

# VÍAS TERRESTRES



ÓRGANO OFICIAL DE LA  
**ASOCIACIÓN MEXICANA DE INGENIERÍA  
DE VÍAS TERRESTRES A.C.**  
ISSN 2448-5292 [viasterrestres.mx](http://viasterrestres.mx)

AÑO 9 #50  
NOVIEMBRE  
DICIEMBRE  
2017

50



Fig. 7. Vista panorámica de panel de prueba de consolidación por vacío realizado en el Valle de México.

# SISTEMA DE CONSOLIDACIÓN ACELERADA CON LA APLICACIÓN DE UN VACÍO

## GENERALIDADES Y CASO HISTÓRICO

---

Ing. Alfredo Cirión Arana  
Ing. Rémi Chatte  
Menard México

---

El sistema de consolidación por vacío es una técnica de mejoramiento de suelos que consiste en aplicar una precarga grande a un terreno formado por suelos cohesivos impermeables. La finalidad de dicho sistema es generar una consolidación de forma acelerada para que el terreno pueda cumplir con las condiciones de portabilidad y con los criterios de deformación establecidos para un proyecto de construcción. Este método de precarga por vacío es una variación del método de mejoramiento de suelos de consolidación acelerada con drenes verticales y precarga clásica (terraplén). La técnica es más sofisticada en cuanto a requerimientos técnicos y de operación, pero además ofrece múltiples ventajas en comparación con la solución tradicional: magnitudes de precarga mayores (el vacío aplicado es proporcional a la presión atmosférica del sitio), generación de mayores asentamientos y grados de consolidación en tiempos menores, y creación de condiciones de carga isostáticas que disminuyen riesgos de inestabilidad. El método utiliza una membrana impermeable y zanjas de estanqueidad perimetrales que hacen que la consolidación de los suelos se logre de manera eficaz.

En este artículo se describen los principios del sistema de mejoramiento de suelos por vacío Menard Vacuum, se muestran sus ventajas y desventajas frente a otros métodos de mejoramiento de suelos y frente al método clásico de consolidación con drenes verticales y terraplén de precarga. Además, se presentan las características, experiencias y resultados de la aplicación del sistema en terrenos arcillosos del Valle de México, gracias a una prueba llevada a cabo.

### INTRODUCCIÓN

Tal como lo describió Terzaghi en una primera instancia, el fenómeno de consolidación se produce cuando se genera un incremento en los esfuerzos efectivos de suelos cohesivos saturados, a la par que se modifican las presiones intersticiales debido a la aplicación de una carga. Lo anterior resulta en la disminución de la relación de vacíos de la estructura del suelo y con ello, cambios en su volumen. Como bien se sabe, esta disminución

de volumen no ocurre de manera instantánea, sino que se desarrolla a lo largo del tiempo, pues depende de la permeabilidad del suelo, que suele ser baja en arcillas y limos.

Durante años, la consolidación ha sido motivo de múltiples estudios y ha sido uno de los principales temas de interés de la ingeniería geotécnica. La consolidación tiene un valor altamente ponderado en la industria de la construcción pues la falta de previsión de la ocurrencia de este fenómeno, o un estudio poco detallado del mismo, puede resultar en daños a mediano y largo plazo a proyectos construidos sobre suelos consolidables. Esto inevitablemente trae consigo pérdidas económicas importantes.

Actualmente existen diversas formas de solucionar un proyecto que debe ser construido sobre suelos consolidables, siendo una de la más efectivas la aplicación de técnicas de mejoramiento de suelos. Efectivamente, mejorar un suelo con el fin de mitigar los efectos que este fenómeno trae consigo, puede realizarse (por lo general) de dos maneras. La primera implica evitar que la consolidación ocurra y la segunda consiste en modificar las características del suelo consolidable para disminuir los asentamientos superficiales una vez que el proyecto esté en etapa de servicio. Una forma común de mejoramiento, que se encuadra dentro del segundo de los grupos descritos, consiste en preconsolidar el terreno aplicando cargas superficiales (precargas) que tendrán que ser mayores a las cargas de servicio del proyecto. De esta forma se genera, de forma anticipada a la puesta en marcha del proyecto, un nivel de consolidación que asegure que los asentamientos residuales finales que ocurran durante la etapa de servicio del proyecto estén dentro del rango de límites permisibles.

Normalmente, el mejoramiento de suelos con precarga debe venir acompañado de la instalación de un conjunto de drenes verticales que atraviesan el estrato de suelo blando con el fin de acelerar su proceso de consolidación y reducir los tiempos de ejecución para entrar dentro de programas de trabajo razonables. Es práctica común instalar los llamados Drenes Verticales Prefabricados (DVPs) en mallas

regulares pues esto transforma el fenómeno original de consolidación vertical (unidimensional) en un fenómeno de consolidación tridimensional que combina los efectos de consolidación vertical más la consolidación radial alrededor de los drenes, lo que genera una aceleración del proceso de pérdida de volumen y alcanza los objetivos en tiempos menores.

En términos prácticos, la malla de drenes verticales (separación regular entre cada dren) define la celeridad con que el fenómeno de consolidación se llevará a cabo para lograr cierto grado de consolidación. La longitud y profundidad de la instalación de los mismos define la profundidad del tratamiento, mientras que la magnitud de la precarga define la carga de servicio con la cual el terreno quedará preparado para soportar durante la vida útil del proyecto.

La precarga es comúnmente aplicada mediante la instalación de rellenos, terraplenes compactados o la colocación de material pesado en la superficie del terreno, o la combinación de todo lo anterior. Sin embargo, aun cuando esta tarea implica relativamente poco trabajo, se necesita tiempo para instalar la totalidad de la carga, o esta debe ser instalada por fases intermitentes, por lo que el costo podría ser un factor de importancia. Por otro lado, si existe la necesidad de instalar precargas de magnitud importante, esto es, cuando las cargas de servicio del proyecto sean también grandes, los terraplenes tenderán a ser de gran altura para cumplir con la carga demandada. En este último caso, el proyecto tiende a complicarse en términos de factibilidad técnica y/o constructiva: fallas en los taludes, imposibilidad de conseguir material, etc.

Una alternativa de consolidación acelerada con precarga clásica llevada a cabo mediante drenes verticales y precarga con rellenos, terraplenes o material pesado es instalar un sistema de vacío en el terreno para hacer que la presión atmosférica que existe en el sitio actúe como la precarga que se requiere para detonar la consolidación, lo cual elimina prácticamente la instalación de los mencionados rellenos, terraplenes o materiales pesados. El sistema de consolidación por vacío tiene ventajas con respecto al uso de la precarga "clásica", lo cual se describirá más detalladamente en este artículo.

## DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE CONSOLIDACIÓN ACCELERADA CON VACÍO

La consolidación acelerada por vacío es una solución de mejoramiento utilizada en suelos cohesivos saturados que tiene numerosas ventajas con respecto al sistema tradicional de consolidación acelerada realizado con un terraplén de precarga. En comparación con este último, se reducen los volúmenes de material de precarga necesarios, se reducen los tiempos de instalación del sistema de consolidación y también los tiempos de operación necesarios para lograr cierto grado de consolidación del suelo. Por otro lado, el riesgo de inestabilidad del terreno se ve disminuido pues los esfuerzos que se generan en la masa de suelo son isotrópicos. En ciertas condiciones, el terraplén bajo el cual se instala el sistema de vacío, puede ser una plataforma para la circulación de equipos de construcción, por lo que las zonas donde se aplica esta técnica, siempre podrán formar parte de caminos de acceso, oficinas, etc., sin necesidad de aislar zonas aledañas por falta de accesos.

A este sistema de consolidación acelerada con vacío, también se le conoce como sistema de consolidación atmosférica, o bien, Menard Vacuum, por ser Menard la empresa creadora de la técnica a finales del siglo pasado.

El sistema de consolidación acelerada por vacío utiliza, como precarga para el terreno, la misma presión atmosférica existente en el sitio gracias al uso de un sistema de bombeo de vacío que aumenta directamente el esfuerzo efectivo del suelo al disminuir la presión de poro intersticial de las arcillas de baja permeabilidad. El sistema se compone también de una membrana impermeable y zanjas de estanqueidad que aíslan el suelo de la atmósfera. Para completar el sistema se emplea una red de drenes verticales prefabricados (DVP o PVD, por sus siglas en inglés) para aumentar la velocidad de consolidación del suelo y una red de drenes tubulares horizontales que se conecta a las bombas de vacío.

En la figura siguiente se observa un esquema general del sistema de consolidación por vacío.

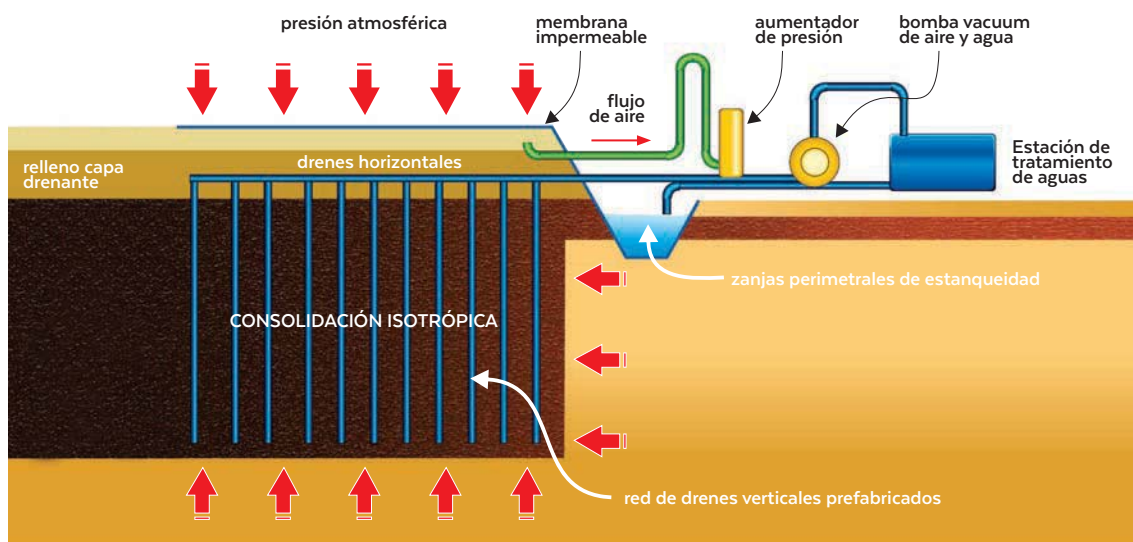


Figura 1. Corte esquemático del sistema de consolidación acelerada con vacío.

Para crear un vacío en el terreno arcilloso, que a su vez genere la disipación de las presiones intersticiales y aumente su esfuerzo efectivo de forma rápida, se debe instalar lo siguiente: una malla regular de Drenes Verticales Prefabricados (DVP) en arreglo cuadrado o triangular hasta la profundidad

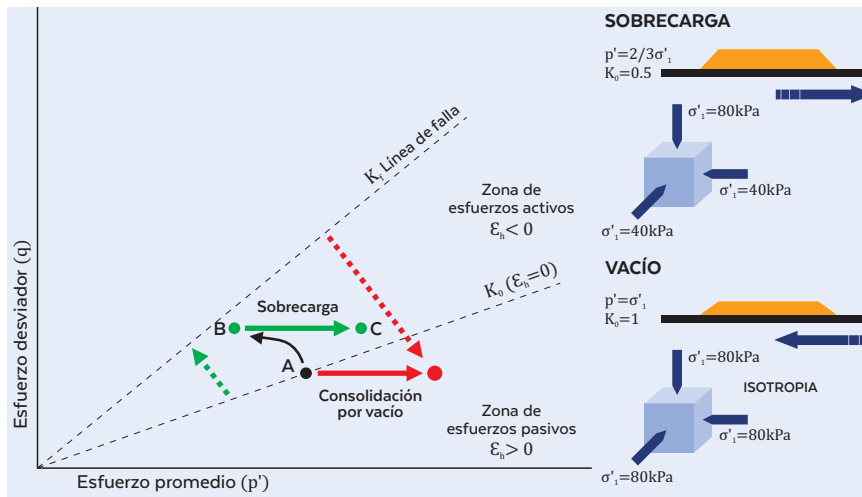
de tratamiento, una serie de drenes horizontales que esté conectada directamente a las bombas de vacío e inmersa dentro de una capa drenante que sobreyace el estrato consolidable, una zanja de estanqueidad construida en el perímetro de la zona a tratar y una membrana impermeable que se “ancla” en la zanja mencionada y que recubre toda la superficie.

La membrana es esencial en el sistema de vacío porque sirve para aislar el suelo de la atmósfera y que la depresión se aplique correctamente a toda la masa de manera uniforme.

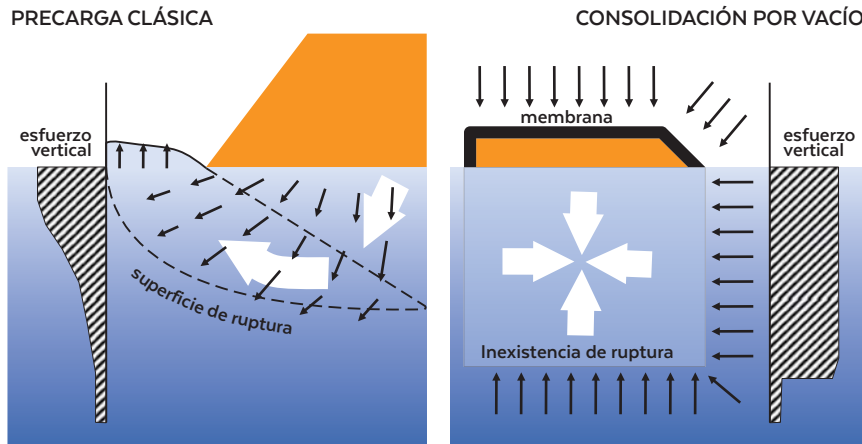
Es importante mencionar que la magnitud de la precarga que se aplicará a la masa de suelo, dependerá de las condiciones del sitio. En sitios ubicados a nivel del mar, la presión atmosférica será idealmente de 100 kPa, pero conforme el sitio de trabajo se ubique a una elevación mayor con respecto al nivel del mar, la presión atmosférica tenderá a ser menor y, por lo tanto, la magnitud de la precarga será también menor.

En las figuras siguientes se muestra esquemáticamente las ventajas en cuanto a la aplicación de un vacío como carga isotrópica (igual magnitud en todas las direcciones) y la carga proveniente de un terraplén superficial. En el segundo caso, los esfuerzos tienden a acercar al suelo a una condición de falla. La consolidación por vacío aplicada con la membrana, induce un estado pasivo de esfuerzos uniformes y constantes en todas direcciones, provocando condiciones de estabilidad y logrando, con cargas más grandes y uniformes, que la consolidación se realice de manera más eficiente.

50  
08



**Figura 2.** Visualización de los estados de esfuerzos inducidos por los sistemas de precarga tradicional con sobrecarga de terraplén y precarga inducida con un sistema de vacío. La precarga inducida con vacío realiza un recorrido más simple dentro de la gráfica de esfuerzos, lo cual se traduce en la eficiencia de la generación de la consolidación y la reducción de riesgos de fallas o inestabilidad.



**Figura 3.** Comparación de esfuerzos y deformaciones inducidos en la masa de suelo cuando se aplican mejoramientos de precarga con sobrecarga de terraplén y precarga con vacío. El primer caso puede tender a la inestabilidad, mientras que el segundo caso induce un estado isotrópico de esfuerzos que beneficia la consolidación y evita riesgos de falla.

## CASO HISTÓRICO EN ARCILLAS DEL VALLE DE MÉXICO

Las características del suelo del Valle de México siempre son un tema de cuidado y precaución cuando se trata de edificar una construcción en la zona, pues se tiene que lidiar con las arcillas blandas que lo componen. Una forma de mitigar las consecuencias de la gran deformabilidad de dichas arcillas es, precisamente, la aplicación de una precarga anticipada en ellas. Lo anterior tiene como objetivo generar la consolidación anticipada de los estratos superficiales, antes de iniciar la construcción, con el fin de que durante la vida útil del proyecto, los asentamientos que habrían de esperarse para la nueva condición de carga superficial debido a la mencionada alta deformabilidad, ya hubiesen ocurrido, y que los asentamientos residuales finales a largo plazo no superen lo que está permitido por los reglamentos. Además, la consolidación anticipada ayuda a mejorar las características mecánicas de la arcilla y la hace apta para soportar cargas superficiales uniformes de magnitud considerable.

En las siguientes líneas se describirá brevemente un caso histórico de aplicación de la técnica (consolidación acelerada por vacío) en una prueba hecha en las arcillas que conforman el Valle de México.

El panel de prueba consistió en un terraplén de 50 x 70 m de 2.0 m de altura hecho con material granular de origen volcánico (tezontle), muy ligero (peso volumétrico bajo), el cual se colocó en tres fases. En la primera fase se instalaron los primeros 50 cm de esta capa para poder acceder al sitio y realizar los trabajos previos de exploración y colocación de instrumentación. Posteriormente, se colocaron 50 cm más para tener una plataforma de trabajo de 1.0 m de espesor que sirviera para la circulación de los equipos dedicados a la instalación de los drenes verticales prefabricados. Finalmente, se instaló una tercera capa de 1.0 m para completar el nivel final del terraplén (relleno de compensación de niveles).

Se colocó una gran cantidad de instrumentación en el panel para poder comprobar los resul-

tados de asentamientos, presiones intersticiales, grados de consolidación, etc. Entre los instrumentos colocados se contaron los siguientes:

- A. Placas de asentamientos
- B. Piezómetros eléctricos
- C. Extensómetros
- D. Inclínómetros
- E. Captadores de depresión (vacuómetros)
- F. Pozos de observación

Como ya se mencionó, la instrumentación se colocó cuando se tenía únicamente la primera capa de 50 cm de material granular instalada, y también, desde esta plataforma se realizaron los sondeos de exploración geotécnica que consistieron en:

- A. Sondeos de penetración estándar (SPT)
- B. Sondeos de cono eléctrico (CPT) con medición de la presión de poro
- C. Pruebas de veleta
- D. Sonda suspendida

Se realizaron múltiples pruebas de laboratorio para caracterizar las arcillas encontradas y definir, con la mayor precisión posible, sus características en cuanto a resistencia, deformabilidad y permeabilidad.

Esta exploración dio como resultado la definición en el sitio de la estratigrafía típica del Valle de México, formada por una costra superficial de 1.0 m de espesor, seguida de 29 m de arcilla blanda (primera formación arcillosa), una primera capa dura de arena limosa, y más abajo, la segunda formación arcillosa, todo sobreyaciendo los depósitos profundos.

Los drenes verticales prefabricados que se instalaron trataron únicamente la primera formación arcillosa, hasta 27.0 m de profundidad, con una separación entre ellos de 1.2 m.

Una serie de drenes horizontales de PVC se colocó dentro del primer metro de terraplén, que, gracias a que está compuesto de material granular grueso, tiene la permeabilidad suficiente para poder transportar con facilidad el vacío inducido por las bombas instaladas para tal propósito. De esta

manera, la red de drenes horizontales se conectó a dos bombas de vacío, una a cada lado del panel, con el fin de distribuir la depresión de una forma uniforme dentro del panel.

Una membrana plástica, que sirve para aislar la masa de suelo de la atmósfera, se colocó por encima de la plataforma de tezontle, cuando ésta era de 1.0 m de alto. También se realizaron las zanjas de estanqueidad donde se ancla la membrana.

El terraplén de compensación se instaló por arriba de todo el sistema y así se recubrió la membrana y la zanja de estanqueidad.

La medición de los asentamientos, de las depresiones aplicadas bajo la membrana, y de las presiones piezométricas que se obtienen del monitoreo de la instrumentación instalada, muestran que la eficiencia en la precarga que sufren las arcillas (con magnitudes proporcionales a la presión de vacío inducida por las bombas) generan asentamientos mayores a 2.5 m en tiempo récord, asociados a mayores grados de consolidación, resultando así un caso de total éxito en la aplicación de este sistema en las arcillas del Valle de México.

50  
10

## CONCLUSIONES

El sistema de consolidación acelerada con vacío utiliza la presión atmosférica de un sitio para precargar un terreno impermeable con el fin de anticipar deformaciones superficiales de largo plazo activando su proceso de consolidación.

Para acelerar el proceso de consolidación del terreno, se instala una malla de drenes verticales prefabricados (drenes sintéticos planos), DVP, como se haría en un sistema típico de mejoramiento de suelos con precarga “clásica”, pero las cargas inducidas por el método mencionado son mayores a las que podrían aplicarse en un sistema de precarga convencional práctico. El arreglo que se tenga de estos DVPs incide directamente en la velocidad de consolidación del terreno: a menor separación, mayor velocidad de consolidación.

Para generar la succión o vacío en la masa de suelo, se coloca un conjunto de drenes horizontales dentro de una capa drenante superficial que contiene también el extremo superior de los DVPs. Los drenes horizontales se conectan directamente a las bombas de vacío y son los encargados de transpor-



**Figura 4.** Vista de la máquina utilizada para la instalación de los Drenes Verticales Prefabricados (DVP) para acelerar el proceso de consolidación.



**Figura 5.** Vista de la membrana y la zanja de estanqueidad perimetral. La depresión causada por las bombas de vacío, es evidente cuando la membrana tiende a “pegarse” al suelo que cubre.



tar la succión a toda la superficie, con la consecuente salida de agua y el aire que contiene la masa de suelo tratado. Para aislar dicha masa de suelo, y realmente generar la presión de vacío o depresión isotrópica característica de este sistema, se instala, sobre la capa drenante, una membrana impermeable que a su vez se ancla a las zanjas de estanqueidad perimetrales por debajo del nivel freático. Lo anterior con el fin de aislar la masa de suelo de la atmósfera. La malla de drenes horizontales, la capa drenante y la membrana de estanqueidad no intervienen en el cálculo de los asentamientos o grado de consolidación del suelo, pero son estos elementos los que definen la eficiencia del sistema completo.

Por encima de la capa drenante y de la membrana impermeable se puede colocar un relleno de compensación de niveles que alcance el nivel de piso terminado, un nivel final o un nivel de subrasante al término del proceso de consolidación acelerada, de manera que cuando termine de operar el sistema de vacío, la plataforma asentada se encuentre a un nivel práctico de construcción. Esta plataforma también permite la circulación de maquinaria y

equipo por encima del sistema, por lo que se evitan interrupciones en un proyecto global en donde se realizan actividades simultáneas de construcción.

La consolidación por vacío aplicada con la membrana induce un estado pasivo de esfuerzos uniformes y constantes en todas direcciones (condición de esfuerzos isotrópica), lo que provoca condiciones de estabilidad (no riesgo de fallas de taludes) y logra, con cargas más grandes y uniformes, que la consolidación se realice de manera más eficiente que en el caso de precarga aplicada con un terraplén superficial.

La primera aplicación de este sistema en las arcillas del Valle de México resultó un caso de éxito. Se obtuvo asentamientos de magnitud importante con grados de consolidación inducidos en tiempo récord, que superan en buena medida a los tiempos y asentamientos que podrían haberse obtenido con la presión inducida con terraplenes de precarga clásicos. Así, podemos concluir que la técnica de vacío con membrana Menard resulta una opción más que viable para la inducción de precarga en proyectos a construirse en la zona.



**Figura 6.** Vista de la estación de bombeo de vacío.

**Figura 7.** Vista panorámica de panel de prueba de consolidación por vacío realizado en el Valle de México [al inicio de articulo].

## REFERENCIAS

- Cassan, Maurice**, *Les essais in situ en mécanique des sols*, Eyrolles, enero 1987.
- Chatte, Remi, Alfredo Cirión y Paulín Juan**, *Aplicación de la Consolidación Atmosférica Menard Vacuum para la plataforma aeroportuaria Airbus A380 en Hamburgo, Alemania*. XXVII Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica, Puerto Vallarta, noviembre 2014.
- Cognon, J.M.**, *La consolidation atmosphérique*, en *Rev. Franç Géotech*, núm. 57, octubre 1991, pp. 37-47.
- Magnan, Jean-Pierre**, *Théorie et Pratique des drains verticaux*, París, Technique et Documentation Lavoisier, 2000.
- Philipponnat, Gérard y Bertand Hubert**, *Fondations et ouvrages en terre*, Eyrolles, París, 2000.
- Varaksin, Serge y Abt Herve**, *Theory and Practical Application of Vacuum Consolidation at the site of Camau Power Plant in Vietnam*, Nozay, 2007.
- Varaksin, Serge, Jean-Luc Chaumeny y Kirstein Johannes**, *Application du procédé Menard Vacuum pour l'aménagement du site du futur Airbus A380 à Hambourg*, Nozay, 2004.