drenes verticales) son utilizadas comúnmente para dar solución a problemas de estabilidad y deformación de suelos finos saturados. Pero de acuerdo a ciertas circunstancias como son costo y tiempo, se decide la técnica apropiada para realizar el tratamiento o mejoramiento.

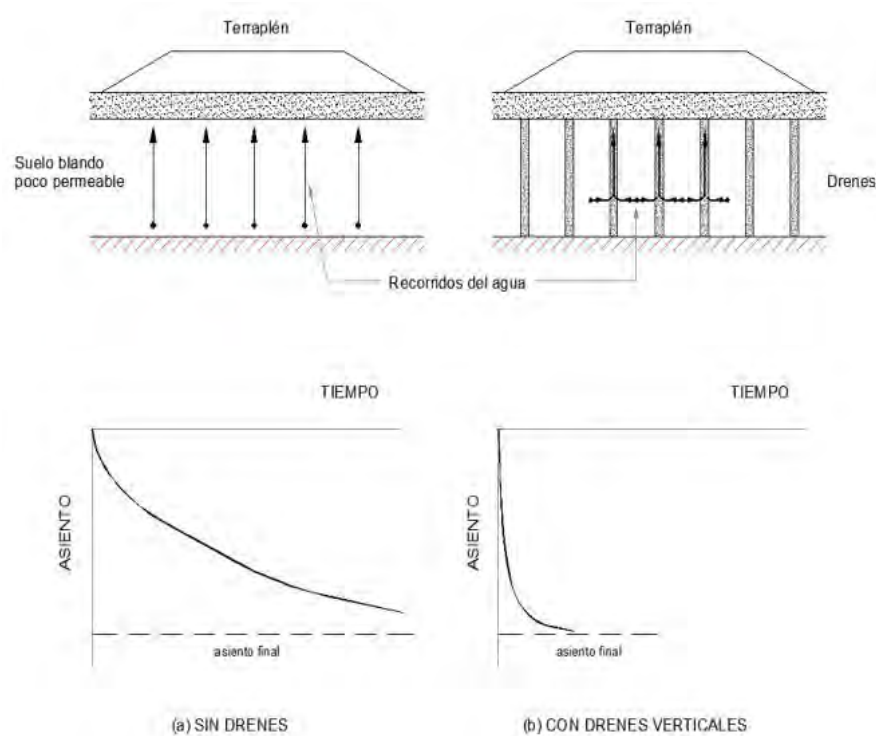


Figura 22.- “Terraplén sobre suelo blando poco permeable, sin drenes y con drenes verticales”
Fuente: Uriel A. 1991.

Como se ha comentado anteriormente, es indispensable contemplar los tiempos de colocación del material de precarga en ambas técnicas, ya que se requiere realizar la colocación del material en diferentes etapas, esto debido a la resistencia al corte del suelo. Una vez que se haya producido un porcentaje de consolidación y una mayor resistencia, es posible colocar una carga adicional, esto sucesivamente hasta tener la carga deseada. Esta dinámica puede ser considerada una desventaja ya que se requiere de ciertas bermas para mantener la estabilidad del terraplén y además considerar tiempo de actividades de terracería.

DIFICULTADES DEL SISTEMA DE PRECARGA.

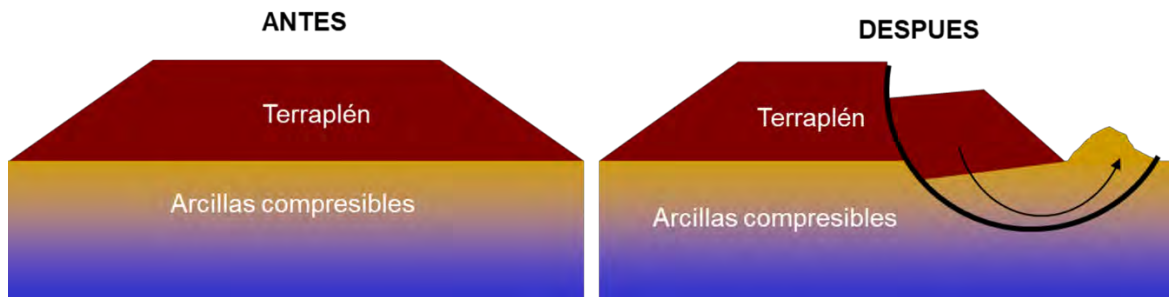


Figura 23.- “Falla circular típica de talud provocada por la aplicación de un esfuerzo mayor a la resistencia al corte del suelo.” *Fuente: Menard México.*

3.4. CONSOLIDACIÓN ACELERADA POR VACÍO CON MEMBRANA

Con base a los fundamentos que prevalecen en los métodos convencionales para el mejoramiento de suelos finos saturados (precarga y drenes verticales) y al análisis del proceso de consolidación. Jean-Marie Cognon desarrollo en 1988 una técnica que permite acelerar el proceso de consolidación, utilizando una carga muy grande la cual es equivalente a la presión atmosférica del sitio y simultáneamente ir disipando la presión intersticial por medio de la aplicación de un vacío directamente en la masa de suelo. Esta técnica es llamada “*Consolidación atmosférica Menard*” o “*Menard Vacuum*” ya que la empresa Menard fundo e implemento esta técnica; y a la fecha es la única que cuenta con la experiencia, maquinaria y personal experimentado para ejecutarla.

3.4.1. Introducción y fundamentos de la técnica

Esta técnica requiere de un análisis técnico y una ejecución más sofisticada pero esto conlleva a tener un resultado más favorable y puede ser aplicado en circunstancias particulares donde el aplicar otra técnica pueda presentar riesgos.

Esta técnica consiste en colocar una plataforma o terraplén de trabajo, el cual debe estar constituido por un material granular con un máximo del 10% de finos. Generando una plataforma altamente permeable.

Posteriormente se instala una red de drenes verticales prefabricados (DVP o PVD) que permiten un drenaje radial y facilitar la disipación de la presión intersticial. Esta fase tiene la misma función que la precarga con drenes verticales. Pero es importante señalar que a diferencia del método convencional, los drenes no deben ser un conector con la cara drenante inferior, es decir, no se hincan en un estrato permeable, sino deben ubicarse en el estrato de material fino saturado (arcilla). Formando una pared natural impermeable con la misma composición del suelo arcilloso.

Después se tiende un arreglo de drenes horizontales dentro de la plataforma de trabajo los cuales, posteriormente irán conectados directamente a unas bombas de Vacío.

Se realiza una zanja de estanqueidad en toda la perimetral de la zona a tratar o mejorar. Consecuentemente se coloca una membrana impermeable sobre la plataforma y se ancla a la zanja de estanqueidad, generando así, un sistema totalmente hermético que confina la masa de suelo que será tratada.

Al encender las bombas de vacío, se genera una succión o depresión que se transmite por los drenes horizontales hacia la plataforma permeable, de ahí, el vacío se transmite a los drenes verticales, logrando con ello extraer el aire atrapado y el agua del proceso de consolidación.

Al formar este sistema hermético e impermeable la carga de vacío es aplicada de manera isotrópica la cual será proporcional a la carga de la presión atmosférica en el sitio.

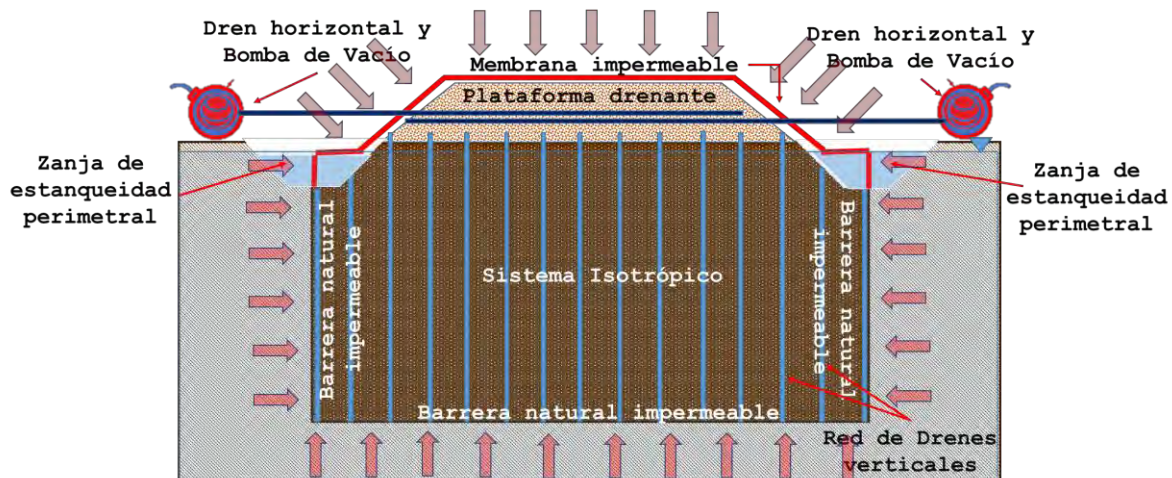


Figura 24.- “Corte tipo del sistema de consolidación atmosférica Menard Vacuum.” *Fuente: Menard México.*

3.4.2. Análisis y principios teóricos

La técnica de consolidación acelerada por vacío Menard Vacuum, consiste en acelerar la consolidación de los suelos finos saturados.

Conociendo la teoría fundamental de la consolidación, la cual consiste en aumentar los esfuerzos efectivos ($\Delta\sigma'$), es posible comprender el principio de la consolidación acelerada por vacío con membrana.

Como se ha mencionado con anterioridad, en un mejoramiento convencional de suelos finos saturados, se lleva a cabo el incremento en los esfuerzos totales ($\Delta\sigma_T$) provocado por la precarga, lo que genera un aumento en la presión de poro (ΔU), posteriormente se requiere de un tiempo (t) para dar lugar a la disipación de la misma y así provocar un incremento en los esfuerzos efectivos ($\Delta\sigma'$).

Pero en el caso de la aceleración de la consolidación por vacío, no hay un incremento en la presión de poro (ΔU), ya que al inducir el vacío a través de los drenes horizontales y verticales, se presenta una succión, la cual extrae el agua que se encuentra atrapada en los vacíos de la masa de suelo, reduciendo directamente la presión intersticial ($-U$). Provocando así, una disminución en la relación de vacíos (Δe), la cual genera un cambio volumétrico más uniforme y acelerando con facilidad el

proceso de consolidación, ya que durante esta etapa, proporcionalmente van incrementando los esfuerzos efectivos ($\Delta\sigma'$), y todo esto manteniendo constantes los esfuerzos totales ($\Delta\sigma_T$).

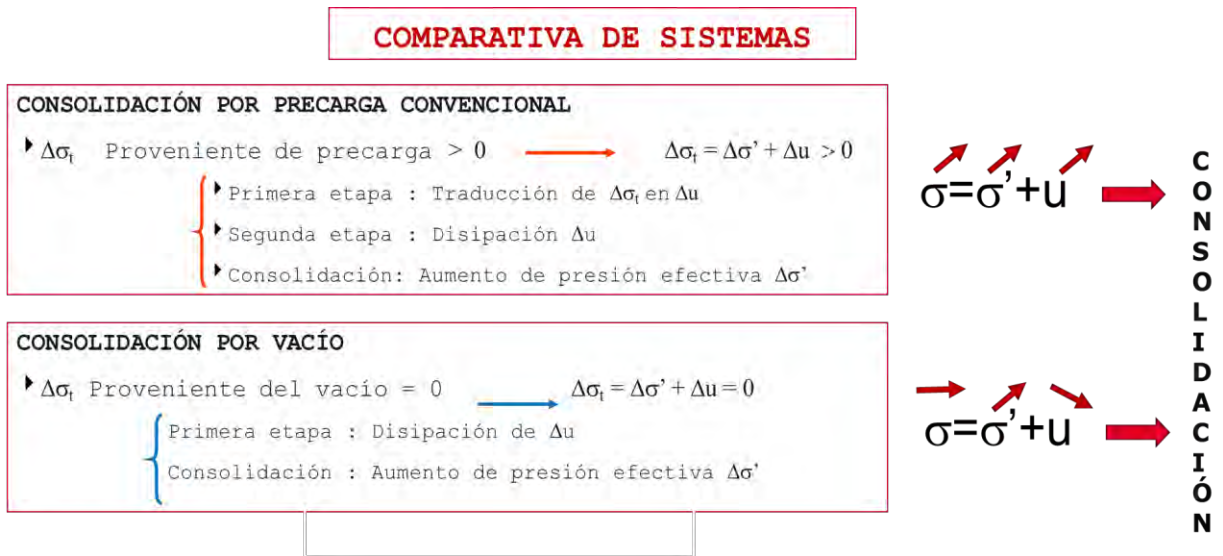


Figura 25.- “Comparativa de sistemas y análisis de esfuerzos.” Fuente: Menard México.

Además, al generar un sistema impermeable debido a la membrana y a la pared natural que forma la arcilla, el suelo siente lo equivalente a cierta carga homogénea e isotrópica. Ya que al introducir el vacío a la masa de suelo, esta se contrae en todas sus direcciones con una presión equivalente a la atmosférica.

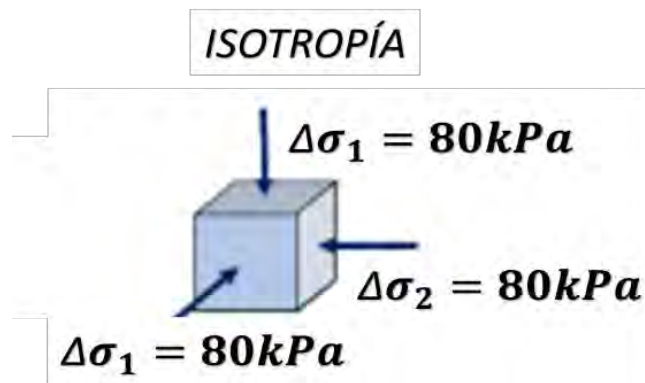


Figura 26.- “Incremento de esfuerzos de manera isotrópica.” Fuente: Menard México.

Esto mismo permite colocar material de relleno sobre la plataforma sin generar una falla por resistencia al esfuerzo cortante, ya que durante el tratamiento la masa de suelo está sujeta a esfuerzos isotrópicos de confinamiento. Así mismo, es posible realizar el tratamiento a zonas que colindan con alguna excavación, río o mar.

Es decir, que la aplicación del vacío genera directamente la disipación de las presiones de poro sin necesidad de que estas hubieran aumentado en una fase previa, lo cual disminuye una etapa del proceso de consolidación que resulta obligatoria en una precarga de terraplén convencional.

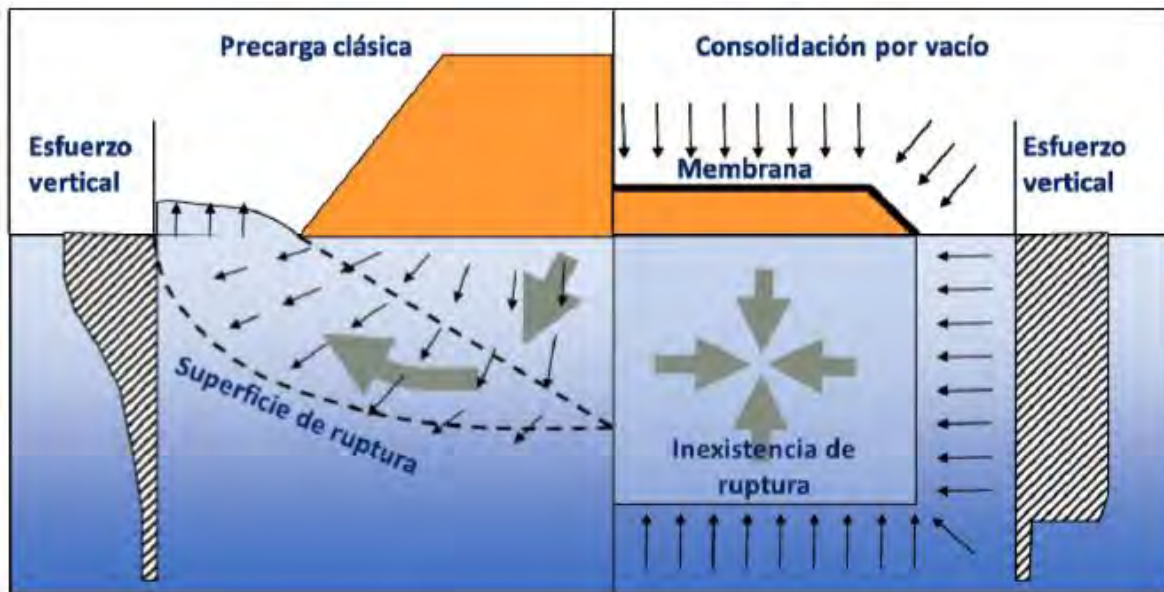


Figura 27.- “Comparación de distribución de esfuerzos verticales y cortantes en las técnicas de ‘precarga clásica’ utilizando un terraplén de precarga, y Consolidación por Vacío.” **Fuente:** Menard México.

La zona de tratamiento queda confinada, no solo en superficie, sino, también a profundidad, la cual permite tener una distribución de esfuerzos vertical uniforme a comparación de una precarga convencional que presenta un efecto de bulbo Boussinesq.

3.4.3. Analogía Menard

Con base a la analogía de Karl Terzaghi, se puede representar el proceso de consolidación acelerado con el principio de la aplicación de vacío.

El proceso puede llevarse a cabo sin la necesidad de incrementar los esfuerzos totales, es decir, evitando colocar una carga sobre el pistón. Esto es posible insertando una manguera directamente en la perforación y dicha manguera debe estar conectada a una bomba de vacío.

Teniendo este arreglo, al encender la bomba de vacío, el fluido irá saliendo gradualmente, provocando una reducción de volumen debido al espacio que ocupaba dicho fluido. Así, simultáneamente, el pistón tenderá a ejercer una fuerza sobre el resorte lo que representa el incremento de los esfuerzos efectivos ($\Delta\sigma'$).

El vacío que genera la bomba, activa la presión atmosférica que existe en el medio lo cual representa una presión isotrópica que comienza a actuar en el sistema, y por consecuencia natural del vacío provocado, el agua comienza a fluir tratando de compensar la diferencia de presiones. Pero sin la necesidad de esperar a que el fluido soporte una carga inicial y después se requiera abrir la válvula para que el resorte empiece a ejercer un esfuerzo debido al exceso de la presión del fluido.

Es decir, al utilizar el sistema de vacío, el resorte empieza a ejercer un esfuerzo desde el momento en que se enciende la bomba ya que es inmediata la extracción del fluido (disminución inmediata de la presión de poro). Lo cual permite acelerar el proceso de consolidación.

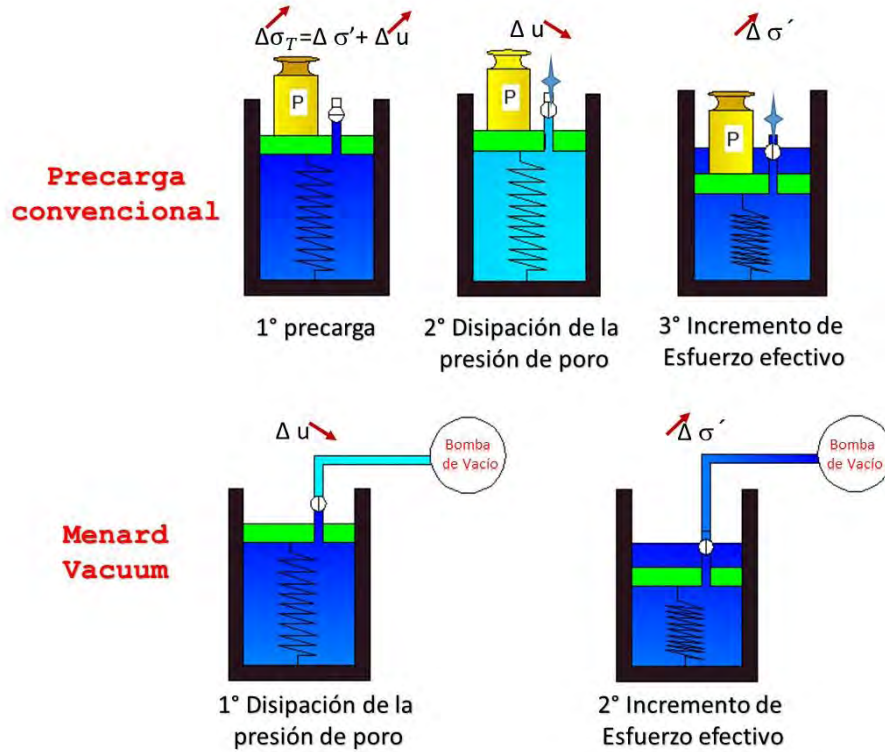


Figura 28.- “Analogía de La consolidación acelerada por vacío tomando como referencia el modelo mecánico de Karl terzaghi.” **Fuente: Menard México.**

Existen otras analogías que simulan el comportamiento del suelo al ser mejorado por la técnica de consolidación acelerada por vacío con membrana (Menard Vacuum). Una de ellas es simular un balde lleno de agua y granos de café, los cuales representan los granos del suelo fino saturado y el nivel de aguas freáticas.

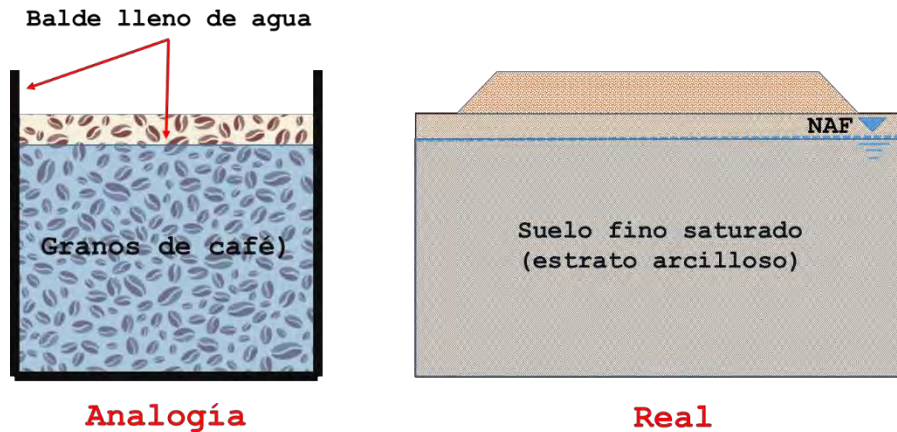


Figura 29.- “Primera fase de la analogía.”

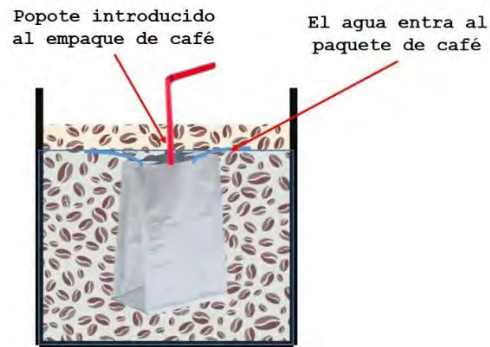
Posteriormente se introduce un empaque abierto que contendrá una parte de los granos de café saturados. Este empaque representa las paredes impermeables naturales, formadas por la arcilla que se encuentra en los límites del arreglo de drenes verticales hincados en el la masa de suelo arcilloso.



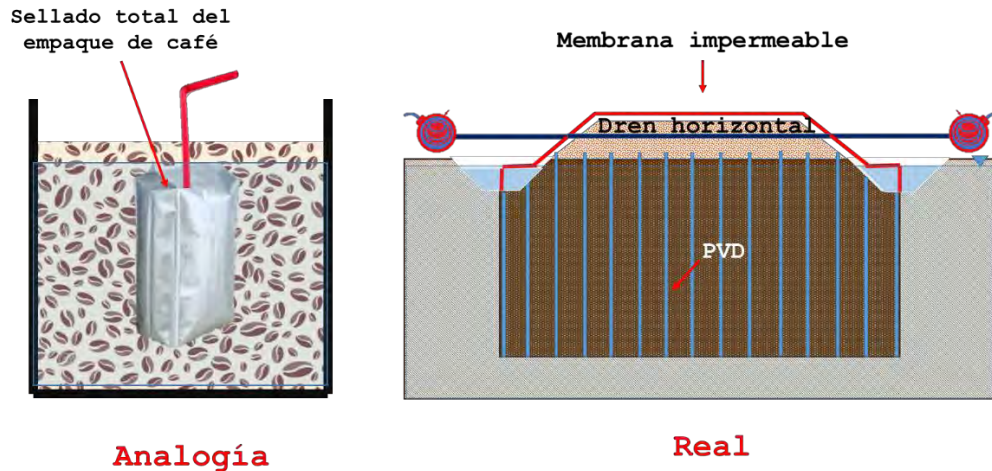
Figura 30.- “Segunda fase de la analogía.”

Después se instala un popote o pajilla dentro del empaque abierto, el cual simulará la instalación de drenes horizontales, los cuales van conectados directamente a la bomba de vacío.

Si en este punto iniciáramos la succión en el popote, estaríamos extrayendo el agua de todo el balde, ya que el agua entrará al empaque y de esta manera el sistema se volvería ineficiente. Es decir, que si se encendieran las bombas de vacío en escala real, sólo estaríamos provocando un abatimiento del nivel freático (bombeo).

**Analogía***Figura 31.- "tercera fase de la analogía."*

En cambio, si cerramos totalmente el empaque de café dejando únicamente la salida del popote, se formaría un sistema totalmente hermético y aislado. Lo cual representa la colocación de la membrana impermeable anclada en la zanja de estanqueidad.

**Analogía****Real***Figura 32.- "Cuarta fase de la analogía."*

De esta manera al succionar por el popote, se extrae únicamente el agua que se encuentra entre los granos de café dentro del empaque. Sin alterar el nivel de agua que se tiene en el balde.

Así mismo se produce una carga isotrópica en todo el empaque al inducir el vacío, generando una contracción del mismo, dando lugar a la reducción de los espacios que había entre cada grano de café y provocando un mayor contacto entre cada grano. Es decir, se reduce el volumen del empaque de café.

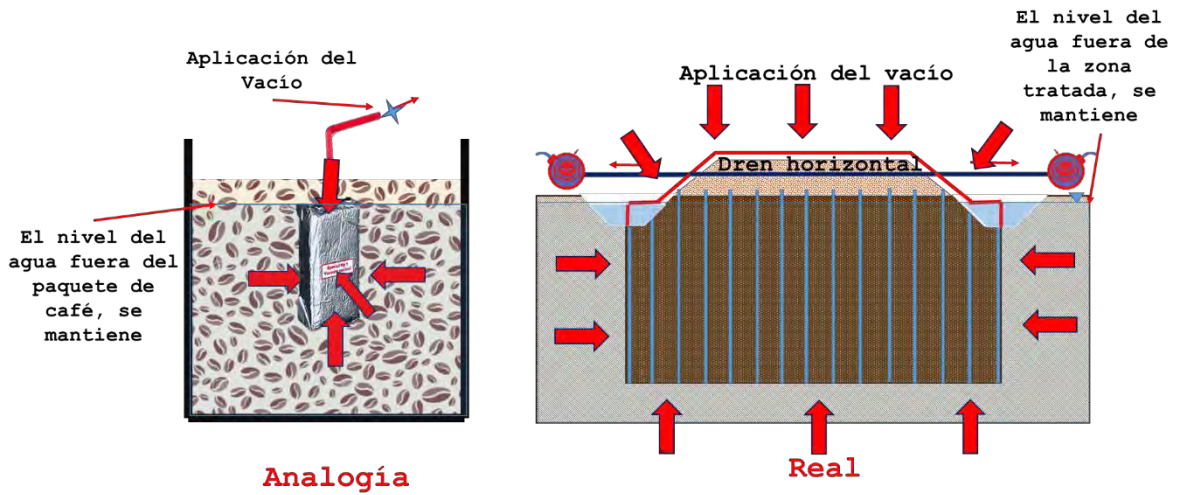


Figura 33.- "Quinta fase de la analogía."

Esto representa la aplicación del vacío, una vez formado el sistema impermeable, ya que este que se transmite por toda la masa de suelo generando una carga isotrópica proporcional a la presión atmosférica. Y el agua extraída es únicamente el agua del proceso de consolidación, disminuyendo la relación de vacíos que provoca a mayor velocidad un cambio volumétrico (asentamiento). Y esto sin afectar el Nivel de aguas freáticas.

CAPÍTULO 4

***Panel de prueba aplicando un mejoramiento con el
método de consolidación acelerada por vacío con
membrana (MENARD-VACUUM) en el Ex Lago de
Texcoco para el NAICM***

4. PANEL DE PRUEBA APLICANDO UN MEJORAMIENTO CON EL MÉTODO DE CONSOLIDACIÓN ACELERADA POR VACÍO CON MEMBRANA (MENARD-VACUUM) EN EL EX LAGO DE TEXCOCO PARA EL NAICM

Con el fin de conocer el comportamiento del suelo arcilloso del Ex Lago de Texcoco al ser inducido a un tratamiento mediante la aceleración de la consolidación por vacío con membrana (Menard Vacuum). Se aprueba la ejecución de un panel de prueba dentro del polígono donde se construye el Nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (NAICM).

La ubicación del panel se asignó en una zona la cual es considerada como virgen. Ya que durante las primeras campañas de exploración geotécnica por parte del Grupo Aeroportuario de la Ciudad de México (GACM), para conocer la estratigrafía general del polígono, coincidió que esta zona contaba con un estado normalmente consolidado (OCR=1).



Figura 34.- “Ubicación de la zona de pruebas y de la prueba de Menard Vacuum, dentro del polígono del NAICM.” **Fuente: GACM.**

El conocer la ubicación de la zona a tratar nos da información a grandes rasgos sobre la tipología del suelo. Conociendo la historia geológica de la Cuenca del Valle de México y el Lago de Texcoco, se puede simular o estimar un cierto comportamiento del suelo, sin embargo cada sección ha tenido una cronología de cargas diferente.



Figura 35.- “Ubicación de la prueba de Menard Vacuum, dentro del Valle de México.” **Fuente:** Google Maps.

Para conocer con claridad y exactitud el comportamiento del suelo tan particular del Ex Lago de Texcoco se realiza por primera vez en México y América, este tipo de tratamiento de suelos finos saturados.

El procedimiento ha sido muy riguroso con el fin de analizar cada fenómeno que se presente. Y lograr, así, dar una interpretación confiable y tomar decisión para proyectos futuros.

El panel de prueba consiste en una plataforma de 50 m de ancho y 70 m de largo con orientación Sur-Norte. Esta geometría y orientación tiene como propósito unificar las características geométricas de todos los paneles de prueba realizados, y así proporcionar una comparación más significativa. También, el tener una sección rectangular, puede representar a pequeña escala el comportamiento de alguna pista o plataforma si se llegará a utilizar alguna técnica específica de mejoramiento de suelo durante el proyecto del NAICM.

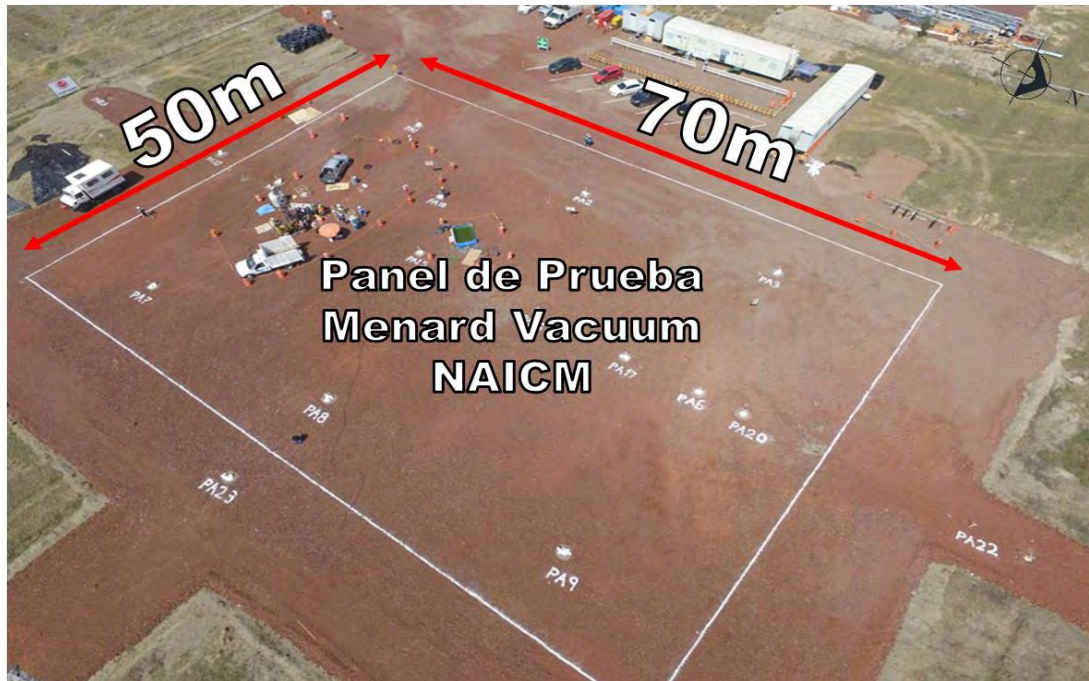


Figura 36.- “Geometría del panel de prueba Menard Vacuum (50 m x70 m) orientación Sur-Norte”
Fuente: Menard México.

4.1. PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO

Cada una de las actividades se realizó con toda rigurosidad ya que el objetivo no era realizar una producción masiva, sino comprender el fenómeno. La construcción del Panel de Prueba para el mejoramiento del suelo arcilloso por medio de la consolidación acelerada por vacío, con membrana (Menard Vacuum) se describe a continuación.


Tabla 02.- “Procedimiento constructivo del Panel de prueba para el mejoramiento del suelo arcilloso del Ex Lago de Texcoco por medio de la consolidación acelerada por vacío, como parte del proyecto del NAICM”. Menard México.

ACTIVIDAD Y DESCRIPCIÓN	PERIODO Y FOTOGRAFÍA
<p>1. Nivelación y despalle</p> <p>Con el propósito de tener una plataforma limpia y estable, se retira la vegetación existente y el material orgánico.</p>	<p>Del 03/05/2017 al 05/05/2017</p> 

<p>2. Plataforma de trabajo 1° etapa</p> <p>Para poder circular sobre la zona del panel y realizar la construcción del mismo, se requiere colocar una plataforma de trabajo, la cual consistió en un terraplén de tezontle de 50cm de altura con un máximo de 10% de finos ya que se requiere tener una plataforma permeable.</p>	<p>10/05/2017 al 18/05/2017</p> 
<p>3. Exploración Geotécnica</p> <p>Para conocer la estratigrafía y los parámetros del suelo fue necesario realizar una campaña de exploración donde se ejecutaron pruebas de resistencia y permeabilidad en sitio. Las pruebas que se realizaron son:</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Piezoconos (CPTu). ➤ Disipaciones de presión de poro(U). ➤ Prueba de penetración estándar (SPT). ➤ Prueba de veleta (VT) ➤ Sondeos selectivo (TGC) ➤ Lefranc (LF) <p>(En el punto 4.2 se muestra el plano de ubicación)</p>	<p>22/05/2017 al 23/06/2017</p>  
<p>4. Instrumentación Geotécnica</p> <p>Para conocer el comportamiento del suelo antes, durante y después del tratamiento, se instaló una serie de instrumentos geotécnicos en diferentes zonas y profundidades estratégicas.</p> <p>(En el punto 4.3 se muestra un enlistado con la instrumentación instalada y su ubicación)</p>	<p>22/05/2017 al 23/06/2017</p>  

<p>5. Plataforma de trabajo 2° etapa</p> <p>Se colocaron 50cm adicionales de material de tezontle con las mismas características que el de la primera etapa. Esto con el fin de conformar un terraplén de 1m de espesor y poder circular la maquinaria pesada para el hincado de drenes verticales.</p>	<p>29/06/2017 al 04/07/2017</p> 
<p>6. Hincado de drenes verticales</p> <p>Se realizó el hincado de drenes verticales con un arreglo triangular a cada 1.2 m y a una profundidad de 27m a partir del Nivel de Terreno Natural (NTN). Estos facilitan la salida del agua durante el proceso de consolidación.</p>	<p>06/07/2017 al 24/07/2017</p> 
<p>7. Colocación de drenes horizontales</p> <p>Se realizó la colocación de una serie de drenes horizontales, estos ubicados 50 cm bajo el nivel de plataforma. Los cuales están conectados directamente a las bombas de vacío.</p>	<p>12/07/2017 al 04/08/2017</p> 
<p>8. Zanja de estanqueidad perimetral</p> <p>La zanja de estanqueidad se realizó en toda la parte perimetral de la zona a tratar, con el objetivo de anclar la membrana impermeable bajo en NAF y formar el sistema hermético impermeable.</p>	<p>07/08/2017 al 06/08/2017</p> 

<p>9. Primera cama de arena de tezontle</p> <p>Sobre la plataforma de trabajo se colocó una cama de 5cm de arena de tezontle con un máximo de 10% de finos. Ésta con el propósito de formar una protección bajo la membrana y no tener rupturas por punzonamiento debido a los granos angulosos del tezontle.</p>	<p>14/08/2017 al 23/08/2017</p> 
<p>10. Colocación de la membrana impermeable</p> <p>Con el fin de tener un sistema totalmente aislado, impermeable y hermético que permita aplicar un vacío a la masa de suelo, se instaló la membrana impermeable sobre la plataforma y se ancló a la zanja de estanqueidad bajo el NAF.</p>	<p>24/08/2017 al 01/09/2017</p> 
<p>11. Conexión del sistema de Vacío</p> <p>Se realizó la conexión de los drenes horizontales a las estaciones de Bombeo donde se encuentran las bombas de vacío. Se selló herméticamente cada una de las salidas que perforan la membrana con el fin mantener la zona estanca.</p>	<p>04/09/2017 al 07/09/2017</p> 
<p>12. Arranque del sistema de Vacío</p> <p>Se encienden las bombas de vacío y se verifica el funcionamiento de las mismas. Con esto se da inicio al mejoramiento del suelo arcilloso por medio de la aceleración de la consolidación aplicando un vacío (Menard Vacuum).</p>	<p>07/09/2017</p> 

<p>13. Verificación del sistema</p> <p>Una vez arrancado el sistema de Vacío, se verificó el comportamiento de las presiones aplicadas y el estado de la membrana para continuar con la etapa de relleno.</p>	<p>08/09/2017 al 02/10/2017</p> 
<p>14. Segunda cama de Arena de tezontle</p> <p>Se colocó una cama de arena de 30cm de espesor, con el fin de proteger la parte superior de la membrana y evitar su ruptura por punzonamiento al colocar granos angulosos de tezontle que conformarán el Relleno de compensación.</p>	<p>02/10/2017 al 06/10/2017</p> 
<p>15. Relleno de compensación</p> <p>Se colocó un terraplén de un metro de tezontle con el propósito de tener una plataforma donde se pueda circular durante el tratamiento, así mismo, para compensar el nivel original una vez llevado a cabo el asentamiento.</p>	<p>17/10/2017 al 01/11/2017</p> 

De esta manera se realizó el procedimiento constructivo del panel de prueba. Posterior a esto, se realiza el monitoreo constante de la instrumentación instalada, la cual también nos puede indicar si la ejecución de cada etapa fue realizada de manera correcta, ya que el sistema es sumamente sensible y se comporta de manera distinta durante cada etapa constructiva, permitiendo realizar correcciones, si es necesario, en tiempo y forma.

4.2. EXPLORACIÓN GEOTÉCNICA

Como se mencionó con anterioridad, es sumamente importante conocer, en principio, el tipo de suelo con el cual vamos a tratar, ya que con base a esto, se tomarán decisiones sobre procedimientos

constructivos y estimaciones de resultados. Es por ello que se realizó una campaña de exploración geotécnica, previa a las actividades constructivas. Realizando diferentes pruebas en sitio como son:

- pruebas de Piezoconos (CPTu).
- Disipaciones (U).
- Prueba de penetración estándar (SPT).
- Prueba de veleta (VT)
- Sondeos selectivo (TGC)
- prueba Lefranc (LF)

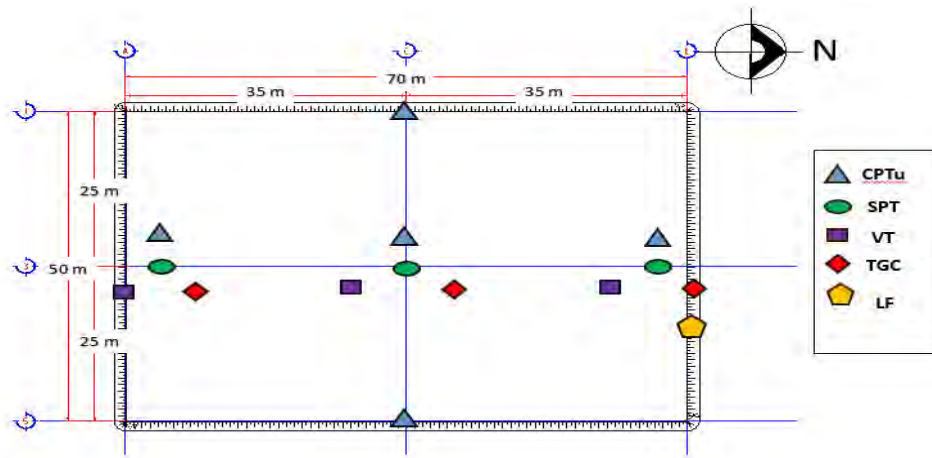


Figura 37.- “Ubicación de la exploración geotécnica: pruebas en sitio y extracción de muestra”

Fuente: Menard México.

Para conocer las condiciones iniciales y verificar la factibilidad de poder aplicar la técnica de mejoramiento por aceleración de consolidación por vacío con membrana (Menard Vacuum), se requirió conocer la estratigrafía, los espesores de cada estrato, el Nivel de Aguas Freáticas y principalmente identificar los lentes drenantes.

Para ello se inició con pruebas de Piezocono (CPTu) en los cuatro puntos cardinales del panel y al centro. Así se obtuvo una estratigrafía general de la zona a tratar y se identificaron los estratos que podrían llegar a complicar un poco la técnica, como son los lentes de arena.

Posteriormente, con el fin de obtener claramente las propiedades físicas del suelo, se realizaron sondeos de penetración estándar (SPT) en la zona Sur, Central y Norte. Una vez conocida la estratigrafía se pudo observar que hay una horizontalidad en los estratos, que el Nivel de Agua Freáticas se encuentra a 0.8 m bajo el Nivel de Terreno Natural y la Formación Arcillosa Superior alcanza hasta los 350% de contenido de agua.

Es sumamente importante conocer la influencia que puede llegar a tener pequeños lentes de arena que puedan servir como fronteras drenantes es por ello que se realizó una prueba de permeabilidad en el lente de mayor espesor con el método de Lefranc. Se pudo concluir que dicho lente es suficientemente impermeable, contando con una permeabilidad de $k=2.3 \times 10^{-7} \left(\frac{m}{s}\right)$. De esta manera se pudo concluir que no existe la necesidad de realizar algún ajuste en el proceso constructivo convencional.

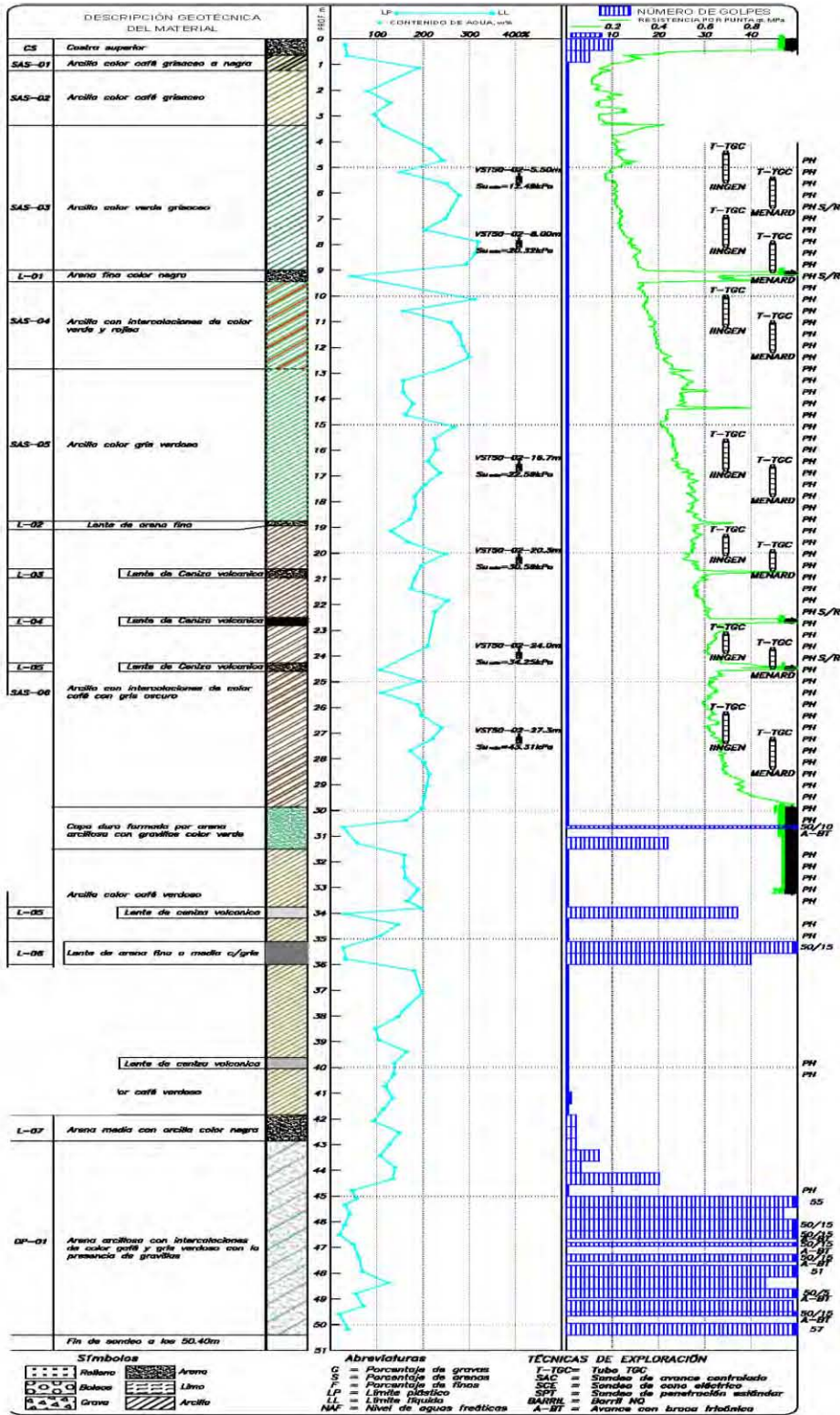


Figura 38.- "Estratigrafía y Resultados de las pruebas en sitio, SPT, CPTu y contenidos de agua de las muestras obtenidas con tubo partido a cada 45cm en SPT" Fuente: Menard México.

Con el gráfico anterior se pudo realizar una comparación directa entre la resistencia por punta de la prueba del CPTu y los contenidos de agua existentes, ya que a menor resistencia, el contenido de agua es mayor y viceversa.

También, el llevar a cabo esta campaña de exploración geotécnica, previa al tratamiento o mejoramiento de aceleración de consolidación por vacío con membrana (Menard Vacuum), nos permite conocer las propiedades iniciales y referenciales del suelo. Así un vez concluido el tiempo de tratamiento se puede realizar otra campaña de exploración para verificar los cambios y mejoras que puede llegar a tener el suelo.

Así mismo, al tener una columna estratigráfica definida, se tomó la decisión para seleccionar la ubicación y profundidad de cada instrumento geotécnico de medición y llevar el monitoreo del comportamiento de cada uno de los estratos identificados.

Cabe mencionar que las características estratigráficas de la zona del panel, concuerdan con los datos generales e históricos del Lago de Texcoco, esto sirve como referencia para estimar ciertos comportamientos.

4.3. INSTRUMENTACIÓN GEOTÉCNICA

Como se mencionó con anterioridad, la técnica de mejoramiento por aceleración de la consolidación por vacío con membrana (Menard Vacuum), se realiza en América por primera vez, y no solo eso, sino que se lleva a cabo en las arcillas más deformables y con parámetros muy particulares, Las arcillas del Ex Lago de Texcoco, México. Es por ello que se requirió instalar una serie de instrumentos de monitoreo donde las lecturas son constantes y rigurosas, con el fin de conocer cada uno de los comportamientos del suelo antes, durante y después del tratamiento.

Por otro lado, el monitoreo se lleva de manera frecuente por medio de un sistema automatizado el cual nos permite recabar datos en horarios establecidos, periódicamente y diariamente. Así mismo nos permite visualizar toda la información recabada en el tiempo por medio de un software de seguimiento. En algunos instrumentos es necesario obtener la información de manera manual, pero los valores son procesados y actualizados diariamente en el sistema mencionado anteriormente.

A continuación se muestra una tabla con la instrumentación geotécnica instalada, así como su periodo de lectura.

**Tabla 03.- “Enlistado de la instrumentación geotécnica instalada en el Panel de Prueba Menard Vacuum. Se muestran las cantidades, las profundidades de instalación y periodos de monitoreo”.
Menard México.**

INSTRUMENTO	CANTIDAD TOTAL	PROFUNDIDAD (m)	TIPO DE LECTURA	PERIODO DE LECTURA
Bancos de Nivel Profundo	2	50	Estación total automatizada	Cada 4 horas
Placas de control de asentamientos	27	PLATAFORMA de 1m	Estación total automatizada	Cada 4 horas
Placas de referencia	7	NTN	Estación total automatizada	Cada 4 horas
Piezómetros Eléctricos Push In	19	2,8,12,20,27,35	Datalogger (Automatizado)	Cada 20 minutos
Celda de presión	2	NTR	Datalogger (Automatizado)	Cada 20 minutos
Vacuómetros	13	1° CAPA DE Tezontle.	Manual	Tres veces al día
Piezómetros Casagrande	5	5,8,12,20,27	Manual	1 vez al día
Pozos de Observación	2	5	Manual	1 vez al día
Inclinómetros	7	31	Manual	1 vez al día
Extensómetros Magnéticos	3	31	Manual	1 vez al día

La instrumentación enlistada anteriormente tiene una ubicación tal que permite comparar los sucesos ocurridos en cada zona del panel, la profundidad de dichos instrumentos va referenciada de acuerdo a los sondeos realizados, ya que se buscó instalarlos en los diferentes estratos identificados.

La figura siguiente muestra la ubicación de los instrumentos y para facilitar la identificación de los mismos, se clasifican por color y nombre.

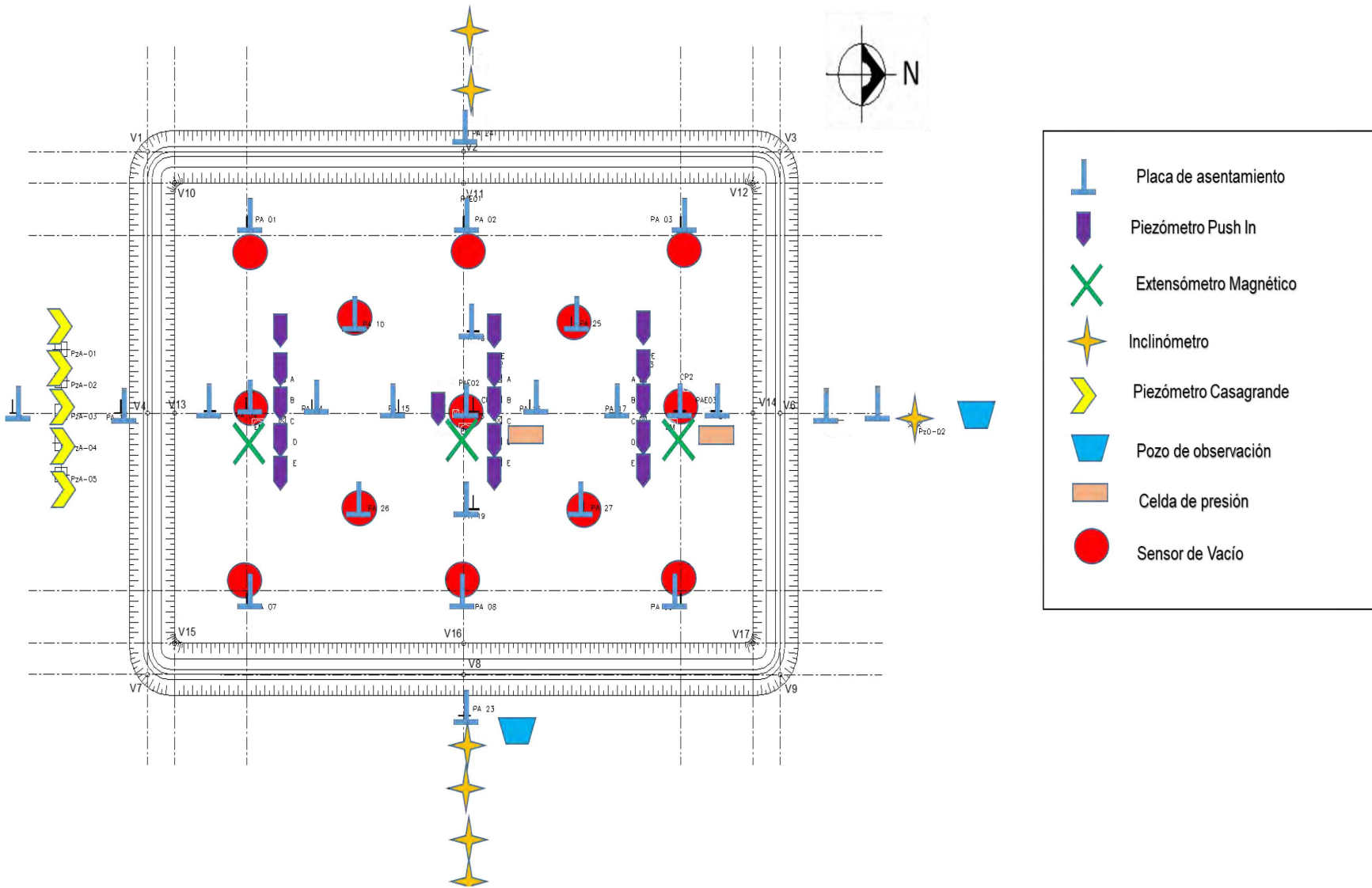


Figura 39.- “Ubicación de la instrumentación geotécnica instalada en el Panel de Prueba menard Vacuum” Fuente: Menard México.

CAPÍTULO 5

Análisis e Interpretación de
comportamiento del suelo con base al
monitoreo de la instrumentación
geotécnica

5. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL SUELO CON BASE AL MONITOREO DE LA INSTRUMENTACIÓN GEOTÉCNICA

Al realizar el proceso de datos recopilados, se obtiene información que permite dar una interpretación del comportamiento del suelo al ser tratado con el sistema de consolidación acelerada por vacío con membrana. También permite dar seguimiento al funcionamiento del sistema y dar solución inmediata si se registra una baja en la eficiencia.

El análisis que se presenta a continuación, abarca las tres primeras etapas del sistema, las cuales son las siguientes:

- **Antes del inicio del vacío:** el comportamiento que presenta suelo durante el procedimiento constructivo.
- **Al inicio del vacío:** el comportamiento del suelo al encender las bombas de vacío.
- **A los tres meses del vacío:** el comportamiento del suelo después de ser tratado durante tres meses consecutivos.

Con base a estas etapas se analizan los diferentes comportamientos que presenta el suelo y se puede conocer las ventajas y desventajas del método. Es por ello que se analiza cada uno de los instrumentos de medición y se representan sus variantes en diferentes gráficas, las cuales facilitan la interpretación.

5.1. MONITOREO DE DEPRESIONES

5.1.1. Antes del inicio del Vacío

Los captore de depresión (vacuómetros) son instalados durante la etapa de colocación de drenes horizontales, 30 cm por debajo de la membrana impermeable y distribuidos uniformemente dentro del panel, con el fin de monitorear la depresión transmitida al suelo y verificar la eficiencia del sistema. Dichos sensores están conectados a sus carátulas de lectura que están numeradas y que se sujetan en un tablero localizado fuera del terraplén de prueba. Un plano en planta con los números correspondientes a cada uno de los sensores indica su ubicación espacial dentro del panel con lo que permite conocer la depresión que se aplica en cada zona del panel. Así mismo se coloca un Vacuómetro en cada una de las bombas de vacío para monitorear la eficiencia de las mismas. Antes de dar inicio al sistema, se verifica que los Vacuómetros se encuentren correctamente conectados a los sensores y que correspondan a la ubicación asignada.

5.1.2. Al inicio del Vacío

Al dar inicio al sistema, la depresión en las bombas alcanzó hasta 78 kPa y el vacío medido en los vacuómetros ubicados bajo la membrana fue de hasta 70 kPa, dando así una eficiencia en el sistema mayor al 90%. Tener una eficiencia alta, nos permite confirmar que el sistema es hermético. Los valores registrados en los diferentes vacuómetros fueron homogéneos lo cual afirma que existe isotropía al aplicar la carga. Tener 70 kPa bajo la membrana es comparable a tener una presión en la superficie del suelo equivalente a la que ejerce un terraplén de tezontle ($\gamma = 14 \frac{kN}{m^3}$) de 5 m de altura o de basalto ($\gamma = 20 \frac{kN}{m^3}$) de 3.5 m de altura aplicados en una sola etapa, solo que en el caso del vacío las presiones son isotrópicas (iguales en todas direcciones y uniformes en profundidad).

Gracias a que el sistema estaba perfectamente hermético, al momento de la aparición de una fuga en la membrana por el punzonamiento de una grava de tezontle en ella, las depresiones marcadas en los vacuómetros cercanos a la zona de la perforación bajaron inmediatamente, por lo que dicha fuga fue fácilmente localizable permitiendo realizar la reparación de manera inmediata. Una vez reparada la fuga, las depresiones crecieron de forma uniforme a los valores que se tenían en un inicio.

Es importante remarcar que la reparación de fugas no es una actividad compleja no demanda un tiempo excepcionalmente largo.

Por otro lado, fue notable identificar que, al momento de la colocación del relleno de compensación, las depresiones medidas disminuían por efecto de reacción a la presión nueva que se aplicaba por arriba de la membrana. Pasado un poco de tiempo, las depresiones volvían a aumentar a los valores que se tenían antes de la colocación del relleno.

5.1.3. A los tres meses del Vacío

Debido al asentamiento generado por la consolidación de las arcillas gracias a la aplicación del vacío, los drenes horizontales poco a poco fueron cambiando de nivel hasta ubicarse por debajo del nivel de las bombas de vacío. Esta diferencia de niveles provoca a disminución de la eficiencia del sistema y, por tanto, las depresiones registradas disminuyeron. Para disminuir este efecto, las bombas se reubicaron a un nivel más bajo, para localizarlas a la altura de la salida de los drenes horizontales y recuperar la eficiencia. Con el paso del tiempo los asentamientos se incrementaron y será un poco más complicado bajar el nivel de las bombas, por ende, las depresiones tenderán a ir disminuyendo. Se estima que la eficiencia será mayor a 60 kPa en promedio.

Al inicio del sistema existía una homogeneidad en la aplicación del vacío, la cual ha disminuido también con el paso del tiempo: la depresión registrada a los tres meses es mayor en los vacuómetros ubicados en el perímetro del panel de prueba en comparación con lo que se mide en los que se ubican en la parte central. Esto está en función del asentamiento que se ha producido, el cual es ligeramente mayor en la zona central que en la periferia (efecto de borde). En términos generales, en la zona perimetral bajo la membrana, se tiene un promedio de 63 kPa y al centro 61 kPa. El vacío medido directamente en las bombas casi no presenta variaciones, teniendo valores de 74 kPa en promedio.

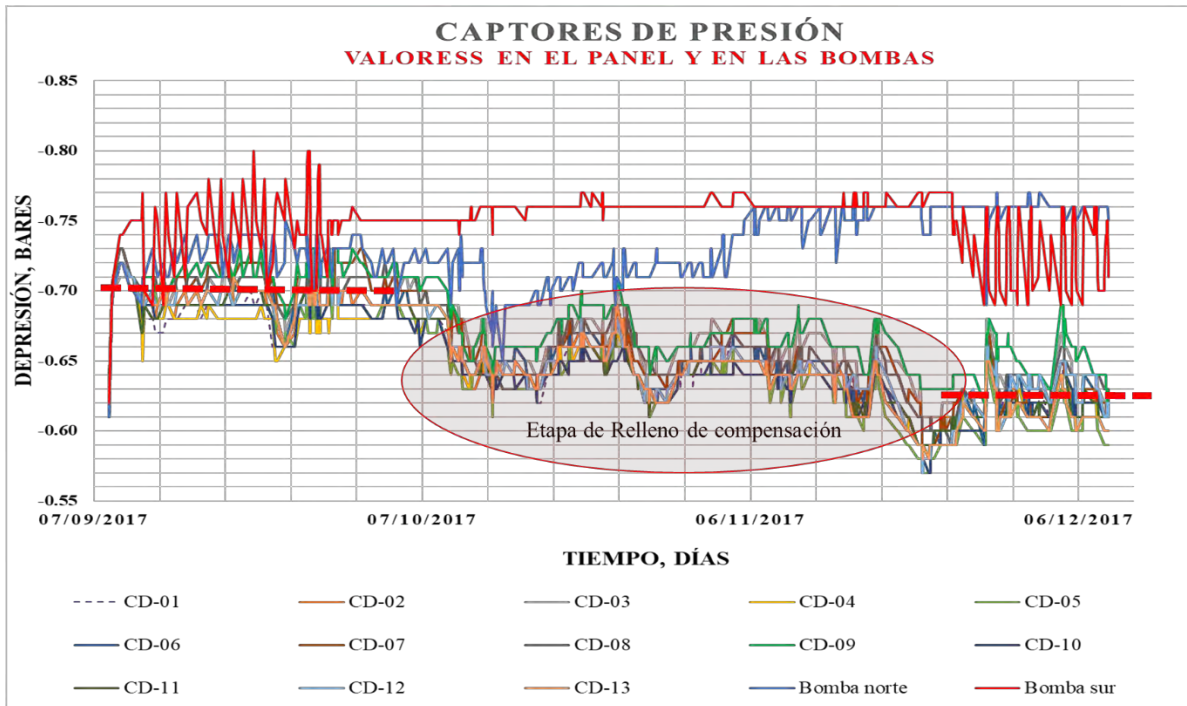


Figura 40.- “Gráfica del comportamiento de las presiones en el panel y las bombas de vacío, con ampliaciones en la escala vertical” Fuente: Menard México.



Figura 41.- “Gráfica del comportamiento de las presiones en el panel y las bombas de vacío, con escala vertical mínima y máxima, con el fin de notar la tendencia de las depresiones” Fuente: Menard México.

5.2. EXTRACCIÓN DE AGUA

5.2.1. Antes del inicio del Vacío

Se han instalado tanques de almacenamiento para el agua que se extrae por el sistema de Vacío. La cantidad de agua que entra al tanque se registra con un 'cuenta litros' instalado en el orificio de entrada de cada tanque.

5.2.2. Al inicio del Vacío

Los primeros dos días de operación de las bombas de vacío no se registró salida de agua del panel. Esto debido a que las bombas toman primero el aire que existe en el suelo y después se requiere tiempo para que el agua salga del terreno y avance hacia arriba por la capa drenante de tezontle y alcance los drenes horizontales.

5.2.3. A los tres meses del Vacío

La costra superficial tiene un espesor decreciente de norte a sur de hasta 40 cm en la zona del panel, esto puede ser debido a la erosión y retiro de materia orgánica. Esto provoca una pendiente al sur. La plataforma de trabajo y el relleno de compensación se han construido siguiendo esa pendiente para evitar cambiar en exceso las condiciones de esfuerzos originales del suelo. Esta condición aparentemente provoca que el agua extraída por el proceso de consolidación, tienda a salir por la bomba sur. Es así como, aún con las dos bombas aplicando el vacío, se registra una extracción de agua mayor en la bomba Sur que en la bomba Norte.

La cantidad de agua extraída por día no ha sido constante pero existe una dependencia evidente con el proceso de consolidación: el volumen extraído debe ser proporcional al asentamiento obtenido. Teniendo así un total de $6,274 m^3$ de agua extraída, considerando ambas bombas, esto en los primeros tres meses de aplicación del vacío.

Se ha detectado también una relación entre la depresión registrada en los vacuómetros y el volumen de agua extraída: en el momento en que se extrae más agua, es cuando las depresiones tienen sus picos bajos y, al contrario, cuando deja de salir agua por las bombas las depresiones se estabilizan en sus valores máximos. Esto aparentemente es un comportamiento normal, ya que el sistema requiere mayor energía para extraer el volumen importante de agua, y una vez terminada esta tarea, se estabiliza. De cualquier manera la eficiencia del sistema se comprueba con la historia de depresiones registradas en el tiempo, y las variaciones ocurridas por estos efectos son relativamente pequeñas.

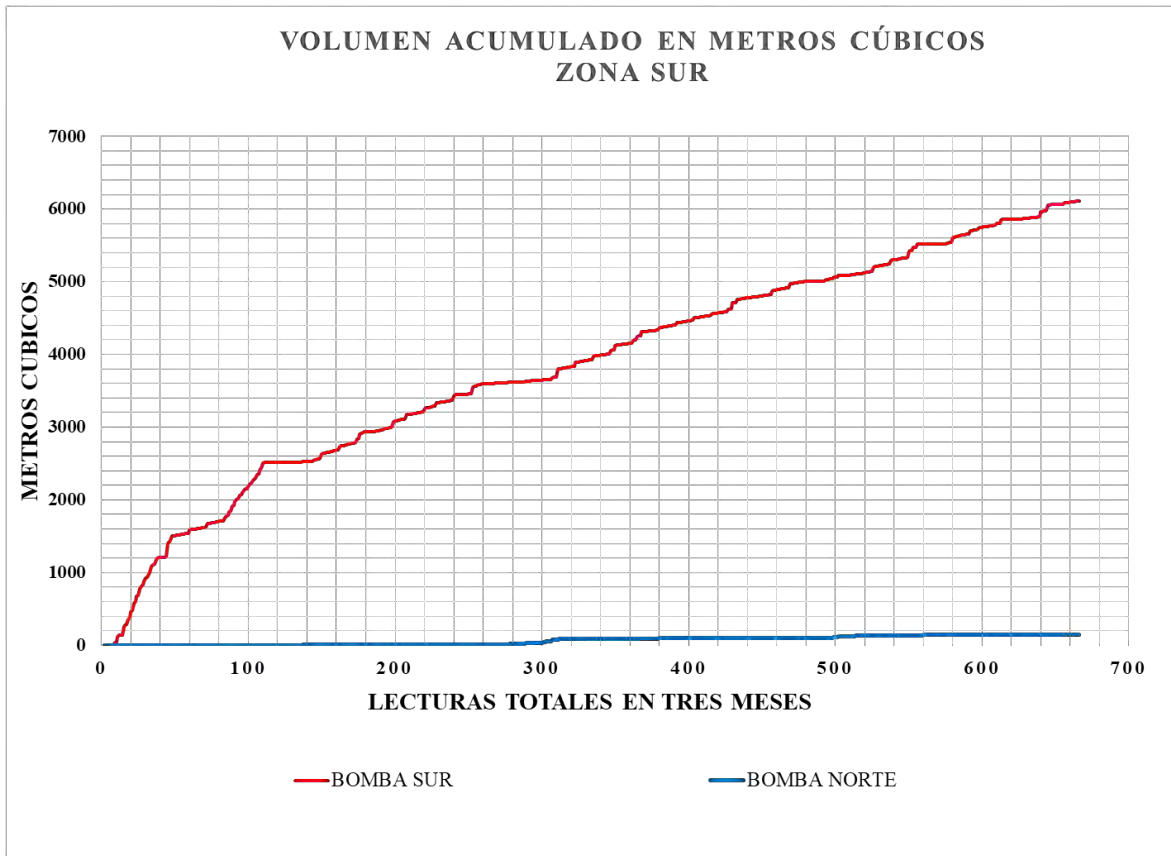


Figura 42.- “Volumen de agua extraída por cada una de las bombas, de acuerdo a las diferentes lecturas tomadas en los cuenta litros durante los primeros tres meses” Fuente: Menard México.



Figura 43.- “Variación del volumen de agua extraída total por cada día y volumen de agua total acumulado” Fuente: Menard México.

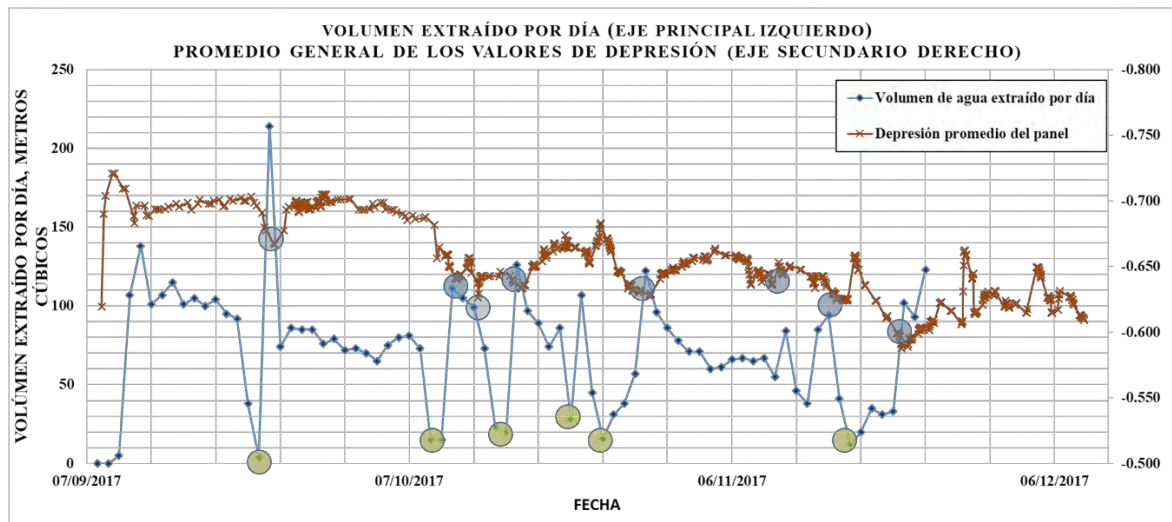


Figura 44.- “Relación entre el volumen de agua extraído por día respecto a las variaciones registradas en las depresiones bajo la membrana” **Fuente: Menard México.**

5.3. PIEZÓMETROS ELÉCTRICOS PUSH IN

5.3.1. Antes del inicio del Vacío

Se realiza la instalación de los piezómetros eléctricos antes del hincado de drenes verticales, con el fin de monitorear el efecto que tiene el procedimiento constructivo en la variación de las presiones intersticiales. Pudo verificarse que los valores iniciales medidos (cero) corresponden a la presión hidrostática del sitio.

Se observó un incremento en la presión de poro al colocar la segunda capa de la plataforma de trabajo la cual consistió en 50 cm de tezontle. Dicho incremento ocurre hasta los 35 m de profundidad. El monitoreo de las presiones de poro durante el hincado de PVD's mostró que no existe una variación importante, manteniéndose prácticamente sin cambio durante todo el proceso de instalación de los drenes..

5.3.2. Al inicio del Vacío

Al momento de dar inicio al vacío, se registra un notable incremento en la presión de poro que se asocia a la presión ejercida por la membrana al tratar de ‘pegarse’ sobre la plataforma de tezontle justo en el arranque del sistema, pero en un segundo tiempo, casi de inmediato, las presiones intersticiales comienzan a disminuir de manera acelerada y en la misma magnitud en toda la longitud de los PVDs. Esto se constata al verificarse abatimientos de los piezómetros instalados en la Formación Arcillosa Superior (FAS), hasta 27 m de profundidad. Por el contrario, el piezómetro instalado a 35 m, por debajo de la Capa Dura (CD), que es una zona considerada fuera de la zona de suelo a tratar, no muestra variaciones. Esto comprueba que el espesor de arcilla de 3.0 m que está sobre la capa dura y que no se ha atravesado con los PVDs forma una capa impermeable que evita el paso del agua y evita el abatimiento de las presiones debajo de esta capa.

5.3.3. A los tres meses del Vacío

Las presiones intersticiales continúan disminuyendo con el transcurso del tiempo, lo cual implica el incremento, en la misma proporción, de los esfuerzos efectivos del suelo (consolidación). Cuando se ha realizado la instalación del relleno de compensación, sí se registran incrementos en la presión de poro, pero con el tiempo estas presiones se disipan rápidamente debido a que el vacío continúa actuando ininterrumpidamente.

El grado de consolidación en cada estrato arcilloso puede estimarse según la disminución de las presiones intersticiales en proporción a la carga de vacío total aplicada.

Es necesario tomar en cuenta que la disipación o disminución de presiones intersticiales registradas en cada piezómetro varía en función de la carga de vacío aplicada por el sistema, de la permeabilidad del estrato, pero también de la cercanía que guarda el instrumento con el Dren Vertical: en ocasiones, un piezómetro puede haber quedado instalado en una posición más cercana al dren que otro, y eso provoca que se registre una disminución más rápida de las presiones intersticiales en unos instrumentos que en otros. Se observa entonces que cada instrumento muestra un valor distinto de disminución, pero también se observa que en general todos llevan la misma tendencia a la baja, lo cual es síntoma de que la consolidación está ocurriendo.

Las gráficas mostradas a continuación representan al historial de registros de presiones intersticiales de cada piezómetro y el decremento que han tenido desde el inicio de la aplicación del vacío.

Deberá llevarse a cabo una interpretación correcta de las disminuciones de las presiones para poder estimar el grado de consolidación que ha ocurrido en la arcilla.

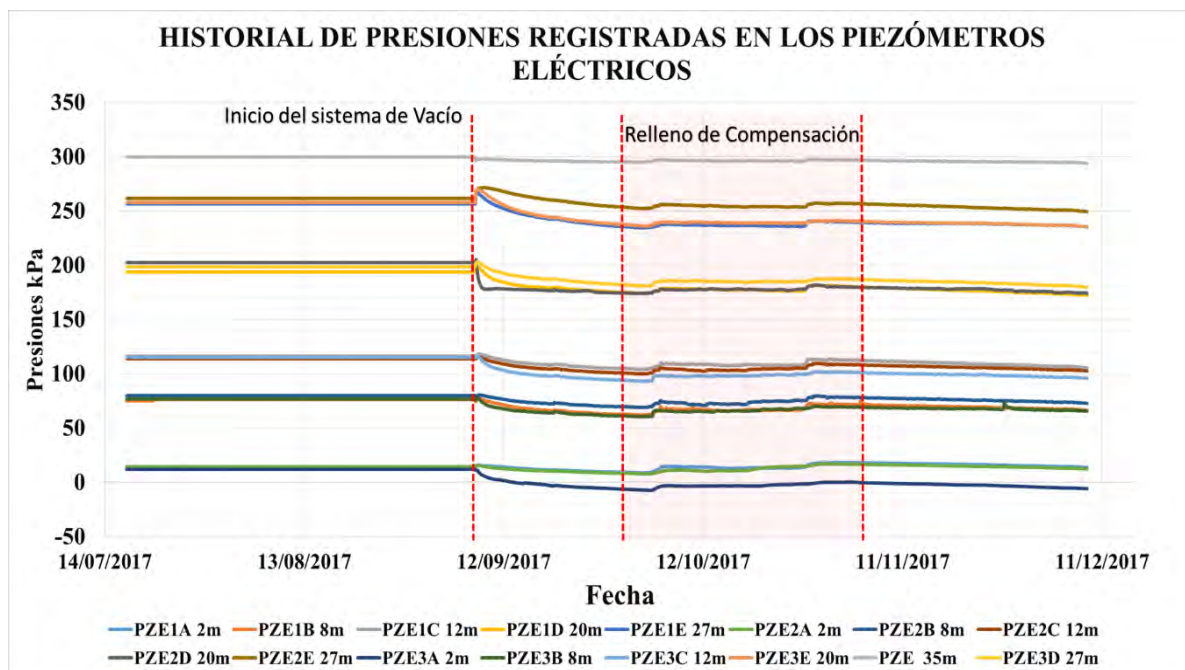


Figura 45.- “Comportamiento de la presión de poro durante las tres etapas: antes, del inicio y tres meses de aplicación del sistema de vacío” **Fuente: Menard México.**

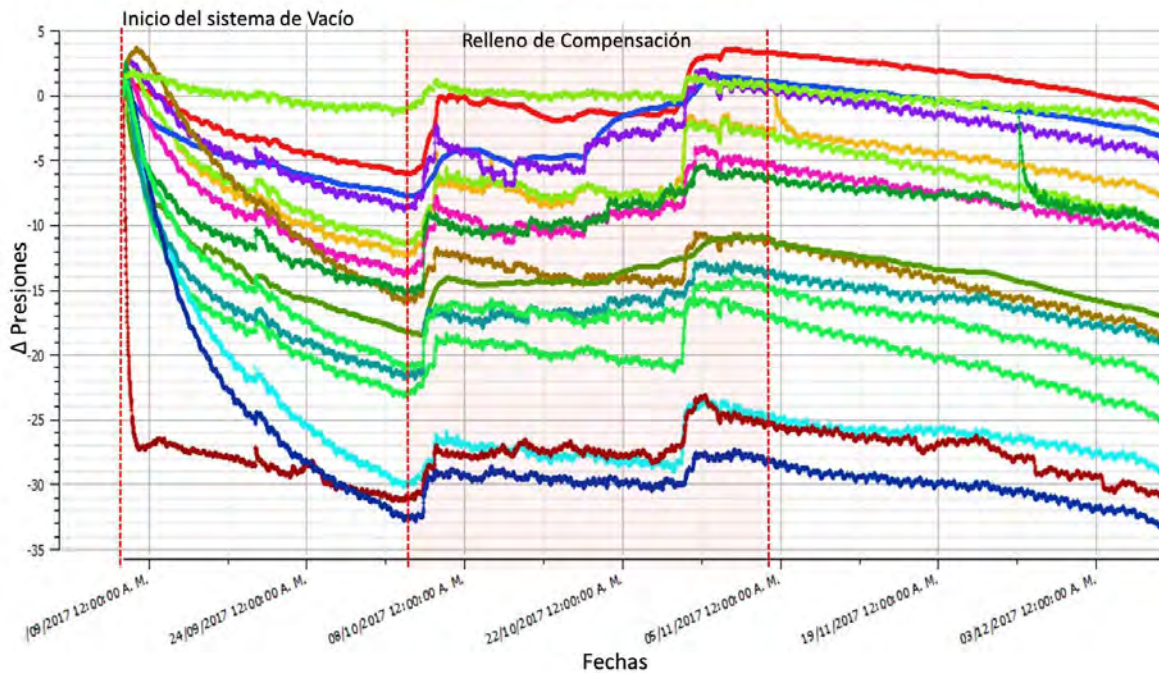


Figura 46.- “Historia de disminución de presiones intersticiales (diferencias entre el valor medido con respecto al valor al inicio del Vacío). Se observa una pendiente similar en todos los casos”

Fuente: Menard México.

5.4. PLACAS DE ASENTAMIENTO

5.4.1. Antes del inicio del Vacío

Las placas de asentamiento se instalan después de la colocación de la primera etapa de la plataforma de trabajo, son monitoreadas manualmente y su nivel se registra con base en referencias instaladas a 50 m de profundidad. Durante cada actividad constructiva, las placas ubicadas dentro de la plataforma, se retiran parcialmente para realizar las actividades correspondientes, y posteriormente se reubican en su sitio de origen (X,Y) al término de cada actividad. Al instalarse la membrana, estas placas se quedan fijas sobre ella y ya no se reubican más.

Los registros históricos de estas placas muestran que durante la etapa de construcción se produjo un asentamiento de 10 cm debido a la colocación de la capa de tezontle de 1.0 m de espesor que conformó la plataforma de trabajo, para la instalación de los drenes verticales y horizontales.

5.4.2. Al inicio del Vacío

Al dar inicio al sistema de Vacío, con las placas totalmente fijas sobre la membrana, se observa un incremento acelerado de los asentamientos, registrándose velocidades de asentamiento de hasta 5 cm al día en la primera semana en todas las placas ubicadas dentro del panel. El efecto de borde es poco notorio al inicio de la aplicación del vacío.

5.4.3. A los tres meses del Vacío

Con el transcurso del tiempo, y el vacío actuando de forma ininterrumpida, la velocidad de asentamientos fue decreciendo (algo que es normal en el proceso de consolidación), pero el asentamiento total alcanzado a los tres meses fue de 2.10 m en la placa central con una velocidad de 1.3 cm al día.

Debido a la colocación del material que conforma el relleno de compensación, el efecto de borde se pronuncia, Se hacen evidentes los bulbos de influencia que ocurren en cargas superficiales, y la oposición que tiene el borde de la zona de prueba a desplazarse debido a la resistencia al esfuerzo cortante existente en los límites de la zona. Se produce entonces un asentamiento diferencial entre las esquinas y el centro de la zona, pero que es relativamente pequeño debido a que la carga de vacío se aplica de manera uniforme en toda la superficie y en toda la profundidad tratada.

A continuación, se muestra el historial de asentamientos de cada una de las placas. De igual manera se muestra una tabla con los asentamientos diferenciales entre las esquinas y el centro, así como perfiles de asentamiento en diversas orientaciones.

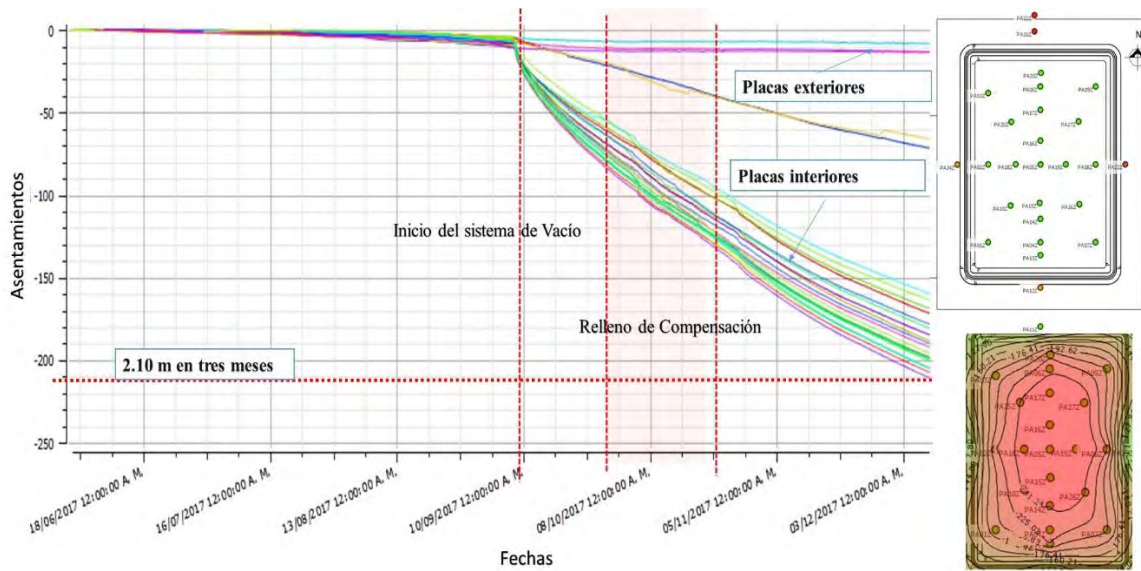


Figura 47.- “Comportamiento histórico de las placas de asentamiento. Es notorio una uniformidad en los asentamientos.” **Fuente: Menard México.**

Tabla 04.- “Asentamiento de cada uno de las placas dentro del panel a los tres meses de operación del sistema de Vacío. Se muestra la diferencia de los asentamientos perimetrales y centrales para conocer el efecto borde”. **Menard México.**

PLACA INTERIOR	ASENTAMIENTO (CM)
PA-01	168
PA-02	185
PA-03	164.5
PA-04	195
PA-05	216.4
PA-06	197.4
PA-07	176.7
PA-08	193.6
PA-09	173.6
PA-10	204.6
PA-13	189.8
PA-14	203.5
PA-15	212.9
PA-16	210.7
PA-17	210.1
PA-18	206
PA-19	210.9
PA-20	183.1
PA-25	201.3
PA-26	203.9
PA-27	210.5
PROMEDIO	196.1
MAXIMA	216.4
MINIMA	164.5

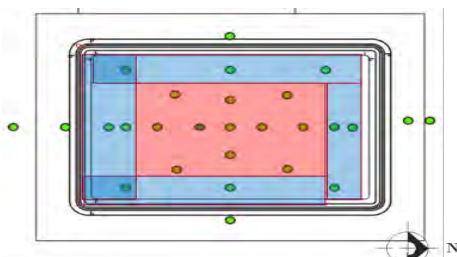
PLACAS CENTRALES	ASENTAMIENTO (CM)
PA-05	216.4
PA-15	212.9
PA-16	210.7
PA-18	206
PA-19	210.9
PA-10	204.6
PA-25	201.3
PA-26	203.9
PA-27	210.5
PA-14	203.5
PA-17	210.1
PROMEDIO	208.25

MAXIMA	216.4
MINIMA	201.3

PLACAS PERIMETRALES	ASENTAMIENTO (CM)
PA-01	168
PA-02	185
PA-03	164.5
PA-13	189.8
PA-20	183.1
PA-07	176.7
PA-08	193.6
PA-09	173.6
PROMEDIO	179.29

MAXIMA	193.6
MINIMA	164.5

EFECTO DE BORDE	
menor diferencia Perimetro v.s. centro	37.11
mayor diferencia PA-05 V.S. PA-03	51.9



En la tabla comparativa anterior se muestra el efecto de borde y el asentamiento diferencial entre las esquinas y el centro. Se observa que el caso más desfavorable es de 51.9 cm de diferencia lo cual corresponde a un 23% del asentamiento al centro. Este valor es poco a diferencia de otro tipo de tratamientos.

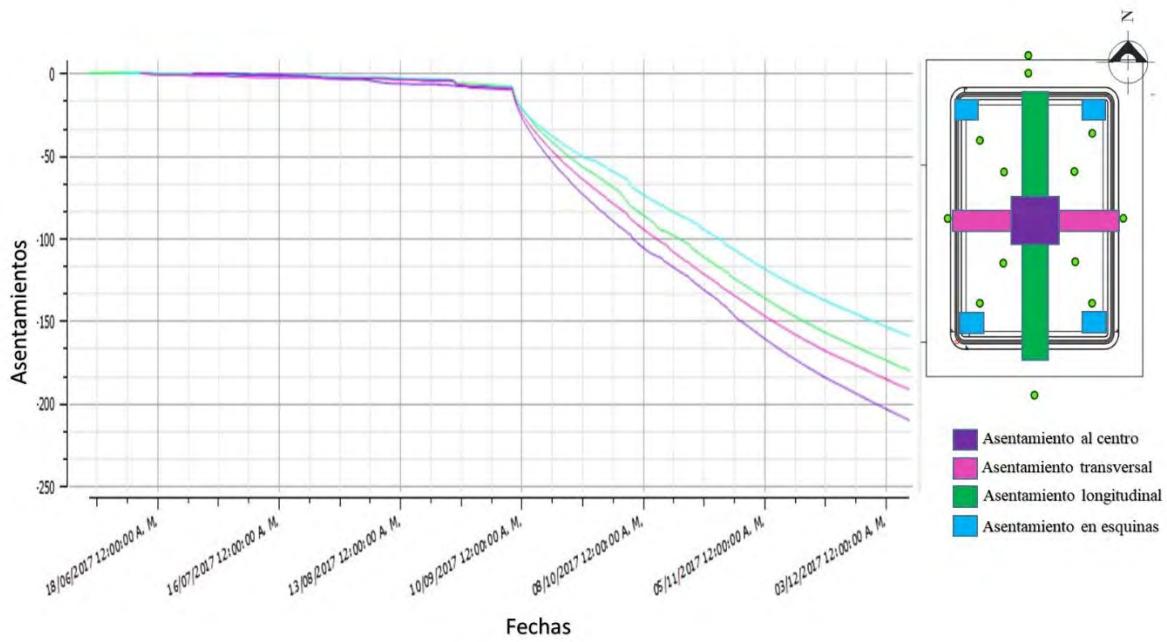


Figura 48.- “Asentamiento de las diferentes zonas del pane: central, transversal, longitudinal y en las esquinas” **Fuente: Menard México.**

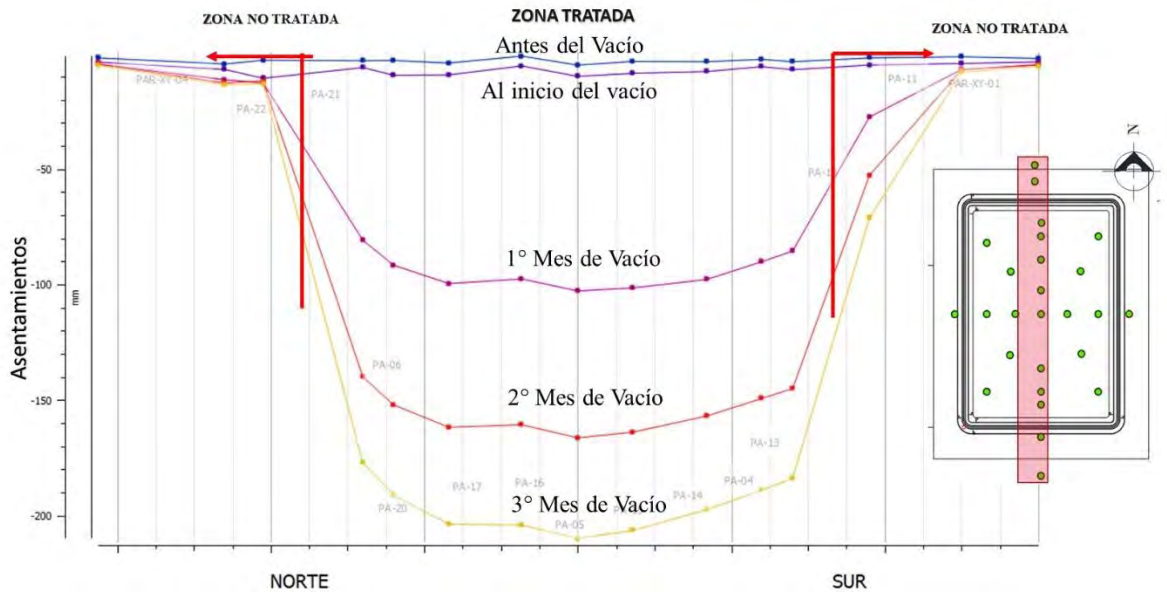


Figura 49.- “Perfil de asentamientos, sección longitudinal Norte-Sur. Mostrando los asentamientos en las diferentes etapas de tiempo de aplicación del vacío” **Fuente: Menard México.**

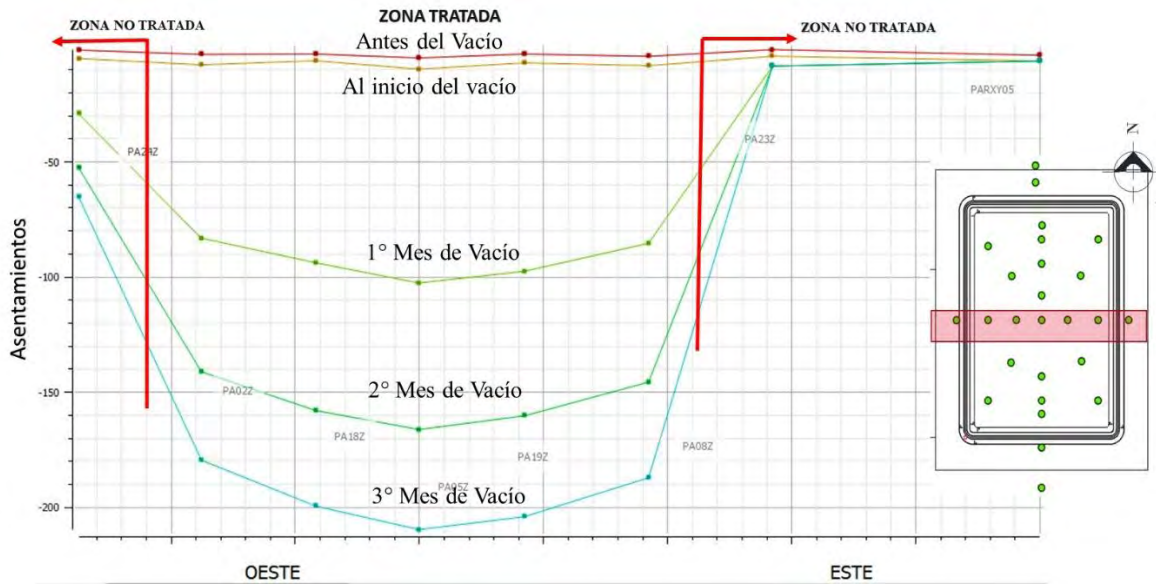


Figura 50.- “Perfil de asentamientos, sección transversal Oeste-Este. Mostrando los asentamientos en las diferentes etapas de tiempo de aplicación del vacío” Fuente: Menard México.

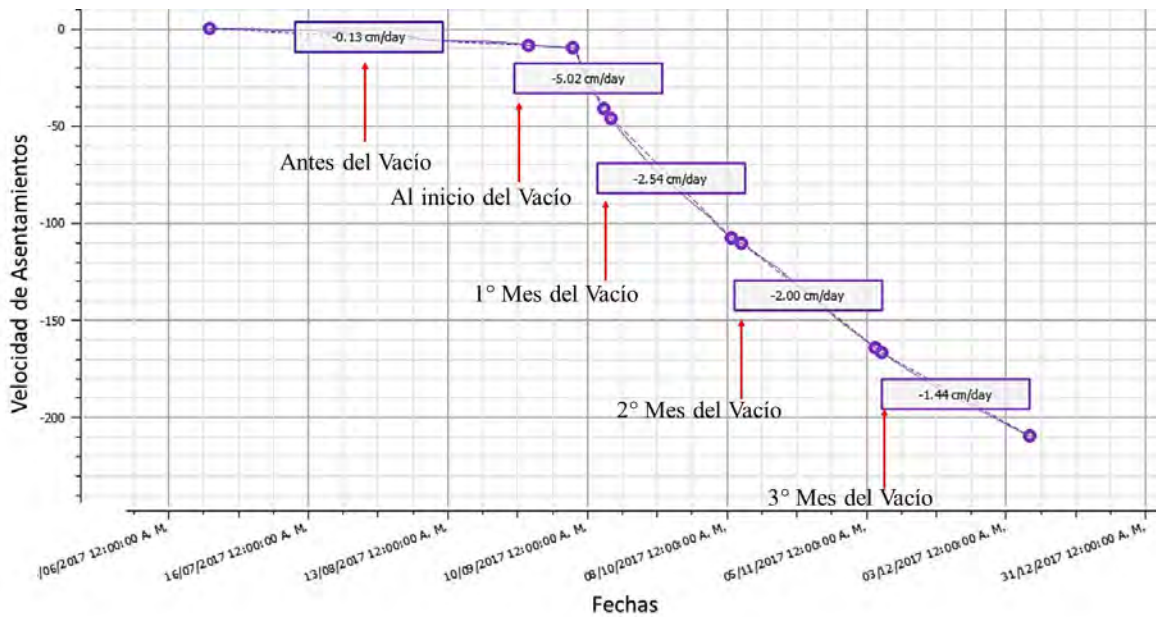


Figura 51.- “Variación en las velocidades de asentamiento en las diferentes etapas de aplicación del tratamiento” Fuente: Menard México.

El asentamiento es provocado por la disminución de la relación de vacíos (Δe), el cual surge del proceso de consolidación donde hay una disminución de las presiones intersticiales. Es así que el volumen de agua extraído por las bombas de vacío es correspondiente al volumen de asentamiento, sin embargo, se extrae una cierta cantidad de aire de los materiales parcialmente saturados como lo son la costra superficial y el terraplén de tezontle; que de la misma manera provoca un asentamiento.

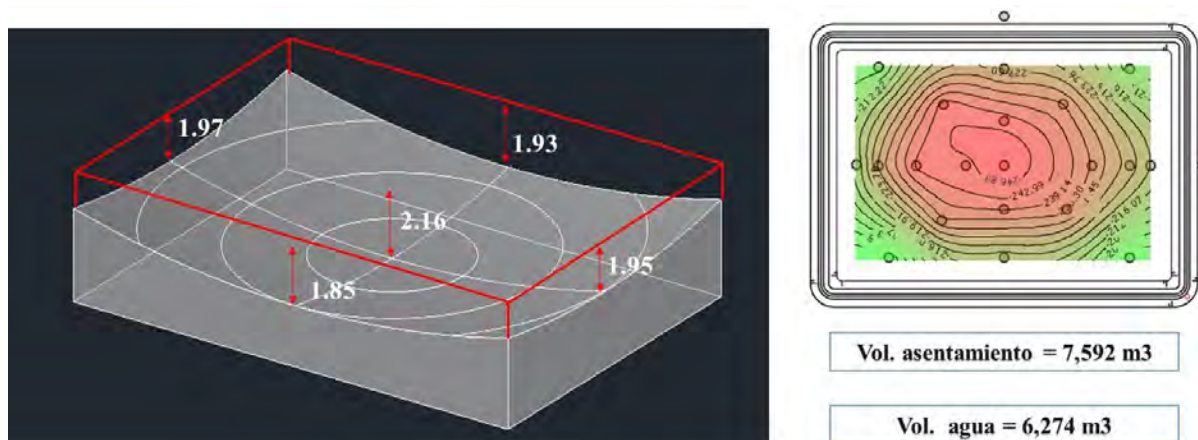


Figura 52.- “Volumen de asentamiento durante los primeros tres meses de aplicación del vacío y el volumen de agua extraído durante el mismo periodo” **Fuente: Menard México.**

5.5. EXTENSÓMETROS MAGNÉTICOS

5.5.1. Antes del inicio del Vacío

El monitoreo de los extensómetros magnéticos se inicia desde la etapa constructiva. La profundidad de instalación de cada araña magnética concuerda con la profundidad de instalación de los piezómetros eléctricos con el fin de monitorear la aportación de deformación de cada estrato al asentamiento total y correlacionarlo con la variación de las presiones intersticiales a la misma profundidad.

5.5.2. Al inicio del Vacío

La tendencia es la misma que la ocurrida en las Placas de asentamiento, una vez dado inicio al vacío la velocidad de asentamientos es evidente en cada una de las arañas magnéticas y esta velocidad disminuye con el tiempo.

5.5.3. A los tres meses del Vacío

En la consolidación con precarga convencional, generada con la instalación de un terraplén superficial, las presiones se acentúan en los estratos más someros debido a que la influencia de las cargas se produce como bulbos de esfuerzos del tipo Boussinesq; sin embargo, el efecto de la aplicación de Vacío con membrana (Menard Vacuum), es distinto, ya que las presiones son negativas y uniformes en todas las direcciones, y en la profundidad tratada. Esto se ve reflejado en los registros de los extensómetros.

En los registros de los extensómetros puede notarse el mismo comportamiento que el que se registra en las placas de asentamientos: La velocidad de asentamientos también varía respecto al tiempo, las deformaciones centrales son un poco mayores que la de los extremos del panel, etc. En este caso, también es evidente la similitud de comportamiento entre los extensómetros instalados en los extremos norte y sur del panel. A continuación, se muestran las gráficas de asentamientos de cada extensómetro, así como la proporción del total que aporta cada uno de los estratos.

Bahía Sur:

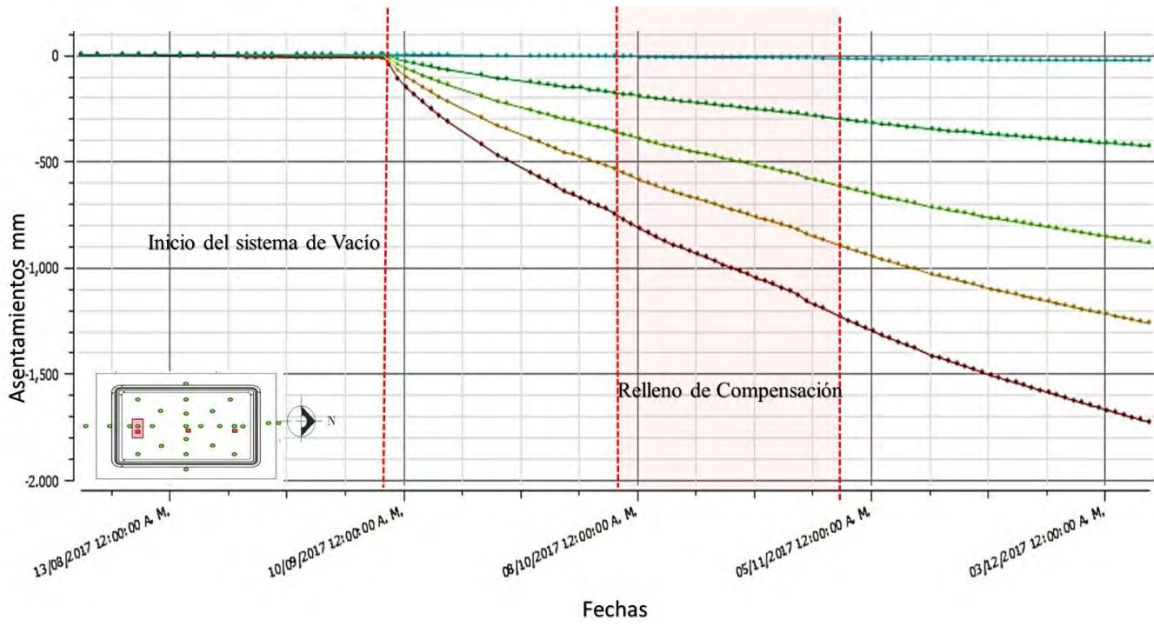


Figura 53.- “Asentamiento acumulado de cada una de las Arañas magnéticas de la bahía Sur” Fuente: Menard México.

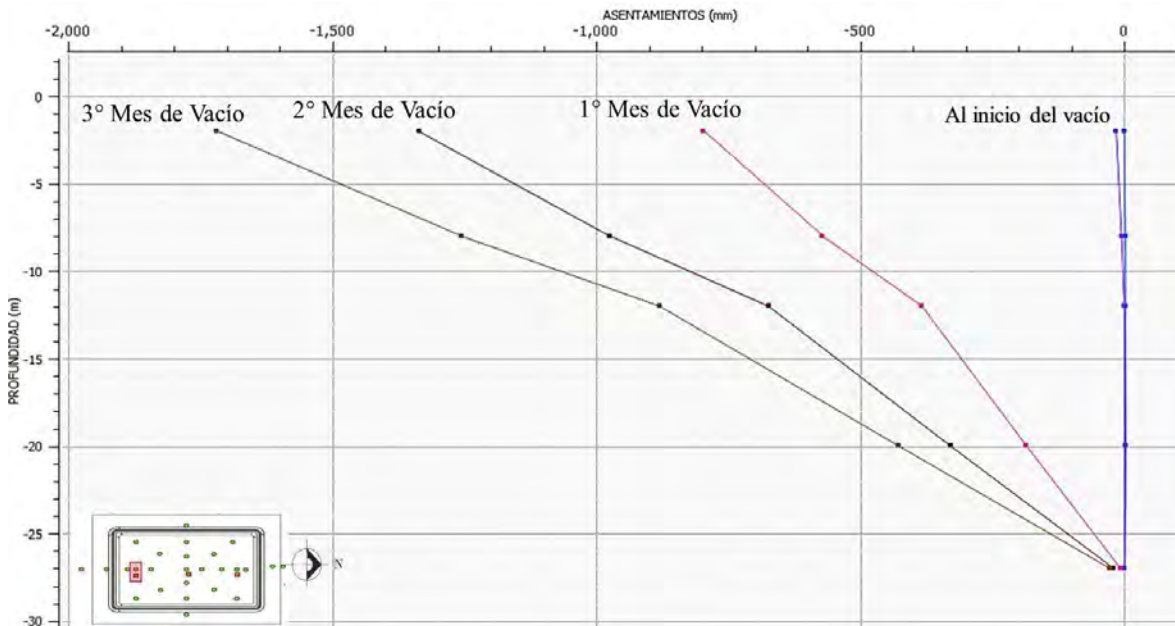


Figura 54.- “Variación de asentamientos respecto a la profundidad de instalación de cada araña magnética del extensómetro de la bahía sur” Fuente: Menard México.



Figura 55.- “Porcentaje de aportación de cada uno de los estratos que se tienen monitoreados con las arañas magnéticas del extensómetro de la bahía Sur. Así mismo se muestra la estratigrafía con la ubicación de las arañas magnéticas del extensómetro de la Bahía Sur” Fuente: Menard México.

Bahía Central:

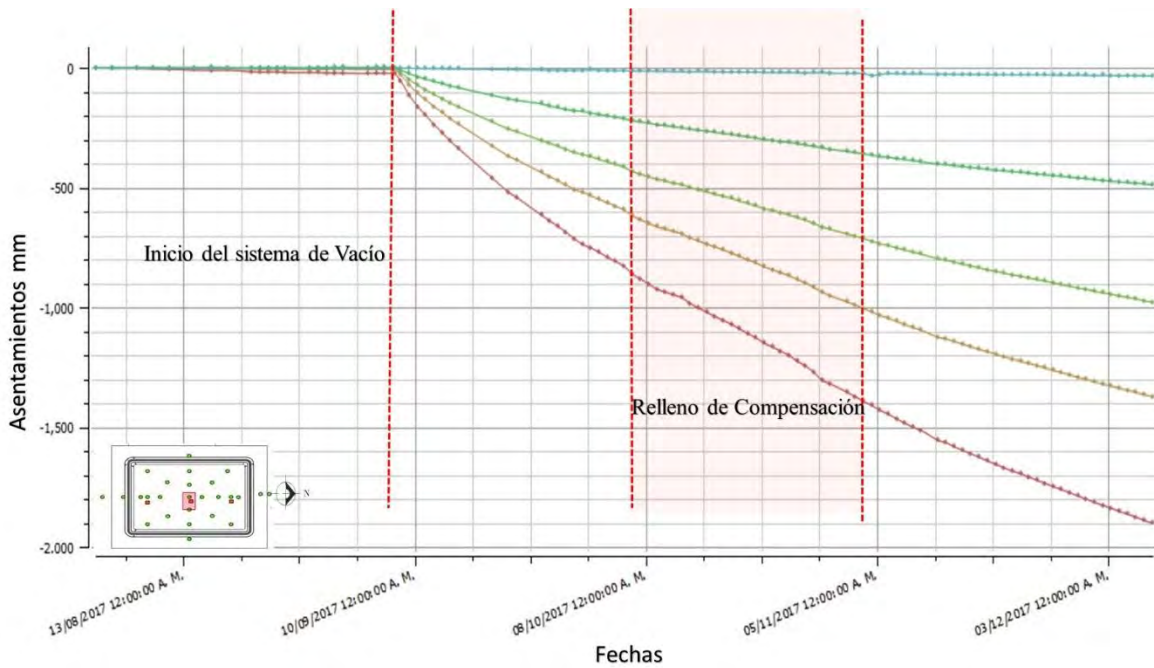


Figura 56.- “Asentamiento acumulado de cada una de las Arañas magnéticas de la bahía Central” Fuente: Menard México.

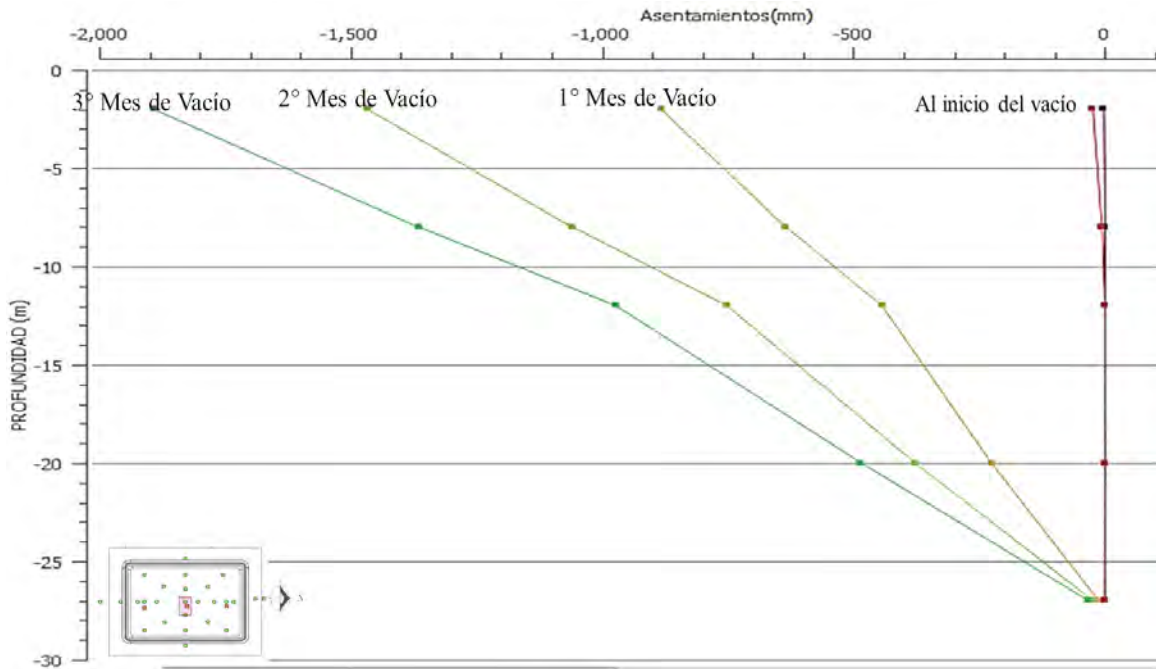


Figura 57.- “Variación de asentamientos respecto a la profundidad de instalación de cada araña magnética del extensómetro de la bahía central” Fuente: Menard México.



Figura 58.- “Porcentaje de aportación de cada uno de los estratos que se tienen monitoreados con las arañas magnéticas del extensómetro de la bahía Central. Así mismo se muestra la estratigrafía con la ubicación de las arañas magnéticas del extensómetro de la Bahía Central” Fuente: Menard México.

Bahía Norte:

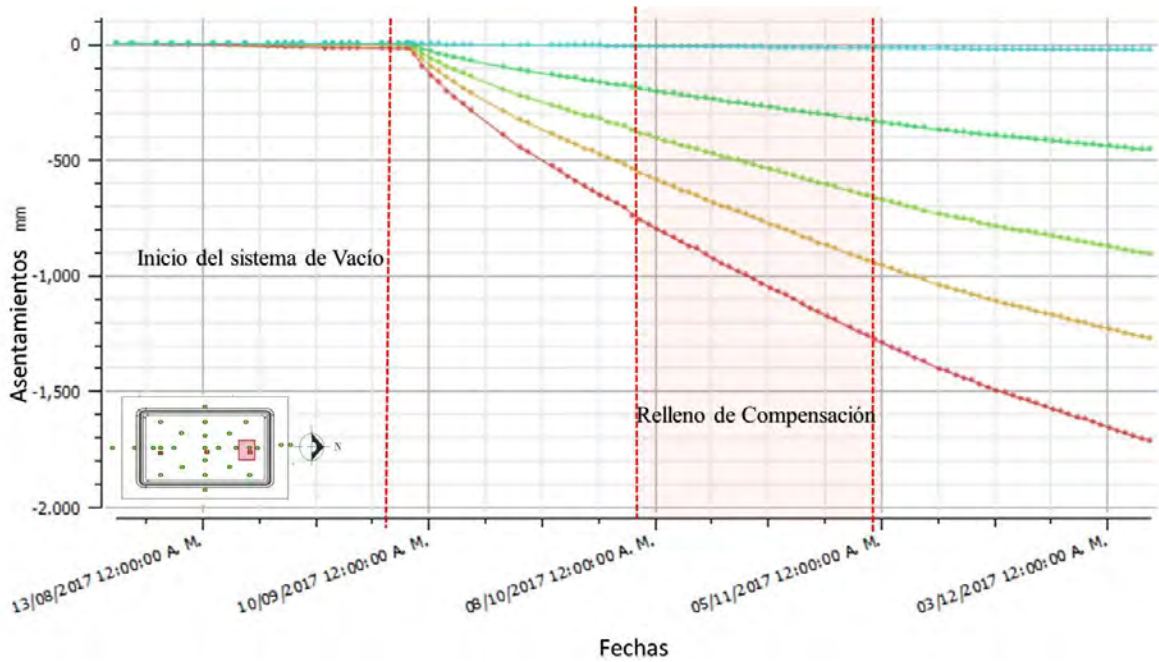


Figura 59.- “Asentamiento acumulado de cada una de las Arañas magnéticas de la bahía Norte” Fuente: Menard México.

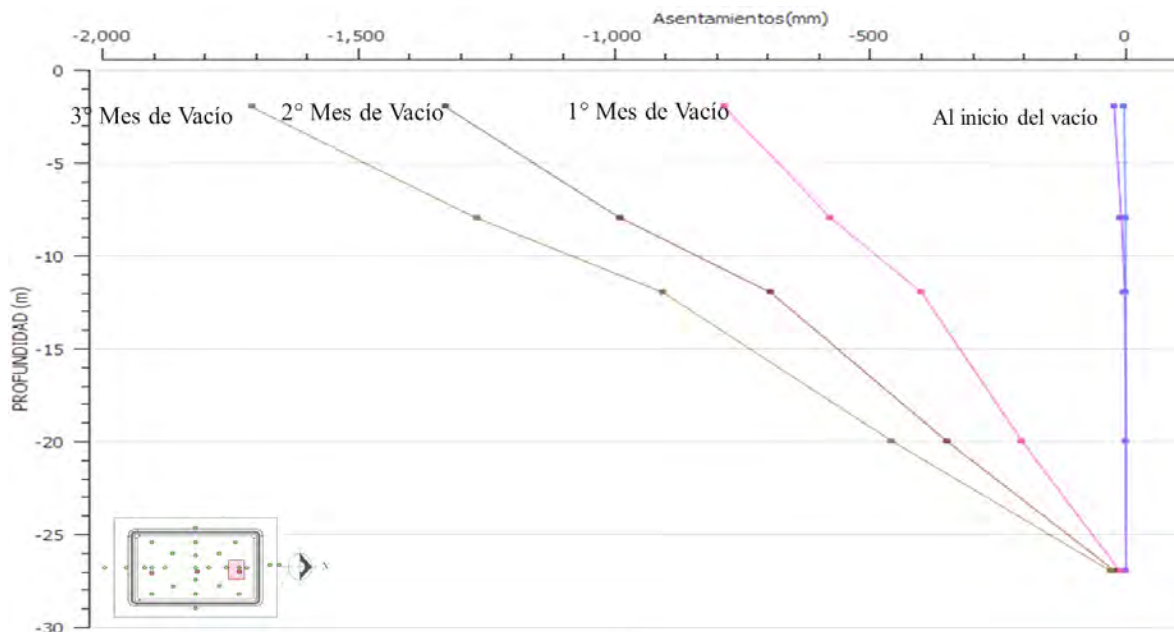


Figura 60.- “Variación de asentamientos respecto a la profundidad de instalación de cada araña magnética del extensómetro de la bahía norte” Fuente: Menard México.

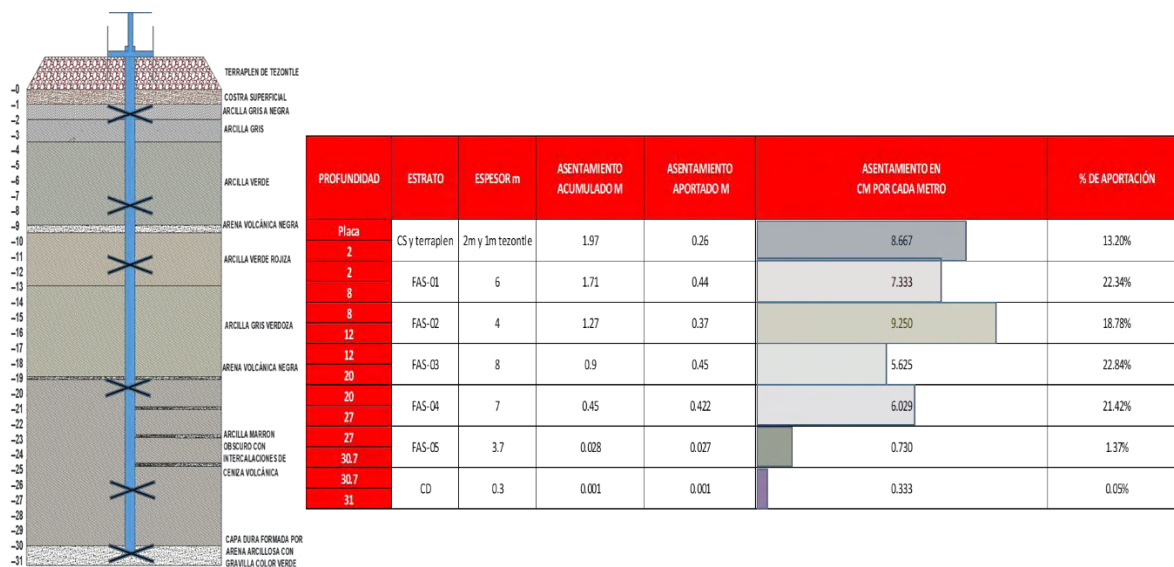


Figura 61.- “Porcentaje de aportación de cada uno de los estratos que se tienen monitoreados con las arañas magnéticas del extensómetro de la bahía Norte. Así mismo se muestra la estratigrafía con la ubicación de las arañas magnéticas del extensómetro de la Bahía Norte” Fuente: Menard México.

El analizar el asentamiento por cada sub-estrato, nos permite conocer su porcentaje de aportación del asentamiento total del estrato completo, así como correlacionar sus características geotécnicas con las deformaciones ocurridas.

Destaca el sub-estrato que se encuentra entre los 2.0 y los 12.0 m de profundidad, ya que se deforma de manera importante, aportando los asentamientos por metro más grandes de todo el estrato. Esto se correlaciona directamente con el contenido de agua obtenido de la exploración geotécnica, pues corresponde con la zona que tiene mayor contenido de agua: hasta 300%.

5.6. INCLINÓMETROS

5.6.1. Antes del inicio del Vacío

Antes de dar inicio al sistema de Vacío, durante el procedimiento constructivo se pudo observar que el suelo sufrió de desplazamientos horizontales hacia afuera del Panel cuando se colocó la plataforma de trabajo de tezontle.

5.6.2. Al inicio del Vacío

Al dar inicio al sistema de Vacío, los desplazamientos laterales se dirigen rápidamente al interior del panel en gran proporción, notando desplazamientos en los 27 m de la profundidad tratados.

Posteriormente se coloca el material de relleno de compensación, el cual consiste en un metro de tezontle, dicha actividad provoca que los inclinómetros registren un desplazamiento al exterior del panel, pero debido a la contracción del suelo por efecto del vacío que genera un comportamiento isotópico, la colocación del relleno no provoca desplazamientos mayores a los generados por el vacío, esto garantiza que no existe una falla circular típica de talud por sobre carga.

Una vez terminadas las actividades de relleno, la tendencia de los desplazamientos laterales regresa al interior del panel.

5.6.3. A los tres meses del Vacío

El sistema conlleva a tener deformaciones importantes en sentido lateral ya que su isotropía beneficia en caso de realizar un tratamiento junto a una excavación y colocar material de relleno en una sola etapa, sin tener una falla circular típica de talud. El comportamiento a lo largo de la prueba han llevado la misma tendencia pero con una velocidad de desplazamiento menor.

Se realiza un análisis de desplazamiento respecto a profundidades determinadas, en este caso, las mismas a las que se encuentran las arañas magnéticas y los piezómetros eléctricos. Esto para ver el comportamiento isotrópico y la influencia que existe al exterior de la zona tratada. Al igual que los desplazamientos verticales, la velocidad de deformación horizontal disminuye conforme pasa el tiempo.

Todos los inclinómetros muestran, en general, el mismo comportamiento, pero la magnitud de la deformación varía dependiendo de la distancia a la que se encuentre respecto al borde del panel. Entre más cercanos al borde, mayores son los desplazamientos horizontales, como es de esperarse.

El comportamiento también depende de las características y propiedades de la estratigrafía. En los primeros 5.0 m de profundidad se encuentra un material arcilloso pre-consolidado el cual posee una resistencia mayor y una menor tendencia a la deformación, esto se ve reflejado en los desplazamientos medidos con el inclinómetro, ya que a esa profundidad su desplazamiento lleva una velocidad menor.

Como ya se verificó con el monitoreo de los extensómetros magnéticos, a una profundidad de entre 8 y 12 metros se encuentra un sub-estrato blando con un contenido de agua alto, el cual tiende a una deformación mayor de forma vertical, pero también de forma horizontal. Se puede ver en los registros de los inclinómetros que en este sub-estrato la velocidad de deformación es mayor que en otras profundidades.

A continuación, se muestran los resultados de los desplazamientos laterales a las mismas profundidades a las que se encuentran las arañas magnéticas y los piezómetros eléctricos, esto para comprobar si, efectivamente, el comportamiento es isotrópico. También se verifica la influencia que existe al exterior de la zona tratada.

Tabla 05.- “Desplazamientos laterales al interior del panel que registran los inclinómetros instalados a diferentes distancias del límite de la zona tratada.”. **Menard México.**

Inclinómetro 04 a 5m		Inclinómetro 05 a 10m		Inclinómetro 06 a 15m		Inclinómetro 07 a 20m	
PROFUNDIDAD (m)	DESPLAZAMIENTO TOTAL (cm)	PROFUNDIDAD (m)	DESPLAZAMIENTO TOTAL (cm)	PROFUNDIDAD (m)	DESPLAZAMIENTO TOTAL (cm)	PROFUNDIDAD (m)	DESPLAZAMIENTO TOTAL (cm)
2	20.8	2	10.03	2	6.03	2	4.38
8	6.69	8	5.57	8	4.04	8	3.09
12	6.4	12	4.25	12	3.02	12	2.32
20	3.3	20	2.19	20	1.38	20	1.15
27	0.75	27	0.39	27	0.39	27	0.44

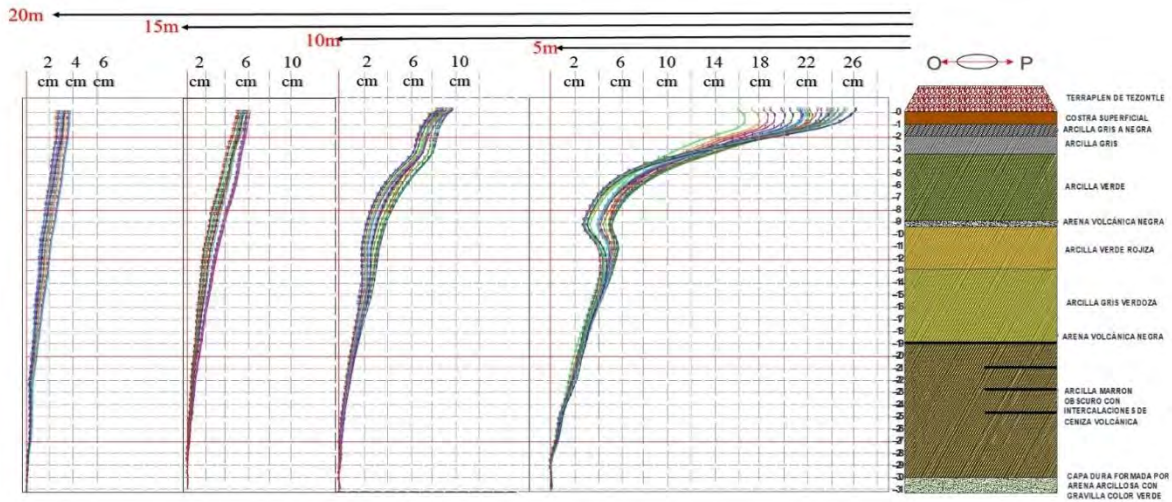


Figura 62.- “Estratigrafía y desplazamientos laterales en dirección al panel de los inclinómetros instalados a diferentes distancias de la zona tratada.” Fuente: Menard México.

En la figura anterior se observa la influencia que existe en la zona fuera del tratamiento, notándose que las deformaciones se presentan a una distancia de 20m. Para remarcar este fenómeno y estimar la influencia que existe se realizó la siguiente gráfica, la cual presenta las deformaciones respecto a la distancia relativa al panel correspondiente a una profundidad.

La influencia se presenta a distancias considerables. También se estima la deformación en la zona límite del panel ya que a 5m hay una deformación de hasta 21cm y si se observa una tendencia exponencial, está deformación puede llegar a los 40cm en el límite de la zona, teniendo así una deformación lateral total de hasta 80 cm ya que se suman los desplazamientos de cada lado. Este valor nos indica que el sistema es sumamente impermeable y nos permite generar una Isotropía.

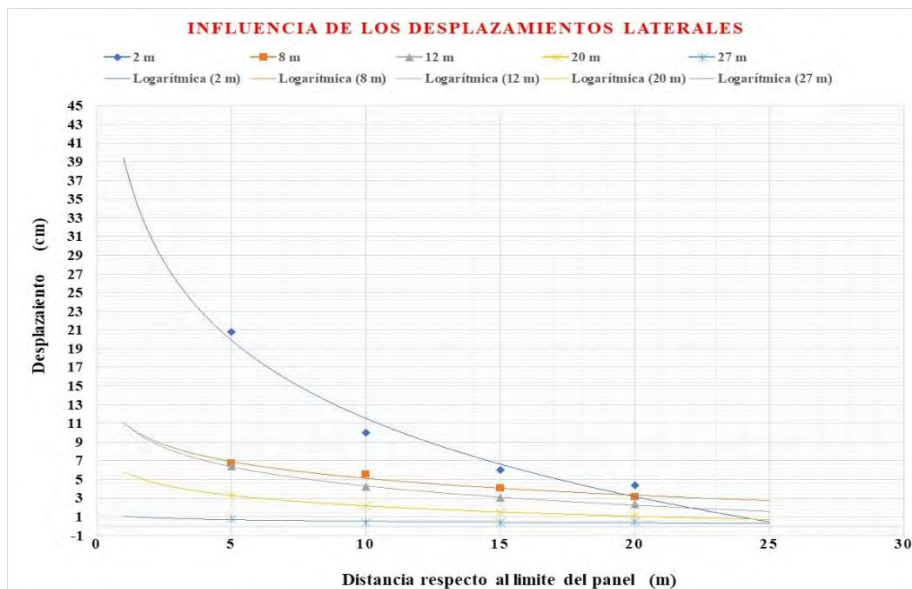


Figura 63.- “Influencia de los desplazamientos laterales y tendencia de movimiento.” Fuente: Menard México.

A continuación se muestran las etapas de desplazamientos horizontales a lo largo del proceso constructivo y los primeros 3 meses de operación del sistema de Vacío.



Figura 64.- “Desplazamiento al colocar la plataforma de trabajo.” Fuente: Menard México.

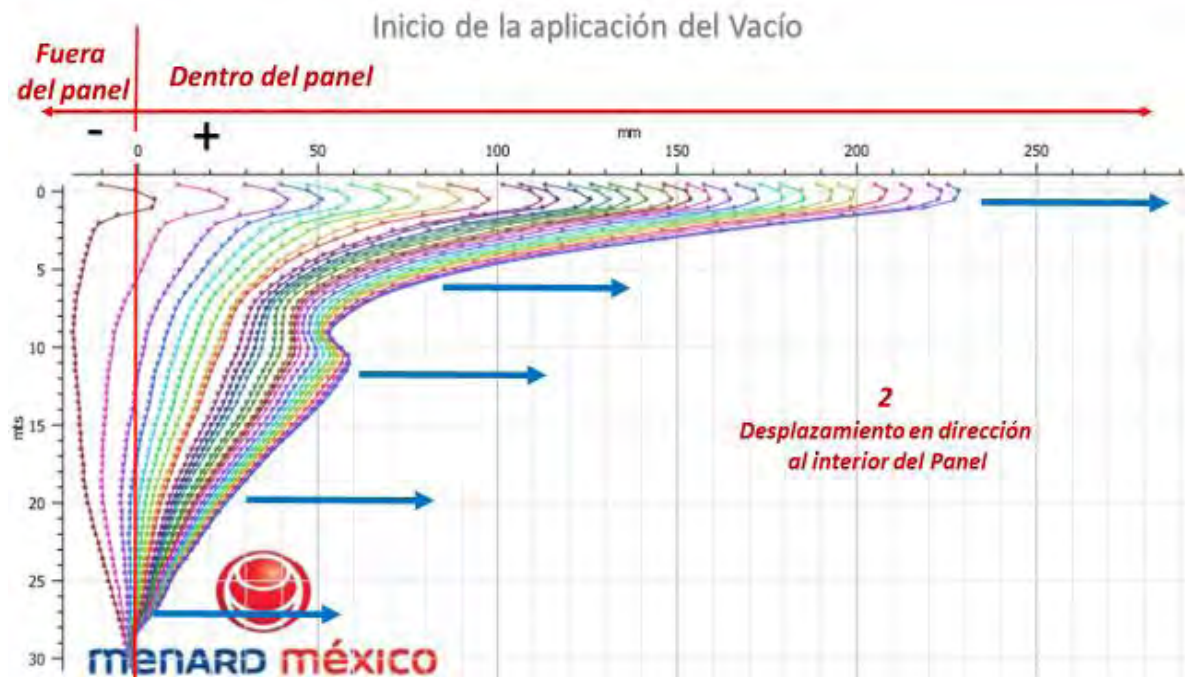


Figura 65.- “Desplazamiento al iniciar el sistema de Vacío”. Fuente: Menard México.

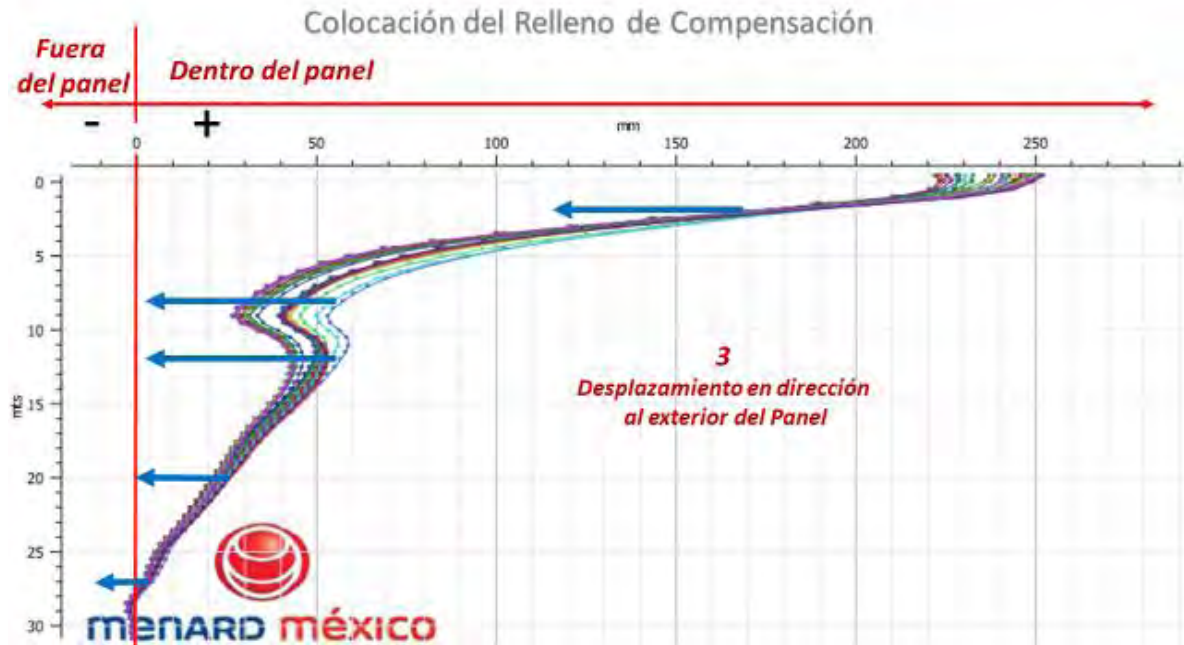


Figura 66.- “Desplazamiento al colocar el relleno de compensación.” Fuente: Menard México.

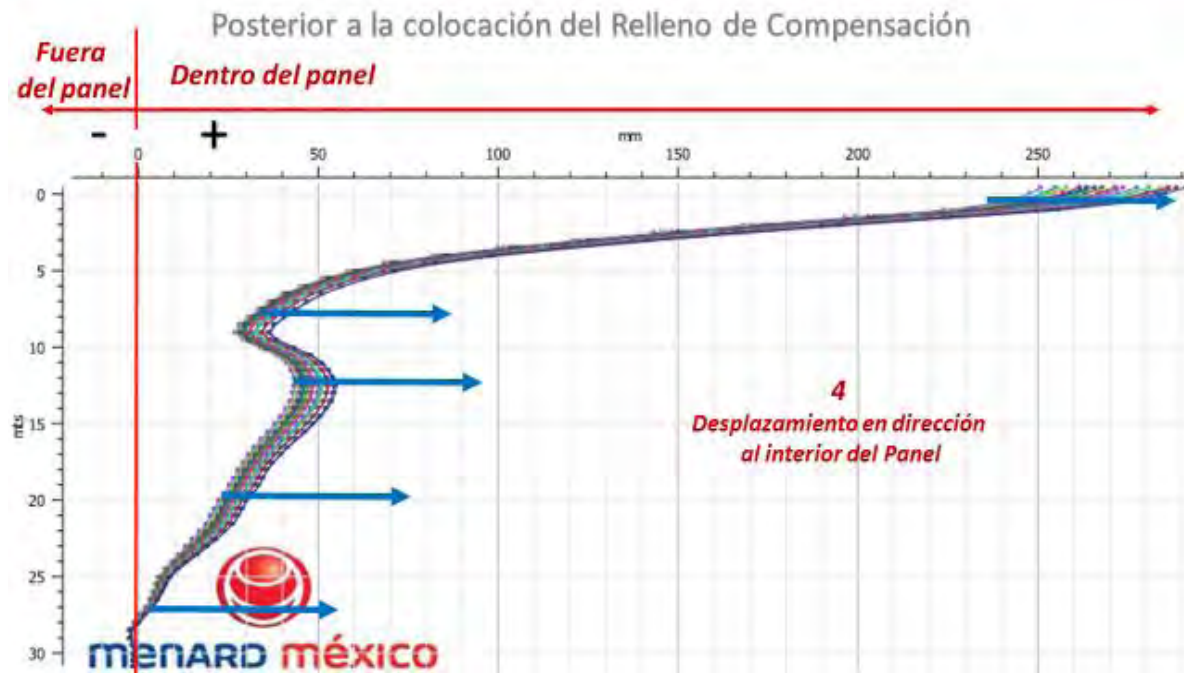


Figura 67.- “Desplazamiento durante los primeros tres meses de aplicación del Vacío.” Fuente: Menard México.

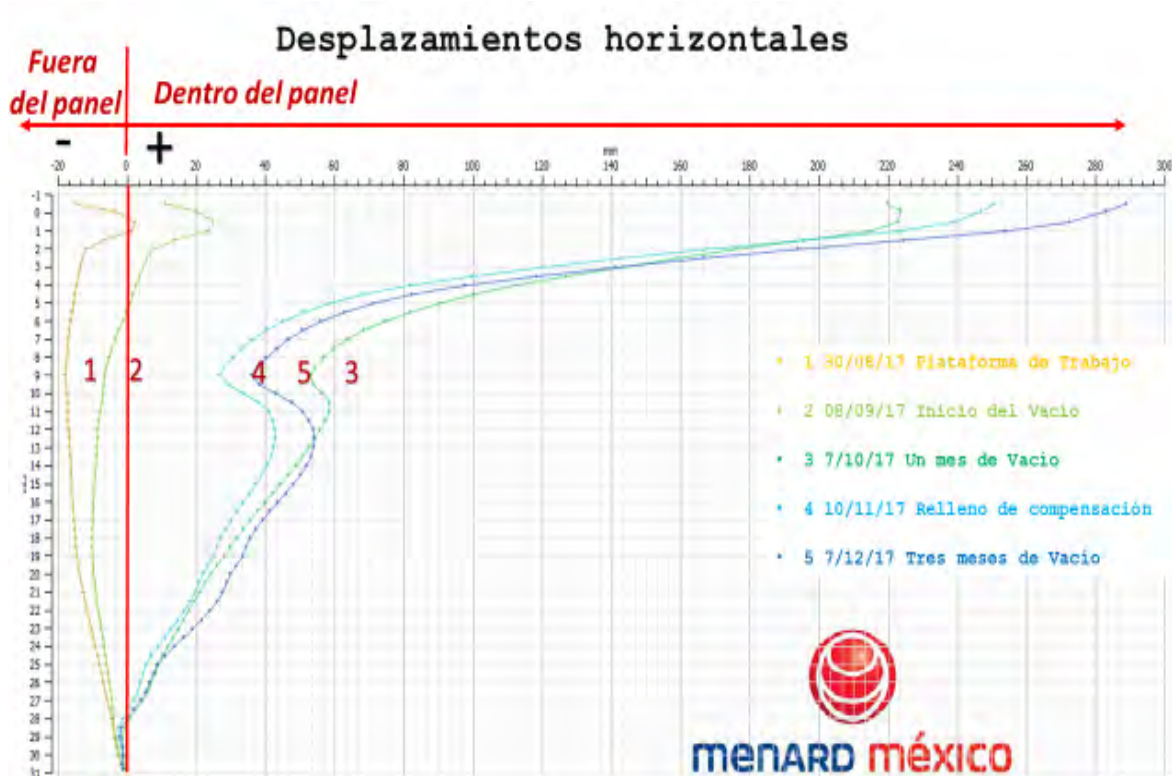


Figura 68.- “Historial de desplazamientos durante las diferentes etapas que cubren los primeros tres meses de aplicación del Vacío.” **Fuente: Menard México.**

5.7. POZOS DE OBSERVACIÓN Y PIEZÓMETROS CASAGRANDE

5.7.1. Antes del inicio del Vacío

El objetivo de instalar los pozos de observación y los piezómetros

Casagrande, es observar el comportamiento del Nivel freático a fuera de la zona ocupada por el terraplén de la prueba. Estos instrumentos se encuentran a 10 m de distancia del borde del panel de prueba. Así entonces, el nivel inicial del NAF registrado en los pozos de observación fue de 0.80 m por debajo del Nivel de Terreno Natural (N.T.N.), y durante la construcción del terraplén este nivel no tuvo variaciones; solamente el nivel del agua subió alrededor de 20 cm, cuando las lluvias se volvieron frecuentes, llegando a estar a 60 cm por debajo del N.T.N.

Los Piezómetros Casagrande se instalaron colocando las puntas a las mismas profundidades que los piezómetros eléctricos con el fin de poder correlacionar los resultados entre unos y otros instrumentos. En general, el comportamiento de las presiones leídas en estos piezómetros fue el mismo que lo observado en los niveles de agua registrados en los pozos de observación. Se grafican las presiones que se obtienen a partir del monitoreo de los piezómetros Casagrande, y se obtiene, antes del inicio del vacío una gráfica igual a la presión hidrostática.

5.7.2. Al inicio del Vacío

Al dar inicio al sistema de Vacío se observa que los niveles de agua en pozos de observación se mantienen constantes, es decir que no existe conexión con el nivel freático de dentro de la zona de prueba. Esto es un indicativo de que la arcilla que no tiene drenes verticales es capaz de aislar la masa de suelo que sí los tiene (barrea impermeable). De la misma manera se comportan los Piezómetros Casagrande, tanto en niveles de agua como en presiones, por lo que se asume que existe la barrera impermeable natural mencionada toda la profundidad tratada es totalmente impermeable y no hay influencia con los niveles freáticos fuera de la zona tratada.

5.7.3. A los tres meses del Vacío

Después de tres meses de aplicación de vacío, el NAF se ha mantenido constante afuera de la zona del panel.

Respecto a los piezómetros Casagrande, los valores se mantienen, en general, constantes.

En los registros del piezómetro Casagrande existen incrementos bruscos a 27 m de profundidad que se deben a los momentos en que se realiza el lavado del instrumento para eliminar el azolve acumulado en el fondo.

Se puede concluir que de acuerdo a los registros de los Pozos de observación y a los piezómetros Casagrande, no existen influencias piezométricas fuera de la zona tratada, esto debido a la impermeabilidad del sistema (barreras naturales impermeables formadas por la arcilla que rodea a la zona en consolidación).

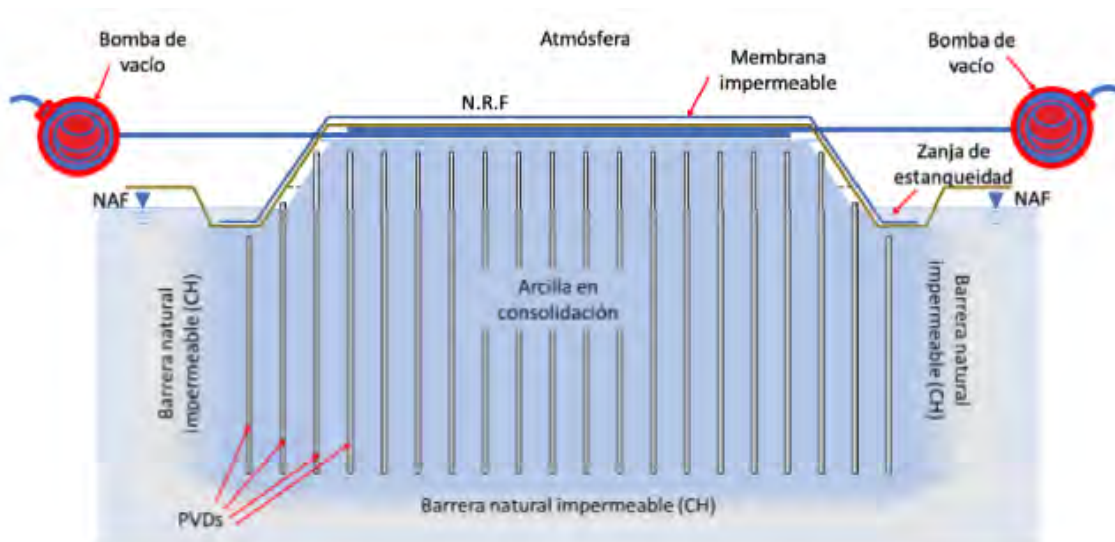


Figura 69.- “Comportamiento del Nivel freático fuera y dentro de la zona tratada durante la aplicación del Vacío.” **Fuente: Menard México.**



Figura 70.- “Comportamiento del Nivel freático durante la aplicación del Vacío.” Fuente: Menard México.

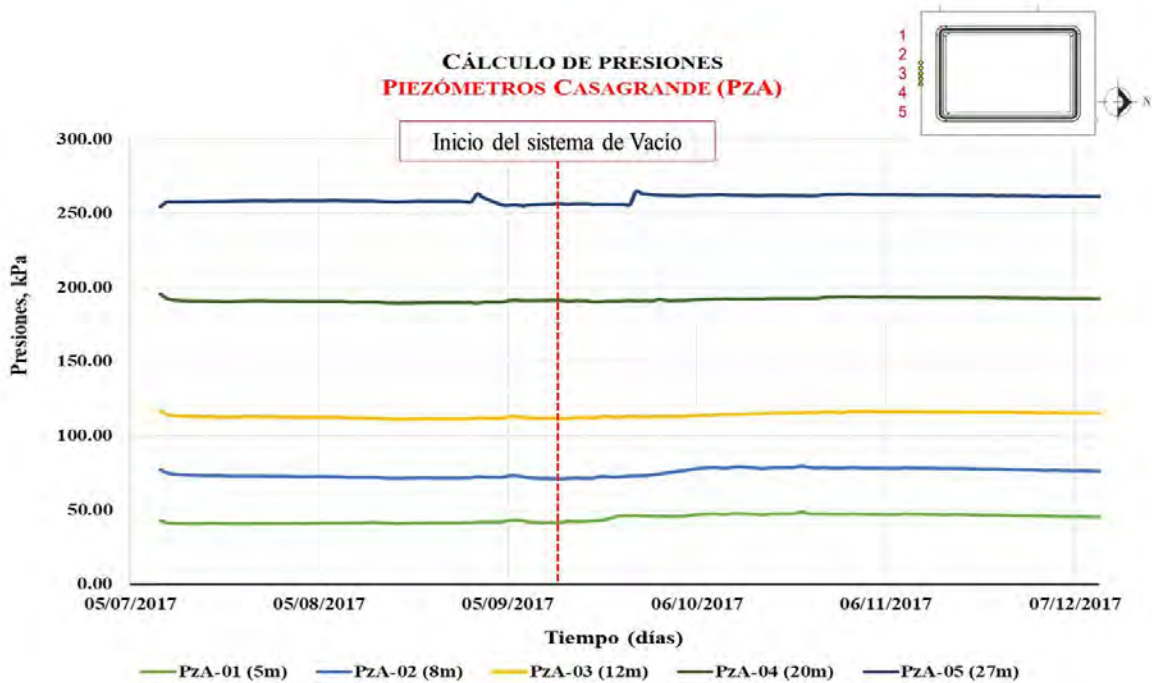


Figura 71.- “Historial de presiones hidrostáticas registradas en los piezómetros abiertos tipo Casagrande.” Fuente: Menard México.

5.8. CELDA DE PRESIÓN

5.8.1. Antes del inicio del Vacío

Las celdas de presión son instaladas a nivel de terreno natural y estas arrojan lecturas correspondientes a la carga aplicada por la plataforma de trabajo (1m). Esto nos indica que fueron correctamente instaladas y funcionan adecuadamente al aplicar presiones.

5.8.2. Al inicio del Vacío

Sin embargo al dar inicio al vacío, las celdas muestran un comportamiento incoherente y totalmente diferente entre ellas, Una incrementa desproporcionadamente a la carga aplicada y la otra descende. Esto debido a que se aplica un vacío y las celdas están calibradas a la presión atmosférica.

5.8.3. A los tres meses del Vacío

Al realizar la colocación del material de relleno de compensación registran una carga aplicada pero nuevamente tienden a bajar. Las dos celdas muestran una tendencia posterior a la colocación del relleno pero no muestran la carga equivalente del Vacío, esto debido a lo mencionado con anterioridad, no son diseñadas para registrar depresiones.

La carga equivalente por el vacío es monitoreada por los sensores de depresión y por la disminución de las presiones intersticiales registradas en los piezómetros electricos. Esto además de los cálculos de estimación de asentamientos ya que dependen, en gran parte, de la carga aplicada.

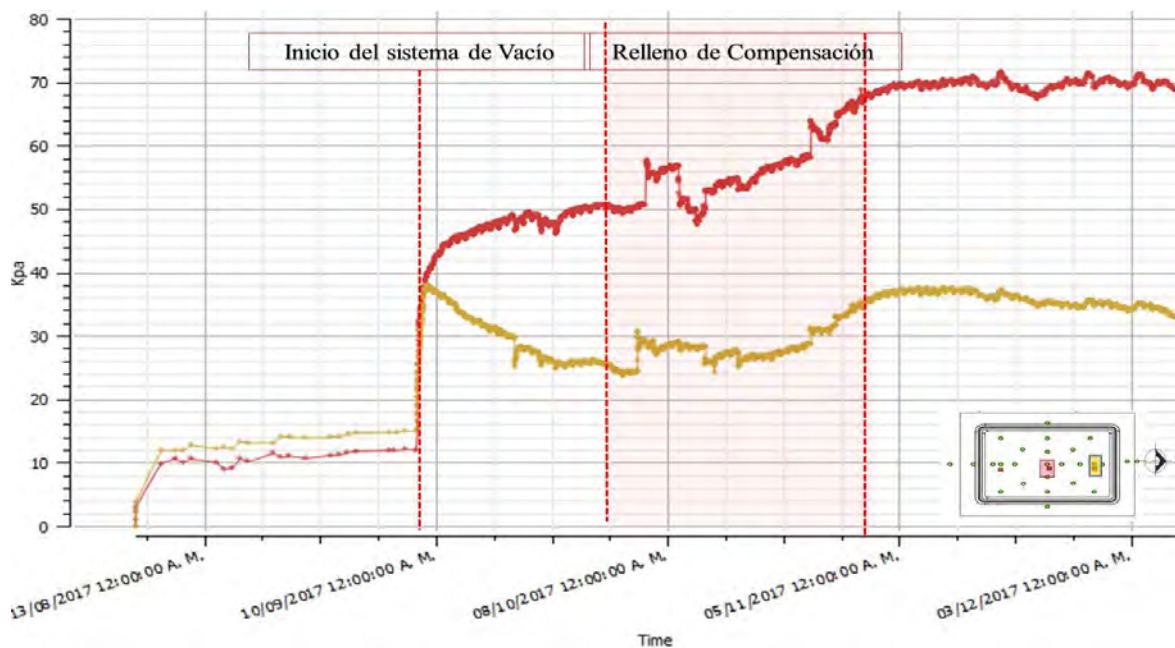


Figura 72.- “Comportamiento histórico de las celdas de presión al ser sometidas a un sistema de depresión” Fuente: Menard México.

CAPÍTULO 6

Cálculo de asentamientos y grado de consolidación ajustando el modelo geotécnico con base en el análisis del monitoreo y en las pruebas de laboratorio

6. CÁLCULO DE ASENTAMIENTOS Y GRADO DE CONSOLIDACIÓN AJUSTANDO EL MODELO GEOTÉCNICO CON BASE EN EL ANÁLISIS DEL MONITOREO Y A LAS PRUEBAS DE LABORATORIO

El procedimiento de la técnica de mejoramiento de suelo Menard Vacuum conlleva diferentes etapas, las cuales tienen una variación en las cargas, es decir, la carga aplicada no es constante.

Para el cálculo, se toma el mismo modelo matemático en cada etapa pero variando ciertos coeficientes, los cuales dependen de los incrementos de carga.

6.1. MODELO DE CÁLCULO

Primeramente se debe conocer la carga de preconsolidación. Es por ello que con base al método propuesto por Arthur Casagrande, se determina dicha carga. El método consiste en utilizar la curva de compresibilidad y trazar lo siguiente:

- De manera visual, se establece un punto a en el que la dirección de la gráfica de compresibilidad tiene un radio mínimo de curvatura.
- Dibujar una línea horizontal en dicho punto (ab).
- Dibujar una tangente del punto a (ac).
- Dibujar la bisectriz del ángulo bac (ad).
- Proyectar la parte recta (gh) de la gráfica hasta intersectar en la bisectriz. La abscisa del punto f es la carga de preconsolidación (σ'_c)

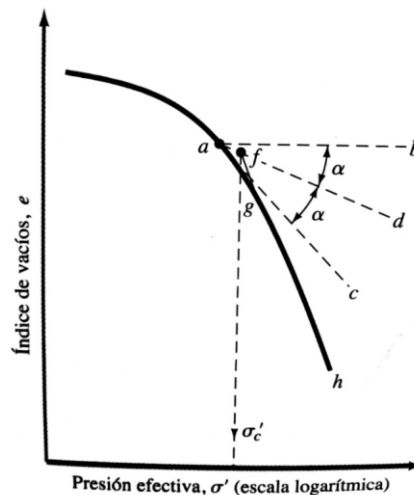


Figura 73.- “Curva de compresibilidad y obtención de la carga de preconsolidación” Fuente: Fundamentos de ingeniería Geotécnica, Braja Das.

Una vez obtenida la carga de preconsolidación se puede conocer el coeficiente de sobreconsolidación:

$$OCR = \frac{\sigma'_c}{\sigma'_0} \quad (6.1)$$

- σ'_c – Esfuerzo de preconsolidación
- σ'_0 – Esfuerzo efectivo actual
- Y si $OCR=1$; el suelo se encuentra normalmente consolidado
- En cambio si el $OCR > 1$; el suelo se encuentra preconsolidado.

Posteriormente, la forma en la que se puede estimar el asentamiento es considerar o suponer una formación de suelo fino saturado de un espesor (H) y el área de la sección transversal A debajo de un esfuerzo efectivo medio inicial o existente (σ'). Posteriormente se ejerce un incremento en el estado de esfuerzos inicial ($\Delta\sigma_t$) el cual provoca un asentamiento (δp). Se considera que al final de la consolidación el incremento de esfuerzos efectivos será igual al incremento que se aplicó en el estado de esfuerzos inicial ($\Delta\sigma_t = \Delta\sigma'$). Por lo tanto, el cambio en el volumen está dado por:

$$\Delta V = V_0 - V_i = HA - (H - \delta p)A = \delta pA \quad (6.2)$$

Donde V_0 y V_i corresponden al volumen inicial y final, respectivamente. Sin embargo, el cambio en el volumen total es igual al cambio en el volumen de vacíos. Por lo tanto:

$$\Delta V = \delta pA = V_{V0} - V_{Vi} = \Delta V_v \quad (6.3)$$

Donde V_{V0} y V_{Vi} son el volumen de vacíos inicial y final, respectivamente. Pero de la definición de relación de vacíos, tenemos que:

$$\Delta e = \frac{\Delta V_v}{V_s} \text{ por lo tanto; } \Delta V_v = \Delta e V_s \quad (6.4)$$

Donde Δe es la variación de la relación de vacíos. Pero considerando el volumen de sólidos como:

$$V_s = \frac{V_0}{1 + e_0} = \frac{AH}{1 + e_0} \quad (6.5)$$

Donde e_0 es la relación de vacíos inicial con un volumen inicial V_0 . Por lo tanto, a partir de las ecuaciones anteriores (6.2), (6.3), (6.4) y (6-5), obtenemos la siguiente expresión:

$$\Delta V = \delta p A = \Delta e V_s = \frac{AH}{1 + e_0} \Delta e \quad (6.6)$$

Finalmente para conocer el asentamiento al final de la consolidación se despeja δp , obteniendo así, la siguiente expresión:

$$\delta p = H \frac{\Delta e}{1 + e_0} \quad (6.7)$$

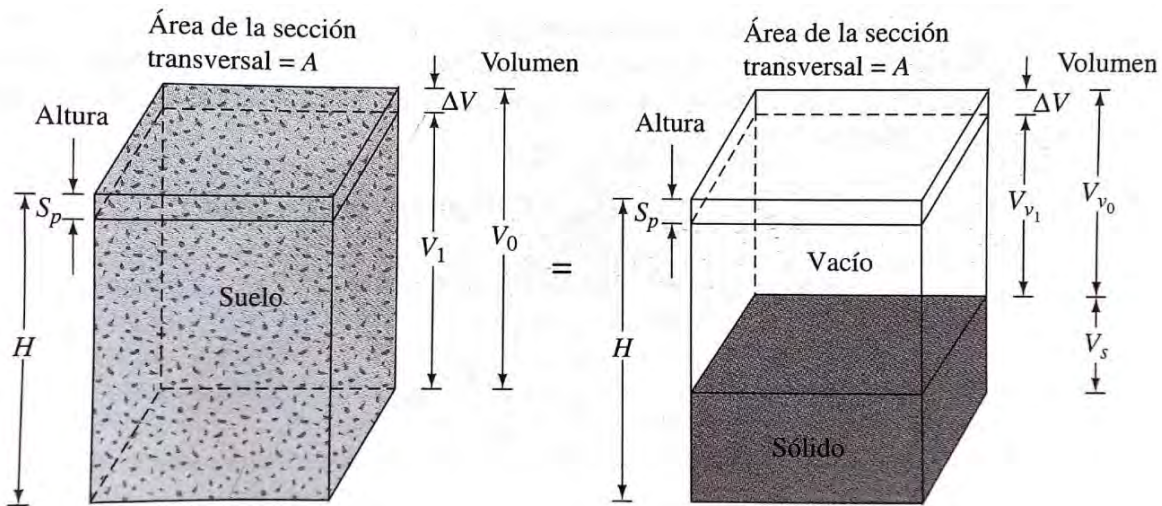


Figura 74.- “Cambios volumétricos y relaciones de fase debidas a un proceso de consolidación unidimensional” Fuente: *Fundamentos de ingeniería Geotécnica, Braja Das.*

Ahora considerando las cargas de preconsolidación. Para un suelo normalmente consolidado, que muestren una relación lineal ($e-\log \sigma'$), es decir: $\sigma'_0 = \sigma_c$; OCR=1, la variación de la relación de vacíos se representa como:

$$\Delta e = Cc [\log(\sigma'_0 + \Delta \sigma') - \log(\sigma'_0)] \quad (6.8)$$

Donde Cc es la pendiente de la gráfica $e-\log \sigma'_0$ y se define como el índice de compresibilidad.

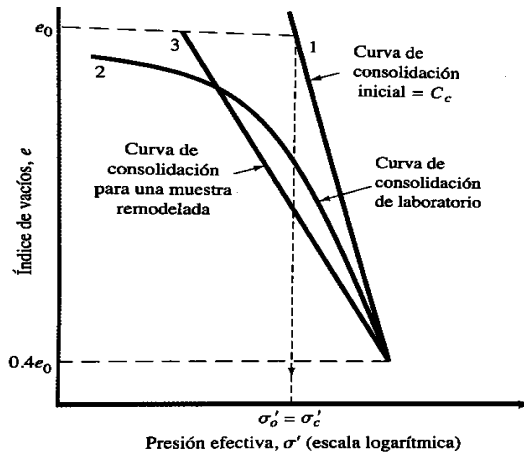


Figura 45.- “Curva de compresibilidad y pendiente para obtener el índice de compresibilidad”
 Fuente: *Fundamentos de ingeniería Geotécnica, Braja Das.*

Una vez conociendo el valor de la variación de la relación de vacíos (Δe) para un suelo normalmente consolidado ($OCR=1$), se puede conocer el asentamiento al sustituir la ecuación (6.8) en la ecuación (6.7):

$$\delta p = \frac{CcH}{1 + e_0} \log \left(\frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma'}{\sigma'_0} \right) \tag{6.9}$$

Ahora, si se tiene una serie de estratos con propiedades diferentes, es necesario calcular la deformación o asentamiento de cada uno de ellos. De esta manera se tiene la expresión siguiente para determinar el asentamiento de todo el conjunto de unidades estratigráficas:

$$\delta p = \sum \left[\frac{CcH_{(i)}}{1 + e_0} \log \left(\frac{\sigma'_{0(i)} + \Delta\sigma'_i}{\sigma'_{0(i)}} \right) \right] \tag{6.10}$$

Donde:

- $H_{(i)}$ = Espesor del estrato
- $\sigma'_{0(i)}$ = esfuerzo efectivo inicial del estrato
- $\Delta\sigma'_i$ = Incremento de esfuerzos correspondiente a cada estrato

En cambio, si se tiene un suelo preconsolidado, es decir, con un historial de carga mayor al estado actual ($\sigma'_0 < \sigma_c$; $OCR \neq 1$), la variación será a lo largo de la línea cb de la siguiente figura, cuya pendiente será aproximadamente igual a la pendiente de la curva de expansión o rebote que se obtiene en la curva de compresibilidad. La pendiente de dicha curva se le llama C_s índice de abultamiento:

$$\Delta e = C_s [\log(\sigma'_0 + \Delta\sigma') - \log(\sigma'_0)] \quad (6.11)$$

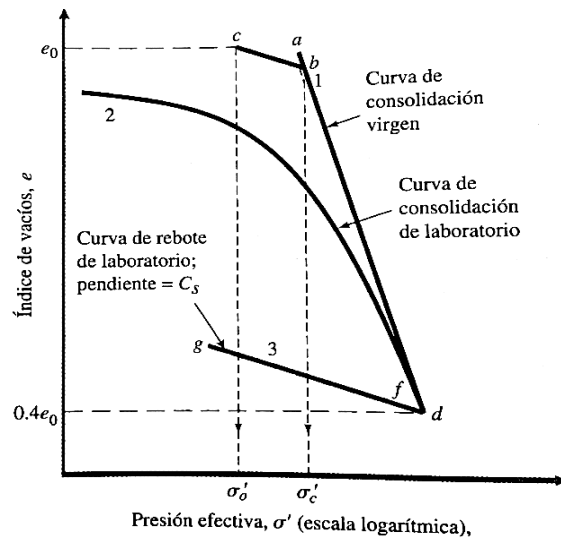


Figura 76.- “Curva de compresibilidad y pendiente para obtener el índice de Abultamiento” **Fuente:** *Fundamentos de ingeniería Geotécnica, Braja Das.*

Sustituyendo en la ecuación (6.11) en la ecuación (6.7), tenemos la siguiente expresión:

$$\delta p = \frac{CsH}{1 + e_0} \log \left(\frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma'}{\sigma'_0} \right) \quad (6.12)$$

Y si la suma del incremento al estado de esfuerzos iniciales y el esfuerzo efectivo inicial es mayor a la carga de preconsolidación ($\sigma'_0 + \Delta\sigma' > \sigma'_c$), se tiene la expresión:

$$\delta p = \frac{CsH}{1 + e_0} \log \left(\frac{\sigma'_c}{\sigma'_0} \right) + \frac{Cch}{1 + e_0} \log \left(\frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma'}{\sigma'_c} \right) \quad (6.13)$$

Posteriormente el asentamiento va asociada a un grado de consolidación o porcentaje de consolidación vertical del suelo para una profundidad Z y para un tiempo t .

El grado de consolidación vertical es la relación entre la consolidación que ya ha ocurrido y la consolidación total que ha de producirse bajo el incremento de carga impuesto.

La expresión que nos permite determinar el grado de consolidación vertical depende de la tasa de cambios de la relación de vacíos y por ende la tasa de cambios volumétricos.

$$Uv\% = \left(1 + \frac{1}{2Tv^3}\right)^{\frac{-1}{6}} \quad (6.14)$$

Dicha expresión está en función del *factor tiempo* (Tv), el cual depende del tiempo transcurrido del incremento de carga impuesto, la distancia de drenaje y un coeficiente de consolidación vertical.

$$Tv = \frac{Cv t}{H^2} \quad (6.15)$$

Donde:

- Cv = Coeficiente de consolidación vertical
- t = Tiempo transcurrido del incremento de carga
- H = Distancia de drenaje

El coeficiente de consolidación vertical (Cv) se puede obtener de la curva de consolidación con el método logarítmico propuesto por Arthur Casagrande en 1940. El cual consiste en el siguiente procedimiento:

Determinar la deformación teórica correspondiente al 0% de la consolidación ($d_{0\%}$). Para esto se debe elegir un punto A en la parte inicial de la curva de consolidación de abscisa (t_1) y encontrar el punto correspondiente de la curva para un tiempo ($t_2 = 4t_1$). Entre ambos puntos se determina la diferencia de ordenadas ($\Delta\delta$). Como la curva es esencialmente parabólica se demuestra que para una relación entre abscisas de 4 corresponde una relación de ordenadas de 2, por lo que la ordenada al origen de dicha parábola se ubica a una distancia ($\Delta\delta$) por encima del punto A . La intersección de dicha recta con el eje de las ordenadas representa la deformación correspondiente al 0% de la consolidación ($d_{0\%}$).

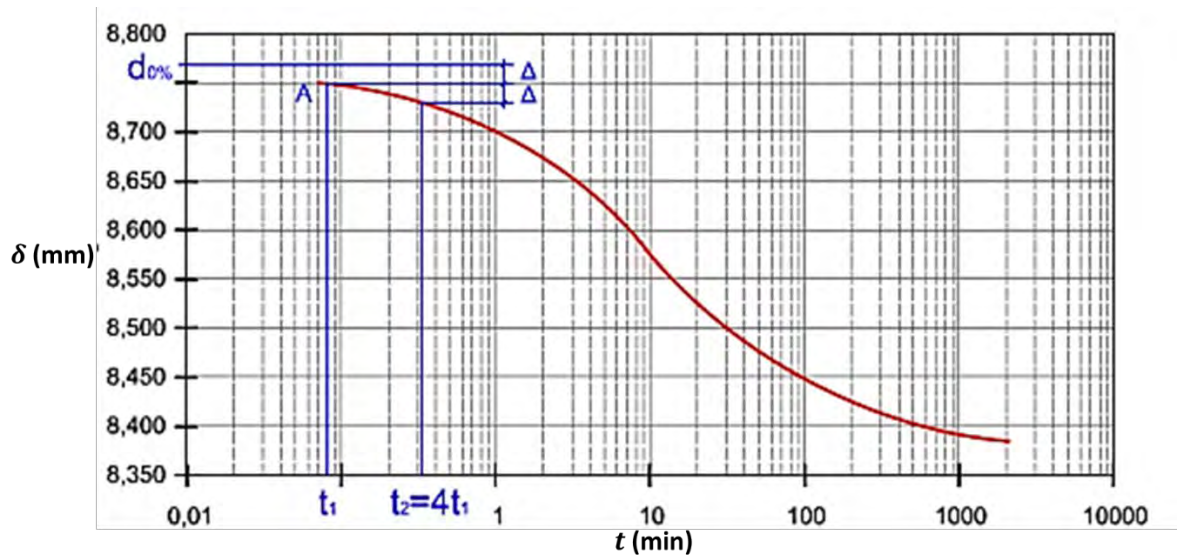


Figura 77.- “Primera etapa del Método de logaritmo de tiempo para determinar el coeficiente de consolidación vertical con base a la curva de consolidación. Obtención del ($d_{0\%}$).” Fuente: Fundamentos de ingeniería Geotécnica, Braja Das.

Posteriormente se debe de obtener la deformación correspondiente al 100% de la consolidación primaria ($d_{100\%}$). Para ello se debe de extender una recta tangente a la parábola en el punto de inflexión y otra recta tangente a los últimos puntos de la curva de consolidación. Dichas rectas se intersecan en un punto B cuya ordenada representa la deformación correspondiente al 100% de la consolidación primaria ($d_{100\%}$).

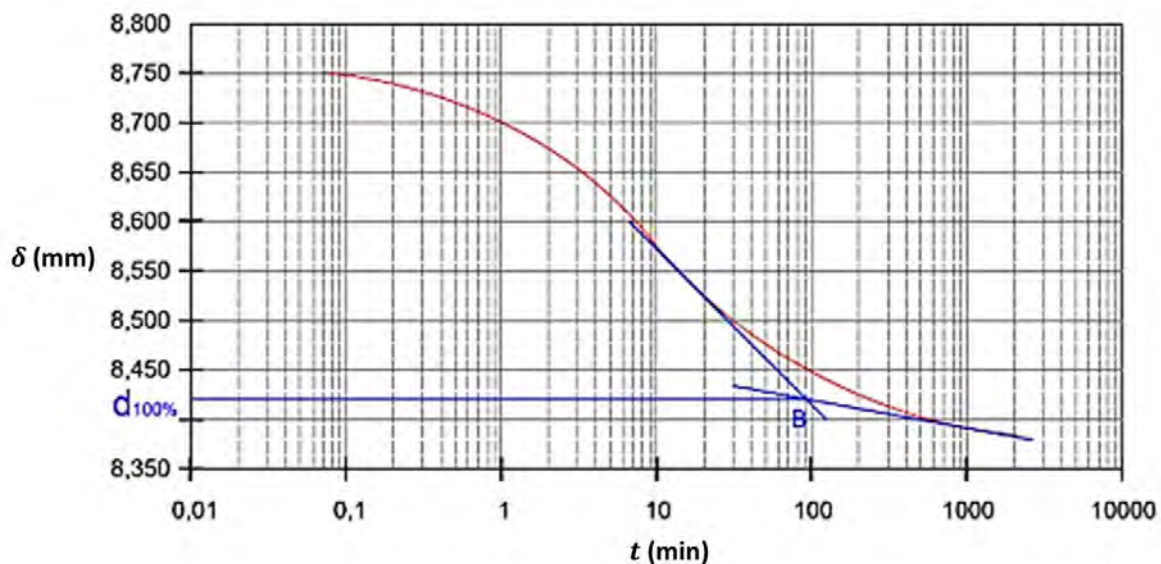


Figura 78.- “Segunda etapa del Método de logaritmo de tiempo para determinar el coeficiente de consolidación vertical con base a la curva de consolidación. Obtención del ($d_{100\%}$).” Fuente: Fundamentos de ingeniería Geotécnica, Braja Das.

Una vez conocida la deformación al inicio y al final de la consolidación primaria, se determina la mitad de dichas distancias que es la deformación correspondiente al 50% de la consolidación ($d_{50\%}$). Teniendo este valor como ordenada se obtiene el punto C correspondiente a la curva, cuya abscisa representa el tiempo en que se produce el 50% de la consolidación primaria ($t_{50\%}$).

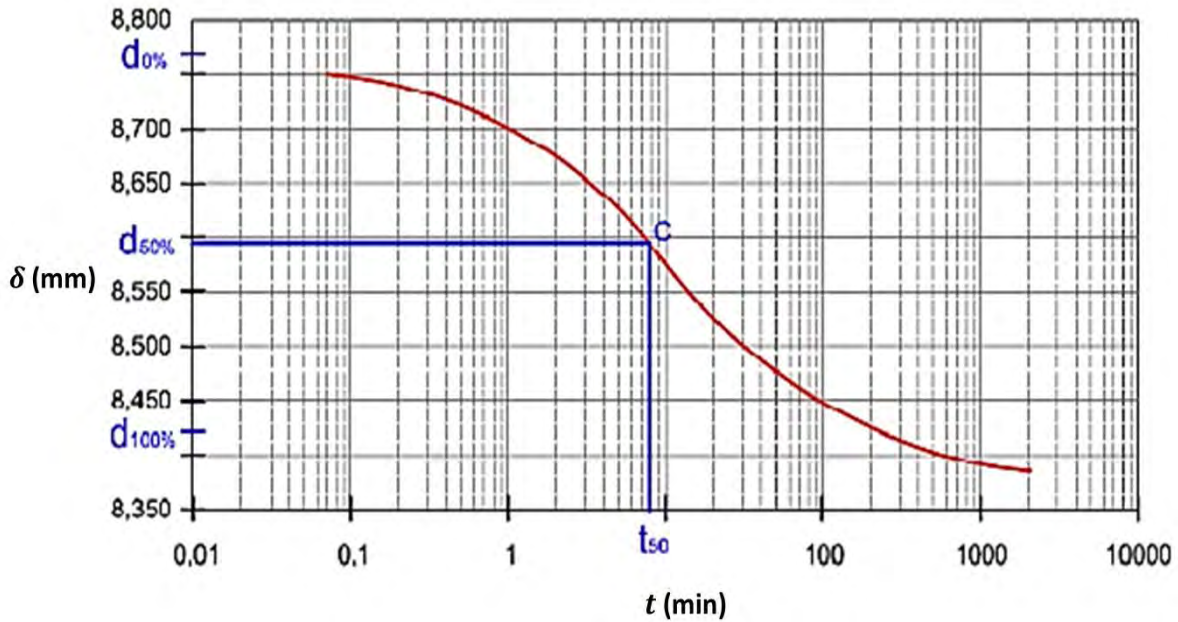


Figura 79.- “Segunda etapa del Método de logaritmo de tiempo para determinar el coeficiente de consolidación vertical con base a la curva de consolidación. Obtención del ($t_{50\%}$).” **Fuente:** *Fundamentos de ingeniería Geotécnica, Braja Das.*

Contando con el valor de tiempo de consolidación al 50% se puede utilizar la expresión siguiente:

$$C_v = \frac{0.197 H^2_{dr}}{t_{50}} \tag{6.16}$$

Donde H^2_{dr} corresponde a la trayectoria promedio de drenaje más larga durante la prueba de consolidación.

Finalmente, para determinar el asentamiento correspondiente a un cierto periodo de tiempo se complementa la ecuación (5.12) con la (5.13), teniendo finalmente la siguiente expresión:

$$\delta p = \left[\frac{CsH}{1 + e_0} \log \left(\frac{\sigma'_c}{\sigma'_0} \right) + \frac{CcH}{1 + e_0} \log \left(\frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma'}{\sigma'_c} \right) \right] U_v \% \tag{6.17}$$

6.2. PRUEBAS DE LABORATORIO Y OBTENCIÓN DE LAS PROPIEDADES

Para conocer las propiedades mecánicas del suelo, se requiere realizar pruebas de laboratorio que permitan obtener los valores necesarios para modelar y calcular el comportamiento del suelo al ser tratado por la técnica de aceleración de la consolidación por vacío con membrana.

Es por ello que durante la etapa de la exploración geotécnica, se realizó la extracción de muestras inalteradas por medio del tubo tipo TGC, dichas muestras se extrajeron con base a las pruebas de Piezocono (CPTu) donde se conoció la estratigrafía del sitio y se determinó la profundidad de la muestra. En este caso se asignaron los estratos que pueden presentar mayor deformación, los cuales se consideraron aquellos con menor resistencia y mayor contenido de agua.

Las pruebas realizadas en laboratorio fueron:

- Consolidaciones
- Triaxiales no consolidadas no drenadas TX-UU
- Permeabilidades de carga variable
- Límites de consistencia

De esta manera se puede hacer una comparación directa con los resultados obtenidos en las pruebas de campo durante la campaña de exploración y conocer las propiedades que darán los parámetros necesarios que permiten realizar los cálculos deseados.

En este caso, para determinar los asentamientos producidos por la aplicación de la técnica de mejoramiento, se requiere conocer ciertas propiedades índices como:

- Peso volumétrico
- Relación de vacíos

Tabla 06.- “Propiedades índice obtenidas en laboratorio de cada muestra inalterada obtenida en los sondeos de recuperación con tubo TGC”. Menard México.

Estrato-01 Profundidad de 0.0 m a 2.0 m Muestra extraída de : 2.00m a 2.20 m											
Peso de sólidos (Ws)	64.84	g						Altura final (Hf)	1.19	cm	
Peso húmedo inicial (Wshi)	139.37	g	Volumen inicial (Vi)	102.04	cm ³	Peso volumétrico inicial (Yhi)	1.366	g/cm ³	Volumen final (Vf)	59.87	cm ³
Peso húmedo final (Wshf)	75.58	g	Volumen de sólidos (Vs)	23.85	cm ³	Humedad inicial (wi)	115	%	Peso volumétrico final (Yshf)	1.26	g/cm ³
Peso del agua inicial (Wwi)	74.53	g	Volumen de vacíos (Vv)	78.19	cm ³	Relación de vacíos inicial (ei)	3.28		Humedad final (wf)	17	%
Peso del agua final (Wwf)	10.74	g	Vol. de agua inicial (Vwi)	74.53	cm ³	Grado de saturación inicial (Gwi)	95	%	Relación de vacíos final (ef)	1.51	
								Grado de saturación final (Gsf)	30	%	
Estrato-02 Profundidad de 2.0 m a 8.0 m Muestra extraída de : 5.00m a 5.20 m											
Peso de sólidos (Ws)	22.06	g						Altura final (Hf)	0.90	cm	
Peso húmedo inicial (Wshi)	122.22	g	Volumen inicial (Vi)	96.51	cm ³	Peso volumétrico inicial (Yhi)	1.266	g/cm ³	Volumen final (Vf)	45.24	cm ³
Peso húmedo final (Wshf)	61.19	g	Volumen de sólidos (Vs)	8.36	cm ³	Humedad inicial (wi)	454	%	Peso volumétrico final (Yshf)	1.35	g/cm ³
Peso del agua inicial (Wwi)	100.16	g	Volumen de vacíos (Vv)	88.15	cm ³	Relación de vacíos inicial (ei)	10.55		Humedad final (wf)	177	%
Peso del agua final (Wwf)	39.13	g	Vol. de agua inicial (Vwi)	100.16	cm ³	Grado de saturación inicial (Gwi)	100	%	Relación de vacíos final (ef)	4.41	
								Grado de saturación final (Gsf)	106	%	
Estrato-03 Profundidad de 8.0 m a 12.0 m Muestra extraída de : 11.50m a 11.70 m											
Peso de sólidos (Ws)	19.66	g						Altura final (Hf)	1.24	cm	
Peso húmedo inicial (Wshi)	113.42	g	Volumen inicial (Vi)	101.29	cm ³	Peso volumétrico inicial (Yhi)	1.120	g/cm ³	Volumen final (Vf)	62.64	cm ³
Peso húmedo final (Wshf)	79.61	g	Volumen de sólidos (Vs)	7.32	cm ³	Humedad inicial (wi)	477	%	Peso volumétrico final (Yshf)	1.27	g/cm ³
Peso del agua inicial (Wwi)	93.76	g	Volumen de vacíos (Vv)	93.97	cm ³	Relación de vacíos inicial (ei)	12.84		Humedad final (wf)	305	%
Peso del agua final (Wwf)	59.95	g	Vol. de agua inicial (Vwi)	93.76	cm ³	Grado de saturación inicial (Gwi)	100	%	Relación de vacíos final (ef)	7.56	
								Grado de saturación final (Gsf)	108	%	
Estrato-04 Profundidad de 12.0 m a 20.0 m Muestra extraída de : 15.10 m a 15.30 m											
Peso de sólidos (Ws)	32.41	g						Altura final (Hf)	1.22	cm	
Peso húmedo inicial (Wshi)	122.28	g	Volumen inicial (Vi)	100.53	cm ³	Peso volumétrico inicial (Yhi)	1.216	g/cm ³	Volumen final (Vf)	61.17	cm ³
Peso húmedo final (Wshf)	75.74	g	Volumen de sólidos (Vs)	11.92	cm ³	Humedad inicial (wi)	277	%	Peso volumétrico final (Yshf)	1.24	g/cm ³
Peso del agua inicial (Wwi)	89.87	g	Volumen de vacíos (Vv)	88.61	cm ³	Relación de vacíos inicial (ei)	7.43		Humedad final (wf)	134	%
Peso del agua final (Wwf)	43.33	g	Vol. de agua inicial (Vwi)	89.87	cm ³	Grado de saturación inicial (Gwi)	99	%	Relación de vacíos final (ef)	4.13	
								Grado de saturación final (Gsf)	88	%	
Estrato-05 Profundidad de 20.0 m a 27.0 m Muestra extraída de : 23.80 m a 24.00 m											
Peso de sólidos (Ws)	30.50	g						Altura final (Hf)	1.15	cm	
Peso húmedo inicial (Wshi)	122.61	g	Volumen inicial (Vi)	100.78	cm ³	Peso volumétrico inicial (Yhi)	1.217	g/cm ³	Volumen final (Vf)	58.00	cm ³
Peso húmedo final (Wshf)	82.74	g	Volumen de sólidos (Vs)	11.53	cm ³	Humedad inicial (wi)	302	%	Peso volumétrico final (Yshf)	1.43	g/cm ³
Peso del agua inicial (Wwi)	92.11	g	Volumen de vacíos (Vv)	89.25	cm ³	Relación de vacíos inicial (ei)	7.74		Humedad final (wf)	171	%
Peso del agua final (Wwf)	52.24	g	Vol. de agua inicial (Vwi)	92.11	cm ³	Grado de saturación inicial (Gwi)	103	%	Relación de vacíos final (ef)	4.03	
								Grado de saturación final (Gsf)	112	%	
Estrato-05 Profundidad de 20.0 m a 27.0 m Muestra extraída de : 23.80 m a 24.00 m											
Peso de sólidos (Ws)	30.50	g						Altura final (Hf)	1.15	cm	
Peso húmedo inicial (Wshi)	122.61	g	Volumen inicial (Vi)	100.78	cm ³	Peso volumétrico inicial (Yhi)	1.217	g/cm ³	Volumen final (Vf)	58.00	cm ³
Peso húmedo final (Wshf)	82.74	g	Volumen de sólidos (Vs)	11.53	cm ³	Humedad inicial (wi)	302	%	Peso volumétrico final (Yshf)	1.43	g/cm ³
Peso del agua inicial (Wwi)	92.11	g	Volumen de vacíos (Vv)	89.25	cm ³	Relación de vacíos inicial (ei)	7.74		Humedad final (wf)	171	%
Peso del agua final (Wwf)	52.24	g	Vol. de agua inicial (Vwi)	92.11	cm ³	Grado de saturación inicial (Gwi)	103	%	Relación de vacíos final (ef)	4.03	
								Grado de saturación final (Gsf)	112	%	
Estrato-05 Profundidad de 20.0 m a 27.0 m Muestra extraída de : 23.80 m a 24.00 m											
Peso de sólidos (Ws)	30.50	g						Altura final (Hf)	1.15	cm	
Peso húmedo inicial (Wshi)	122.61	g	Volumen inicial (Vi)	100.78	cm ³	Peso volumétrico inicial (Yhi)	1.217	g/cm ³	Volumen final (Vf)	58.00	cm ³
Peso húmedo final (Wshf)	82.74	g	Volumen de sólidos (Vs)	11.53	cm ³	Humedad inicial (wi)	302	%	Peso volumétrico final (Yshf)	1.43	g/cm ³
Peso del agua inicial (Wwi)	92.11	g	Volumen de vacíos (Vv)	89.25	cm ³	Relación de vacíos inicial (ei)	7.74		Humedad final (wf)	171	%
Peso del agua final (Wwf)	52.24	g	Vol. de agua inicial (Vwi)	92.11	cm ³	Grado de saturación inicial (Gwi)	103	%	Relación de vacíos final (ef)	4.03	
								Grado de saturación final (Gsf)	112	%	
Estrato-06 Profundidad de 27.0 m a 30.0 m Muestra extraída de : 23.80 m a 24.00 m											
Peso de sólidos (Ws)	28.95	g						Altura final (Hf)	1.14	cm	
Peso húmedo inicial (Wshi)	120.36	g	Volumen inicial (Vi)	100.28	cm ³	Peso volumétrico inicial (Yhi)	1.200	g/cm ³	Volumen final (Vf)	57.29	cm ³
Peso húmedo final (Wshf)	81.44	g	Volumen de sólidos (Vs)	10.61	cm ³	Humedad inicial (wi)	316	%	Peso volumétrico final (Yshf)	1.42	g/cm ³
Peso del agua inicial (Wwi)	91.41	g	Volumen de vacíos (Vv)	89.67	cm ³	Relación de vacíos inicial (ei)	8.45		Humedad final (wf)	181	%
Peso del agua final (Wwf)	52.49	g	Vol. de agua inicial (Vwi)	91.41	cm ³	Grado de saturación inicial (Gwi)	102	%	Relación de vacíos final (ef)	4.40	
								Grado de saturación final (Gsf)	112	%	

Posteriormente, con base a las curvas de compresibilidad y de consolidación obtenidas a partir de las pruebas edométricas en laboratorio. Se obtiene el índice de compresibilidad, el índice de abultamiento y el coeficiente de consolidación correspondientes, los cuales van asociados a cada estrato y a cada etapa donde se realiza un cambio en el estado de esfuerzos. Es decir, el valor que se determina es aquel que corresponde a la curva obtenida en el laboratorio durante un incremento de carga proporcional al que se estima aplicar en cada etapa de Vacío.

A continuación se muestran cada una de las etapas del tratamiento, los estratos involucrados y la carga de aplicación que se estimó en cada etapa antes del inicio del sistema de mejoramiento.

La carga aplicada por la plataforma de trabajo y el relleno de compensación está en función de la influencia a profundidad que puede tener con base a la distribución de esfuerzos bajo un terraplén. En cambio, la carga de vacío es tomada en cuenta de manera isotrópica.

Tabla 07.- “Etapa constructiva y cargas aplicadas durante dicho periodo”. Menard México.

Etapa 1 “Construcción” Del 24/07/2017 al 07/09/2017 duración: 45 días						
Estrato	Profundidad (m)		Influencia a profundidad (Boussinesq)	Carga estimada de la plataforma de trabajo (1m de tezontle) (kPa)	Carga estimada de vacío (kPa)	Carga total (kPa)
	De	A				
1	0	2	1	12.5	0	12.5
2	2	8	0.99	12.5	0	12.38
3	8	12	0.96	12.5	0	12
4	12	20	0.95	12.5	0	11.88
5	20	27	0.84	12.5	0	10.5
6	27	30	0.73	12.5	0	9.13

Tabla 08.- “Primer mes de aplicación del vacío y cargas aplicadas durante dicho periodo”. Menard México.

Etapa 2 “1º mes de Vacío” Del 08/09/2017 al 08/10/2017 duración: 31 días						
Estrato	Profundidad (m)		Influencia a profundidad (Boussinesq)	Carga estimada de la plataforma de trabajo (1m de tezontle) (kPa)	Carga estimada de vacío (kPa)	Carga total (kPa)
	De	A				
1	0	2	1	12.5	65	77.5
2	2	8	0.99	12.5	65	77.38
3	8	12	0.96	12.5	65	77
4	12	20	0.95	12.5	65	76.88
5	20	27	0.84	12.5	65	75.5
6	27	30	0.73	12.5	65	74.13

Tabla 09.- “Segundo mes de aplicación del vacío y cargas aplicadas durante dicho periodo”. Menard México.

Etapa 3 “2º mes de Vacío” Del 08/10/2017 al 08/11/2017 duración: 31 días						
Estrato	Profundidad (m)		Influencia a profundidad (Boussinesq)	Carga estimada de la plataforma de trabajo (1m de tezontle) (kPa)	Carga estimada de vacío (kPa)	Carga total (kPa)
	De	A				
1	0	2	1	12.5	60	72.50
2	2	8	0.99	12.5	60	72.38
3	8	12	0.96	12.5	60	72.00
4	12	20	0.95	12.5	60	71.88
5	20	27	0.84	12.5	60	70.50
6	27	30	0.73	12.5	60	69.13

Tabla 10.- “Tercer mes de aplicación del vacío y cargas aplicadas durante dicho periodo”. Menard México.

Etapa 4 “3° mes de Vacío y colocación del relleno de compensación” Del 08/11/2017 al 08/12/2017 duración: 30 días						
Estrato	Profundidad (m)		Influencia a profundidad (Boussinesq)	Carga estimada de la plataforma de trabajo y relleno de compensación (2m de tezontle) (kPa)	Carga estimada de vacío (kPa)	Carga total (kPa)
	De	A				
1	0	2	1	12.5	60	85.00
2	2	8	0.99	12.5	60	84.75
3	8	12	0.96	12.5	60	84.00
4	12	20	0.95	12.5	60	83.75
5	20	27	0.84	12.5	60	81.00
6	27	30	0.73	12.5	60	78.25

Tabla 11.- “A los seis meses de aplicación del Vacío, periodo completo”. Menard México.

Etapa 4 “tres meses de tratamiento” Del 08/11/2017 al 08/12/2017 duración: 30 días						
Estrato	Profundidad (m)		Influencia a profundidad (Boussinesq)	Carga estimada de la plataforma de trabajo y relleno de compensación (2m de tezontle) (kPa)	Carga estimada de vacío (kPa)	Carga total (kPa)
	De	A				
1	0	2	1	12.5	55	67.50
2	2	8	0.99	12.5	55	67.38
3	8	12	0.96	12.5	55	67.00
4	12	20	0.95	12.5	55	66.88
5	20	27	0.84	12.5	55	65.50
6	27	30	0.73	12.5	55	64.13

Estos valores fueron estimados previo al inicio del sistema, con el fin de tener una aproximación en el asentamiento de cada etapa.

6.2.1. Determinación de la carga de preconsolidación, índice de compresibilidad e índice de abultamiento

Inicialmente se obtiene la carga de preconsolidación con base al método de Casagrande, mencionado en el capítulo 6.1. Posteriormente, de las curvas de compresibilidad obtenidas en el laboratorio, asociadas a un incremento de carga proporcional a la carga a aplicar en el panel, se obtienen los índices de compresibilidad y abultamiento.

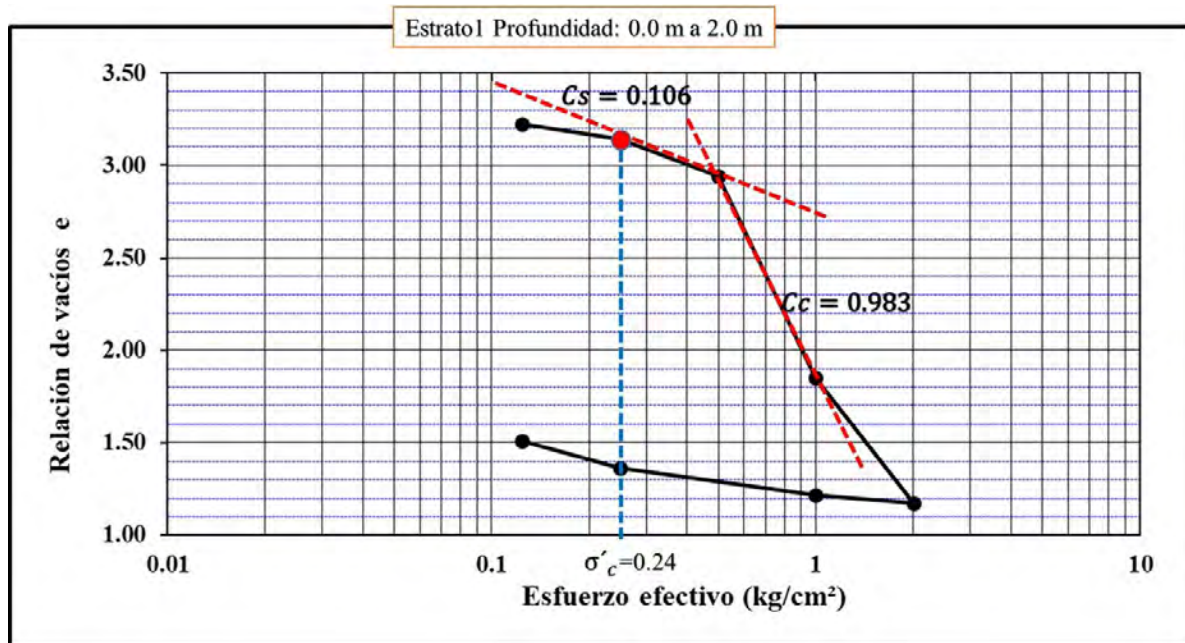


Figura 80.- “Carga de preconsolidación, índice de compresibilidad e índice de abultamiento del estrato uno (0.0 m a 2.0 m), con base a la curva de compresibilidad y al incremento de cargas en el laboratorio, proporcional al incremento de carga real estimado en el sitio de prueba.

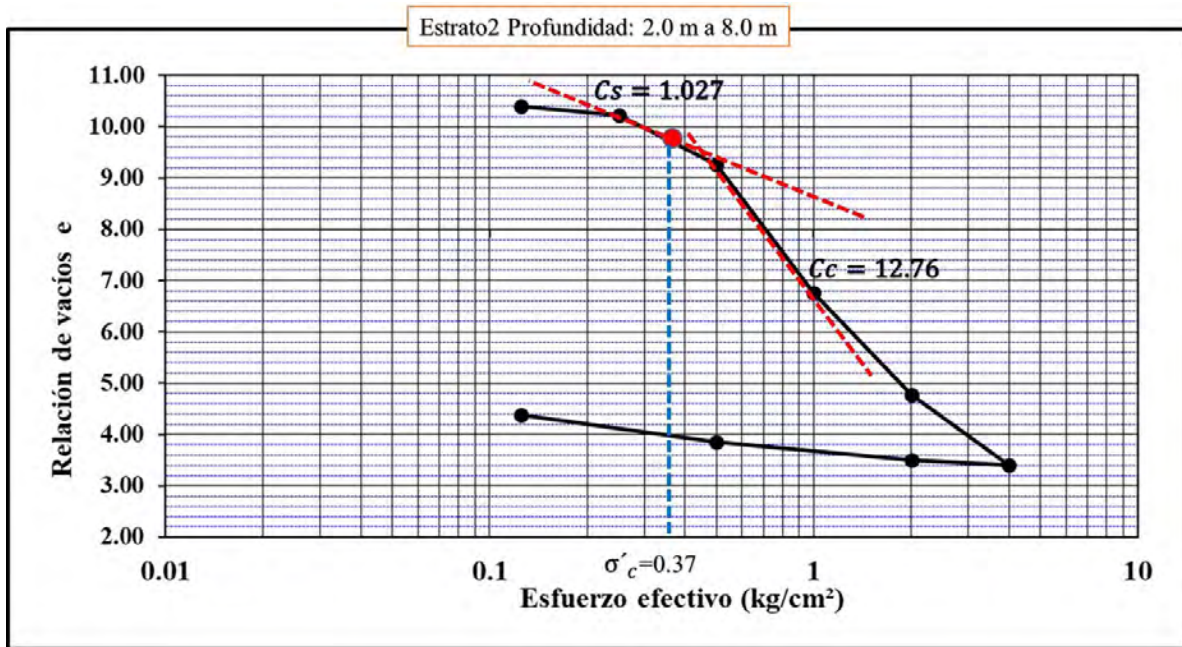


Figura 81.- “Carga de preconsolidación, índice de compresibilidad e índice de abultamiento del estrato dos (2.0 m a 8.0 m), con base a la curva de compresibilidad y al incremento de cargas en el laboratorio, proporcional al incremento de carga real estimado en el sitio de prueba.

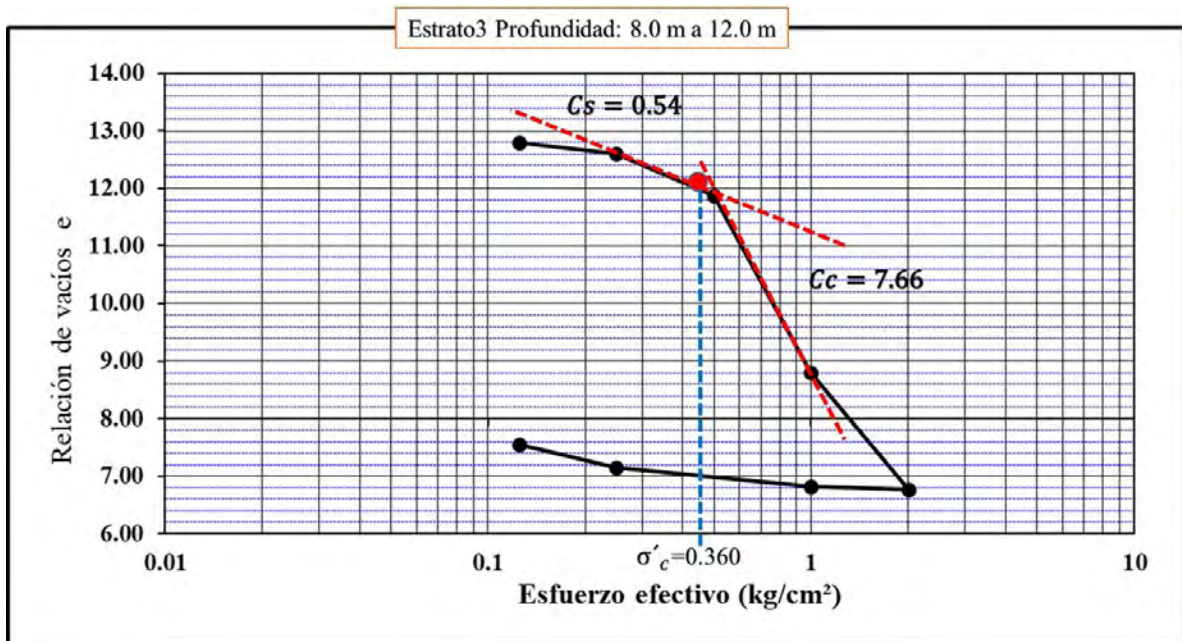


Figura 82.- “Carga de preconsolidación, índice de compresibilidad e índice de abultamiento del estrato tres (8.0 m a 12.0 m), con base a la curva de compresibilidad y al incremento de cargas en el laboratorio, proporcional al incremento de carga real estimado en el sitio de prueba.

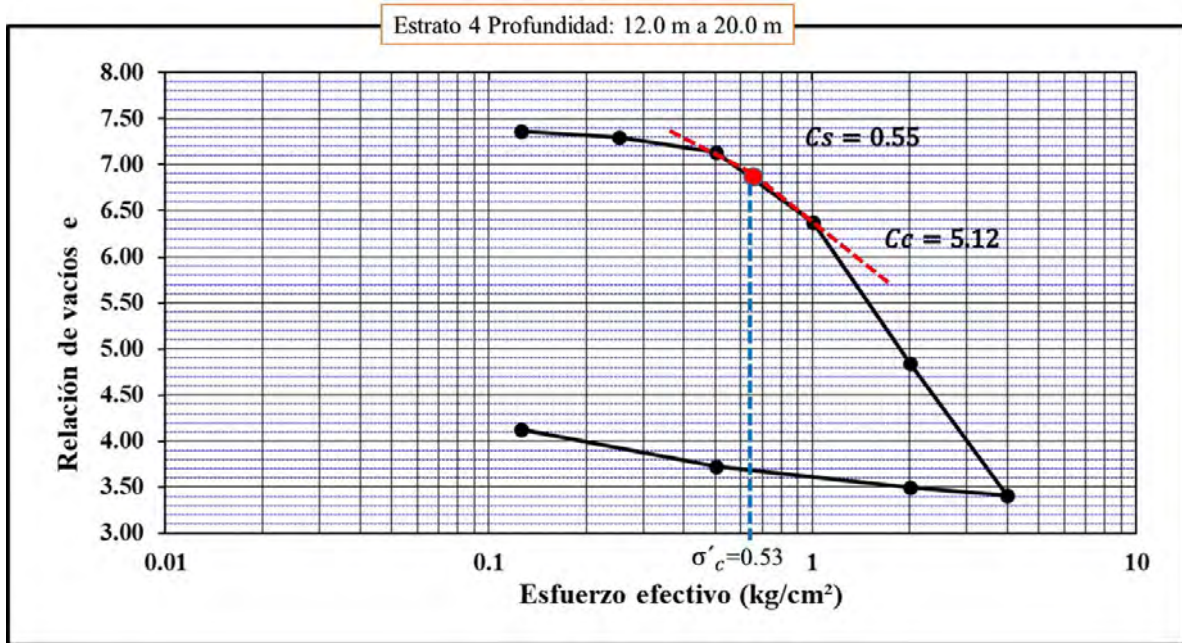


Figura 83.- “Carga de preconsolidación, índice de compresibilidad e índice de abultamiento del estrato cuatro (12.0 m a 20.0 m), con base a la curva de compresibilidad y al incremento de cargas en el laboratorio, proporcional al incremento de carga real estimado en el sitio de prueba.

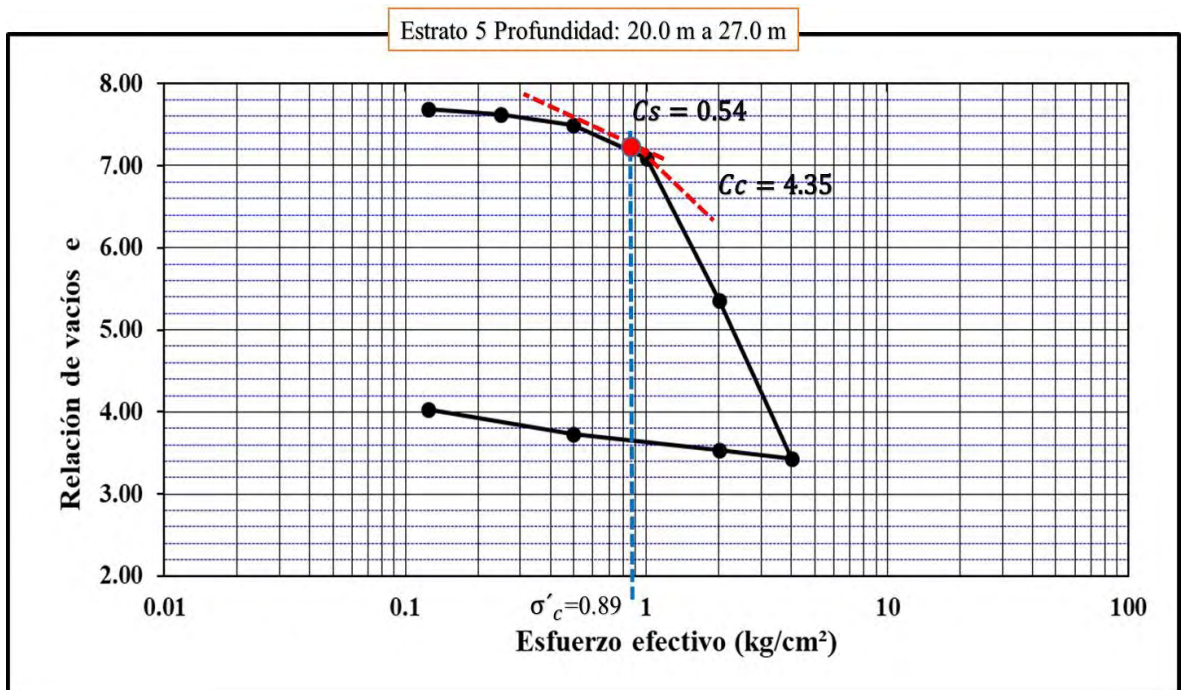


Figura 84.- “Carga de preconsolidación, índice de compresibilidad e índice de abultamiento del estrato cinco (20.0 m a 27.0 m), con base a la curva de compresibilidad y al incremento de cargas en el laboratorio, proporcional al incremento de carga real estimado en el sitio de prueba.

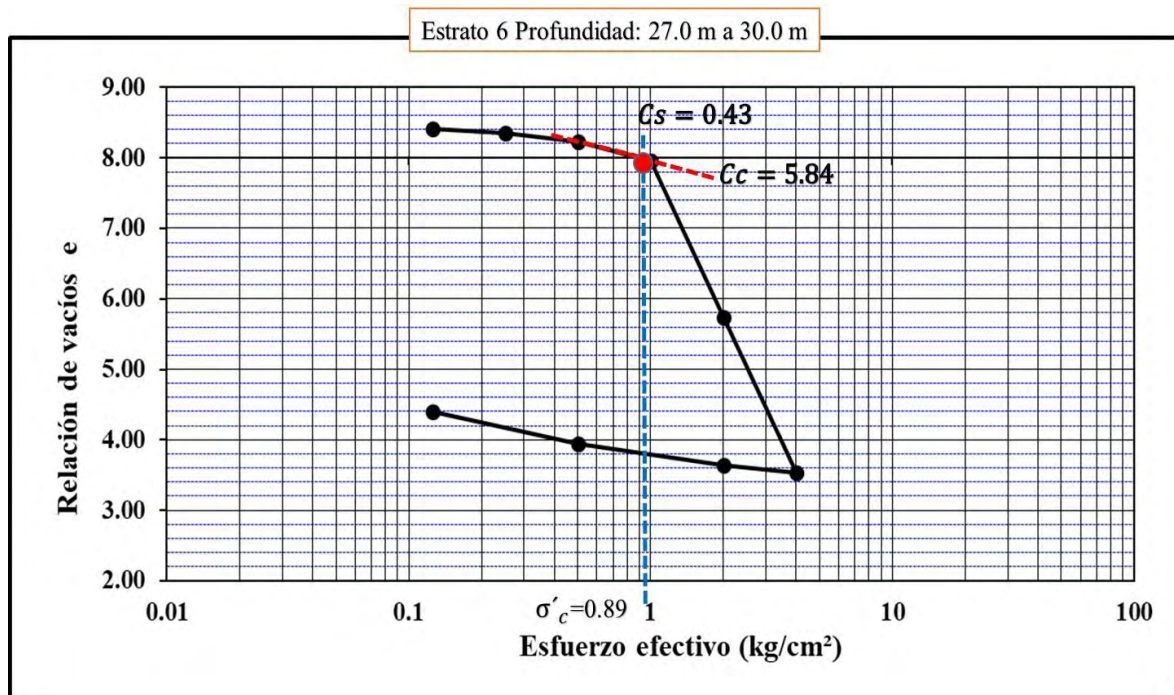


Figura 85.- “Carga de preconsolidación, índice de compresibilidad e índice de abultamiento del estrato seis (27.0 m a 30.0 m), con base a la curva de compresibilidad y al incremento de cargas en el laboratorio, proporcional al incremento de carga real estimado en el sitio de prueba.

6.2.2. Determinación del coeficiente de consolidación

Con base al método de cálculo propuesto por Arthur Casagrande y explicado en el Capítulo 6.1 y la ecuación (6.16) se determinan los coeficientes de consolidación vertical de acuerdo a cada incremento de esfuerzo en el laboratorio proporcional a la carga estimada por aplicar en cada etapa del Vacío.

Cabe mencionar que de acuerdo a la tabla anterior (Tabla xx) las cargas en las etapas 2, 3, 4 y 5 tienen una proporción similar y de acuerdo al incremento de carga en el laboratorio tienen el mismo rango.

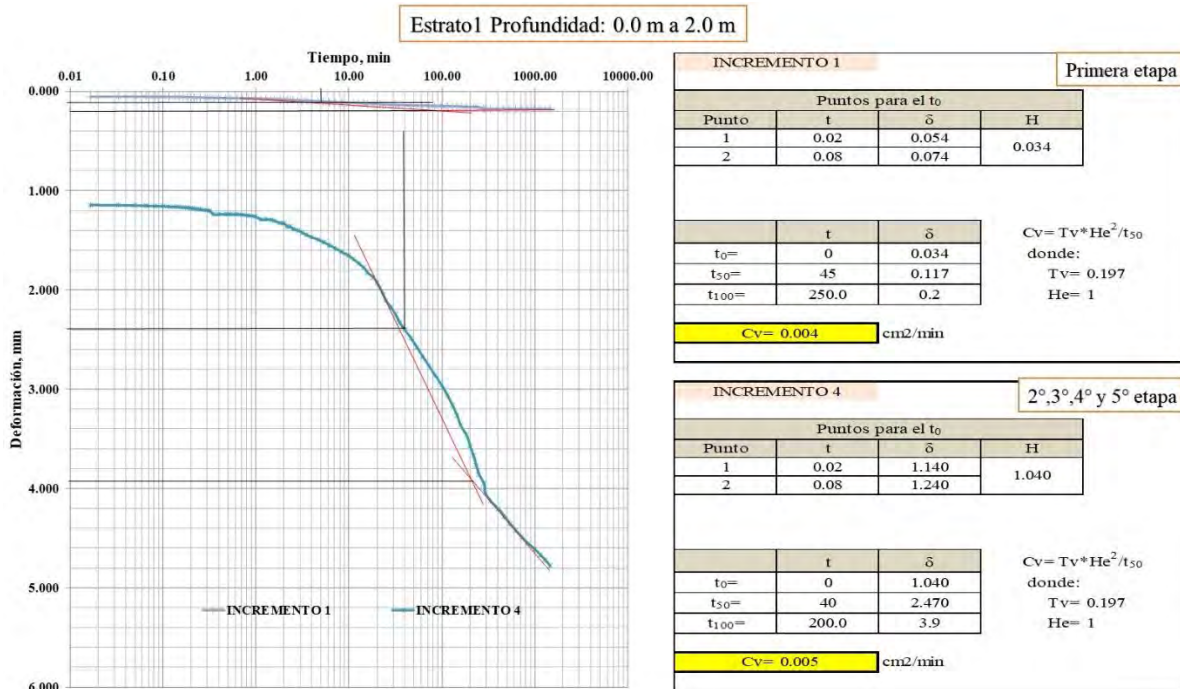


Figura 86.- “Coeficientes de Consolidación del estrato uno (0.0 m a 2.0 m con base a la curva de compresibilidad y al incremento de cargas en el laboratorio, proporcional al incremento de carga real estimado en el sitio de prueba.

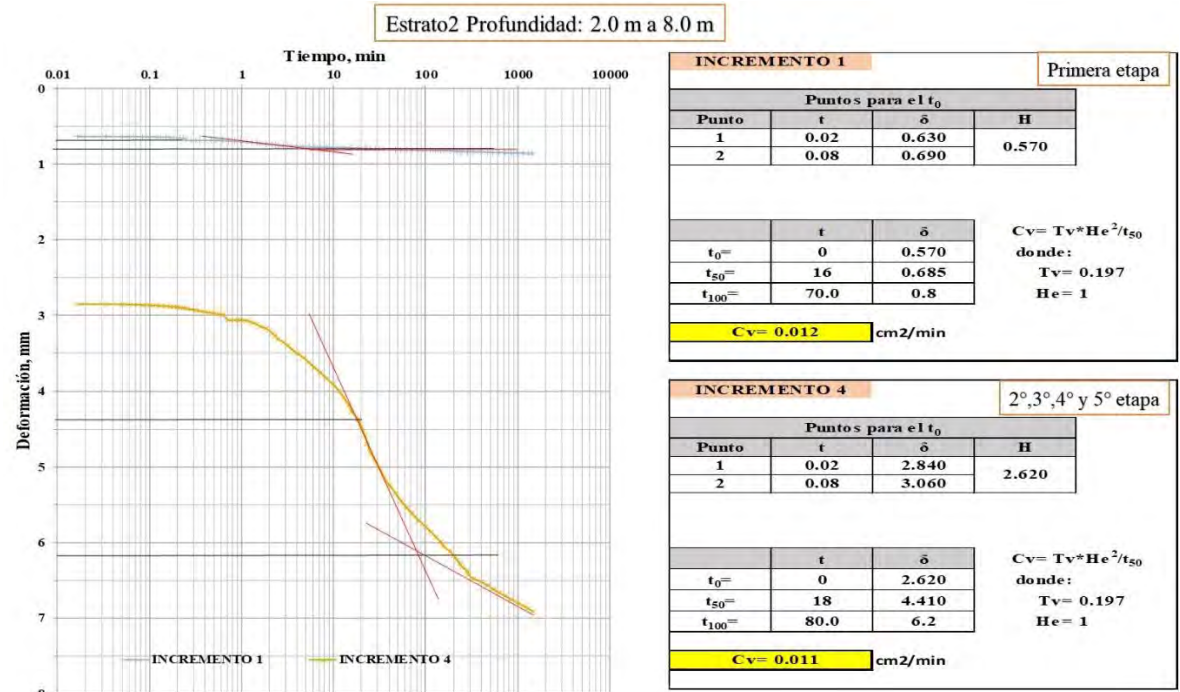


Figura 87.- “Coeficientes de Consolidación del estrato dos (2.0 m a 8.0 m), con base a la curva de compresibilidad y al incremento de cargas en el laboratorio, proporcional al incremento de carga real estimado en el sitio de prueba.

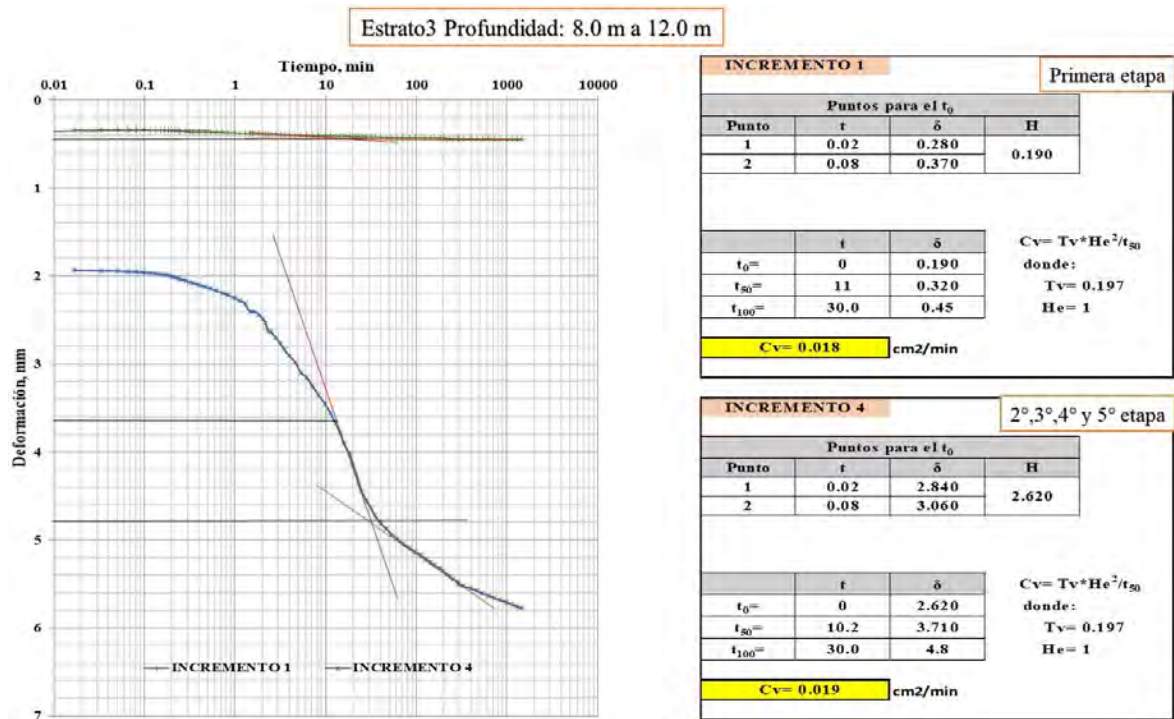


Figura 88.- “Coeficientes de Consolidación del estrato tres (8.0 m a 12.0 m), con base a la curva de compresibilidad y al incremento de cargas en el laboratorio, proporcional al incremento de carga real estimado en el sitio de prueba.

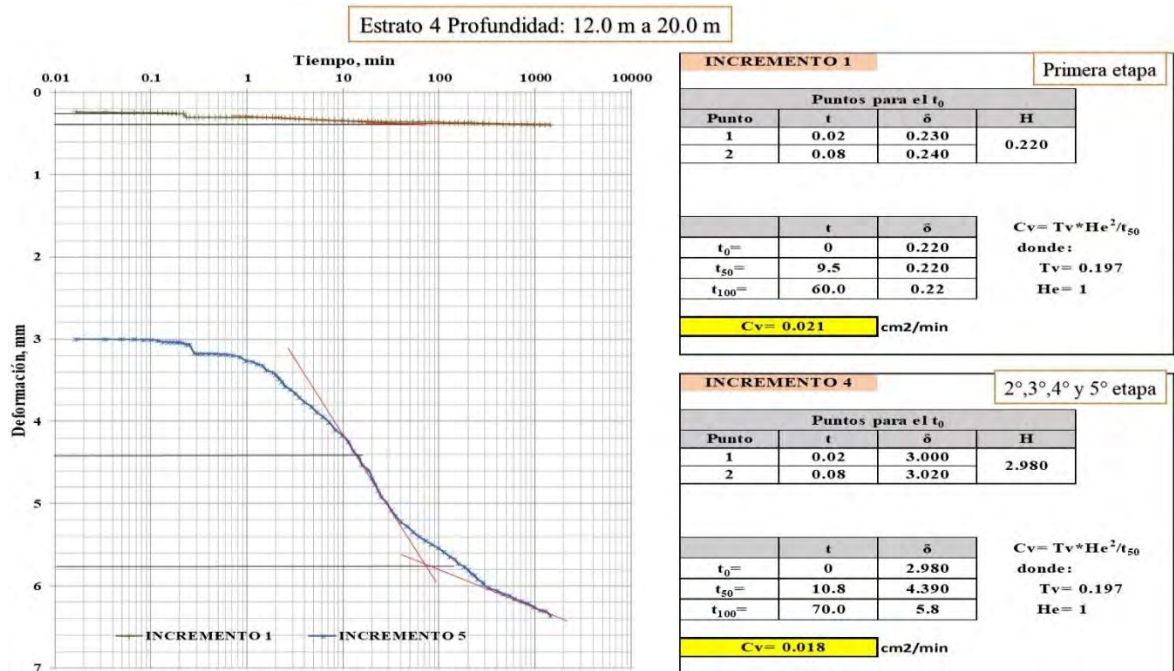


Figura 89.- “Coeficientes de Consolidación del estrato cuatro (12.0 m a 20.0 m), con base al incremento de cargas en el laboratorio relacionados al incremento de carga real estimado en el sitio de prueba.

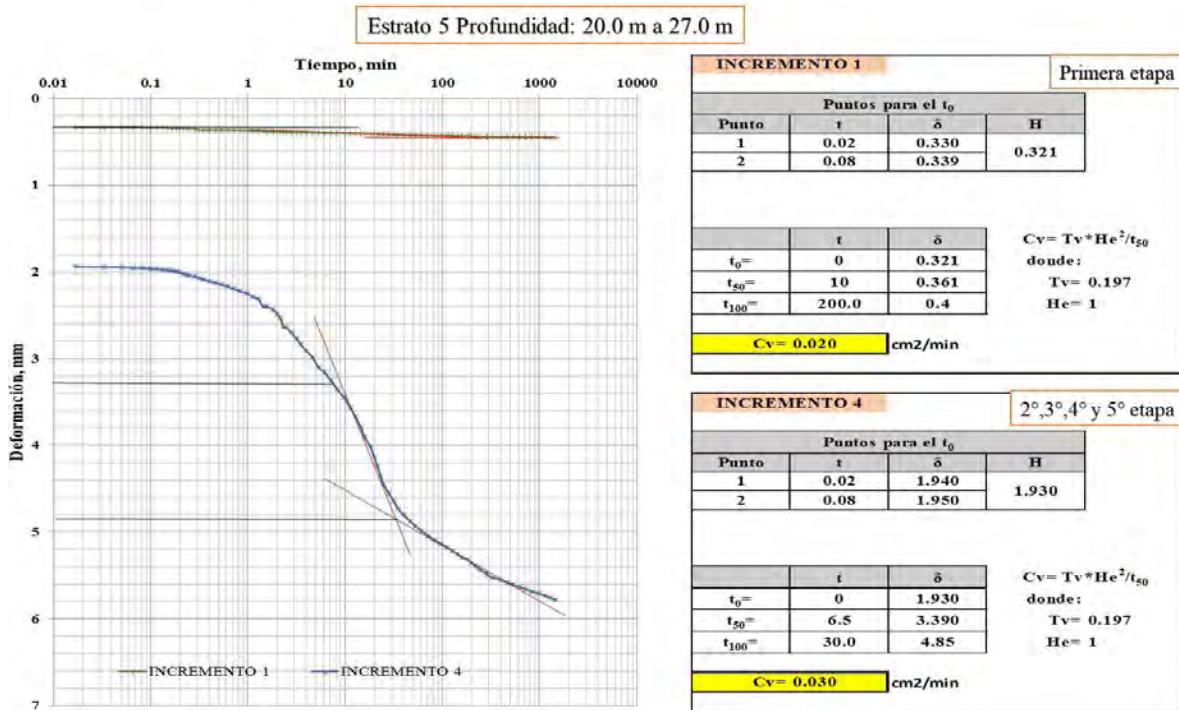


Figura 90.- “Coeficientes de Consolidación del estrato cinco (20.0 m a 27.0 m), con base a la curva de compresibilidad y al incremento de cargas en el laboratorio, proporcional al incremento de carga real estimado en el sitio de prueba.

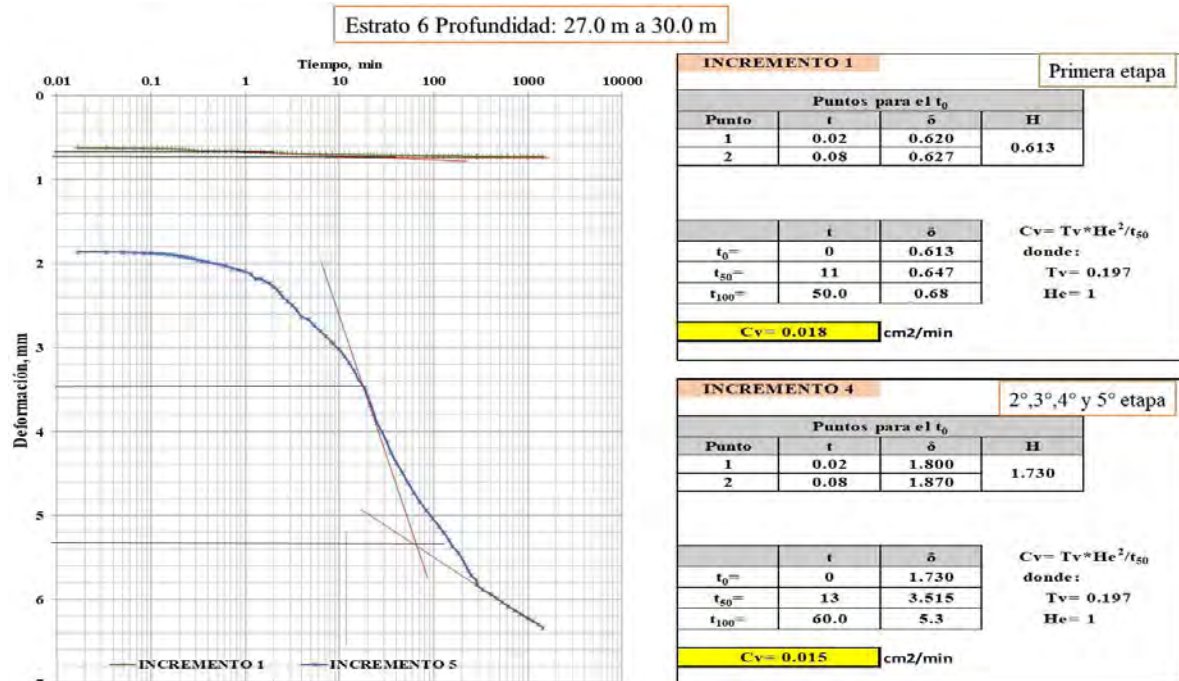


Figura 91.- “Coeficientes de Consolidación del estrato seis (27.0 m a 30.0 m), con base a la curva de compresibilidad y al incremento de cargas en el laboratorio, proporcional al incremento de carga real estimado en el sitio de prueba.

6.3. CALCULO DE ASENTAMIENTOS EN DIVERSAS CONDICIONES Y POR ETAPAS CONSTRUCTIVAS

Una vez obtenidos los parámetros necesarios, es posible determinar el asentamiento en cada una de las etapas constructivas de acuerdo al incremento de carga que se estimaba aplicar con base a la experiencia antes de dar inicio al tratamiento en la plataforma. El cálculo se obtiene a partir de las ecuaciones explicadas en el Capítulo 6.1.

Previamente se obtienen las características geotécnicas y propiedades del suelo para conocer el estado inicial o las condiciones iniciales del suelo. Y así mismo poder determinar el estado de esfuerzos iniciales.

Tabla 12.- “Caracterización geotécnica y propiedades del suelo”.

PARÁMETROS DE SUELO											
No.	ESTRATO	PROFUNDIDAD		H (m)	γ (kN/m ³)	σ_t (kPa)	U (kPa)	σ'_o (kPa)	σ'_c (kPa)	OCR	e ₀
		DE (m)	A (m)								
1	Arcilla gris (CH)	0	-2	2	13.66	27.32	12.00	15.32	24.56	1.6	3.28
2	Arcilla verde (CH)	-2	-8	6	12.66	103.28	72.00	31.28	37.53	1.2	10.54
3	Arcilla rojiza (CH)	-8	-12	4	11.2	148.08	112.00	36.08	36.08	1.0	12.84
4	Arcilla verde (CH)	-12	-20	8	12.16	245.36	192.00	53.36	53.68	1.0	7.43
5	Arcilla marrón (CH)	-20	-27	7	12.17	330.55	262.00	68.55	89.53	1.3	7.74
6	Arcilla marrón (CH)	-27	-30	3	12	366.55	292.00	74.55	97.33	1.3	8.45

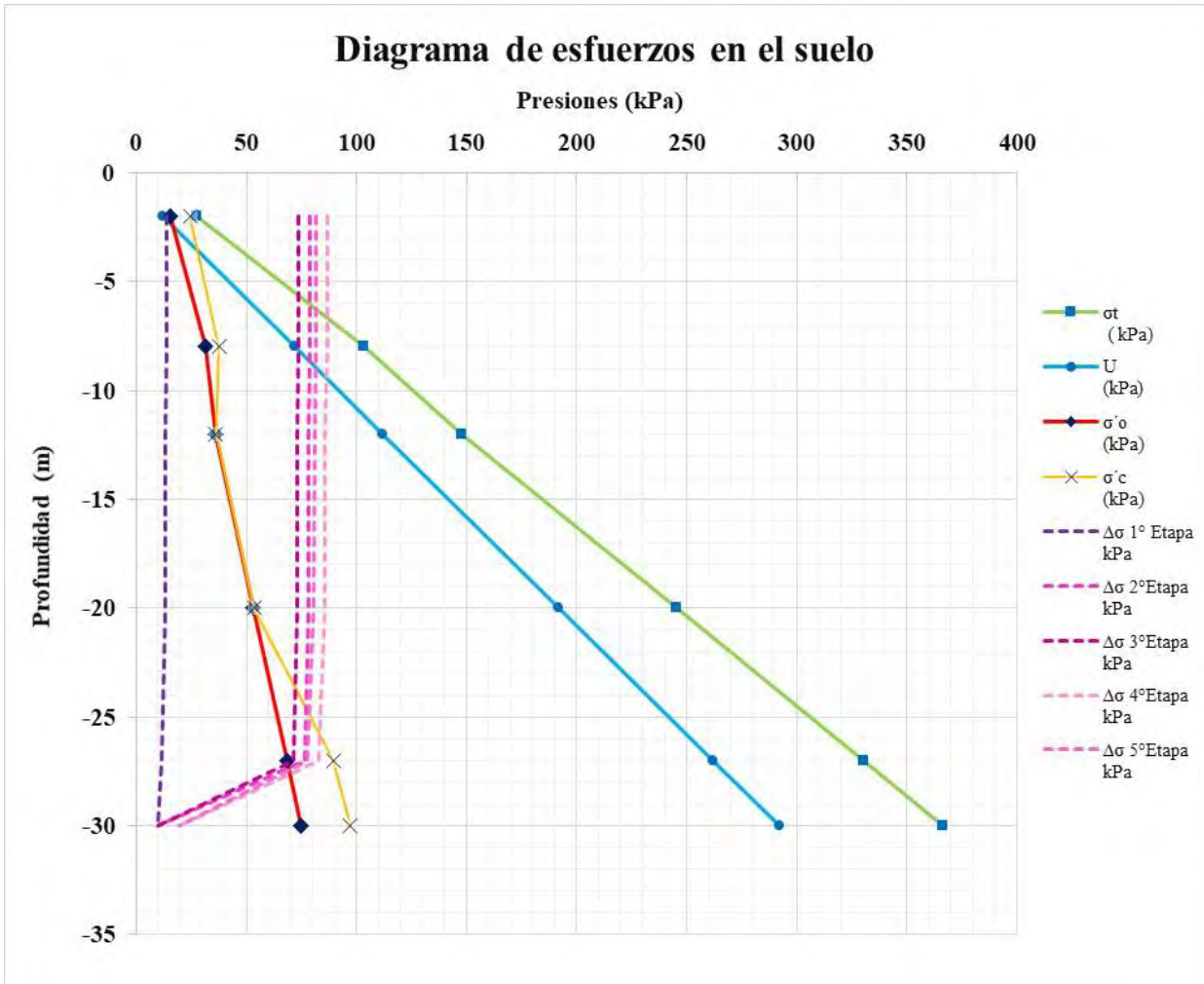


Figura 92.- “Diagrama de esfuerzos del suelo y cargas estimadas en cada una de las etapas”.

6.3.1. Asentamientos estimado considerando una precarga convencional (sin PVD’s) proporcional a la carga de vacío.

Para conocer, posteriormente, la aportación e influencia de la colocación de los drenes verticales, se determina el asentamiento en cada una de las etapas únicamente tomando en una precarga proporcional a la presión ejercida por el vacío y a las plataformas de trabajo. Esto con el suelo en estado inicial sin la influencia de drenes verticales.

Debido a la baja resistencia al corte de la arcilla, es difícil colocar una precarga la cual sea proporcional a la carga aplicada por el sistema de vacío con membrana, ya que rebasará dicha resistencia al corte probando una falla circular típica de talud.

El siguiente cálculo únicamente nos permitirá conocer el asentamiento considerando que no hay falla circular y posteriormente conocer la influencia de la instalación de los PVD’s y aplicar un vacío.

Tabla 13.- “Cálculo de asentamientos por etapas debidos a una precarga proporcional a la carga de vacío y a las plataformas de trabajo correspondientes, esto sin la influencia de los PVD’s”.

ETAPA	1	CONSTRUCCIÓN					PERIODO	24/07/2017	-	07/09/2017						
ESTRATO	I	$\Delta\sigma$ 1ª ETAPA kPa	$\Delta\sigma$ kg/cm2	DURACIÓN (Días)	TOEMPO ACUMULADO (Días)	t (Segundos)	Tv	Cv	Cc	Cs	Uv%	SMEAR EFFECT F(n)	Ur%	U%	ΔH_p (m)	
1	1	12.50	0.125	45	45	3.89E+06	0.0065	0.0006	0.9830	0.1060	0.090	3.62	0.000	0.090	0.003	
2	0.99	12.38	0.124	45	45	3.89E+06	0.0022	0.0017	12.7600	1.0270	0.052	3.62	0.000	0.052	0.025	
3	0.96	12.00	0.120	45	45	3.89E+06	0.0073	0.0026	7.6600	0.5400	0.096	3.62	0.000	0.096	0.026	
4	0.95	11.88	0.119	45	45	3.89E+06	0.0021	0.0030	5.1200	0.5500	0.052	3.62	0.000	0.052	0.021	
5	0.84	10.50	0.105	45	45	3.89E+06	0.0026	0.0029	4.3500	0.5400	0.058	3.62	0.000	0.058	0.000	
6	0.73	9.13	0.091	45	45	3.89E+06	0.0130	0.0026	5.8400	0.4300	0.128	3.62	0.000	0.128	0.000	
δ acumulado															0.076	
ETAPA	2	1º MES DE VACÍO					PERIODO	08/09/2017	-	08/10/2017						
ESTRATO	I	$\Delta\sigma$ 2ª ETAPA kPa	$\Delta\sigma$ kg/cm2	DURACIÓN (Días)	TOEMPO ACUMULADO (Días)	t (Segundos)	Tv	Cv	Cc	Cs	Uv%	SMEAR EFFECT F(n)	Ur%	U%	ΔH_p (m)	
1	1	77.50	0.775	30	75	6.48E+06	0.0135	7.20E-04	0.9830	0.1060	0.130	3.62	0.000	0.130	0.036	
2	0.99	77.38	0.774	30	75	6.48E+06	0.0033	1.58E-03	12.7600	1.0270	0.064	3.62	0.000	0.064	0.200	
3	0.96	77.00	0.770	30	75	6.48E+06	0.0128	2.74E-03	7.6600	0.5400	0.127	3.62	0.000	0.127	0.140	
4	0.95	76.88	0.769	30	75	6.48E+06	0.0030	2.59E-03	5.1200	0.5500	0.062	3.62	0.000	0.062	0.116	
5	0.84	75.50	0.755	30	75	6.48E+06	0.0066	4.32E-03	4.3500	0.5400	0.091	3.62	0.000	0.091	0.070	
6	0.73	9.13	0.091	30	75	6.48E+06	0.0180	2.16E-03	5.8400	0.4300	0.151	3.62	0.000	0.151	0.000	
δ acumulado															0.562	
ETAPA	3	2º MES DE VACÍO					PERIODO	08/10/2017	-	08/11/2017						
ESTRATO	I	$\Delta\sigma$ 3ª ETAPA kPa	$\Delta\sigma$ kg/cm2	DURACIÓN (Días)	TOEMPO ACUMULADO (Días)	t (Segundos)	Tv	Cv	Cc	Cs	Uv%	SMEAR EFFECT F(n)	Ur%	U%	ΔH_p (m)	
1	1	72.50	0.725	31	106	9.16E+06	0.0191	7.20E-04	0.9830	0.1060	0.155	3.62	0.000	0.155	0.041	
2	0.99	72.38	0.724	31	106	9.16E+06	0.0047	1.58E-03	12.7600	1.0270	0.077	3.62	0.000	0.077	0.228	
3	0.96	72.00	0.720	31	106	9.16E+06	0.0181	2.74E-03	7.6600	0.5400	0.151	3.62	0.000	0.151	0.160	
4	0.95	71.88	0.719	31	106	9.16E+06	0.0043	2.59E-03	5.1200	0.5500	0.074	3.62	0.000	0.074	0.132	
5	0.84	70.50	0.705	31	106	9.16E+06	0.0093	4.32E-03	4.3500	0.5400	0.109	3.62	0.000	0.109	0.078	
6	0.73	9.13	0.091	31	106	9.16E+06	0.0254	2.16E-03	5.8400	0.4300	0.179	3.62	0.000	0.179	0.000	
δ acumulado															0.638	
ETAPA	4	3º MES DE VACÍO Y RELLENO					PERIODO	08/11/2017	-	08/12/2017						
ESTRATO	I	$\Delta\sigma$ 4ª ETAPA kPa	$\Delta\sigma$ kg/cm2	DURACIÓN (Días)	TOEMPO ACUMULADO (Días)	t (Segundos)	Tv	Cv	Cc	Cs	Uv%	SMEAR EFFECT F(n)	Ur%	U%	ΔH_p (m)	
1	1	85.00	0.850	30	136	1.18E+07	0.0245	7.20E-04	0.9830	0.1060	0.176	3.62	0.000	0.176	0.051	
2	0.99	84.75	0.848	30	136	1.18E+07	0.0060	1.58E-03	12.7600	1.0270	0.087	3.62	0.000	0.087	0.286	
3	0.96	84.00	0.840	30	136	1.18E+07	0.0233	2.74E-03	7.6600	0.5400	0.171	3.62	0.000	0.171	0.198	
4	0.95	83.75	0.838	30	136	1.18E+07	0.0055	2.59E-03	5.1200	0.5500	0.083	3.62	0.000	0.083	0.165	
5	0.84	81.00	0.810	30	136	1.18E+07	0.0120	4.32E-03	4.3500	0.5400	0.123	3.62	0.000	0.123	0.102	
6	0.73	18.25	0.183	30	136	1.18E+07	0.0326	2.16E-03	5.8400	0.4300	0.203	3.62	0.000	0.203	0.000	
δ acumulado															0.802	
ETAPA	5	6º MES DE VACÍO					PERIODO	08/12/2017	-	08/03/2018						
ESTRATO	I	$\Delta\sigma$ 5ª ETAPA kPa	$\Delta\sigma$ kg/cm2	DURACIÓN (Días)	TOEMPO ACUMULADO (Días)	t (Segundos)	Tv	Cv	Cc	Cs	Uv%	SMEAR EFFECT F(n)	Ur%	U%	ΔH_p (m)	
1	1	80.00	0.800	90	226	1.95E+07	0.0407	7.20E-04	0.9830	0.1060	0.226	3.62	0.000	0.226	0.064	
2	0.99	79.75	0.798	90	226	1.95E+07	0.0099	1.58E-03	12.7600	1.0270	0.112	3.62	0.000	0.112	0.355	
3	0.96	79.00	0.790	90	226	1.95E+07	0.0386	2.74E-03	7.6600	0.5400	0.221	3.62	0.000	0.221	0.246	
4	0.95	78.75	0.788	90	226	1.95E+07	0.0092	2.59E-03	5.1200	0.5500	0.107	3.62	0.000	0.107	0.204	
5	0.84	76.00	0.760	90	226	1.95E+07	0.0199	4.32E-03	4.3500	0.5400	0.158	3.62	0.000	0.158	0.123	
6	0.73	18.25	0.183	90	226	1.95E+07	0.0542	2.16E-03	5.8400	0.4300	0.261	3.62	0.000	0.261	0.000	
δ acumulado															0.992	

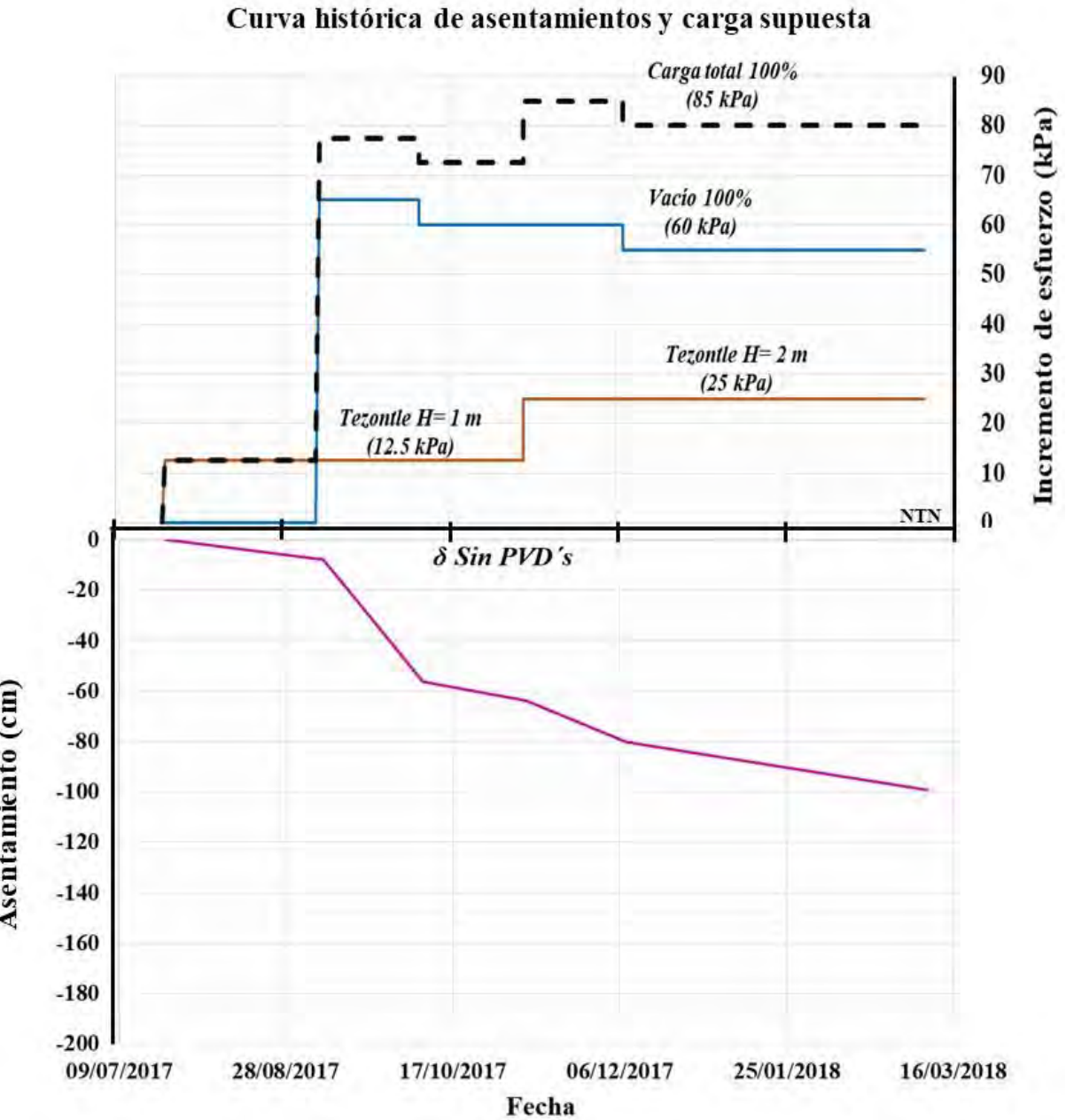


Figura 93.- “Asentamientos calculados en cada etapa constructiva de acuerdo a una precarga aplicada proporcional a la carga de vacío y a las plataformas de trabajo respectivas”. (Condiciones de prueba y propiedades del suelo optimas)

6.3.2. Asentamientos estimado considerando la influencia de los drenes verticales y la aplicación del vacío con membrana pero sin provocar un remoldeo en la arcilla

Como se ha mencionado en las bases teóricas del sistema de Vacío con membrana, se realiza el cálculo de los asentamientos en cada etapa constructiva, provocados por la instalación del sistema de vacío al cien por ciento. Es decir, que se tienen instalados los drenes verticales (PVD's), los drenes horizontales, la membrana y se aplica el vacío.

Para esta sistema, es primordial considerar la influencia que tienen los drenes horizontales. Es por ello que se obtiene la consolidación radial del suelo.

Como se explicó en la parte teórica del presente trabajo, la consolidación radial se produce más rápido que la consolidación vertical. Para ello se colocan drenes verticales que permiten facilitar la salida de agua o liberar la presión de poro con mayor velocidad.

En cuestiones de diseño, el grado de consolidación, no solo dependerá del grado de consolidación vertical ($U_v\%$), sino que estará asociado, también, a un grado de consolidación radial ($U_r\%$).

El grado de consolidación radial se puede determinar con la expresión definida por Barrón (1942):

$$U_r = 1 - e^{\left(\frac{-8 Cr t}{D^2 F(n)}\right)} \quad (6.18)$$

Donde:

Cr = Coeficiente de consolidación radial ($Cr > C_v$)

$F(n)$ = Factor de drenaje radial

En el caso del Coeficiente de consolidación radial (Cr), el valor va a depender de las propiedades del suelo y va relacionado con el coeficiente de consolidación vertical (C_v). Normalmente se le da un valor proporcional de $2 < C_v < 4$.

Por otro lado, el factor de drenaje, tomando en cuenta el remoldeo, se puede estimar como (Nabor 1940):

$$F(n) = \frac{n^2}{n^2 - 1} \ln(n) - \frac{3n^2 - 1}{4n^2} + (R_s - 1) \ln\left(\frac{ds}{dm}\right) \quad (6.19)$$

Donde:

- $n = \frac{D}{d}$; D = diametro de influencia del drenaje (en funcion del arreglo de los drenes verticales) y d = diametro equivalente del Dren vertical.
- $R_s = \frac{K_h}{K_h'}$; K_h = permeabilidad natural horizontal y K_h' = permeabilidad remoldeada horizontal
- ds =Diametro de la zona remoldeada
- dm = Diametro equivalente del casing= diametro equivaente del dren

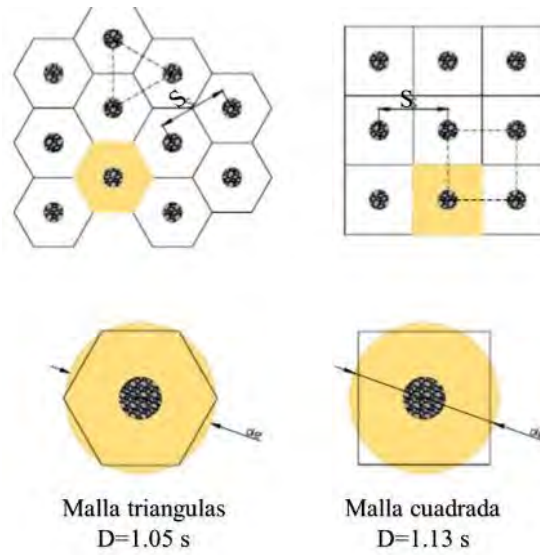


Figura 94.- “Diámetro de influencia de drenaje según el arreglo o malla de drenes verticales”.

En este caso, para conocer la influencia del dren vertical (PVD), se considerará un remoldeo nulo, es decir $R_s=1$ y $d_s=dm$. Y con base a la experiencia se propone el coeficiente de consolidación radial igual a $C_r=3 C_v$.

Una vez obtenido el valor del grado de consolidación radial y vertical, se realiza el cálculo de la consolidación total.

$$1 - U\% = (1 - U_v\%)(1 - U_r\%) \tag{6.20}$$

Donde:

- $U\%$ = Grado de consolidación total
- $U_v\%$ = Grado de consolidación vertical
- $U_r\%$ = Grado de consolidación radial

Cálculo de asentamientos y grado de consolidación ajustando el modelo geotécnico con base en el análisis del monitoreo y en las pruebas de laboratorio

Tabla 14.- "Cálculo de asentamientos por etapas debidos a la aplicación del vacío pero sin generar un remoldeo por instalación de arenos verticales".

ETAPA		CONSTRUCCIÓN				PERIODO		24/07/2017	-	07/09/2017							
ESTRATO	I	Δσ 1ª Etapa kPa	Δσ kg/cm2	DURACIÓN (Días)	TIEMPO ACUMULADO (Días)	t (Segundos)	Tv	Cv	Cr	Cc	Cs	Uv%	SMOAR EFFECT F(n)	Uz%	U _s %	ΔHp (m)	
1	1	12.50	0.125	45	45	3.89E+06	0.0065	0.0006	1.73E-03	0.9830	0.1060	0.090	2.24	0.160	0.236	0.008	
2	0.99	12.38	0.124	45	45	3.89E+06	0.0022	0.0017	5.18E-03	12.7600	1.0270	0.052	2.24	0.408	0.439	0.210	
3	0.96	12.00	0.120	45	45	3.89E+06	0.0073	0.0026	7.78E-03	7.6600	0.5400	0.096	2.24	0.544	0.588	0.162	
4	0.95	11.88	0.119	45	45	3.89E+06	0.0021	0.0030	9.07E-03	5.1200	0.5500	0.052	2.24	0.600	0.621	0.256	
5	0.84	10.50	0.105	45	45	3.89E+06	0.0026	0.0029	8.64E-03	4.3500	0.5400	0.058	2.24	0.582	0.607	0.000	
6	0.73	9.13	0.091	45	45	3.89E+06	0.0130	0.0026	7.78E-03	5.8400	0.4300	0.128	2.24	0.544	0.603	0.000	
δ acumulado																0.637	
ETAPA		1º MES DE VACÍO				PERIODO		08/09/2017	-	08/10/2017							
ESTRATO	I	Δσ 2ª ETAPA kPa	Δσ kg/cm2	DURACIÓN (Días)	TIEMPO ACUMULADO (Días)	t (Segundos)	Tv	Cv	Cr	Cc	Cs	Uv%	SMOAR EFFECT F(n)	Uz%	U _s %	ΔHp (m)	
1	1	77.50	0.775	30	75	6.48E+06	0.0135	7.20E-04	2.16E-03	0.9830	0.1060	0.130	2.24	0.305	0.396	0.109	
2	0.99	77.38	0.774	30	75	6.48E+06	0.0033	1.58E-03	4.75E-03	12.7600	1.0270	0.064	2.24	0.551	0.580	1.800	
3	0.96	77.00	0.770	30	75	6.48E+06	0.0128	2.74E-03	8.21E-03	7.6600	0.5400	0.127	2.24	0.749	0.781	0.859	
4	0.95	76.88	0.769	30	75	6.48E+06	0.0030	2.59E-03	7.78E-03	5.1200	0.5500	0.062	2.24	0.730	0.747	1.398	
5	0.84	75.50	0.755	30	75	6.48E+06	0.0066	4.32E-03	1.30E-02	4.3500	0.5400	0.091	2.24	0.887	0.898	0.692	
6	0.73	9.13	0.091	30	75	6.48E+06	0.0180	2.16E-03	6.48E-03	5.8400	0.4300	0.151	2.24	0.664	0.715	0.000	
δ acumulado																4.858	
ETAPA		2º MES DE VACÍO				PERIODO		08/10/2017	-	08/11/2017							
ESTRATO	I	Δσ 3ª ETAPA kPa	Δσ kg/cm2	DURACIÓN (Días)	TIEMPO ACUMULADO (Días)	t (Segundos)	Tv	Cv	Cr	Cc	Cs	Uv%	SMOAR EFFECT F(n)	Uz%	U _s %	ΔHp (m)	
1	1	72.50	0.725	31	106	9.16E+06	0.0191	7.20E-04	2.16E-03	0.9830	0.1060	0.155	2.24	0.402	0.495	0.131	
2	0.99	72.38	0.724	31	106	9.16E+06	0.0047	1.58E-03	4.75E-03	12.7600	1.0270	0.077	2.24	0.677	0.702	2.085	
3	0.96	72.00	0.720	31	106	9.16E+06	0.0181	2.74E-03	8.21E-03	7.6600	0.5400	0.151	2.24	0.858	0.880	0.929	
4	0.95	71.88	0.719	31	106	9.16E+06	0.0043	2.59E-03	7.78E-03	5.1200	0.5500	0.074	2.24	0.843	0.855	1.529	
5	0.84	70.50	0.705	31	106	9.16E+06	0.0093	4.32E-03	1.30E-02	4.3500	0.5400	0.109	2.24	0.954	0.959	0.688	
6	0.73	9.13	0.091	31	106	9.16E+06	0.0254	2.16E-03	6.48E-03	5.8400	0.4300	0.179	2.24	0.786	0.824	0.000	
δ acumulado																5.361	
ETAPA		3º MES DE VACÍO Y RELLENO				PERIODO		08/11/2017	-	08/12/2017							
ESTRATO	I	Δσ 4ª ETAPA kPa	Δσ kg/cm2	DURACIÓN (Días)	TIEMPO ACUMULADO (Días)	t (Segundos)	Tv	Cv	Cr	Cc	Cs	Uv%	SMOAR EFFECT F(n)	Uz%	U _s %	ΔHp (m)	
1	1	85.00	0.850	30	136	1.18E+07	0.0245	7.20E-04	2.16E-03	0.9830	0.1060	0.176	2.24	0.483	0.574	0.167	
2	0.99	84.75	0.848	30	136	1.18E+07	0.0060	1.58E-03	4.75E-03	12.7600	1.0270	0.087	2.24	0.766	0.786	2.590	
3	0.96	84.00	0.840	30	136	1.18E+07	0.0233	2.74E-03	8.21E-03	7.6600	0.5400	0.171	2.24	0.919	0.932	1.079	
4	0.95	83.75	0.838	30	136	1.18E+07	0.0055	2.59E-03	7.78E-03	5.1200	0.5500	0.083	2.24	0.907	0.915	1.811	
5	0.84	81.00	0.810	30	136	1.18E+07	0.0120	4.32E-03	1.30E-02	4.3500	0.5400	0.123	2.24	0.981	0.983	0.813	
6	0.73	18.25	0.183	30	136	1.18E+07	0.0326	2.16E-03	6.48E-03	5.8400	0.4300	0.203	2.24	0.862	0.890	0.000	
δ acumulado																6.461	
ETAPA		6º MES DE VACÍO				PERIODO		08/12/2017	-	08/03/2018							
ESTRATO	I	Δσ 5ª ETAPA kPa	Δσ kg/cm2	DURACIÓN (Días)	TIEMPO ACUMULADO (Días)	t (Segundos)	Tv	Cv	Cr	Cc	Cs	Uv%	SMOAR EFFECT F(n)	Uz%	U _s %	ΔHp (m)	
1	1	80.00	0.800	90	226	1.95E+07	0.0407	7.20E-04	2.16E-03	0.9830	0.1060	0.226	2.24	0.666	0.742	0.208	
2	0.99	79.75	0.798	90	226	1.95E+07	0.0099	1.58E-03	4.75E-03	12.7600	1.0270	0.112	2.24	0.910	0.920	2.915	
3	0.96	79.00	0.790	90	226	1.95E+07	0.0386	2.74E-03	8.21E-03	7.6600	0.5400	0.221	2.24	0.984	0.988	1.103	
4	0.95	78.75	0.788	90	226	1.95E+07	0.0092	2.59E-03	7.78E-03	5.1200	0.5500	0.107	2.24	0.981	0.983	1.869	
5	0.84	76.00	0.760	90	226	1.95E+07	0.0199	4.32E-03	1.30E-02	4.3500	0.5400	0.158	2.24	0.999	0.999	0.775	
6	0.73	18.25	0.183	90	226	1.95E+07	0.0542	2.16E-03	6.48E-03	5.8400	0.4300	0.261	2.24	0.963	0.972	0.000	
δ acumulado																6.870	

Cálculo de asentamientos y grado de consolidación ajustando el modelo geotécnico con base en el análisis del monitoreo y en las pruebas de laboratorio

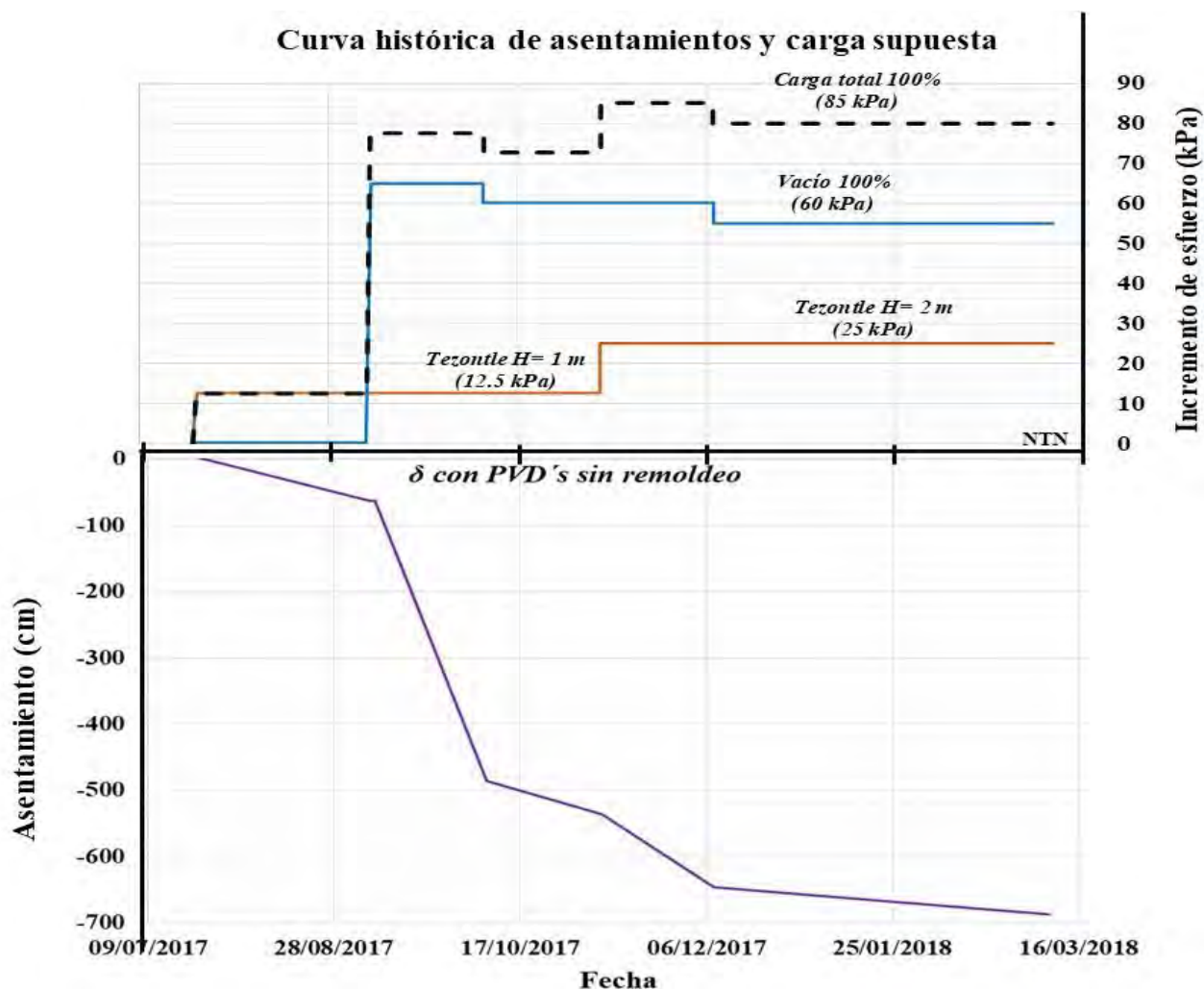


Figura 95.- “Asentamientos calculados en cada etapa constructiva de acuerdo a la aplicación del vacío per sin tener un remoldeo de la arcilla al instalar los drenes verticales (PVD’s)”. (Condiciones de prueba y propiedades del suelo optimas)

6.3.3. Asentamiento estimado considerando la aplicación del vacío y la afectación por el remoldeo al instalar los drenes verticales (PVD’s)

Una vez visualizado la influencia que tiene la colocación de drenes verticales, se realiza el cálculo estimado del asentamiento considerando todos los factores, entre ellos el remoldeo. Así mismo se siguen utilizando las cargas aplicadas en cada etapa de acuerdo a lo que se estimó antes de iniciar el tratamiento en la plataforma con base a la experiencia.

El método de cálculo es el mismo que se realizó en el punto anterior (6.3.2), pero asignando en la ecuación (6.19) los valores correspondientes a la influencia del remoldeo que se genera durante la instalación de los Drenes Verticales (PVD’s).

Para $R_s = \frac{K_h}{K_h'}$ con base a la literatura (Carrillo 1942) la permeabilidad remoldeada de una arcilla orgánica de alta plasticidad, disminuye hasta seis veces su permeabilidad inicial. Es por ello que el valor de $R_s = 6$.

Cálculo de asentamientos y grado de consolidación ajustando el modelo geotécnico con base en el análisis del monitoreo y en las pruebas de laboratorio

Para el diámetro de la zona remodelada (ds) se considera el diámetro de la huella formada después del hincado del PVD, el cual en arcillas orgánicas de alta plasticidad es de 40 cm.

En el caso del diámetro de influencia del Casing (dm), se considera igual al diámetro de influencia del dren vertical (PVD); $dm=d$.

Se continua utilizando el valor de $Cr= 3 Cv$ ya que al igual que las cargas, es un valor estimado con base a la experiencia. Lo cual inicialmente nos permiten tener un estimado del asentamiento.

Tabla 15.- “Cálculo de asentamientos considerando la aplicación del vacío y el remoldeo provocado por el hincado de Drenes Verticales (PVD’s) de acuerdo a la aplicación de una serie de cargas estimadas antes del inicio del sistema”.

ETAPA	1	CONSTRUCCIÓN				PERIODO	24/07/2017	-	07/09/2017										
ESTRATO		$\Delta\sigma$ 1° ETAPA	$\Delta\sigma$	DURACIÓN	TIEMPO ACUMULADO	t	T_v	C_v	C_r	C_c	C_s	$U_v\%$	SMEAR EFFECT F(n)	$U_r\%$	$U_s\%$	ΔH_p			
		kPa	kg/cm ²	(Días)	(Días)	(Segundos)										(m)			
1	1	12.50	0.125	45	45	3.89E+06	0.0065	0.0006	1.73E-03	0.9830	0.1060	0.090	11.68	0.033	0.120	0.004			
2	0.99	12.38	0.124	45	45	3.89E+06	0.0022	0.0017	5.18E-03	12.7600	1.0270	0.052	11.68	0.096	0.143	0.068			
3	0.96	12.00	0.120	45	45	3.89E+06	0.0073	0.0026	7.78E-03	7.6600	0.5400	0.096	11.68	0.140	0.223	0.061			
4	0.95	11.88	0.119	45	45	3.89E+06	0.0021	0.0030	9.07E-03	5.1200	0.5500	0.052	11.68	0.162	0.205	0.085			
5	0.84	10.50	0.105	45	45	3.89E+06	0.0026	0.0029	8.64E-03	4.3500	0.5400	0.058	11.68	0.154	0.203	0.000			
6	0.73	9.13	0.091	45	45	3.89E+06	0.0130	0.0026	7.78E-03	5.8400	0.4300	0.128	11.68	0.140	0.250	0.000			
δ acumulado																0.219			

ETAPA	2	1° MES DE VACÍO				PERIODO	08/09/2017	-	08/10/2017										
ESTRATO		$\Delta\sigma$ 2° ETAPA	$\Delta\sigma$	DURACIÓN	TIEMPO ACUMULADO	t	T_v	C_v	C_r	C_c	C_s	$U_v\%$	SMEAR EFFECT F(n)	$U_r\%$	$U_s\%$	ΔH_p			
		kPa	kg/cm ²	(Días)	(Días)	(Segundos)										(m)			
1	1	77.50	0.775	30	75	6.48E+06	0.0135	7.20E-04	2.16E-03	0.9830	0.1060	0.130	11.68	0.068	0.189	0.052			
2	0.99	77.38	0.774	30	75	6.48E+06	0.0033	1.58E-03	4.75E-03	12.7600	1.0270	0.064	11.68	0.143	0.198	0.614			
3	0.96	77.00	0.770	30	75	6.48E+06	0.0128	2.74E-03	8.21E-03	7.6600	0.5400	0.127	11.68	0.233	0.331	0.364			
4	0.95	76.88	0.769	30	75	6.48E+06	0.0030	2.59E-03	7.78E-03	5.1200	0.5500	0.062	11.68	0.222	0.271	0.506			
5	0.84	75.50	0.755	30	75	6.48E+06	0.0066	4.32E-03	1.90E-02	4.3500	0.5400	0.091	11.68	0.343	0.403	0.310			
6	0.73	9.13	0.091	30	75	6.48E+06	0.0180	2.16E-03	6.48E-03	5.8400	0.4300	0.151	11.68	0.189	0.311	0.000			
δ acumulado																1.847			

ETAPA	3	2° MES DE VACÍO				PERIODO	08/10/2017	-	08/11/2017										
ESTRATO		$\Delta\sigma$ 3° ETAPA	$\Delta\sigma$	DURACIÓN	TIEMPO ACUMULADO	t	T_v	C_v	C_r	C_c	C_s	$U_v\%$	SMEAR EFFECT F(n)	$U_r\%$	$U_s\%$	ΔH_p			
		kPa	kg/cm ²	(Días)	(Días)	(Segundos)										(m)			
1	1	72.50	0.725	31	106	9.16E+06	0.0191	7.20E-04	2.16E-03	0.9830	0.1060	0.155	11.68	0.094	0.235	0.062			
2	0.99	72.38	0.724	31	106	9.16E+06	0.0047	1.58E-03	4.75E-03	12.7600	1.0270	0.077	11.68	0.195	0.257	0.763			
3	0.96	72.00	0.720	31	106	9.16E+06	0.0181	2.74E-03	8.21E-03	7.6600	0.5400	0.151	11.68	0.313	0.417	0.440			
4	0.95	71.88	0.719	31	106	9.16E+06	0.0043	2.59E-03	7.78E-03	5.1200	0.5500	0.074	11.68	0.299	0.351	0.626			
5	0.84	70.50	0.705	31	106	9.16E+06	0.0093	4.32E-03	1.90E-02	4.3500	0.5400	0.109	11.68	0.447	0.507	0.364			
6	0.73	9.13	0.091	31	106	9.16E+06	0.0254	2.16E-03	6.48E-03	5.8400	0.4300	0.179	11.68	0.256	0.390	0.000			
δ acumulado																2.257			

ETAPA	4	3° MES DE VACÍO Y RELLENO				PERIODO	08/11/2017	-	08/12/2017										
ESTRATO		$\Delta\sigma$ 4° ETAPA	$\Delta\sigma$	DURACIÓN	TIEMPO ACUMULADO	t	T_v	C_v	C_r	C_c	C_s	$U_v\%$	SMEAR EFFECT F(n)	$U_r\%$	$U_s\%$	ΔH_p			
		kPa	kg/cm ²	(Días)	(Días)	(Segundos)										(m)			
1	1	85.00	0.850	30	136	1.18E+07	0.0245	7.20E-04	2.16E-03	0.9830	0.1060	0.176	11.68	0.119	0.274	0.080			
2	0.99	84.75	0.848	30	136	1.18E+07	0.0060	1.58E-03	4.75E-03	12.7600	1.0270	0.087	11.68	0.243	0.309	1.018			
3	0.96	84.00	0.840	30	136	1.18E+07	0.0233	2.74E-03	8.21E-03	7.6600	0.5400	0.171	11.68	0.382	0.488	0.565			
4	0.95	83.75	0.838	30	136	1.18E+07	0.0055	2.59E-03	7.78E-03	5.1200	0.5500	0.083	11.68	0.366	0.419	0.830			
5	0.84	81.00	0.810	30	136	1.18E+07	0.0120	4.32E-03	1.90E-02	4.3500	0.5400	0.123	11.68	0.533	0.590	0.488			
6	0.73	18.25	0.183	30	136	1.18E+07	0.0326	2.16E-03	6.48E-03	5.8400	0.4300	0.203	11.68	0.316	0.455	0.000			
δ acumulado																2.981			

ETAPA	5	6° MES DE VACÍO				PERIODO	08/12/2017	-	08/03/2018										
ESTRATO		$\Delta\sigma$ 5° ETAPA	$\Delta\sigma$	DURACIÓN	TIEMPO ACUMULADO	t	T_v	C_v	C_r	C_c	C_s	$U_v\%$	SMEAR EFFECT F(n)	$U_r\%$	$U_s\%$	ΔH_p			
		kPa	kg/cm ²	(Días)	(Días)	(Segundos)										(m)			
1	1	80.00	0.800	90	226	1.95E+07	0.0407	7.20E-04	2.16E-03	0.9830	0.1060	0.226	11.68	0.190	0.373	0.105			
2	0.99	79.75	0.798	90	226	1.95E+07	0.0099	1.58E-03	4.75E-03	12.7600	1.0270	0.112	11.68	0.371	0.441	1.398			
3	0.96	79.00	0.790	90	226	1.95E+07	0.0386	2.74E-03	8.21E-03	7.6600	0.5400	0.221	11.68	0.551	0.650	0.726			
4	0.95	78.75	0.788	90	226	1.95E+07	0.0092	2.59E-03	7.78E-03	5.1200	0.5500	0.107	11.68	0.532	0.582	1.106			
5	0.84	76.00	0.760	90	226	1.95E+07	0.0199	4.32E-03	1.90E-02	4.3500	0.5400	0.158	11.68	0.717	0.762	0.591			
6	0.73	18.25	0.183	90	226	1.95E+07	0.0542	2.16E-03	6.48E-03	5.8400	0.4300	0.261	11.68	0.468	0.607	0.000			
δ acumulado																3.926			

Cálculo de asentamientos y grado de consolidación ajustando el modelo geotécnico con base en el análisis del monitoreo y en las pruebas de laboratorio

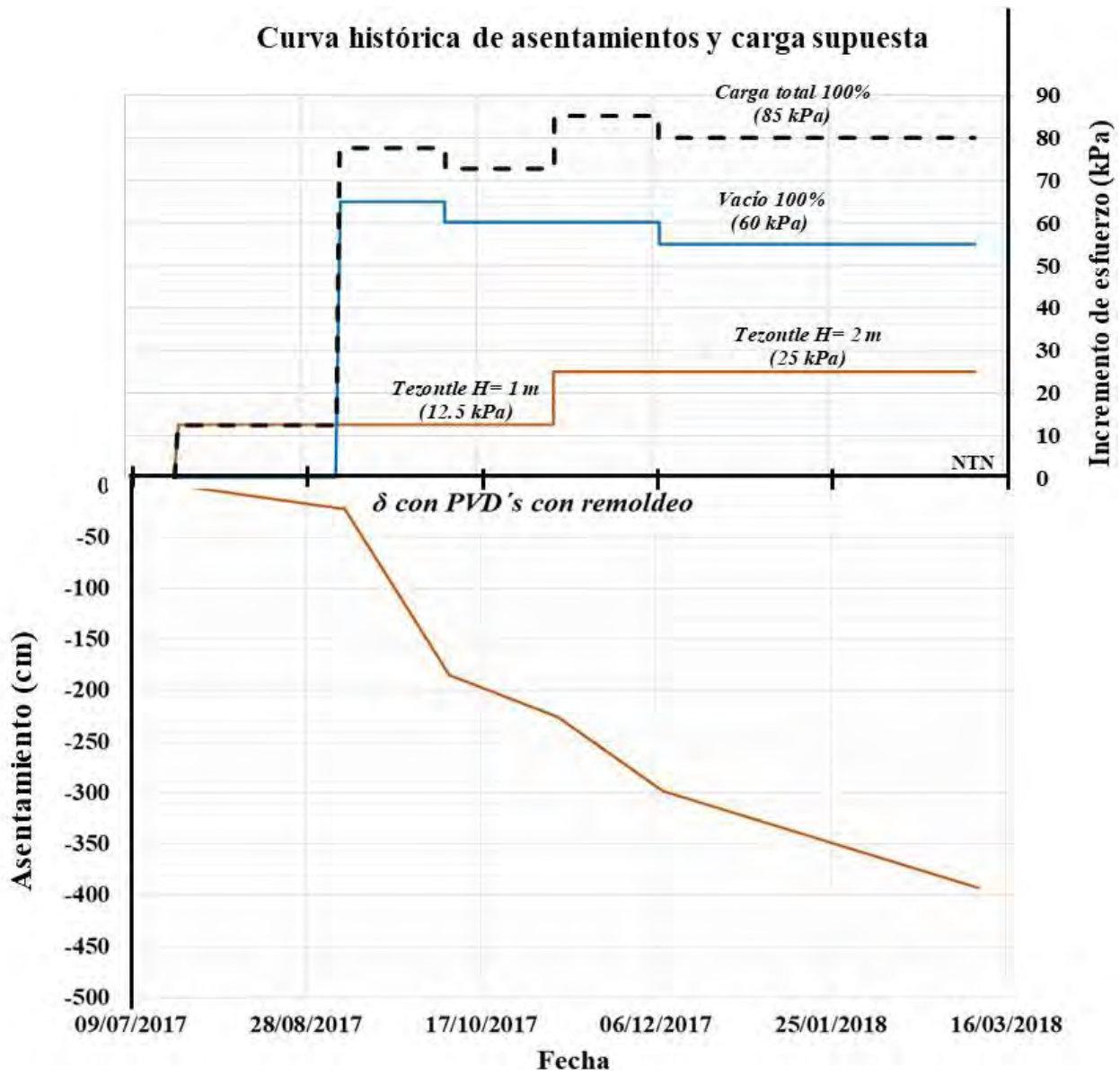


Figura 96.- “Asentamientos considerando la aplicación del vacío y el remoldeo provocado por el hincado de Drenes Verticales (PVD’s) de acuerdo a la aplicación de una serie de cargas estimadas antes del inicio del sistema”. (Condiciones de prueba y propiedades del suelo optimas)

De esta manera se tiene un asentamiento estimado con base a un modelo geotécnico hipotético el cual se tiene antes de dar inicio al sistema de vacío con membrana (Menard Vacuum).

El realizar el caculo variando la influencia de la colocación de los drenes verticales (PVD’s) nos permite conocer la aportación o afectación que estos tienen.

En la siguiente gráfica comparativa se puede observar que al colocar una precarga convencional sin drenes verticales (PVD’s), aun siendo un incremento de esfuerzos muy grande, debido a la baja permeabilidad vertical del suelo, la consolidación es más lenta. Determinando un asentamiento de 0.99 m en seis meses.

Cálculo de asentamientos y grado de consolidación ajustando el modelo geotécnico con base en el análisis del monitoreo y en las pruebas de laboratorio

Por otro lado, al considerar la consolidación radial y la aportación de los Drenes Verticales (PVD's) que permiten disminuir la distancia de drenaje, la velocidad de consolidación total es mucho mayor. Sin considerar el cambio de permeabilidades al remodelar la arcilla durante el hincado de los Drenes Verticales (PVD's), se produce un asentamiento de hasta 6.8 m en seis meses.

Sin embargo, es importante considerar los factores que conlleva realizar la técnica. Para tener una hipótesis o estimado del asentamiento lo más real posible a lo que se puede presentar, se debe considerar la consolidación vertical y la radial, la aportación de la carga de vacío y el remoldeo que se genera en la arcilla al hincar los drenes verticales (PVD's). Es por ello que antes de iniciar el sistema de vacío con membrana (Menard Vacuum) se calculó un asentamiento de hasta 3.92 m en seis meses de operación.

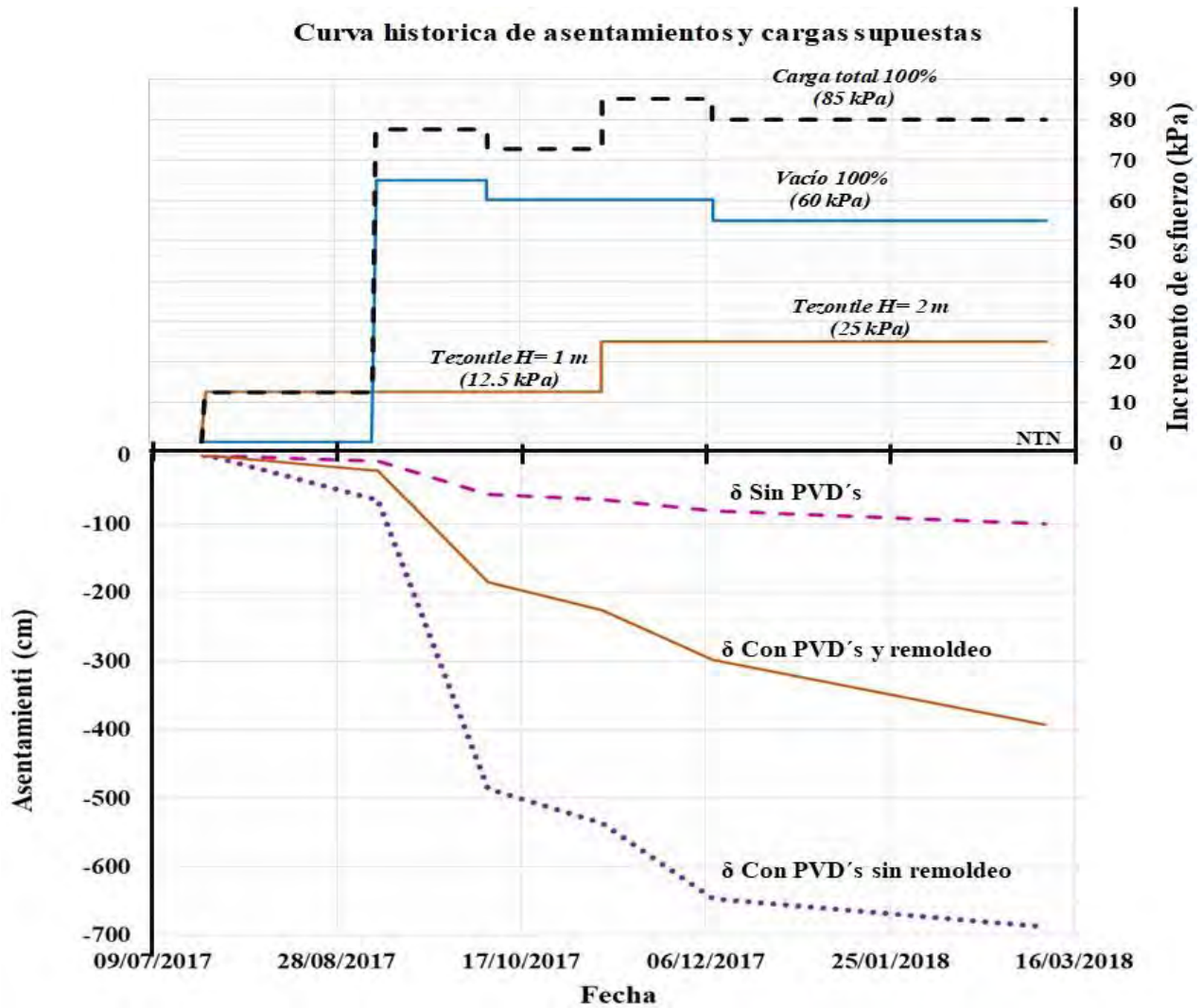


Figura 97.- “Comparación de asentamientos calculados, variando la influencia de la colocación de drenes verticales (PVD's)”

Cálculo de asentamientos y grado de consolidación ajustando el modelo geotécnico con base en el análisis del monitoreo y en las pruebas de laboratorio

6.4. AJUSTE DEL MODELO GEOTÉCNICO CON BASE A LOS RESULTADOS DE LA INSTRUMENTACIÓN

Una vez iniciado el mejoramiento por medio de la aceleración de la consolidación por vacío con membrana (Menard Vacuum) se monitorean los asentamientos diariamente y con base a estos asentamientos reales se ajusta el modelo de cálculo con el fin de obtener un modelo geotécnico particular de este suelo.

Para que el cálculo concuerde con los desplazamientos reales en cada etapa, se modifica el la relación entre el coeficiente de consolidación radial respecto al coeficiente de consolidación vertical ($C_r = n C_v$). Dicha relación se consideró anteriormente con base a la experiencia en proyectos realizados en otras partes del mundo, pero las propiedades de cada suelo son diferentes. Es por ello que se itera el valor de n para coincidir el cálculo estimado antes del vacío con el comportamiento real.

También, se sustituyen las cargas estimadas antes del inicio del sistema por las cargas de vacío reales (Monitoreadas en los vacuómetros). De la misma manera se ajusta la carga real del terraplén la cual se obtiene por medio de calas volumétricas en sitio.

Tabla 16.- “Cargas reales aplicadas por el vacío y el terraplén de Tezontle”.

CARGAS					
Tezontle	H (m)	γ (kN/m ³)			
Plataforma de trabajo	1	13.7			
Relleno de compensación	1	13.2			
VACÍO kPa	ETAPA 1	ETAPA 2	ETAPA 3	ETAPA 4	ETAPA 5
	0	70	65	63	61

Así mismo, es importante considerar que debido al asentamiento provocado, el terraplén de tezontle disminuye su nivel. Conociendo el Nivel de Aguas Freáticas (NAF) el cual se encuentre muy somero (0.80 m bajo el NTN) se produce una sumersión, la cual provoca que la carga del terraplén sea tomada por el agua y se ejerza una carga menor al suelo progresivamente.

Para ello se determina la cantidad del material sumergido con base a los asentamientos presentados y monitoreados con las placas de asentamiento.

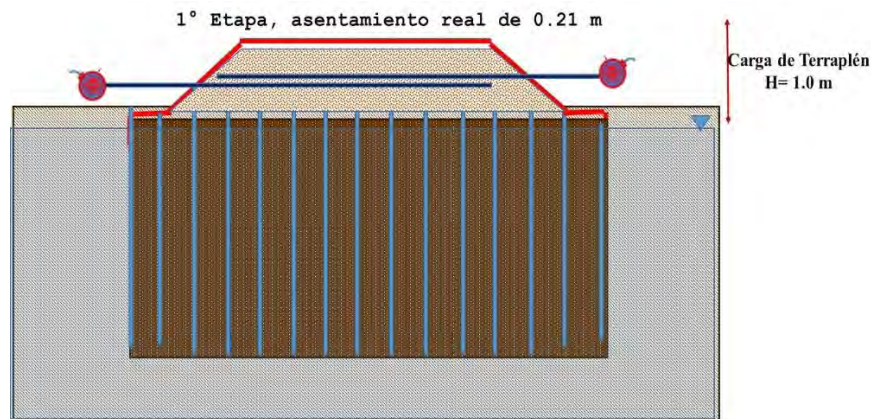


Figura 98.- “Sumersión del terraplén de tezontle durante la primera etapa constructiva del panel de prueba de vacío (Menard Vacuum)”.

Cálculo de asentamientos y grado de consolidación ajustando el modelo geotécnico con base en el análisis del monitoreo y en las pruebas de laboratorio



Figura 99.- “Sumersión del terraplén de tezontle durante la segunda etapa constructiva del panel de prueba de vacío (Menard Vacuum)”.

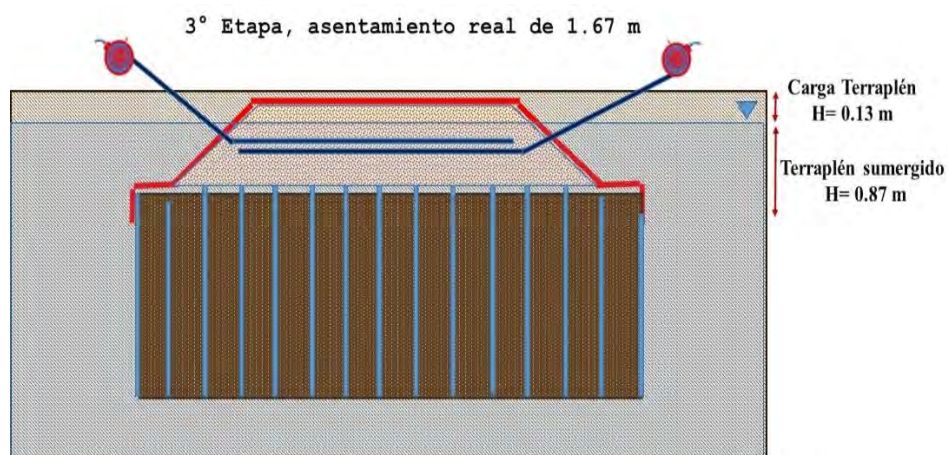


Figura 100.- “Sumersión del terraplén de tezontle durante la tercera etapa constructiva del panel de prueba de vacío (Menard Vacuum)”.

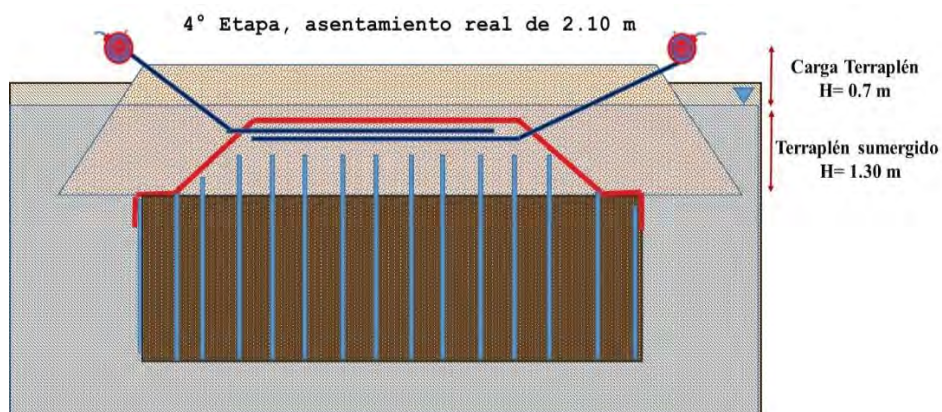


Figura 101.- “Sumersión del terraplén de tezontle durante la cuarta etapa constructiva del panel de prueba de vacío (Menard Vacuum)”.

Cálculo de asentamientos y grado de consolidación ajustando el modelo geotécnico con base en el análisis del monitoreo y en las pruebas de laboratorio

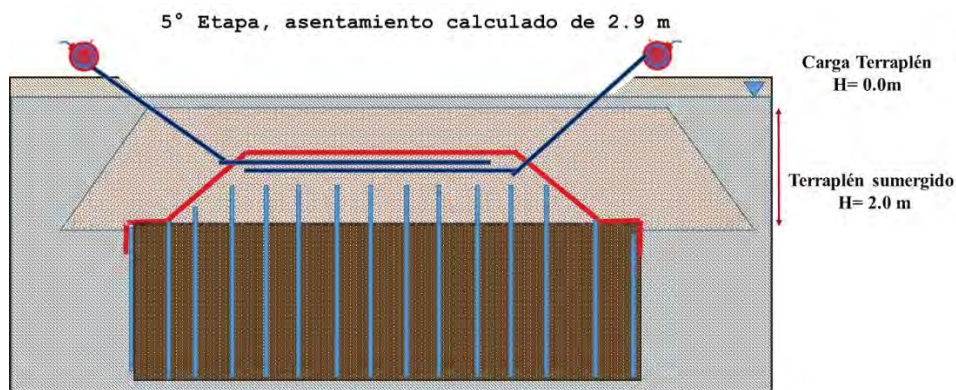


Figura 102.- “Sumersión del terraplén de tezontle al final de prueba de vacío (Menard Vacuum)”.

Finalmente se realiza el cálculo con todas las consideraciones influyentes, de tal forma que el asentamiento en cada etapa ajuste con el asentamiento real.

Una vez realizada la iteración para la obtención del Coeficiente de Consolidación Radial característico del suelo y tomado en cuenta la sumersión del terraplén de tezontle, adicionalmente a todos los parámetros mencionados con anterioridad; se presenta el modelo geotécnico real.

Tabla 17.- “Parámetros de Drenaje y características del Dren Vertical (PVD)”.

FACTORES DE DRENAJE		
Cr=	2.4	Veces elCv
Arreglo de PVDs=	1.05	
Triangular	1.05	
Rectangular	1.13	
(s) Malla=	1.2	m
Salidas de drenaje (1 o 2)	1	
(d) D eq. del Dren=	0.06	m
(D) Diametro influencia	1.26	m
(n) D/d	20	
RS	6	
ds/dm	6.6	

Tabla 18.- “Características geotécnicas y propiedades reales del suelo”.

Características geotécnicas y propiedades del suelo																
Estrato	PROFUNDIDAD		H (m)	γ (kN/m ³)	σ_t (kPa)	U (kPa)	σ'_o (kPa)	σ'_c (kPa)	OCR	e ₀	Cv 1° Etapa (m ² /día)	Cv Etapas(2,3,4,5) (m ² /día)	Cr 1° Etapa (m ² /día)	Cr Etapas(2,3,4,5) (m ² /día)	Cc	Cs
	De (m)	A (m)														
1	0	-2	2	13.66	27.32	12.00	15.32	24.56	1.6	3.28	5.76E-04	7.20E-04	1.38E-03	1.73E-03	0.983	0.106
2	-2	-8	6	12.66	103.28	72.00	31.28	37.53	1.2	10.54	1.73E-03	1.58E-03	4.15E-03	3.80E-03	12.76	1.027
3	-8	-12	4	11.2	148.08	112.00	36.08	36.08	1.0	12.84	2.59E-03	2.74E-03	6.22E-03	6.57E-03	7.668	0.540
4	-12	-20	8	12.16	245.36	192.00	53.36	53.68	1.0	7.43	3.02E-03	2.59E-03	7.26E-03	6.22E-03	5.12	0.552
5	-20	-27	7	12.17	330.55	262.00	68.55	89.53	1.3	7.74	2.88E-03	4.32E-03	6.91E-03	1.04E-02	4.35	0.549
6	-27	-30	3	12	366.55	292.00	74.55	97.33	1.3	8.45	2.59E-03	2.16E-03	6.22E-03	5.18E-03	5.84	0.437

Con base al modelo geotécnico se realiza el cálculo de asentamientos por cada etapa constructiva y se hace a comparación entre el asentamiento real, el asentamiento estimado antes del inicio del sistema de vacío con membrana y el asentamiento calculado ajustando el modelo con base a los resultados de la instrumentación.

Cálculo de asentamientos y grado de consolidación ajustando el modelo geotécnico con base en el análisis del monitoreo y en las pruebas de laboratorio

Tabla 19.- “Cálculo de asentamientos considerando la aplicación del vacío y el remoldeo provocado por el hincado de Drenes Verticales (PVD's) de acuerdo al ajuste del modelo de cálculo con base a los resultados de la instrumentación y el comportamiento real del suelo siendo sometido a una serie de cargas medidas durante el tratamiento”.

ETAPA	1	CONSTRUCCIÓN					PERIODO	24/07/2017	-	07/09/2017							
ESTRATO	I	$\Delta\sigma$ 1° ETAPA kPa	$\Delta\sigma$ kg/cm2	DURACIÓN (Días)	TOEMPO ACUMULADO (Días)	t (Segundos)	T_v	C_v	C_r	C_c	C_s	$U_v\%$	SMEAR EFFECT F(n)	$U_r\%$	$U\%$	ΔH_p (m)	
1	1	13.70	0.137	45	45	3.89E+06	0.0065	5.76E-04	1.38E-03	0.9830	0.1060	0.090	11.68	0.026	0.114	0.005	
2	0.99	13.56	0.136	45	45	3.89E+06	0.0022	1.73E-03	4.15E-03	12.7600	1.0270	0.052	11.68	0.077	0.125	0.070	
3	0.96	13.15	0.132	45	45	3.89E+06	0.0073	2.59E-03	6.22E-03	7.6600	0.5400	0.096	11.68	0.114	0.199	0.059	
4	0.95	13.02	0.130	45	45	3.89E+06	0.0021	3.02E-03	7.26E-03	5.1200	0.5500	0.052	11.68	0.131	0.176	0.079	
5	0.84	11.51	0.115	45	45	3.89E+06	0.0026	2.88E-03	6.91E-03	4.3500	0.5400	0.058	11.68	0.126	0.176	0.000	
6	0.73	10.00	0.100	45	45	3.89E+06	0.0130	2.59E-03	6.22E-03	5.8400	0.4300	0.128	11.68	0.114	0.227	0.000	
δ acumulado																	
0.213																	
ETAPA	2	1° MES DE VACÍO					PERIODO	08/09/2017	-	08/10/2017							
ESTRATO	I	$\Delta\sigma$ 2° ETAPA kPa	$\Delta\sigma$ kg/cm2	DURACIÓN (Días)	TOEMPO ACUMULADO (Días)	t (Segundos)	T_v	C_v	C_r	C_c	C_s	$U_v\%$	SMEAR EFFECT F(n)	$U_r\%$	$U\%$	ΔH_p (m)	
1	1	79.59	0.796	30	75	6.48E+06	0.0135	7.20E-04	1.73E-03	0.9830	0.1060	0.130	11.68	0.054	0.178	0.050	
2	0.99	79.49	0.795	30	75	6.48E+06	0.0033	1.58E-03	3.80E-03	12.7600	1.0270	0.064	11.68	0.116	0.173	0.546	
3	0.96	79.21	0.792	30	75	6.48E+06	0.0128	2.74E-03	6.57E-03	7.6600	0.5400	0.127	11.68	0.191	0.294	0.329	
4	0.95	79.11	0.791	30	75	6.48E+06	0.0030	2.59E-03	6.22E-03	5.1200	0.5500	0.062	11.68	0.182	0.233	0.444	
5	0.84	78.06	0.781	30	75	6.48E+06	0.0066	4.32E-03	1.04E-02	4.3500	0.5400	0.091	11.68	0.285	0.350	0.279	
6	0.73	10.00	0.100	30	75	6.48E+06	0.0180	2.16E-03	5.18E-03	5.8400	0.4300	0.151	11.68	0.154	0.282	0.000	
δ acumulado																	
1.648																	
ETAPA	3	2° MES DE VACÍO					PERIODO	08/10/2017	-	08/11/2017							
ESTRATO	I	$\Delta\sigma$ 3° ETAPA kPa	$\Delta\sigma$ kg/cm2	DURACIÓN (Días)	TOEMPO ACUMULADO (Días)	t (Segundos)	T_v	C_v	C_r	C_c	C_s	$U_v\%$	SMEAR EFFECT F(n)	$U_r\%$	$U\%$	ΔH_p (m)	
1	1	66.37	0.664	31	106	9.16E+06	0.0191	7.20E-04	1.73E-03	0.9830	0.1060	0.155	11.68	0.076	0.219	0.055	
2	0.99	66.36	0.664	31	106	9.16E+06	0.0047	1.58E-03	3.80E-03	12.7600	1.0270	0.077	11.68	0.160	0.224	0.627	
3	0.96	66.32	0.663	31	106	9.16E+06	0.0181	2.74E-03	6.57E-03	7.6600	0.5400	0.151	11.68	0.259	0.371	0.373	
4	0.95	66.30	0.663	31	106	9.16E+06	0.0043	2.59E-03	6.22E-03	5.1200	0.5500	0.074	11.68	0.248	0.303	0.513	
5	0.84	66.15	0.662	31	106	9.16E+06	0.0093	4.32E-03	1.04E-02	4.3500	0.5400	0.109	11.68	0.378	0.445	0.298	
6	0.73	10.00	0.100	31	106	9.16E+06	0.0254	2.16E-03	5.18E-03	5.8400	0.4300	0.179	11.68	0.211	0.352	0.000	
δ acumulado																	
1.865																	
ETAPA	4	3° MES DE VACÍO Y RELLENO					PERIODO	08/11/2017	-	08/12/2017							
ESTRATO	I	$\Delta\sigma$ 4° ETAPA kPa	$\Delta\sigma$ kg/cm2	DURACIÓN (Días)	TOEMPO ACUMULADO (Días)	t (Segundos)	T_v	C_v	C_r	C_c	C_s	$U_v\%$	SMEAR EFFECT F(n)	$U_r\%$	$U\%$	ΔH_p (m)	
1	1	72.24	0.722	30	136	1.18E+07	0.0245	7.20E-04	1.73E-03	0.9830	0.1060	0.176	11.68	0.096	0.255	0.067	
2	0.99	72.15	0.721	30	136	1.18E+07	0.0060	1.58E-03	3.80E-03	12.7600	1.0270	0.087	11.68	0.200	0.269	0.798	
3	0.96	71.87	0.719	30	136	1.18E+07	0.0233	2.74E-03	6.57E-03	7.6600	0.5400	0.171	11.68	0.320	0.436	0.460	
4	0.95	71.78	0.718	30	136	1.18E+07	0.0055	2.59E-03	6.22E-03	5.1200	0.5500	0.083	11.68	0.306	0.364	0.650	
5	0.84	70.76	0.708	30	136	1.18E+07	0.0120	4.32E-03	1.04E-02	4.3500	0.5400	0.123	11.68	0.456	0.523	0.376	
6	0.73	19.64	0.196	30	136	1.18E+07	0.0326	2.16E-03	5.18E-03	5.8400	0.4300	0.203	11.68	0.262	0.412	0.000	
δ acumulado																	
2.352																	
ETAPA	5	6° MES DE VACÍO					PERIODO	08/12/2017	-	08/03/2018							
ESTRATO	I	$\Delta\sigma$ 5° ETAPA kPa	$\Delta\sigma$ kg/cm2	DURACIÓN (Días)	TOEMPO ACUMULADO (Días)	t (Segundos)	T_v	C_v	C_r	C_c	C_s	$U_v\%$	SMEAR EFFECT F(n)	$U_r\%$	$U\%$	ΔH_p (m)	
1	1	61.00	0.610	90	226	1.95E+07	0.0407	7.20E-04	1.73E-03	0.9830	0.1060	0.226	11.68	0.155	0.346	0.082	
2	0.99	61.00	0.610	90	226	1.95E+07	0.0099	1.58E-03	3.80E-03	12.7600	1.0270	0.112	11.68	0.310	0.387	1.020	
3	0.96	61.00	0.610	90	226	1.95E+07	0.0386	2.74E-03	6.57E-03	7.6600	0.5400	0.221	11.68	0.473	0.589	0.561	
4	0.95	61.00	0.610	90	226	1.95E+07	0.0092	2.59E-03	6.22E-03	5.1200	0.5500	0.107	11.68	0.455	0.513	0.820	
5	0.84	61.00	0.610	90	226	1.95E+07	0.0199	4.32E-03	1.04E-02	4.3500	0.5400	0.158	11.68	0.636	0.694	0.423	
6	0.73	19.64	0.196	90	226	1.95E+07	0.0542	2.16E-03	5.18E-03	5.8400	0.4300	0.261	11.68	0.397	0.554	0.000	
δ acumulado																	
2.906																	

Cálculo de asentamientos y grado de consolidación ajustando el modelo geotécnico con base en el análisis del monitoreo y en las pruebas de laboratorio

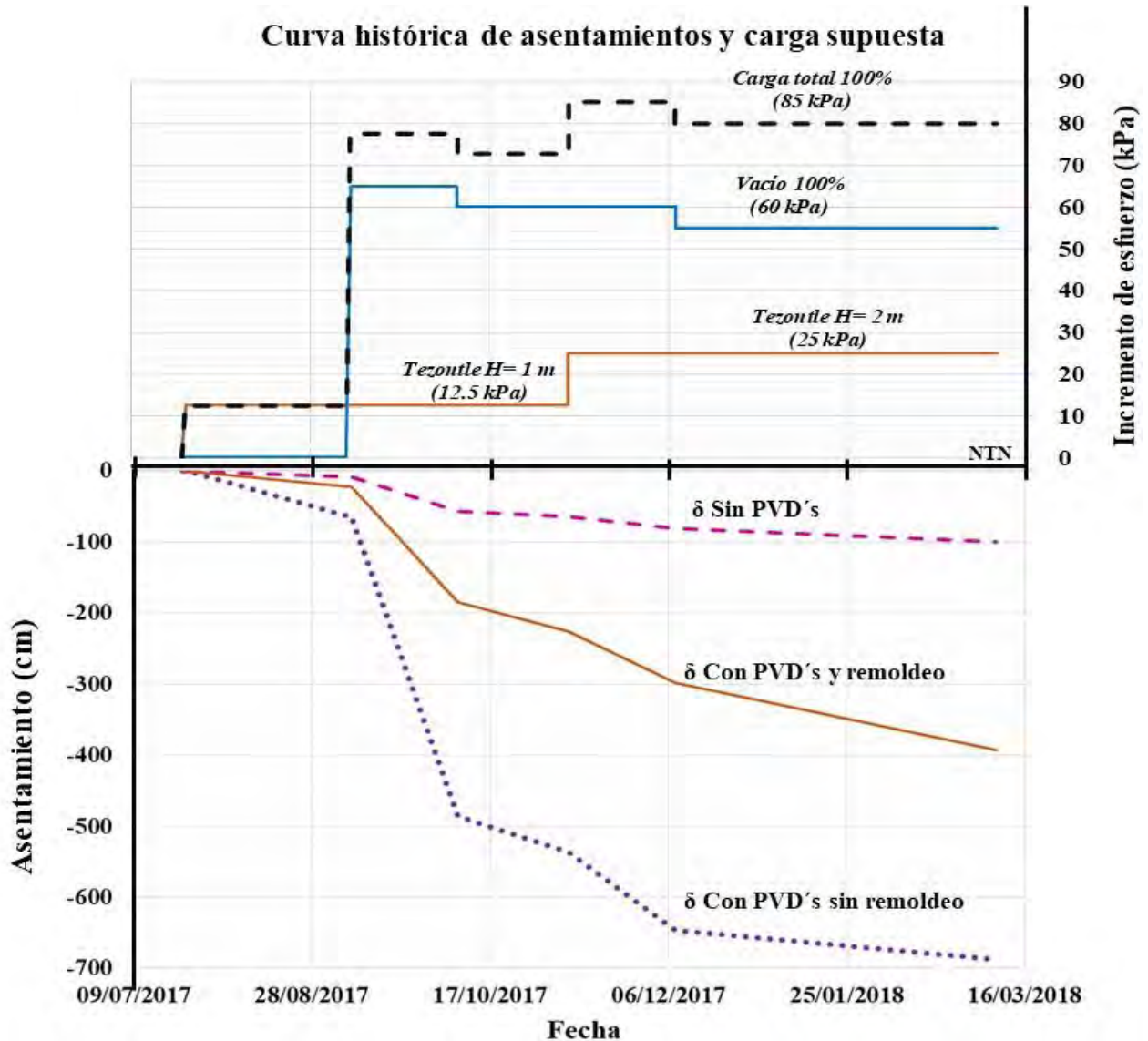


Figura 103.- “Comparación del asentamiento real, el asentamiento estimado antes del sistema y el asentamiento calculado con los parámetros reales. Todo esto con base a la aplicación de cargas reales medidas en el Panel”.

Es notable que el asentamiento real y el obtenido con base al ajuste del modelo de cálculo, son menores que el asentamiento estimado antes de iniciar el tratamiento. Esto es debido a los factores que no se tomaron en cuenta al inicio, como la sumersión y la relación adecuada entre la consolidación vertical y la consolidación radial.

Pero con la iteración que se realizó para ajustar la gráfica real con la calculada, nos permite tener un modelo geotécnico del suelo característico del Ex Lago de Texcoco al ser tratado por medio de una aceleración de la consolidación por vacío con membrana (Menard Vacuum).

Cálculo de asentamientos y grado de consolidación ajustando el modelo geotécnico con base en el análisis del monitoreo y en las pruebas de laboratorio

6.5. GRADO DE CONSOLIDACIÓN

El grado de consolidación, durante el mejoramiento de suelo, es un valor importante, el cual nos indica hasta qué punto se ha avanzado en el tratamiento.

El objetivo de aplicar una consolidación acelerada por vacío con membrana es lograr el grado de consolidación de una grande, la cual permita disminuir los asentamientos residuales al colocar la carga de servicio del proyecto.

Es decir, Con la aplicación de la técnica de consolidación acelerada por vacío con membrana se pueden aplicar cargas de consolidación realmente altas al terreno (proporcionales a la presión atmosférica del sitio) y con ello asegurar una capacidad portante alta en un menor tiempo.

6.5.1. OBTENCIÓN DEL GRADO DE CONSOLIDACIÓN A PARTIR DE LA INSTRUMENTACIÓN.

Uno de los objetivos de la instrumentación y el monitoreo de los parámetros geotécnicos es la definición de los tiempos de aplicación del sistema de vacío para asegurar que la precarga requerida ha sido aplicada. Esto se puede definir mediante la obtención del grado de consolidación del terreno.

A continuación, se muestra una estimación del grado de consolidación del terreno tras 3 meses de aplicación del vacío, por medio de la interpretación de la variación de las presiones registradas en los piezómetros eléctricos.

El criterio propuesto consiste en verificar la proporción de presión intersticial que se ha perdido a diferentes profundidades con respecto a un valor teórico máximo que se podría alcanzar y que equivaldría a la depresión o vacío aplicado por el sistema y relacionado con la carga máxima aplicada por el relleno y el vacío. Los valores de depresión aplicados se conocen a través de los vacuómetros instalados bajo la membrana, los pesos volumétricos de los materiales obtenidos de las calas hechas directamente en el terraplén de prueba y los espesores de relleno instalados nos definen la carga superficial, mientras que los registros piezométricos sirven para verificar la variación de la presión intersticial en el suelo. En las tablas y figuras que se muestran a continuación se observan los valores de presión intersticial registrados en cada bahía (zonas norte, centro y sur del panel), en diferentes profundidades y en diferentes etapas de la prueba, así como las variaciones de estas presiones entre las etapas.

En general se revisan 5 etapas:

1. Etapa inicial.- Los valores iniciales representan la primera lectura hecha tras la instalación de los piezómetros.

2. Colocación de la plataforma de trabajo final (PT).- Se instala la plataforma de trabajo de 0.5 a 1.0 m. Esta etapa produce aumento en las presiones intersticiales del suelo, debido al aumento de la carga superficial.

3. Vacío (las bombas prendidas).- Las presiones intersticiales comienzan a disminuir, como era de esperarse, al prender las bombas de vacío. La gráfica mostrada corresponde a las lecturas tomadas un mes después del encendido de las bombas.

4. Colocación del relleno de compensación (RC).- Las presiones intersticiales aumentan nuevamente debido a la aplicación de una nueva carga superficial (peso del relleno de compensación).

Cálculo de asentamientos y grado de consolidación ajustando el modelo geotécnico con base en el análisis del monitoreo y en las pruebas de laboratorio

5. Tres meses de vacío.- Las presiones intersticiales continúan disminuyendo debido a la acción ininterrumpida del vacío en toda la masa de suelo.

Tabla 20.- “Historial de la presión intersticial en cada estrato, de acuerdo a las etapas constructivas. Y grado de consolidación respecto a la disminución máxima de la presión intersticial provocada por el vacío. Bahía sur”.

BAHÍA - 01 SUR									
PzE-01	PROFUNDIDAD (m)	CARGA DE VACÍO	PRESIONES (kPa)						U%
			INICIAL	PT	VACÍO	RC	3 meses	ΔP	
A	2	60	11	15	9	16	14	-3	0.36
B	8	60	72	74	62	72	67	5	0.08
C	12	60	113	115	104	113	106	7	0.12
D	20	60	190	197	174	181	173	17	0.28
E	27	60	250	264	234	240	236	14	0.23
PROMEDIO									0.22

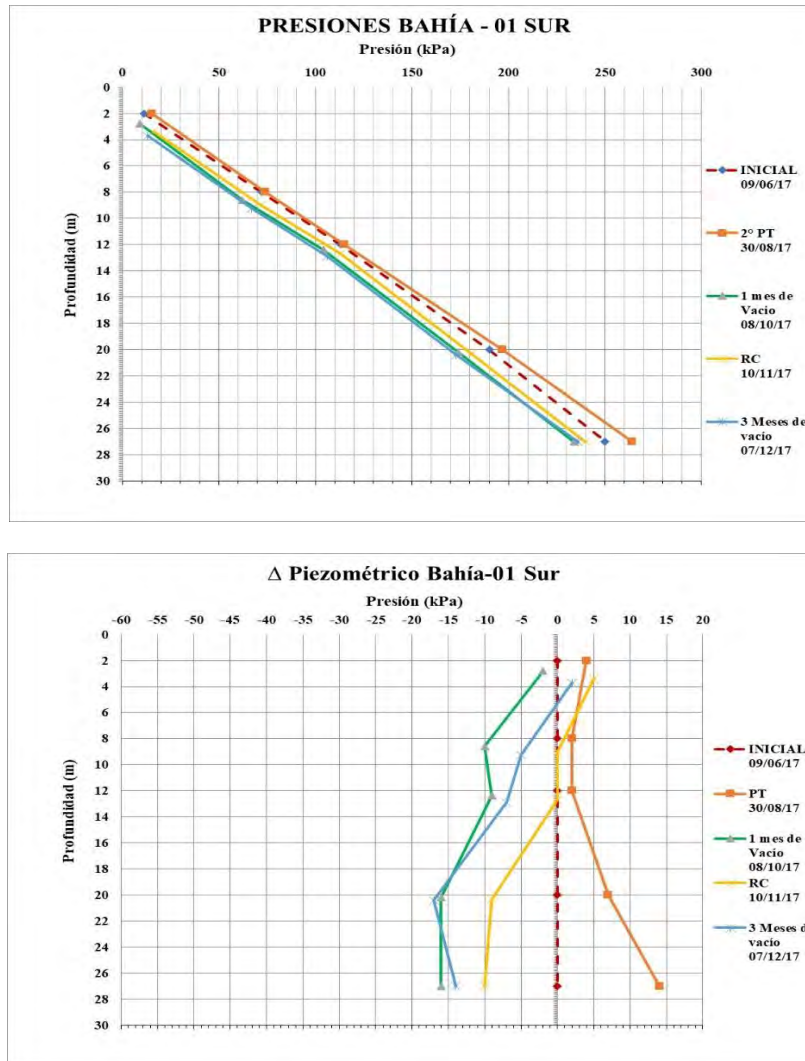


Figura 104.- “Variación de la presión intersticial en cada estrato, con base a cada etapa. Bahía Sur”.

Cálculo de asentamientos y grado de consolidación ajustando el modelo geotécnico con base en el análisis del monitoreo y en las pruebas de laboratorio

Tabla 21.- “Historial de la presión intersticial en cada estrato, de acuerdo a las etapas constructivas. Y grado de consolidación respecto a la disminución máxima de la presión intersticial provocada por el vacío. Bahía Central”.

BAHÍA - 02 CENTRAL									
PzE-01	PROFUNDIDAD (m)	CARGA DE VACÍO	PRESIONES (kPa)						U%
			INICIAL	PT	VACÍO	RC	3 meses	ΔP	
A	2	60	14	18	8	16	13	1	0.50
B	8	60	78	78	69	79	73	5	0.08
C	12	60	110	114	110	109	103	7	0.12
D	20	60	197	207	174	182	174	23	0.38
E	27	60	258	267	252	257	250	8	0.13
PROMEDIO									0.24

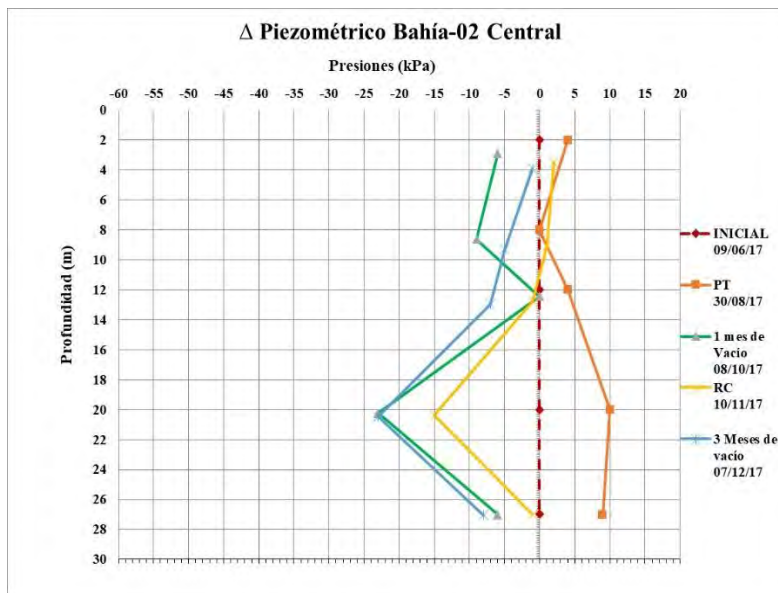
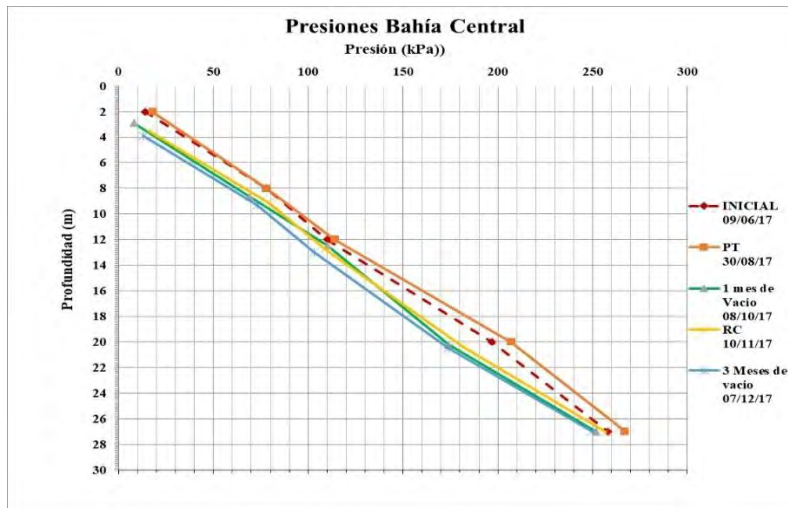


Figura 105.- “Variación de la presión intersticial en cada estrato, con base a cada etapa. Bahía Central”.

Cálculo de asentamientos y grado de consolidación ajustando el modelo geotécnico con base en el análisis del monitoreo y en las pruebas de laboratorio

Tabla 22.- “Historial de la presión intersticial en cada estrato, de acuerdo a las etapas constructivas. Y grado de consolidación respecto a la disminución máxima de la presión intersticial provocada por el vacío. Bahía Central”.

BAHÍA - 03 NORTE									
PzE-01	PROFUNDIDAD (m)	CARGA DE VACÍO	PRESIONES (kPa)						U%
			INICIAL	PT	VACÍO	RC	3 meses	ΔP	
A	2	60	11	11	-7	-1	-6	17	1.00
B	8	60	73	76	60	70	66	7	0.12
C	12	60	112	115	93	102	96	16	0.27
D	20	60	199	202	181	187	180	19	0.32
E	27	60	253	268	236	241	236	17	0.28
PROMEDIO									0.40

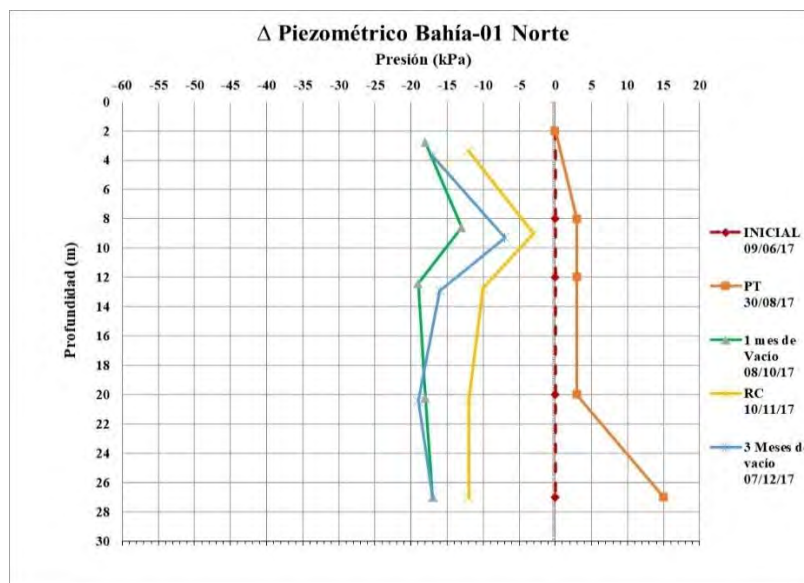
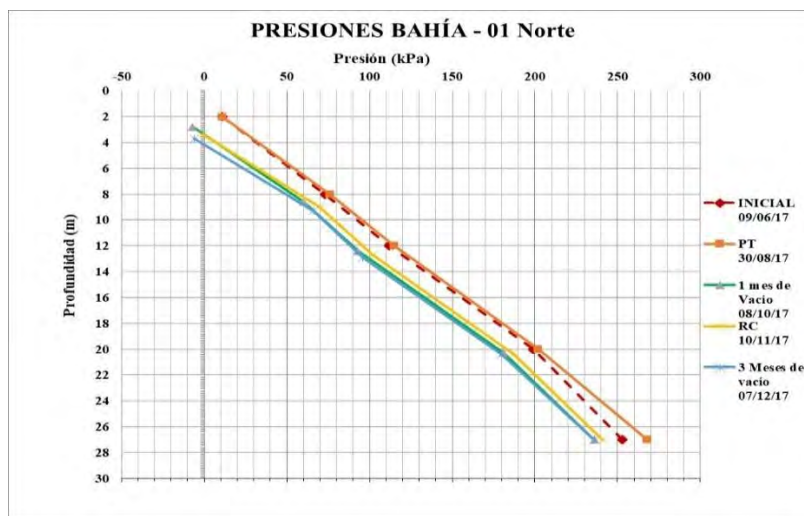


Figura 106.- “Variación de la presión intersticial en cada estrato, con base a cada etapa. Bahía Central”.

Cálculo de asentamientos y grado de consolidación ajustando el modelo geotécnico con base en el análisis del monitoreo y en las pruebas de laboratorio

De acuerdo a los valores obtenidos con la piezometría se conoce el grado de consolidación de los estratos seleccionados y clasificados de acuerdo a la exploración y la instrumentación geotécnica.

La variación de los valores depende de la permeabilidad del estrato y en este caso de la cercanía que existe entre el piezómetro eléctrico y el Dren Vertical. Es así como se obtienen promedios generales por cada Bahía para dar un valor de grado de consolidación mínimo de toda la zona tratada.

En las figuras siguientes se muestran los porcentajes de consolidación U(%) calculados con respecto a una depresión total potencial proveniente del vacío de 60 kPa

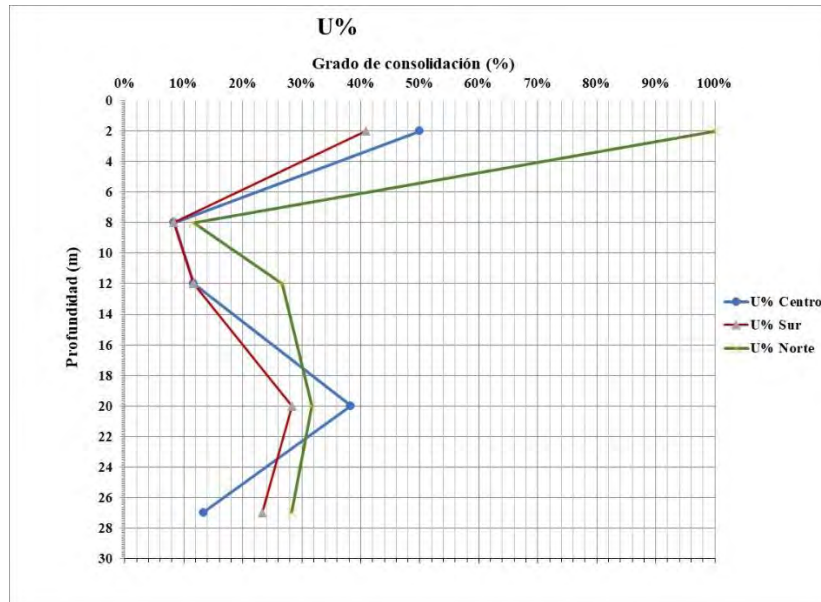


Figura 107.- “Grados de consolidación de cada Bahía, determinados con base a la variación de la presión intersticial registrada en los piezómetros eléctricos”.

Finalmente, como se hizo en el cuerpo principal de este documento, será importante correlacionar este porcentaje de consolidación obtenido con la carga asociada que se ha aplicado al sistema para realmente conocer la ganancia en capacidad del suelo. La carga aplicada total de vacío aplicada hasta los 3 meses es de 65 kPa promedio, y la carga superficial por los terraplenes correspondientes a la Plataforma de Trabajo y el relleno de compensación aproximada es de 13.7 kPa + 13.2 kPa = 26.9 kPa, que dan un total de $\sigma_t = 91.9$ kPa

Tabla 24.- “Cargas aplicadas y grado de consolidación determinado por medio de las presiones intersticiales y la precarga generada a los tres meses del Vacío”.

Tiempo	Carga de vacío aplicada promedio (kPa)	Carga de Relleno de compensación (kPa)	Carga total (kPa)	Asentamiento (m)	U % obtenido con piezometría	Precarga generada (kPa)
3 Meses	65	26.9	91.9	2.10	30	37

Cálculo de asentamientos y grado de consolidación ajustando el modelo geotécnico con base en el análisis del monitoreo y en las pruebas de laboratorio

El valor promedio del grado de consolidación obtenido a partir del monitoreo de los piezómetros eléctricos, puede compararse directamente con el grado de consolidación asociado al modelo de cálculo de asentamientos.

En dicho modelo, el grado de consolidación a los tres meses se obtuvo considerando la consolidación vertical y radial, con base a las propiedades geotécnicas del suelo. Obteniendo así:

Tabla 25.- “Grado de consolidación obtenido a partir del modelo de cálculo de asentamiento a los tres meses de aplicación del Vacío”.

U _v %	U _r %	U%
17.56	9.64	25.51
8.68	19.99	26.94
17.12	31.98	43.62
8.33	30.58	36.37
12.29	45.58	52.27
20.28	26.23	41.19
Promedio=		37.65

Tabla 26.- “Cargas aplicadas y grado de consolidación determinado por medio del modelo de cálculo ajustado”.

Tiempo	Carga de vacío aplicada promedio (kPa)	Carga de Relleno de compensación (kPa)	Carga total (kPa)	Asentamiento (m)	U % obtenido con el modelo de cálculo	Precarga generada (kPa)
3 Meses	65	26.9	91.9	2.10	37.65	35

Finalmente se pueden comparar ambos métodos de obtención del grado de consolidación. El valor obtenido por medio de la lectura de los piezómetros eléctricos y la disminución de la presión intersticial, es una referencia, ya que las variaciones que presenta dependen de la permeabilidad del estrato y la cercanía del sensor piezométrico al dren vertical.

Por otra parte, el valor obtenido a partir del modelo de cálculo, es más certero, ya que considera cada propiedad y parámetro del suelo. Su inconveniente es el tiempo que conlleva generar un modelo geotécnico característico del suelo tratado.

Sin embargo, no hay gran diferencia entre ambos valores y se pueden utilizar mutuamente para generar un rango, con el cual se estime la precarga generada gracias a la aportación del sistema de vacío con membrana (Menard Vacuum).

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES

7. CONCLUSIONES

El suelo arcilloso del Ex Lago de Texcoco, debido a su historia geológica, tiene propiedades muy singulares, las cuales provocan que el suelo reaccione de manera muy particular a cualquier cambio en su estado físico natural. Esto ha generado que especialistas de todo el mundo realicen campañas de exploración y análisis geotécnico para conocer las características de cada unidad estratigráfica y determinar su comportamiento en distintas circunstancias.

Ahora, debido a la ejecución del magno proyecto del Nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, el cual se encontrará en la zona federal del Ex Lago de Texcoco, la investigación y la realización de diversas pruebas en el sitio han incrementado constantemente, con el propósito de dar las mejores soluciones para el desarrollo de la infraestructura.

Es por ello que, al tratarse de un suelo arcilloso saturado, las opciones de mejoramiento de suelo por medio de la aceleración de la consolidación son las más consideradas, pero de acuerdo a cada etapa del proyecto y a cada zona destinada, se tiene que realizar el tratamiento adecuado.

Así que se realizó una prueba de la técnica de aceleración de la consolidación por vacío con membrana (Menard Vacuum), donde se instrumentó con el fin de conocer el comportamiento del suelo.

En el presente trabajo se muestran los resultados de los primeros tres meses de la aplicación del sistema de vacío con membrana (Menard Vacuum) en un panel de prueba para el NAICM. Lo cual permite interpretar con gran precisión la eficiencia del sistema. Con base al monitoreo de la instrumentación se puede conocer el comportamiento del suelo arcilloso del Ex Lago de Texcoco y concluir que:

El sistema de vacío con membrana (Menard Vacuum), utiliza la presión atmosférica de un sitio para precargar a un terreno impermeable con el fin de anticipar deformaciones superficiales de largo plazo activando su proceso de consolidación y preparando al terreno para resistir las cargas de servicio a las que se verá sujeto en la vida útil del proyecto.

La presión atmosférica de la Cuenca del Valle de México, a más de 2228 m de altura sobre el Nivel Medio del Mar, es de 78 kPa. Las presiones de vacío alcanzadas debajo de la membrana fueron de 70 kPa al inicio de la prueba (90 % de eficiencia del sistema y aplicable aún en condiciones atmosféricas bajas), y fueron disminuyendo un poco conforme aumentó el asentamiento, teniendo más de 60 kPa al finalizar los primeros tres meses de aplicación del vacío. Este fenómeno de disminución de la depresión en el sistema conforme avanza el asentamiento es un comportamiento normal, ya que las bombas pierden eficiencia conforme los drenes horizontales tienden a bajar, por lo que una re-nivelación de las bombas hacia abajo, tratando de tener la bomba a la altura de los drenes horizontales, ayuda a que la depresión aumente de nuevo si esta llega a bajar demasiado. Las depresiones presentadas debido a la aplicación del vacío son equivalentes a la carga ejercida por un terraplén de tezontle de 5 m de altura o proporcional a un terraplén de 3 m de basalto ($\gamma_{tezontle} = 13.5 \frac{kN}{m^3}$ y $\gamma_{basalto} = 20 \frac{kN}{m^3}$), solo que a diferencia de la distribución de esfuerzos bajo un terraplén, en el caso del vacío, la carga es aplicada de forma isotrópica.

Se realizaron ensayos de permeabilidad en sitio y en laboratorio con el fin de obtener las permeabilidades de los pequeños lentes arenosos que se intercalan en la FAS, encontrándose que éstas son pequeñas. Tras tres meses de aplicación del vacío, se ha verificado que la permeabilidad de estos lentes es tan baja que no influye en la generación de las presiones isotrópicas de vacío en la profundidad, por lo que el sistema de vacío con membrana es perfectamente aplicable y mantiene su eficiencia.

Es importante recalcar el hecho de que las presiones de vacío realmente aplicadas en el terreno deben ser medidas por debajo de la membrana impermeable, y no en la bomba de vacío

CONCLUSIONES

Otro punto importante es mencionar que la membrana sufrió de una fuga durante el proceso de instalación del relleno de compensación por encima de ella; sin embargo, la fuga se detectó fácilmente gracias al monitoreo de los vacuómetros que indicaban en tiempo real, cerca de la zona de la fuga, una pérdida de presión por vacío. Los monitoreos de las depresiones a través de los vacuómetros ayudan entonces a detectar eventuales fugas.

Aun cuando las fugas son fáciles de reparar agregando parches termofusionados en el punto donde se haya perforado, la protección de la membrana es esencial para el buen funcionamiento del sistema durante el tiempo de aplicación del vacío.

Toda la instrumentación permite dar una interpretación del comportamiento del suelo arcilloso del Ex Lago de Texcoco al ser tratado por un mejoramiento de suelo por el método de aceleración de la consolidación por vacío con membrana. Y es notable que el suelo responde inmediatamente a la aplicación del vacío y que el sistema funciona con base a las cuestiones teóricas.

La presión intersticial disminuye directamente sin afectar los esfuerzos totales, esto es notable con la disipación que presentan los piezómetros eléctricos tipo Push In. Los cuales muestran que la aplicación del vacío se transmite a toda la profundidad tratada. Así mismo ayudan a conocer el grado de consolidación en cualquier fase de tiempo durante el tratamiento con lo que se puede estimar la precarga generada.

Los asentamientos que se presentan son relativamente uniformes y el efecto de borde es mínimo a comparación del resto de las técnicas de mejoramiento por aceleración de la consolidación (Precargas, Bombeos, Pozos, etc.). La velocidad de asentamiento inicial es de hasta 5.5 cm al día, la cual con el tiempo disminuye debido al proceso de consolidación ya que se va reduciendo la relación de vacíos. El asentamiento en el suelo del Ex Lago de Texcoco es de hasta 2.10 m en tres meses con la técnica de Vacío con membrana (Menard Vacuum).

Así mismo los desplazamientos laterales se generan debido a la isotropía del sistema, ya que la masa de suelo tenderá a contraerse. Estos tienen una influencia de hasta una relación 1:1 con la profundidad de hincado de los drenes verticales (PVD's). Además el desplazamiento lateral se presenta en toda la profundidad tratada, no solo en la parte superficial como se presentaría en una precarga convencional o un sistema de bombeo.

La pared impermeable formada por la arcilla que rodea la fila perimetral exterior de drenes verticales (PVD's) y la parte inferior de estos y la membrana que aísla la zona a tratar del contacto con la atmósfera, permite aplicar directamente el vacío al suelo, extrayendo únicamente el agua del proceso de consolidación en la zona tratada y manteniendo estable el Nivel de Aguas Freáticas, es decir, no se provoca un abatimiento fuera de la zona.

Por otro lado, a través de las mediciones realizadas en campo durante los primeros 3 meses de aplicación del vacío, se pudieron correlacionar las propiedades mecánicas de los estratos de suelo y obtener un modelo geotécnico que representa el comportamiento del suelo durante el tratamiento. Así mismo se pudieron considerar factores que contribuyen al comportamiento de suelo, como son la sumersión del terraplén, la afectación por el remoldeo al momento de hincar los drenes verticales (PVD's) y la consolidación radial, la cual es la más contribuyente al proceso de consolidación. Con este modelo de cálculo, es posible predecir los asentamientos que vendrán al final de la prueba, los grados de consolidación alcanzados en la arcilla y las cargas de pre-consolidación que alcanzará el suelo. Estas cargas darán, al final de cuentas, la medida del mejoramiento que se tendrá del terreno con esta técnica.

CAPÍTULO 8

*Aportaciones y recomendaciones para
beneficio de la técnica y el proyecto del
NAICM*

8. APORTACIONES Y RECOMENDACIONES PARA BENEFICIO DE LA TECNICA Y EL PROYECTO DEL NAICM

Con base a los resultados de la prueba, es notable que el sistema de aceleración de la consolidación por vacío con membrana (Menard Vacuum), funciona correctamente y tiene una eficiencia la cual cumple con el mejoramiento deseado.

Es importante llevar un monitoreo constante para verificar la eficiencia del sistema y poder verificar el grado de consolidación que se va alcanzando para saber en qué momento el suelo será capaz de soportar la carga de servicio con asentamientos residuales limitados.

Así mismo es recomendable seguir considerando la protección de la membrana con capas de arena, ya que el material de relleno que se compone por granos angulosos y punzantes puede dañarla.

Para mantener la máxima eficiencia posible en el sistema durante la operación del mismo, y debido a que el asentamiento hace que el terraplén, la membrana y los drenes horizontales bajen de nivel topográfico, es recomendable re-nivelar las bombas de vacío de tal manera que queden el mayor tiempo posible a la altura de los drenes horizontales.

De acuerdo al modelo de cálculo es importante considerar la sumersión del terraplén de tezontle y la posible carga de agua que se encuentra sobre la membrana al sobre pasar por el asentamiento el NAF. Así mismo considerar que cada zona puede contar con propiedades geotécnicas distintas que ajusten al modelo de cálculo pero es importante contemplar la consolidación radial la cual se presenta en mayor magnitud que la consolidación vertical.

Al final de la prueba se recomienda realizar una campaña de exploración geotécnica para ver los mejoramientos que se generaron, así mismo realizar extracciones de muestras inalteradas a la misma profundidad que se extrajeron las muestras iniciales, con el fin de obtener pruebas de consolidación en laboratorio y conocer la nueva carga de preconsolidación. Con el fin de comparar los valores reales con los obtenidos por medio de la instrumentación (piezómetros) o por el modelo de cálculo.



Figura 108.- “Foto aérea del panel de prueba del método de aceleración de la consolidación por vacío con membrana (Menard Vacuum)” **Fuente: Menard México.**

Por otro lado, se planea realizar el mejoramiento de suelo de la zona perimetral de la terminal del Nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, lo cual conformará a las plataformas de rodaje. Pero para ello se recomienda realizar un mejoramiento por la técnica de aceleración de la consolidación por vacío con membrana (Menard Vacuum). Ya que el mejoramiento se debe realizar de la forma más rápida posible debido a los programas establecidos y a que se realizó, ya, el tratamiento de las pistas y se inició la construcción del edificio terminal.

El factor más importante a considerar es la problemática que puede causar el realizar un mejoramiento de aceleración de la consolidación, por medio de una técnica común (Precarga o bombeo), ya que es propenso a tener una falla por resistencia al corte en los taludes de la excavación adjunta de la cimentación de la terminal. Además de que no existe el espacio necesario para hacer el desarrollo de los taludes de terraplenes de precarga.

Para evitar este tipo de riesgos, tanto geotécnicos, sociales y económicos. Es recomendable aplicar el mejoramiento de suelos por aceleración de la consolidación por vacío con membrana (Menard Vacuum) en las plataformas de rodaje. Ya que además de su eficiencia al aplicar una precarga muy grande, el efecto del vacío y la carga isotrópica, permite contraer el suelo evitando tener problemas de falla de talud por sobrepasar la resistencia al esfuerzo cortante. Además es posible aplicarlo en áreas muy extensa dividiendo la zona en diversos paneles. Esto se ha desarrollado y mejorado con el paso del tiempo de experiencia de la empresa Menard ya que son los únicos calificados para ejecutar esta tecnología geotécnica.



Figura 110.- “Excavación de la losa de cimentación de la terminal del NAICM, precarga de las pistas y zona a tratar con técnica de vacío (perímetro de la terminal). **Fuente:** *Expansión, Diego Macía*”

CAPITULO 9

REFERENCIAS

9. **REFERENCIAS**

16. Alberro A., Jesús. “La Consolidación de los Suelos Visco — plásticos”. Un Análisis para Asentamientos Grandes. Publicación SID/650 del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México. México D.F., 2006.
17. Alexandra Ossa, César Lerma y Mario Flores. (Mayo 2017). “Propiedades resilientes de los suelos del ex-lago de Texcoco”. Mensaje público en <http://www.iingen.unam.mx/es-mx/Publicaciones/GacetaElectronica/GacetaMayo2017/Paginas/PropiedadesResilientesSuelos.aspx>
18. Braja M. Das. “Fundamentos de ingeniería geotécnica”. Cengage Learning Cuarta Edición. Febrero 2017.
19. Dirección General de Divulgación de la Ciencia, UNAM .(30 Mayo 2016). “Historia Hidrológica de la Cuenca de México”. Mensaje Publico en <http://www.fundacionunam.org.mx/ecopuma/la-unam-te-explica-la-historia-hidrologica-de-la-cuenca-de-mexico/>
20. Dr. Lorenzo Borselli Instituto de Geología. “Geotecnia I” Publicación de La Fac. De Ingeniería, UASLP. Año académico 2017-2018.
21. Grupo Aeroportuario de la Ciudad de México S.A. de C.V. (2012). “Nuevo Aeropuert de la Ciudad de México” [nota técnica]. Mensaje público en <http://www.aeropuerto.gob.mx/index.php>
22. Instituto de Ingeniería, UNAM Geotecnia. “Revisión y evaluación en geotecnia y estructuras para resolver la problemática del transporte aéreo del país” . Elaborado para (ASA). (Marzo 2014).
23. J. Chu and S. W. Yan. “Estimation of Degree of Consolidation for Vacuum Preloading Projects”. International Journal og Geomechanics. June 2005.
24. J.M. Cognon. “La consolidation atmosphérique (Vacuum consolidation)”. Revista. Francia, geotecnia N° 57. Pp. 37-47. Octubre 1991.
25. Jean-Pierre Magnan. “Théorie et pratique des drains verticaux”. Ingénieur des Pants et Choussées Laboratoire Central des Ponts et Choussées. París Cedex, 1983.
26. Jouve París “Détermination de la résistance au poinçonnement statique des géomembranes et des dispositift d’étanchelé par géomembranes. Cas du poincon cylindrique sans support”. Homologuée Septembre 1996.
27. Jouve París. “Détermination de la résistance au déchirement(déchiure amorcée)”. Homologuée mai 1989.
28. Juárez Badillo, E y Rico R., Alfonso. “Fundamentos de la Mecánica de Suelos”. Tomo I. Editorial Limusa, Noriega Editores. Tercera Edición. México D. F., 1997.

29. Juárez Badillo, E. “General compressibility equation for soils”. Proceedings of X International Conference on Soils Mechanics and Foundation Engineering”. Stockolm, pp 171-178. 1981.
30. Juárez Badillo, E. “General Theory of Consolidation for Clays”. Consolidation of Soils: Testing and Evaluation, ASTM STP 892, R. N. Yong and F.C. Townsend, Eds. pp 137 — 153. Philadephia, 1986.
31. Luis Juárez, Yann Beliard y Alfredo Cirion. “Resultados obtenidos a los tres meses de 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)”. Reporte trimestral. 19 de Diciembre de 2017.
32. Marsal, Raúl J. “Estudio Sobre la Predicción Teórica de Asentamientos y de Presiones de Poro en Suelos Saturados”. Publicación del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México. México D. F., 1961.
33. Mesri, G., Shaien, M. “Compressibility parameters during primary consolidation”. International Symposium on Compression and Consolidation of Clayey Soils Hiroshima, pp. 102 1-1036. 1995.
34. Rojas Rabiela, Teresa (2004): "Las cuencas lacustres del Altiplano Central". En: *Arqueología Mexicana*. Vol. XII. Núm. 68. pp. 20-27. Editorial Raíces - Instituto Nacional de Antropología e Historia. México. Julio-agosto de 2004.
35. Taylor, Donald W. “Fundamentals of Soil Mechanics”. Editorial John Wiley & Sons. Primera edición. New York, 1958.
36. Terzaghi, Karl, Peck, Ralph B. y Mesri, Gholamreza. “Soil Mechanics in Engineering Practice”. Editorial John Wiley & Sons Tercera edicion New York, 1996.
37. UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA GRADO EN INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN. “Geotecnia. “Consolidación de suelos saturados”. Tema de posgrado. 2015.
38. Zeevaert, Leonardo. “Foundation Engineering for Difficult Subsoil Conditions”. Van Nostrand Reinhold Company Inc. Segunda edición. New York, 1983.