

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



SISTEMAS DE PRECARGA PARA SUELOS ARCILLOSOS SATURADOS

**Trabajo de investigación para la obtención del grado académico de BACHILLERA EN
CIENCIAS CON MENCIÓN EN INGENIERÍA CIVIL**

AUTORAS:

Felices Tineo, Lizeth Sofía
Burgos Pérez, María Valeria

**Trabajo de investigación para la obtención de grado académico de BACHILLER EN
CIENCIAS CON MENCIÓN EN INGENIERÍA CIVIL**

AUTORES:

Escalante Pillaca, George Henry
Castañeda Vasquez, Ángel Fernando
Campos Verdi, Piero Steve

ASESOR:

Soto Dueñas, Milagros del Pilar

Lima, diciembre, 2020

Resumen

El ser humano se enfrenta cada vez a mayores retos geotécnicos para construir estructuras, ya que las zonas geológica y geotécnicamente favorables son cada vez más escasas. Una de las técnicas más antiguas y que siguen siendo utilizadas para el mejoramiento del terreno es el uso de la precarga. El objetivo de la precarga en suelos blandos saturados es reducir el asentamiento cuando se lleva a cabo la construcción real en el sitio. Este objetivo se logra acelerando el proceso de consolidación de estos suelos, ejerciendo presiones e implementando medios para el drenaje de agua. En esta investigación se busca comparar los distintos tipos de precarga que son ejecutados en proyectos de ingeniería, los cuales son el sistema de precarga con material de relleno y con vacío. Este último tiene dos tipos: precarga con vacío con membrana hermética y precarga con vacío de dren a dren. Se recopila información de cada uno de estos sistemas, tanto en sus características propias y como su aplicación en distintas obras de ingeniería. Al finalizar, se presentan tablas comparativas de cada método, donde se detallan ventajas, aplicabilidad, desventajas y limitaciones.

ÍNDICE

Resumen.....	i
ÍNDICE.....	ii
LISTA DE FIGURAS.....	iv
LISTA DE TABLAS.....	vi
Capítulo 1. Generalidades.....	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Justificación.....	2
1.3 Alcance.....	2
1.4 Objetivos.....	3
1.4.1 Objetivo general:.....	3
1.4.2 Objetivos específicos:.....	3
1.5 Metodología.....	4
Capítulo 2. Revisión de la Literatura.....	5
2.1 Antecedentes.....	5
2.2 Conceptos básicos.....	8
2.2.1 Precarga.....	8
2.2.2 Suelos parcialmente saturados.....	10
2.2.3 Consolidación.....	13
Capítulo 3. Desarrollo de la Investigación.....	15
3.1 Drenes verticales.....	16
3.2 Implementación de precargas convencionales.....	19
3.3 Implementación de precarga al vacío.....	24
3.3.1 Sistema con membrana hermética.....	30

3.3.2	Sistema dren a dren (sin membrana hermética)	32
3.3.3	Implementación de precarga convencional con la de vacío	34
3.3.4	Resumen comparativo de sistemas	36
Capítulo 4. Conclusiones y Recomendaciones		39
4.1	Conclusiones	39
4.2	Recomendaciones	41
Referencias.....		42



LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Precarga y su aplicación	5
Figura 2. Esquema típico del Sistema de precarga con vacío	7
Figura 3. Principios de la precarga.....	9
Figura 4. Visualización generalizada del mundo de la mecánica de suelos.....	11
Figura 5. Un elemento de un suelo parcialmente saturado con una fase continua de aire	11
Figura 6. Esquema de una curva de retención de agua de un suelo	12
Figura 7. Asentamientos versus tiempo de los distintos tipos de drenes prefabricados.....	17
Figura 8. Resistencia al corte no drenada obtenido de ensayos de veleta.....	18
Figura 9. Tipos de drenes prefabricados	18
Figura 10. Deformación lateral del suelo debajo de un (a) relleno y de una (b) presión al vacío.....	20
Figura 11. Perfil de asentamientos debido a una precarga de relleno	22
Figura 12. Esquema del terraplén (no a escala): (a) perfil; (b) vista en planta	23
Figura 13. Comparación de los datos obtenidos de la instrumentación con los modelos 2D y 3D del terraplén	24
Figura 14. Perfil de asentamientos debido a una precarga de vacío	26
Figura 15. Comparación del desplazamiento lateral entre sistemas de precarga	27
Figura 16. Superficie de asentamiento: (a) precarga de relleno y (b) precarga con vacío	28
Figura 17. Resultados del ensayo de veleta antes y después de la precarga con vacío.....	28
Figura 18. Envolvente de falla de Mohr-Coulumb extendido.....	29
Figura 19. Comparación de la resistencia al corte obtenido del ensayo de veleta de las muestras ensayadas en el edómetro y placa de presión: (a) arcilla marina superficial; (b) arcilla medianamente rígida; (c) arcillas marinas profundas; (d) arcilla limosa	30
Figura 20. Sistema de precarga con vacío con membrana hermética	31
Figura 21. Comparación de asentamientos entre la precarga con vacío tradicional con el método de múltiples etapas.....	32
Figura 22. Sistema de precarga con vacío dren a dren (sin membrana hermética).....	33
Figura 23. Comparación del desplazamiento lateral entre distintos sistemas de precarga.....	34

Figura 24. Método de sobrecarga de relleno y de vacío combinado..... 35

Figura 25. Comparación de resultados de instrumentación con el modelo analítico en asentamiento y exceso de presión de poros 36



LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Perfil y propiedades del suelo del proyecto Yaoqiang Airport.....	21
Tabla 2. Análisis de asentamiento de la sobrecarga de relleno.....	21
Tabla 3. Análisis de asentamiento de la precarga con vacío.....	25
Tabla 4. Comparación entre sistema de precarga con material de relleno y con vacío.....	37
Tabla 5. Comparación entre los tipos de sistema con vacío	38



Capítulo 1. Generalidades

1.1 Introducción

Con el avance de la civilización, la demanda por el uso de la tierra ha ido incrementando. Cada vez se construyen más casas, edificios, túneles, presas y diques de mayores dimensiones, para los cuales, el hombre utiliza los lugares con mejores condiciones geotécnicas para construirlos. Debido a esto, este tipo de lugares se vuelven cada vez más escasos, por lo cual, los ingenieros se han enfrentado a grandes retos geotécnicos (grandes asentamientos totales y diferenciales, licuefacción, erosión, filtración, entre otros) para convertir en viable la construcción de proyectos en sitios geotécnicamente no favorables (Han, 2015). Según Hausmann, (1990), las opciones para afrontar estas problemáticas son las siguientes:

- Evitar el sitio
- Diseñar superestructuras
- Eliminar y reemplazar geomateriales desfavorables
- Mejorar las propiedades de los geomateriales y condiciones geotécnicas del sitio

A lo largo de nuestra historia, la mejora de las propiedades de los geomateriales se fue convirtiendo en la opción favorita de los ingenieros para realizar sus proyectos. La mejora de las propiedades del suelo se remonta desde hace 6000 años, cuando los habitantes de Banpo, China, utilizaban columnas de tierra apisonadas para sostener postes de madera (Chen et al., 1995). Los métodos modernos de mejoramiento de terrenos se desarrollaron desde los años 20. Por ejemplo, en 1925, Daniel Moran utilizó drenes verticales de arena para acelerar la consolidación de suelos blandos (Han, 2015; Cai et al., 2017).

En la actualidad existen numerosos métodos de mejoramiento, los cuales se pueden dividir en dos grandes grupos. En primer lugar, se encuentran los refuerzos con elementos estructurales, por ejemplo: inclusiones rígidas, inyecciones, jet grouting, micropilotes, entre otros. En segundo lugar, se encuentran los métodos de densificación y drenaje, por ejemplo:

precarga y drenes verticales, sustitución dinámica, compactación dinámica, vibrocompactación, columnas de grava, entre otros (Sobrecases, 2018).

De estos métodos, la precarga es uno de los métodos más antiguos pero muy comúnmente utilizados. El concepto básico de esta tecnología es reducir el índice de vacíos del suelo a través de la consolidación (disipación del exceso de presión de poros) aplicando cargas en el área del terreno por un determinado período de tiempo, para luego removerla para la construcción de una estructura (Jie Han, 2014). El trabajo de investigación tiene como eje central el análisis de este método y sus variantes, de las cuales se determinarán las ventajas y desventajas.

1.2 Justificación

Con la creciente urbanización y la alta demanda del uso del suelo para construir diversas obras, se ha vuelto común realizar proyectos en sitios en condiciones geotécnicas no favorables. Para esto, los ingenieros se han visto en la necesidad de implementar métodos que permitan mejorar las propiedades del suelo. Uno de estos es el método de la precarga, el cual se vuelve rentable y de bajo costo para mejorar suelos arcillosos y limosos con alta compresibilidad y baja resistencia cuando el tiempo no es el principal problema.

De esta manera, conocer sobre la aplicabilidad, limitaciones, ventajas y desventajas de cada uno de los tipos de sistemas de precarga permitirá a los ingenieros elegir el método más eficiente para mejorar las condiciones y propiedades geotécnicas del lugar donde se construirá algún tipo de estructura.

1.3 Alcance

El alcance de esta investigación es comparar los resultados de los distintos sistemas de precarga utilizados en determinados proyectos. De esta manera, se podrán discutir las ventajas y desventajas de cada sistema. En primer lugar, se procederá a realizar la recopilación

bibliográfica del uso de estos sistemas en el campo ingenieril. En segundo lugar, se expondrán los conceptos básicos necesarios para comprender los distintos fenómenos involucrados al utilizar estos sistemas. En tercer lugar, se definirán los tipos de sistemas utilizados para acelerar la consolidación de arcillas saturadas, y se evaluará y discutirá los resultados de cada sistema empleado en un determinado proyecto. Finalmente, se darán conclusiones y recomendaciones de la investigación.

Esta investigación no pretende confirmar los resultados del uso de cada sistema de precarga realizando análisis analíticos o numéricos. La metodología de este trabajo de investigación es completamente cualitativa, se busca realizar una síntesis de cada sistema y compararlas entre ellas para conocer su aplicabilidad, limitaciones, ventajas y desventajas de cada una.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general:

Evaluar la aplicabilidad, limitaciones, ventajas y desventajas de los distintos sistemas de precarga para acelerar la consolidación en suelos arcillosos.

1.4.2 Objetivos específicos:

- Recopilar y sintetizar los distintos sistemas de precarga. Asimismo, realizar un análisis crítico de la aplicabilidad y limitaciones de cada uno
- Analizar la efectividad del desempeño de los distintos sistemas en diversas obras de ingeniería.
- Determinar las ventajas y desventajas de cada sistema mediante cuadros comparativos

1.5 Metodología

La metodología del trabajo de investigación está basada en un enfoque cualitativo, ya que, en base a la recopilación bibliográfica y el análisis de la implementación de cada sistema en un proyecto determinado, se busca realizar cuadros comparativos de ventajas y desventajas de cada sistema.



Capítulo 2. Revisión de la Literatura

2.1 Antecedentes

La precarga es uno de los métodos de mejora del suelo más antiguo, pero que todavía se utilizan habitualmente en la práctica. El concepto básico de esta tecnología es reducir la relación de vacíos (compresibilidad) del geomaterial a través de la consolidación (el cual consiste en la disipación del exceso de presión intersticial o presión de poros) aplicando cargas sobre la superficie del suelo durante un cierto período de tiempo y luego retirándolo para la construcción de una estructura (Griffin & O’Kelly, 2014; Han, 2015). En la Figura 1 se aprecia que, durante la precarga, el asentamiento se desarrolla en base a la magnitud de la carga y el tiempo. Asimismo, cuando la precarga es retirada, se aprecia un rebote.

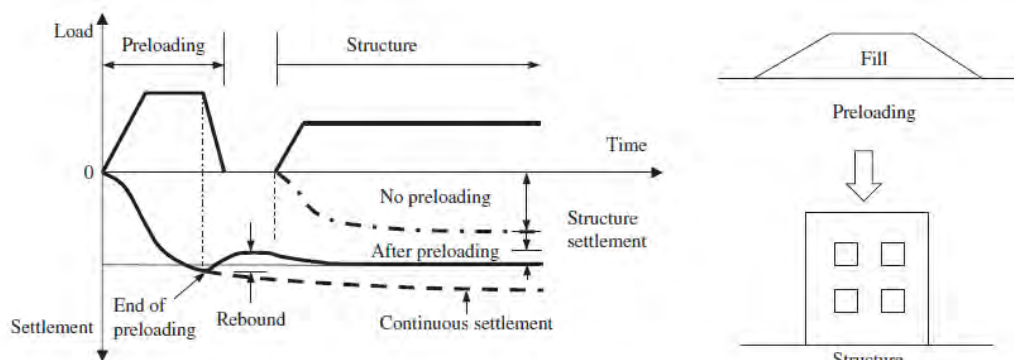


Figura 1. Precarga y su aplicación

Nota. Tomado de “Principles and Practice Ground Improvement”, por J. Han, (2015).

La construcción de la estructura permanente induce un nuevo asentamiento debido a su propio peso, el cual es menor a la precarga anteriormente colocada. Es por ello que se espera que el asentamiento inducido por la estructura después de la precarga sea mucho menor que sin la precarga.

Es importante en el diseño determinar el tiempo para el final de la precarga. Para arcillas blandas, la consolidación puede tardar más en completarse debido a su baja permeabilidad. Si

el tiempo de precarga y construcción de la estructura excede el tiempo disponible, se pueden instalar drenes verticales para acortar la distancia de drenaje, acelerando así la tasa de consolidación y reduciendo el tiempo de consolidación y asentamiento del suelo. Fue Daniel Moran quien propuso por primera vez una tecnología de drenaje de arena para la mejora del suelo de depósitos blandos profundos en 1925 y fue patentada un año después (B. Indraratna et al., 2012; Han, 2015). Los drenajes de arena se forman rellenando perforaciones con arena altamente permeable y dispuestos en patrones regulares con cierto espaciamiento para acortar la distancia de drenaje del agua en el suelo, acelerando así la tasa de consolidación. La División de Carreteras, Materiales e Investigación del Departamento de California realizó pruebas de laboratorio y de campo utilizando esta tecnología de drenaje de arena en 1933 (Rixner et al., 1986).

A finales de la década de los 30, W. Kjellman desarrolló la tecnología de drenes verticales prefabricados en forma de banda, cada dren estaba hecho de un núcleo de cartón y una camisa de filtro de papel. La camisa del filtro de papel se reemplazó más tarde con geotextil no tejido. Hoy en día, los drenes verticales prefabricados (PVD por sus siglas en inglés) se han utilizado ampliamente en el mundo para acelerar la consolidación de los suelos. La precarga en base a la construcción de un relleno requiere el uso de una cantidad significativa de material. El transporte y la colocación del relleno toman mucho tiempo y dichas partidas son de un alto costo económico. Asimismo, a veces la colocación del relleno puede inducir fallas y grandes movimientos. Para evitar estos problemas, otro desarrollo importante de la tecnología de precarga es la idea de precarga al vacío con drenes verticales, que fue propuesta por Kjellman en 1952 (J. Chu & Yan, 2005; Tang & Shang, 2000). A diferencia de la precarga de llenado, la precarga con vacío utiliza presión atmosférica en un sistema hermético instalado en el campo aplicando vacío dentro del sistema, tal y como se muestra en la Figura 2. Un sistema de precarga con vacío generalmente incluye una bomba de vacío, un revestimiento de membrana

impermeable, una capa de drenaje de arena, una tubería de recolección de agua, drenajes verticales y una zanja y un revestimiento de arcilla para sellar el límite y evitar fugas. Cuando la presión de vacío no es suficiente, se puede agregar relleno en la parte superior del sistema.

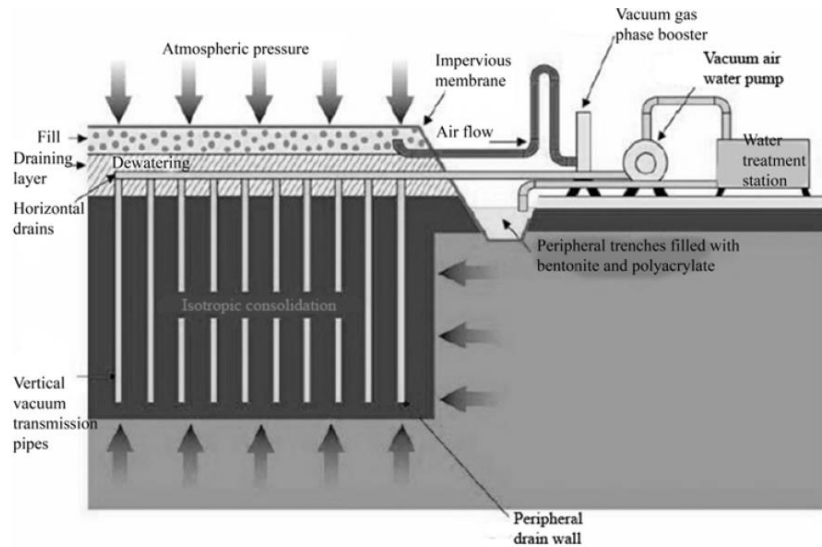


Figura 2. Esquema típico del Sistema de pre-carga con vacío

Nota. De “Sustainability of Combined Vacuum and Surcharge Preloading”, por H. Griffin & B. C. O’Kelly, (2014).

Por lo tanto, la carga aplicada en la pre-carga puede ser de relleno, presión de vacío o una combinación de presión debido al relleno y al vacío. La presión de vacío se eliminará una vez completada la pre-carga, mientras que el relleno puede eliminarse o permanecer como parte de una estructura de tierra. Las estructuras permanentes se construirán después de la pre-carga y se espera que tengan un pequeño asentamiento. Jien Han (2015), manifiesta que las arcillas blandas suelen tener una baja resistencia al corte, lo que puede limitar la magnitud de la carga aplicada en una primera instancia. En tal condición, es necesario realizar la construcción del terraplén por etapas para aumentar la carga permisible poco a poco. Asimismo, para aumentar la magnitud del asentamiento de consolidación primaria durante la pre-carga y minimizar el asentamiento secundario después de este, se puede utilizar una sobrecarga.

2.2 Conceptos básicos

Antes de abarcar a mayor detalle las definiciones y características de los distintos sistemas de precarga que se utilizan en la práctica ingenieril, es necesario abordar algunos términos importantes. Se describirá en qué consiste una precarga y el proceso de consolidación de suelos blandos. Asimismo, como esta investigación busca evaluar la eficiencia y eficacia de estos sistemas de precarga en suelos que no se encuentran en un estado completamente saturado, será necesario definir algunos conceptos de suelos parcialmente saturados, de este modo, se tendrá mayor entendimiento del comportamiento de estos suelos al aplicarles una precarga y el posterior proceso de consolidación. Es necesario recordar que las teorías de consolidación se forman partiendo de la hipótesis de que el suelo se encuentra completamente saturado, es decir, que todos los vacíos se encuentran llenos de agua.

2.2.1 Precarga

El principio básico de la precarga es reducir la relación de vacíos del suelo por consolidación, reduciendo así la compresibilidad y aumentando la resistencia del suelo. En la Figura 3 se ilustra este principio básico basado en la consolidación unidimensional. El esfuerzo de consolidación efectivo implica que la relación de vacíos y la resistencia al corte del suelo en la figura 3 están al final de la consolidación. Jie Han (2015) expresa que cuando la tensión de consolidación en el elemento suelo aumenta desde la tensión de sobrecarga inicial, σ'_{z0} (punto A) a $\sigma'_{z0} + \Delta\sigma_z$ (punto B) por precarga, la relación de vacíos del suelo disminuye de e_0 a e_1 siguiendo la línea de compresión. Una vez completada la consolidación, se elimina la tensión aplicada, $\Delta\sigma_z$, por lo que la tensión de consolidación disminuye a σ'_{z0} . Durante este proceso, el suelo rebota a través de la línea discontinua (una línea de rebote) desde el punto B al C (en la proporción de vacíos, e'_0). Se aprecia que e'_0 es menor que e_0 ; por tanto, el suelo se encuentra en un estado más denso. Si después se construye una estructura permanente y el

esfuerzo aumenta desde el punto C al D (menos de $\sigma'_{z0} + \Delta\sigma_z$), la reducción de la relación de vacíos inducida, $\Delta e'$, siguiendo la línea de recompresión es mucho menor que la inducida al aumentar el esfuerzo de punto A a E (con la misma tensión que el punto D) siguiendo la línea de compresión, es decir, $\Delta e' \ll \Delta e''$. En otras palabras, la deformación del suelo después de la precarga se reduce considerablemente. Se busca que el punto D esté entre los puntos C y B porque la deformación del suelo dentro de la línea de recompresión es pequeña. Debe evitarse que el punto D esté más allá del punto B porque la deformación del suelo en la línea de compresión es grande.

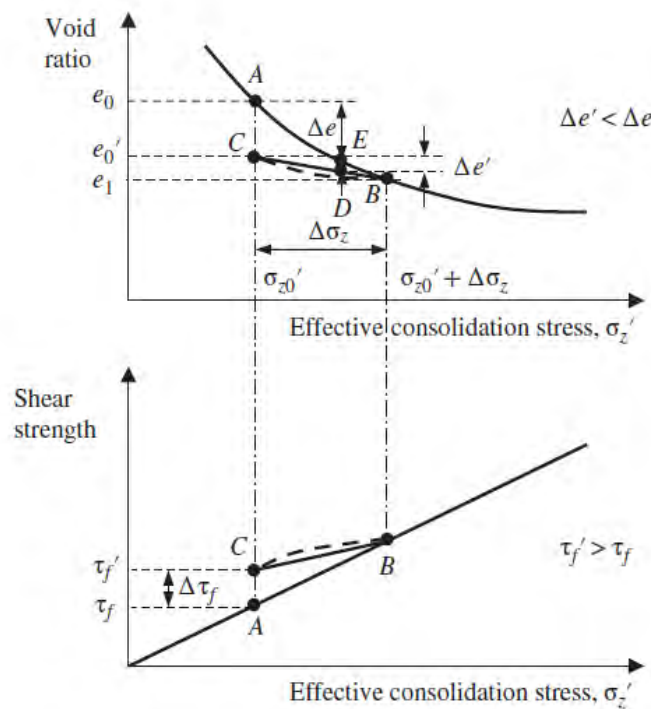


Figura 3. Principios de la precarga

Nota. Tomado de “An Introduction to Geotechnical Engineering”, por D. R. Holtz & W. D. Kovacs, (1981). New Jersey: Prentice-Hall.

Debido a la densificación del suelo después de la precarga, la resistencia al corte del suelo aumenta desde el punto A al C antes de la recarga por parte de la estructura. Jien Han (2015) concluye que el aumento de la resistencia al corte es importante para la estabilidad de la sobrecarga de relleno durante la construcción por etapas.

2.2.2 Suelos parcialmente saturados

La mecánica clásica del suelo y la ingeniería geotécnica se han enseñado a menudo con la suposición de que el suelo está seco (0% de saturación) o saturado (100% de saturación) (Ng & Menzies, 2007). Sin embargo, los estados secos y saturados son solo dos condiciones extremas y limitantes de un suelo, y se sabe que la mayoría de problemas geotécnicos no contemplan estrictamente una de estas condiciones, sino que involucra el conocimiento de del suelo en un estado parcialmente saturado. Por ello, no sería correcto asumir que el comportamiento del suelo se rige únicamente por el principio de estrés efectivo de Terzaghi (1936) (Fredlund & Rahardjo, 1993; Ng & Menzies, 2007).

El doctor Charles Ng (2007) señala que, aunque se puede demostrar que esta división artificial entre suelos saturados e insaturados es innecesaria, aún puede ser útil hacer uso del conocimiento obtenido de los suelos saturados como referencia y luego extenderlo al mundo insaturado como se muestra en la Figura 4, el cual proporciona una ayuda visual para entender de forma generalizada el mundo de la mecánica de suelos (Fredlund, 1996). En esta figura, se visualiza que, por debajo del nivel freático, el comportamiento del suelo se rige por el estrés efectivo ($-u_w$), mientras que el suelo insaturado por encima del nivel freático se rige por dos variables de estrés independientes, el estrés normal neto ($-u_a$) y la succión mátrica ($u_a - u_w$) (Jennings y Burland, 1962; Fredlund y Morgenstern, 1977).

Fredlund (1993) señala que para un suelo insaturado no debe solo definirse las fases típicas, las cuáles son: sólidos, agua y aire. Sino que puede ser conveniente reconocer la existencia de una cuarta fase, la interfaz aire-agua o piel contráctil (ver Figura 5). Esta piel contráctil fue propuesta por Paddy en 1969 y reconocida mediante ensayos por Fredlund y Morgenstem en 1977. La presencia de incluso la menor cantidad de aire hace que el suelo se vuelva insaturado.

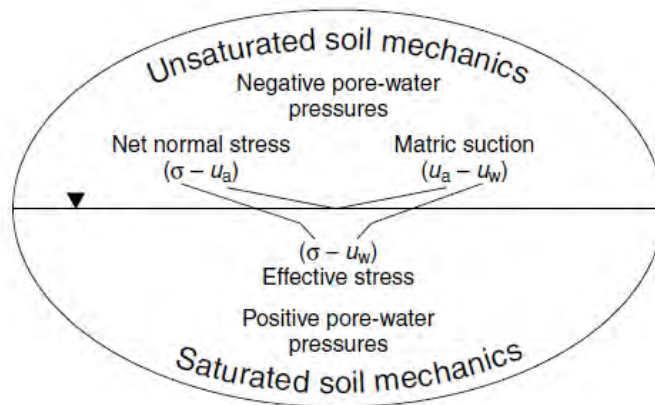


Figura 4. Visualización generalizada del mundo de la mecánica de suelos

Nota. Tomado de “Advanced Unsaturated Soils Mechanics and Engineering”, por NG y Menzies, 2007.

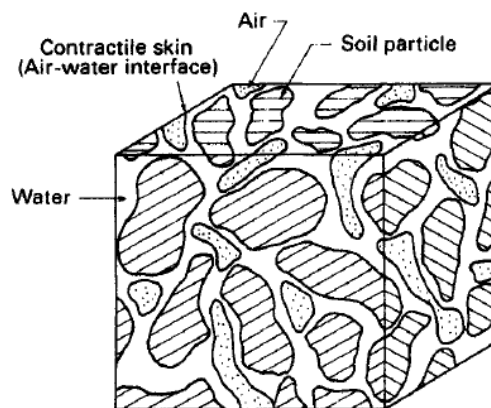


Figura 5. Un elemento de un suelo parcialmente saturado con una fase continua de aire

Nota. Tomado de “Soils Mechanics for Unsaturated Soils”, por Fredlund and Rahardjo, 1993.

Es debido a esto que el suelo, con un grado de saturación distinto de 0 y 100%, bajo cargas tiene un comportamiento distinto frente a suelos saturados o no saturados en lo que respecta a deformaciones, cambios volumétricos y resistencia al corte. Alfaro Soto (2008) manifiesta que esto se debe a que el suelo se encuentra sometido a un estado de tensión diferenciado e influenciado por una componente denominada tensión de succión, la cual puede

generar variaciones en el volumen del suelo. Esta succión total puede definirse (físicamente) como una medida del estado de energía libre del agua (Sfriso, 2016), la cual puede estar compuesta por dos partes: succión matricial y succión osmótica. La succión matricial está relacionada al concepto de presión capilar; esta se produce debido a los meniscos aire-agua y está fuertemente relacionada al tamaño de los vacíos y al contenido de humedad. La succión osmótica es producida por los cationes atraídos por la superficie negativa de las partículas, por ello, estas dependen fundamentalmente de la concentración y tipo de sales (y otras sustancias) disueltas en el agua (Marinho, 1994; Sfriso, 2016; Erasmo et al., 2018).

La magnitud de la succión mátrica (la cual es la que se suele evaluar para determinar el comportamiento mecánico e hidráulico del suelo) dependerá del contenido de humedad del medio poroso (ya sea en términos de grado de saturación, humedad volumétrica o gravimétrica). Esta relación es de gran importancia para la caracterización de los suelos no saturado, y suele ser representado por la “curva de retención del agua del suelo” (Croney & Coleman, 1960; Fredlund & Rahardjo, 1993; Alfaro, 2008). Esta curva puede visualizarse en la *Figura 6*.

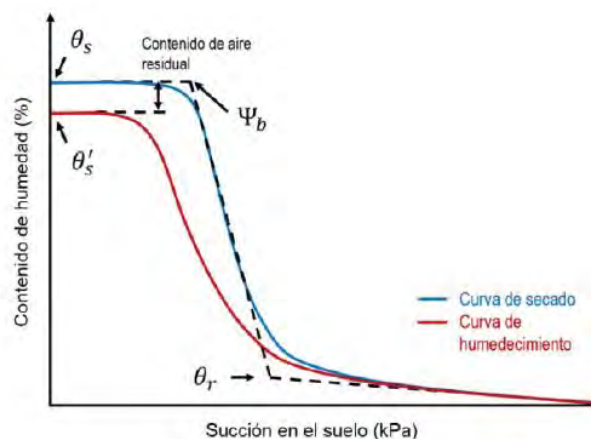


Figura 6. Esquema de una curva de retención de agua de un suelo

Nota. Tomado de “Análisis numérico de infiltración de agua en un suelo residual no saturado utilizando la curva de retención de agua”, por Carnero & Carnero, 2018

2.2.3 Consolidación

La consolidación de suelos cohesivos como resultado de la disipación de las presiones de poro excesivas generadas por cargas externas es un problema de considerable preocupación para los ingenieros geotécnicos (Conte, 2004). Terzaghi (1943) presentó una teoría clásica (simple) de la consolidación unidimensional para suelos saturados que todavía se utiliza ampliamente en la práctica. Se utilizaron varios supuestos en las derivaciones, tales como:

- El suelo es homogéneo y saturado.
- Las deformaciones son pequeñas.
- Los coeficientes de cambio de volumen, m_v , y la permeabilidad, k_s , permanecen constantes durante la consolidación.
- Las partículas de agua y suelo son incompresibles.

Por ende, la continuidad de un elemento de suelo saturado requiere que el cambio de volumen de un elemento de suelo sea igual al cambio en el volumen de agua en el elemento (Fredlund & Rahardjo, 1993; Rahardjo & Fredlund, 1995). La aplicación del requisito de continuidad da como resultado la ecuación de consolidación propuesta por Terzaghi (1943):

$$\frac{\partial \mu_w}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 \mu_w}{\partial y^2}$$

donde

c_v = coeficiente de consolidación (e.g., $k_s/(p_w * g * m_v)$)

k_s = coeficiente de permeabilidad relacionado a un grado de saturación (e.g. $S=100\%$)

p_w = densidad del agua

g = aceleración gravitacional

m_v = coeficiente de cambio de volumen para suelos saturados

En 1941, Biot propuso una teoría general de consolidación para un suelo no saturado con burbujas de aire atrapadas. Se formularon dos ecuaciones constitutivas que relacionan la tensión y la deformación en términos de la tensión efectiva, $(\sigma - u_w)$. Una ecuación relaciona la relación de vacíos con el estado de estrés y la otra ecuación relaciona el contenido de agua con el estado de estrés del suelo. Para la consolidación unidimensional, la teoría de Biot resultó en una ecuación similar a la ecuación de Terzaghi, pero el coeficiente de consolidación vertical (c_v) se modificó para tener en cuenta la compresibilidad del fluido poroso. Larmour (1966), Hill (1967), Olson (1986) y Scott (1963) demostraron que la ecuación de Terzaghi con un coeficiente de consolidación modificado puede usarse para describir el comportamiento de consolidación de suelos insaturados con burbujas de aire atrapadas (Conte, 2004; Fredlund et al., 2012; Rahardjo & Fredlund, 1995).

Richards (1974) y Dakshanamurthy et al. (1984) propusieron extensiones de la teoría de la consolidación para suelos insaturados a casos tridimensionales. Las ecuaciones de continuidad fueron acopladas con las ecuaciones de equilibrio de Dakshanamurthy et al. (1984), al derivar la formulación tridimensional. Otros autores que desarrollaron teorías de consolidación de dos o tres dimensiones fueron Verruijt (1969), Ghaboussi and Wilson (1973) y Conte (1998).

Briaud (2013) manifiesta que si el suelo está insaturado, los procedimientos de la prueba ASTM D2435 no se modifican. Sin embargo, el agua está en tensión inicialmente, cuando la muestra se coloca en el consolidómetro. El aumento de la tensión vertical en la muestra a medida que avanza la prueba puede crear un aumento suficiente de la tensión hídrica como para pasar de tensión a compresión. Si el suelo está saturado, se supone implícitamente que al final de cada paso de carga de 24 horas en el procedimiento de paso de carga, el estrés hídrico es cero; de esa forma se puede calcular la tensión efectiva en la muestra para cada paso. En el caso de suelos insaturados, resulta más difícil calcular la tensión efectiva en la muestra.

Capítulo 3. Desarrollo de la Investigación

La precarga, a veces llamada precompresión, es una de las técnicas más populares y antiguas para el mejoramiento del suelo, sobretodo en suelos blandos. La forma más clásica de precarga es el uso de rellenos de material arenoso o arcilloso. En los últimos años, la precarga al vacío se ha utilizado con éxito en varios proyectos. Aunque los resultados de las diferentes técnicas de precarga son similares, existen diferencias en los mecanismos de sobrecarga y precarga con vacío (Jian Chu et al., 2008; Griffin & O'Kelly, 2014; Leong et al., 2000). Jie Han (2015), declara que estos dos tipos de precarga tienen tres diferencias sustanciales, estos son:

1. La precarga de relleno induce un exceso de presión de agua de poro positiva en el geomaterial, mientras que la precarga con vacío induce un exceso de presión de agua de poro negativa. Es por esta razón, que para el cálculo de asentamientos y es de esfuerzos en la precarga con vacíos es necesario conocer los principios fundamentales de los suelos parcialmente saturados, ya que está involucrado en el proceso el fenómeno de succión.
2. La precarga de relleno induce tensiones verticales y horizontales desiguales, mientras que la precarga con vacío induce las mismas tensiones (es decir, presión de vacío) en todas las direcciones.
3. La precarga de relleno induce un movimiento hacia afuera en la dirección horizontal, mientras que la precarga con vacío induce un movimiento hacia adentro en las direcciones horizontales. Esto es clave para el control de desplazamientos laterales.

Existen muchas investigaciones del uso de estos tipos de precarga; sin embargo, son utilizados en su gran mayoría en material dragado del mar y en suelos donde la napa freática está muy cercano a la cota del terreno. Esto puede deberse a que las ecuaciones de

consolidación usados en la práctica ingenieril han sido formuladas para materiales saturados, y las que tienen en cuenta las propiedades y características particulares de los suelos parcialmente saturados aún solo tienen aplicaciones en la academia, universidades y para fines de investigación. Como se mencionó en el capítulo 2, ecuaciones de consolidación han sido formuladas desde los inicios de la década de los 40. Murray & Sivakumar (2010), manifiestan que cuando un suelo está en un estado insaturado, el tiempo necesario para alcanzar un estado de equilibrio puede ser significativamente más largo que el del suelo en un estado saturado; por lo tanto, se pueden experimentar tiempos de consolidación prolongados bajo succiones elevadas. La recopilación de datos de caolinita que se han realizado por parte de algunos autores, como Fredlund, ha demostrado que el coeficiente de consolidación de la caolinita insaturada puede ser alrededor de 10 veces menor que en condiciones saturadas (Fredlund & Rahardjo, 1993; Murray & Sivakumar, 2010; Fredlund et al., 2012). Esta reducción sin duda tiene una gran repercusión al momento de calcular el grado de consolidación para suelos parcialmente saturados.

A continuación, se procederá a recopilar la información de distintas investigaciones donde se han implementado los distintos sistemas de precarga y drenes verticales para acelerar el asentamiento del terreno y mejorar sus propiedades geotécnicas, tanto para suelos parcialmente saturados como saturados.

3.1 Drenes verticales

Hoy en día, los drenajes prefabricados en forma de banda son los más utilizados y los PVD a menudo se refieren a este tipo de drenaje. El objetivo principal de estos drenes verticales es generar una trayectoria más corta para el agua, de esta manera, acelerar el proceso de consolidación del terreno (Holtz et al., 1991). La eficiencia del PVD en la descarga de agua depende no solo de la capacidad de descarga del PVD, sino también de la permeabilidad del

suelo circundante y la longitud del drenaje (Han, 2015). Los PVD deben tener suficiente resistencia a la tracción para sobrevivir durante su instalación. Bo y col. (2003) sugirió que las resistencias a la tracción del núcleo, el filtro, el drenaje completo y el drenaje empalmado deberían ser superiores a 1 kN a una deformación por tracción del 10% tanto en condiciones secas como húmedas.

Tanto para la carga por vacío como para la carga con material de suelo, los drenajes verticales pueden funcionar con buena resistencia. En otras palabras, para algunas condiciones del subsuelo, instalaciones de drenaje vertical y cargas impuestas, la capacidad de descarga movilizada de los drenajes verticales puede ser menor que la capacidad de descarga mínima requerida para una condición de drenaje libre. (Mesri & Khan, 2012).

Yuanqiang Cai et al. (2017) realizó una investigación del uso de drenes verticales prefabricados en un sistema de precarga al vacío para el mejoramiento de un suelo limoso dragado en un proyecto en Wenzhou Oufei, China. En ella demostró la importancia de la correcta colocación e instalación de los drenes verticales para obtener un mejor desempeño en el proceso de asentamientos (ver Figura 7) y en la mejora de las propiedades de resistencia del suelo (ver Figura 8).

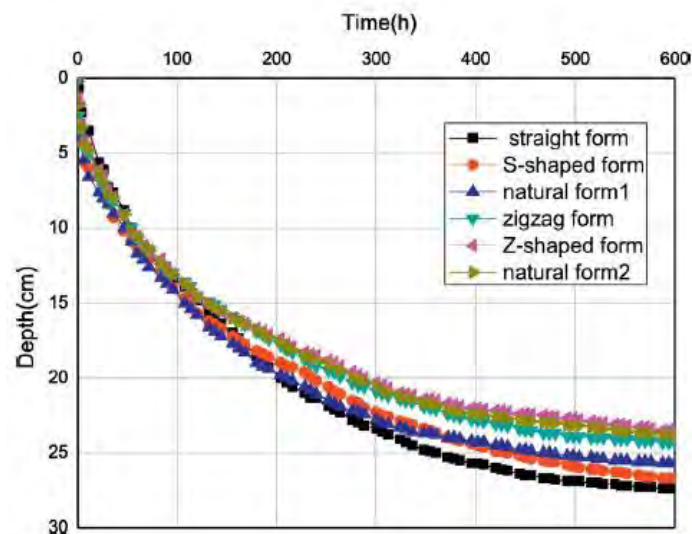


Figura 7. Asentamientos versus tiempo de los distintos tipos de drenes prefabricados.

Nota. Tomado de “Experimental tests on effect of deformed prefabricated vertical drains in dredged soil on consolidation via vacuum preloading”, por Cai et al., 2017.

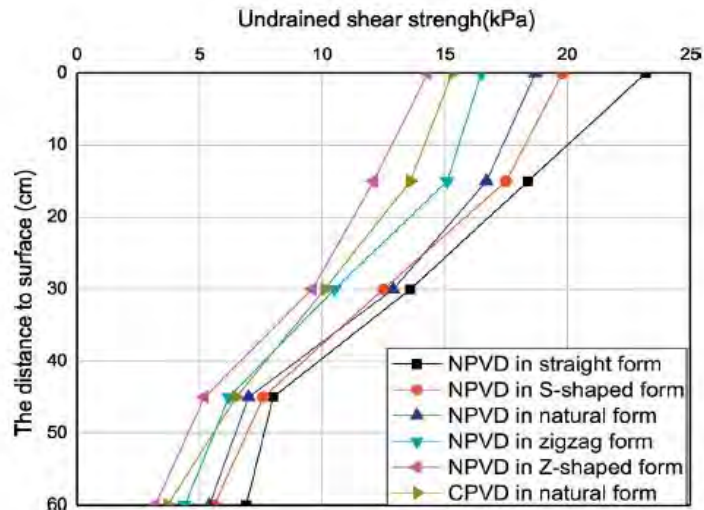


Figura 8. Resistencia al corte no drenada obtenido de ensayos de veleta

Nota. Tomado de “Experimental tests on effect of deformed prefabricated vertical drains in dredged soil on consolidation via vacuum preloading”, por Cai et al.,2017.

Yuanqiang Cai et al. (2017) demostró que el tipo NPVD (ver figura 9), en el cual el filtro se adhiere al núcleo mediante termofusión para formar un cuerpo integrado, en una forma recta es la que mejor desempeño ha obtenido.

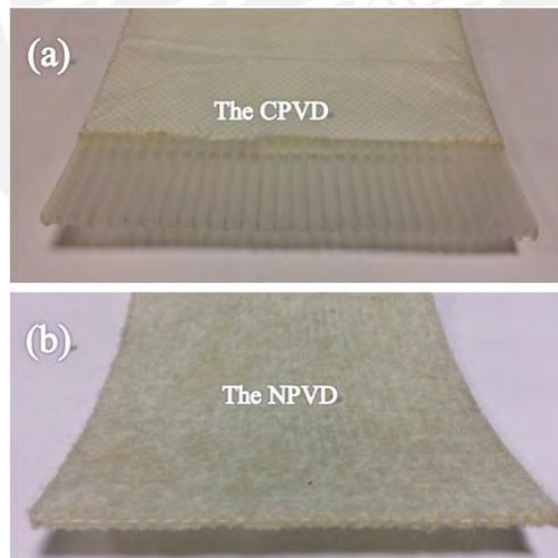


Figura 9. Tipos de drenes prefabricados

Nota. Tomado de “Experimental tests on effect of deformed prefabricated vertical drains in dredged soil on consolidation via vacuum preloading”, por Cai et al.,2017

3.2 Implementación de precargas convencionales

La precarga convencional consiste en implementar en el campo un relleno en el terreno que se desea mejorar sus propiedades geotécnicas. Este relleno puede estar conformado por un geomaterial o ser un tanque de agua. Han (2015), recomiendan obtener estos parámetros para el correcto diseño e implementación del método:

- Resistencia al corte no drenada, coeficiente de permeabilidad y consolidación, relación de vacíos inicial, esfuerzo de preconsolidación, índices de compresión y recompresión, índice de compresión secundaria y espesor del suelo blando.
- Profundidad del nivel freático y condición del drenaje.
- Tamaño del área de precarga e intensidad de carga
- Tasa de carga
- Tiempo disponible para precarga
- Carga de estructura final
- Factores de seguridad requeridos contra fallas de rodamientos y pendientes
- Asentamiento tolerable post-construcción
- Vida de servicio

En caso se requiera implementar drenes verticales, se deben considerar adicionalmente estos parámetros:

- Tipo, dimensión, longitud, capacidad de drenaje de drenajes verticales
- Patrón y espaciamiento de drenajes verticales

Este sistema de precarga induce un movimiento hacia afuera en la dirección horizontal. Esto puede observarse en la figura 10. Mientras que el sistema de precarga con vacío induce un movimiento hacia dentro.

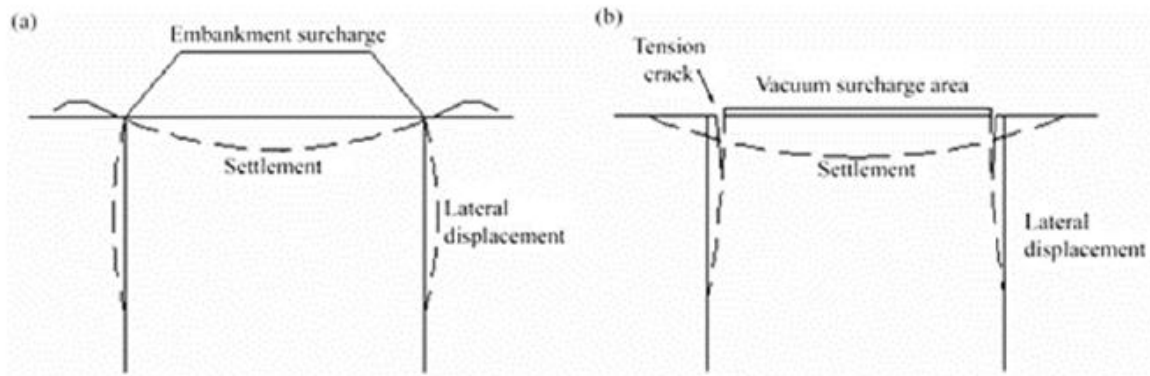


Figura 10. Deformación lateral del suelo debajo de un (a) relleno y de una (b) presión al vacío

Nota. Tomado de “Sustainability of combined vacuum and surcharge preloading”, por Griffin & O’Kelly, 2014)

Este fenómeno se pudo observar, medir y analizar por Tang & Shang (2000). Esta investigación se realizó en el aeropuerto de Yaoqiang, China. La pista del aeropuerto posee 2600 m de largo y 60 m de ancho, la napa freática se encuentra aproximadamente a 3 metros del nivel del terreno. El perfil del suelo y las propiedades en el sitio, medidos a partir de 54 sondeos que se realizaron lo largo de la pista se resumen en la *Tabla 1*.

Tang & Shang utilizaron la formulación de Barron (1948), la cual es usada para estimar el tiempo requerido para alcanzar un grado de consolidación y asentamiento (s_d). Esta fórmula fue aplicada para todas las capas excepto la capa 1, la cual está insaturada y está formada por arena limosa. Para esta capa arenosa se utilizó la siguiente formulación:

$$s = \frac{e_0 - e_f}{1 + e_0} h$$

donde e_0 = índice de vacíos inicial, e_f = índices de vacíos final y h = espesor de la capa

Tabla 1.

Perfil y propiedades del suelo del proyecto Yaoqiang Airport

Nº de capa	Descripción	Profundidad (m)	w (%)	γ (kN/m ³)	e	c_v (cm ² /s)	k_s (cm/s)
1	Arena limosa	0-3	12-18	15.6-19.0	0.83-0.98	-	2.8×10^{-2}
2	Arcilla limosa	3-5	26-31	19.0-19.5	0.85-0.88	0.042	1.87×10^{-5}
3	Limo	5-7.5	28-32	19.0-19.2	0.73-0.81	0.035	7.85×10^{-5}
4	Arcilla blanda	7.5-11.5	32-40	17.2-19.2	1.1-1.6	0.001	1.55×10^{-6}
5	Arcilla blanda	11.5-20	22-28	19.3-20.3	0.60-0.70	0.021	2×10^{-5}

Nota. Modificado de Vacuum preloading consolidation of Yaoqiang Airport runway, por Tan & Shang, 2000

Para esta investigación se realizaron sistemas de precarga con relleno y al vacío. Los detalles de los resultados del método de precarga con vacío serán discutidos más adelante para este mismo proyecto. Se colocaron extensómetros e inclinómetros en el terreno para medir asentamientos y los desplazamientos laterales que induce este tipo de relleno. Los resultados de la precarga de relleno se muestran en la *Tabla 2*.

Tabla 2.

Análisis de asentamiento de la sobrecarga de relleno

Nº de capa	Descripción	Localización de extensómetros		Asentamiento (cm)				
		Elevación	Profundidad (m)	s medido	Desplaz. Lateral	s_{1D}	s_d diseño	s_{1D}/s_d
1	Arena limosa	20.1	2	6.2	0.4	5.8	3.34	1.71
2	Arcilla limosa	16.1	6	4.8	0.44	4.36	3.15	1.38
3	Limo	14.6	7.5	5.8	0.48	5.32	4.05	1.31
4	Arcilla blanda	11.6	10.5	10.2	0.53	9.67	4.85	1.99
5	Arcilla blanda	10.1	12	6.7	0	6.7	4.22	1.59
			Total	33.70	1.85	31.85	19.61	1.62

Nota. Modificado de Vacuum preloading consolidation of Yaoqiang Airport runway, por Tan & Shang, 2000

Las mediciones de desplazamiento medido (s medido) que se muestran en la *Tabla 2* representan la combinación de los efectos de consolidación unidimensional (s1D) y el desplazamiento lateral del suelo. Se puede observar que este tipo de precarga origina un desplazamiento lateral positivo, cuya magnitud total fue de 1.85 cm. Este desplazamiento lateral genera un valor de asentamiento total medido (33.70 cm) mayor que el asentamiento calculado debido a la consolidación unidimensional (31.85 cm).

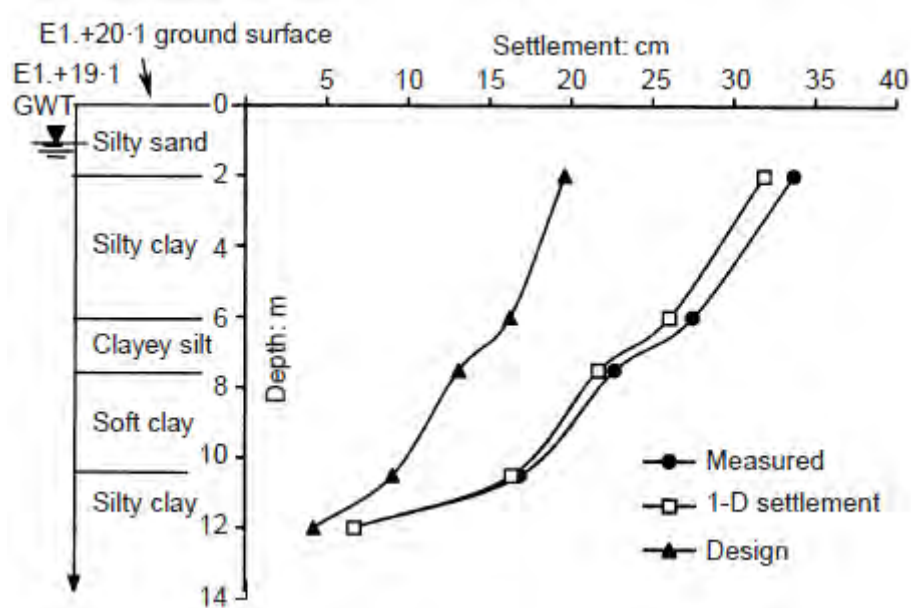


Figura 11. Perfil de asentamientos debido a una precarga de relleno

Nota. Tomado de “Vacuum preloading consolidation of Yaoqiang Airport runway”, por Tan & Shang, 2000

Asimismo, se puede observar que el asentamiento calculado para el diseño en base a la ecuación de Barron (1948) ha subestimado el grado de consolidación y el asentamiento. Esto puede deberse a que la fórmula de Barron necesita del coeficiente de consolidación horizontal de consolidación, el cual es muy difícil de estimar. También, las asunciones que se realizaron

fueron que el material estaba completamente saturado y era homogéneo, y que la zona de influencia de cada PVD ha sido cilíndrica.

En base a la investigación anterior, predecir los asentamientos del suelo bajo una precarga de relleno utilizando ecuaciones empíricas que realizan muchas asunciones no llega a ser preciso ni confiable. Ye et al., (2013) realizó un análisis bidimensional (2D) y tridimensional (3D) en un programa de elementos finitos para evaluar el desempeño de un terraplén construido sobre suelo blando mejorado por columnas suelo-cemento (estos son mezclados in situ por un auger) y PVDs. Para calibrar el modelo y comparar resultados instaló diferentes tipos de instrumentación geotécnica tales como piezómetros, celdas de presión y placas de asentamiento. La distribución de la instrumentación puede apreciarse en la Figura 12.

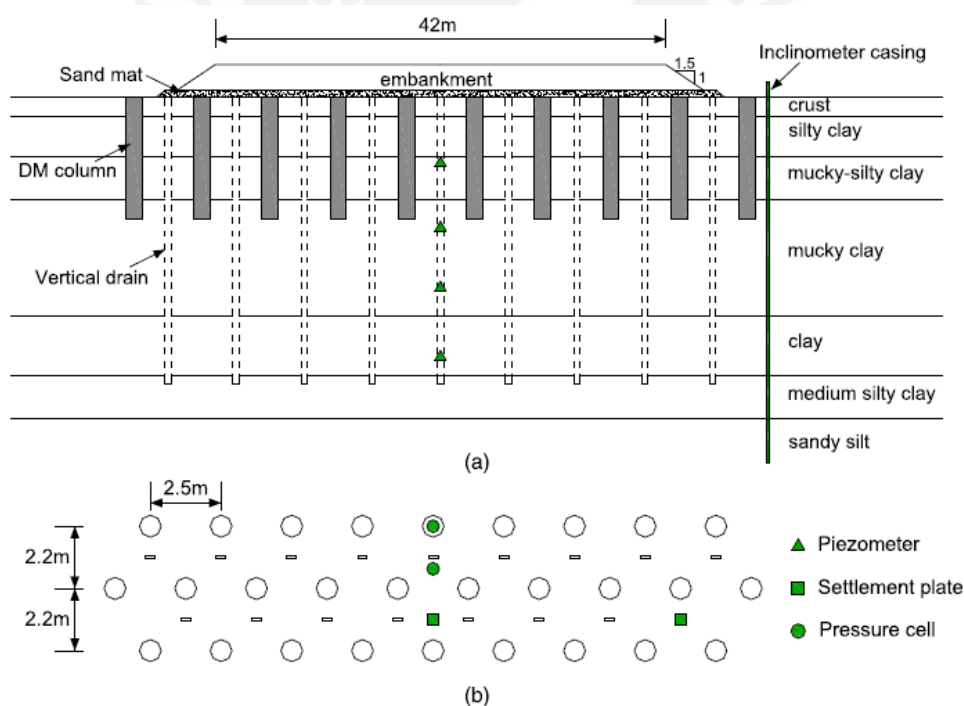
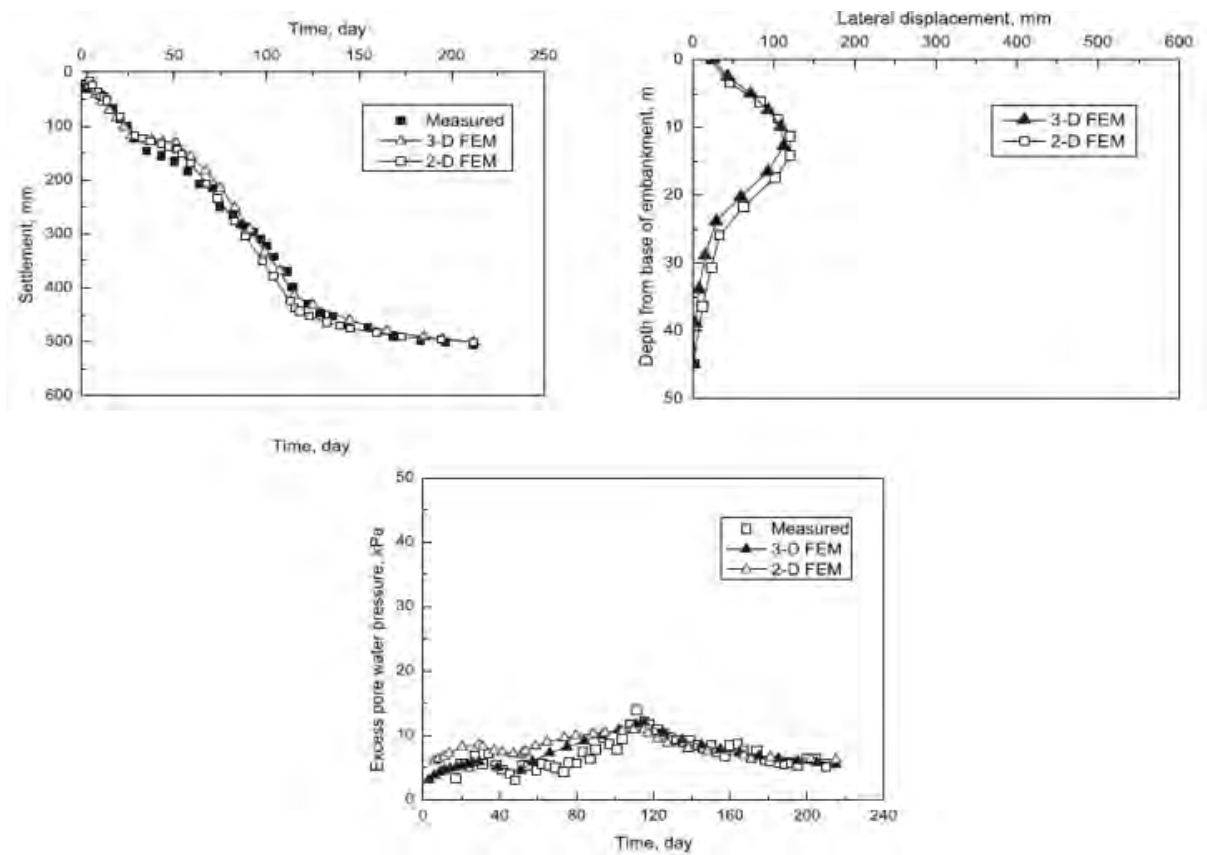


Figura 12. Esquema del terraplén (no a escala): (a) perfil; (b) vista en planta

Nota. Tomado de “Performance evaluation of an embankment of soft soil improved by Deep mixed columns and prefabricated vertical drains”, por Guan-Bao Ye et al., 2013

Los asentamientos calculados, el exceso de presión de agua intersticial, la transferencia de carga del suelo circundante a las columnas y los desplazamientos laterales en ambos análisis

se comparan con los datos de campo y se encontró una buena concordancia entre los datos calculados y medidos. Dichos resultados y comparaciones se pueden observar en la Figura 13. Ye et al., (2013) resalta que los resultados numéricos y de campo mostraron que las columnas suelo-cemento mejoraron la estabilidad del terraplén sobre suelo blando, mientras que los PVD aceleraron la consolidación del suelo blando.



Nota. Tomado de “Performance evaluation of an embankment of soft soil improved by Deep

Figura 13. Comparación de los datos obtenidos de la instrumentación con los modelos 2D y 3D del terraplén

mixed columns and prefabricated vertical drains”, por Guan-Bao Ye et al., 2013.

3.3 Implementación de precarga al vacío

La precarga al vacío, otra forma de precarga, no involucra material de relleno, ya que la carga aplicada a la superficie del suelo es en forma de vacío generalmente a través de un sistema de membrana sellada (Griffin & O’Kelly, 2014). La bomba de vacío produce una presión negativa (con respecto a la presión atmosférica) en un colchón de suelo permeable, ubicado

directamente debajo de la membrana, y a lo largo de drenajes verticales prefabricados (PVD). El vacío hace que el agua se drene del suelo y crea presiones de agua de poro negativas en el suelo. Para las arcillas blandas, en la práctica se pueden lograr presiones de vacío de hasta 90 kPa, aunque normalmente se considera 80 kPa para fines de diseño (Chu et al., 2008). Aplicación exitosa de la precarga al vacío para mejorar la resistencia de suelos blandos (Holtz, 1975; Choa, 1989, Tang y Gao, 1989; Chu et al. 2000). Cuando se requiere una precarga más alta, se puede aplicar una combinación de vacío y recarga de llenado. En comparación con el método de recarga de llenado para una carga equivalente, el método de precarga al vacío es más barato y rápido (Chu et al. 2000). El método de precarga al vacío también se ha incorporado en el proceso de recuperación de tierras cuando material de arcilla dragada del lecho marino se utiliza como relleno para la recuperación de tierras (Cai et al., 2017; Lei Lu, et al., 2017; Lei Qi, et al., 2017).

Tang & Shan (2000) también aplicaron para el proyecto del aeropuerto de Yaoqiang la tecnología de precarga con vacío con membrana. Instrumentaron la estructura y el terreno con el fin de medir asentamientos, presiones de poro y desplazamientos verticales. De esta manera obtuvieron los resultados que se muestran en la *Tabla 3*.

Tabla 3.

Análisis de asentamiento de la precarga con vacío.

Nº de capa	Descripción	Localización de extensómetros			Asentamiento (cm)			
		Elevación	Profundidad (m)	s medido	Desplaz. Lateral	s _{1D}	s _d diseño	s _{1D} /s _d
1	Arena limosa	19.1	2.5	7.5	-1.86	9.36	5.20	1.8
2	Arcilla limosa	16.6	5.0	4.3	-0.48	4.78	3.32	1.44
3	Limo arcilloso	14.1	7.5	2.7	-0.36	3.06	3.20	0.97
4	Arcilla blanda	11.6	10.0	13.3	-0.11	13.1	7.19	1.87
5	Arcilla limosa	9.6	12.0	4.8	0.00	4.8	3.88	1.24
			Total	32.6	-2.81	35.41	22.79	1.55

Nota. Modificado de Vacuum preloading consolidation of Yaoqiang Airport runway, por Tan & Shang, 2000

Estos resultados demuestran que el método de precarga con vacío succiona el suelo, provocando que el desplazamiento lateral sea hacia dentro del área de tratamiento, es por eso que obtenemos valores negativos para esta medida. En la Figura 14 se puede observar las mediciones realizadas por el inclinómetro. Se aprecia que el asentamiento por consolidación unidimensional es menor que el medido por la instrumentación en los 11 primeros metros.

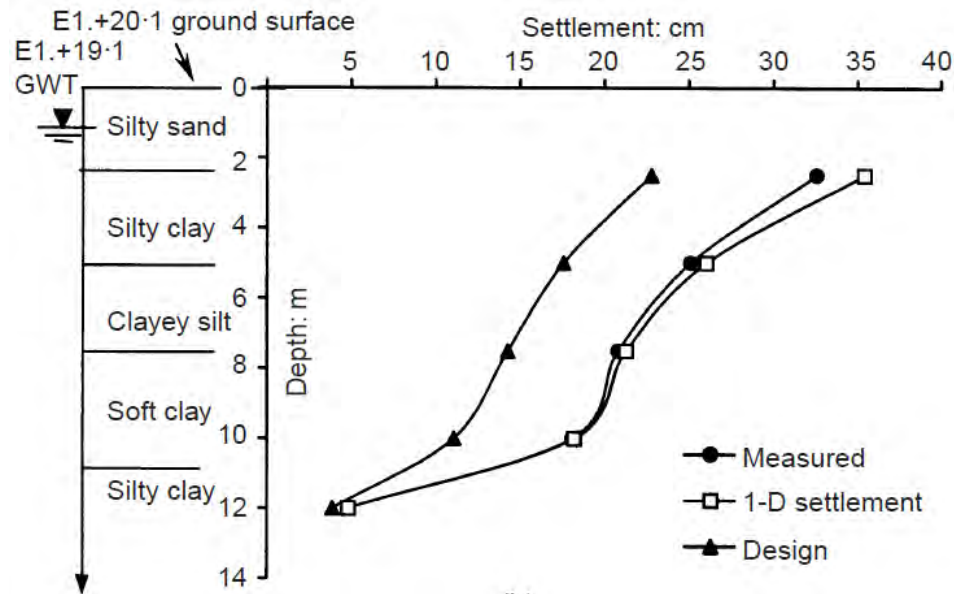


Figura 14. Perfil de asentamientos debido a una precarga de vacío.

Nota. Tomado de “Vacuum preloading consolidation of Yaoqiang Airport runway, por Tan & Shang”, 2000

En la Figura 15, se puede apreciar la comparación del desplazamiento lateral causado por la precarga con material de relleno y por la precarga con vacío. Este registro fue realizado por dos inclinómetros ubicados a 2.5 m y a 7.5 m del borde del área de precarga de relleno, los cuales registraron desplazamientos laterales hacia afuera de 20 a 30 mm. Para el área donde se realizó la precarga con vacío, se registró un desplazamiento lateral hacia adentro de 100 mm y de 20 mm para los inclinómetros 1 y 2 respectivamente.

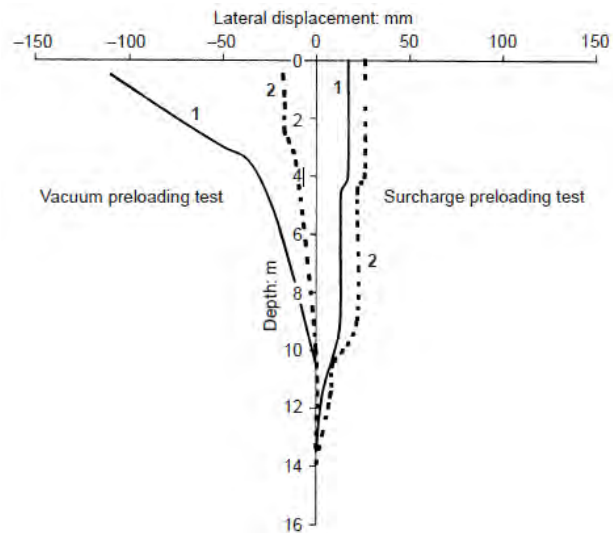


Figura 15. Comparación del desplazamiento lateral entre sistemas de precarga

Nota. Tomado de “Vacuum preloading consolidation of Yaoqiang Airport runway”, por Tan & Shang, 2000

Tanto la precarga de relleno como la de precarga con vacío lograron el objetivo de mejorar el suelo en términos de asentamiento bajo la presión de precarga de diseño para el proyecto del aeropuerto de Yaoqiang. En la Figura 16 se puede observar que la superficie de asentamiento en el caso de la precarga con relleno ha llegado al equilibrio luego de 90 días, alcanzando un asentamiento de 33.70 cm; mientras que para el método de precarga con vacío solo se ha necesitado 50 días para alcanzar dicho equilibrio, registrando un asentamiento de 32.6 cm. Esta diferencia de tiempo radica en las diferencias del proceso constructivo y del tipo de esfuerzos que generan en el área tratada cada uno de estos métodos.

La mejora de las propiedades mecánicas del suelo debido a este sistema de precarga con vacío ha sido estudiada en diversas investigaciones. Yan et al. (2009) analizó dos casos prácticos para el mejoramiento de un suelo arcilloso blando, saturado y en proceso de consolidación. En su investigación pudo concluir que después de la precarga con vacío, la resistencia al corte no drenada aumentó hasta tres veces.

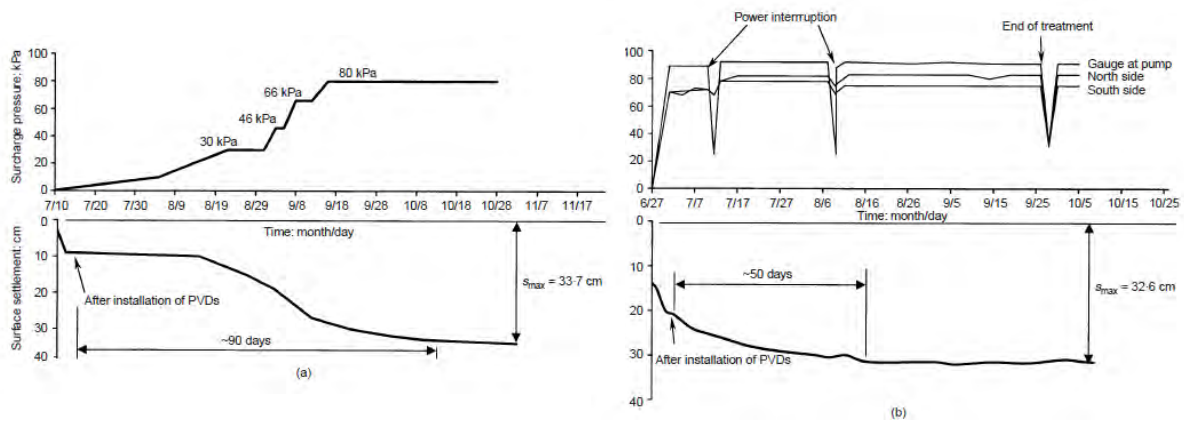


Figura 16. Superficie de asentamiento: (a) precarga de relleno y (b) precarga con vacío

Nota. Tomado de “Vacuum preloading consolidation of Yaoqiang Airport runway”, por Tan & Shang, 2000.

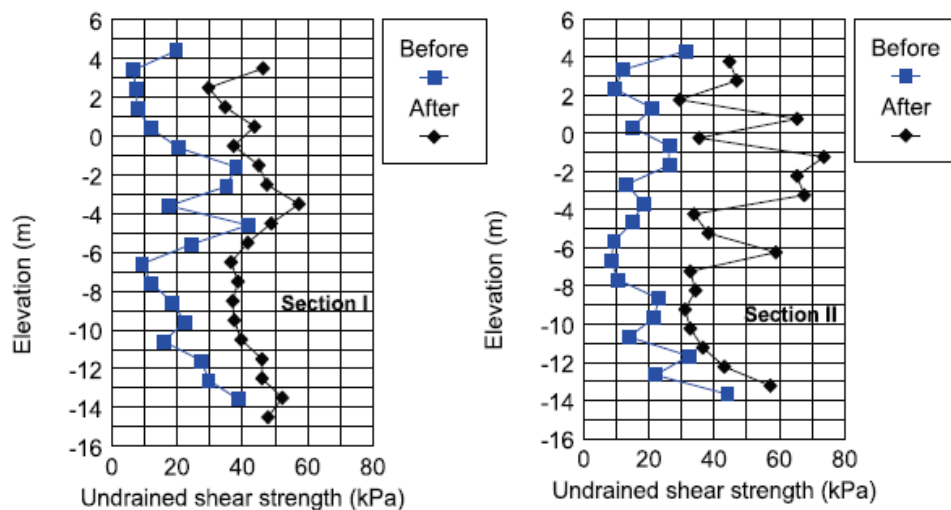


Figura 17. Resultados del ensayo de veleta antes y después de la precarga con vacío

NOTA. Tomado de “Mechanism of Using Preloading Method in Improving Soft Clay Layers”, por Shuwang et al., 2009.

Sin embargo, este aumento de la resistencia al corte, para el caso de la precarga con vacío, está limitada para valores menores de 100 kPa según Leong et al. (2000). En dicha investigación, los autores buscaron evaluar las diferencias entre los sistemas de precarga por relleno y vacío, para ello ensayaron muestras de arcillas blandas en dos diferentes instrumentos.

Un instrumento consistió en un edómetro de anillo fijo, el cual iba a representar las condiciones que genera la precarga de relleno al suelo. El otro instrumento consistía en una placa de presión, ya que la precarga con vacío induce una presión de poros negativa, el cual genera un aumento del esfuerzo efectivo en el suelo. Implementar la precarga con vacío puede provocar que el suelo tratado se convierte en no saturado debido a la aplicación de presiones negativas de poros (Leong et al., 2000). Para este caso de no saturación, la resistencia al corte depende de dos estados de esfuerzos independientes, el esfuerzo normal neto ($\sigma - \mu_a$) y la succión mátrica ($\mu_a - \mu_w$). Fredlund & Rahardjo (1993) relacionaron dichos esfuerzos en el criterio de falla extendida de Mohr-Coulomb (ver Figura 18), cuya ecuación es la siguiente:

$$\tau_{ff} = c' + (\sigma_f - \mu_a)_f \tan \phi' + (\mu_a - \mu_w)_f \tan \phi^b$$

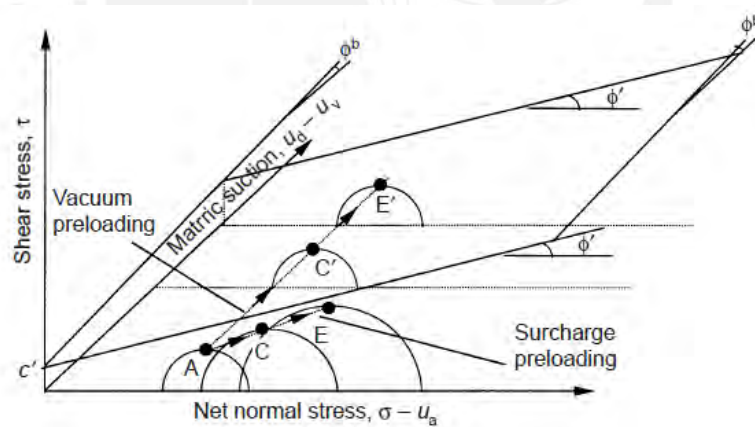


Figura 18. Envolvente de falla de Mohr-Coulomb extendido

Nota. Tomado de “Soil improvement by surcharge and vacuum preloading”, por Leong et al., 2016.

En la Figura 19 se muestran los resultados de ensayo de veleta a las muestras ensayadas en el edómetro y placa de presión. Se puede interpretar que la precarga con material de relleno produce una mayor mejora de la resistencia al corte que la precarga con vacío para una carga equivalente. Asimismo, los resultados de la prueba de placa de presión muestran que la

resistencia máxima al corte se obtiene con una succión matricial de menos de 100 kPa. Los aumentos adicionales en la succión matricial conducen a disminuciones en la resistencia al corte. Esto se debe al proceso de desaturación del suelo, el cual se puede identificar en la curva de retención de agua (curva característica) del suelo (Leong et al., 2000).

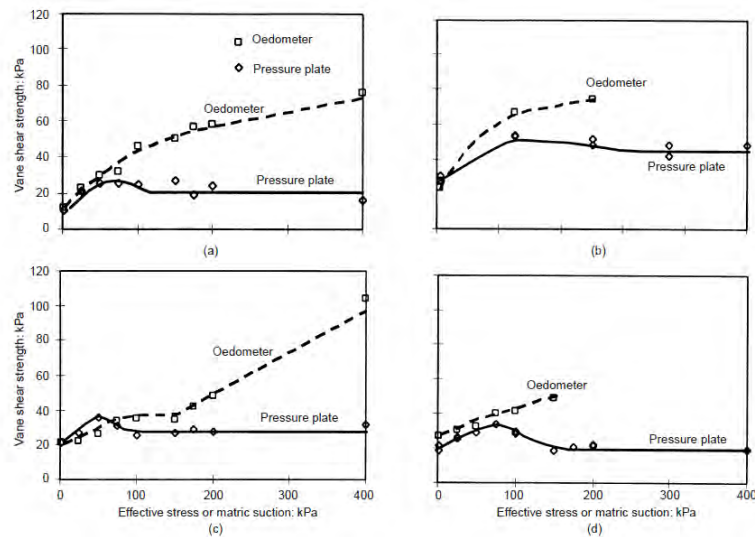


Figura 19. Comparación de la resistencia al corte obtenido del ensayo de veleta de las muestras ensayadas en el edómetro y placa de presión: (a) arcilla marina superficial; (b) arcilla medianamente rígida; (c) arcillas marinas profundas; (d) arcilla limosa

Nota. Tomado de “Soil improvement by surcharge and vacuum preloading”, por Leong et al., 2016.

3.3.1 Sistema con membrana hermética

En este sistema, se instala en el suelo los PVDs y en la superficie se coloca un manto de arena con tubos perforados horizontales. Esta red drenaje permitirá distribuir la succión uniformemente tanto al suelo como a los drenes. La membrana se coloca en la parte superior y sus bordes se inundan bajo un canal de lechada de bentonita, de esta manera se evita la fuga de la presión de vacíos. Luego, las bombas de vacío se conectan al sistema de descarga (ver Figura 20). Una ventaja importante aquí es que el vacío se puede propagar dentro de la plataforma de arena, a lo largo de la superficie del suelo y por los PVD. Una desventaja obvia es que la eficiencia se basa principalmente en la capacidad del sistema hermético para evitar cualquier

fuga de aire durante un período de tiempo significativo. Asimismo, este sistema no funciona correctamente en áreas extensas, por lo que es necesario dividir la zona e instalar el sistema en cada división. Esto último conlleva a una disminución de la eficiencia y el uso de pantallas impermeables (B. Indraratna et al., 2013; Buddhima Indraratna et al., 2014; Acosta et al., 2016).

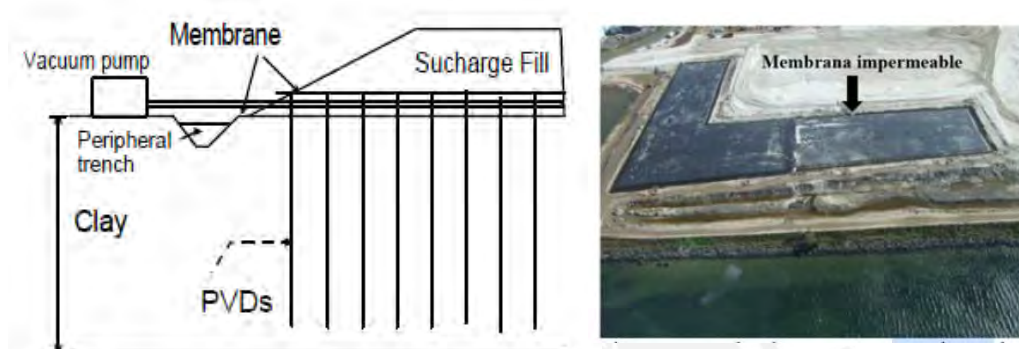


Figura 20. Sistema de precarga con vacío con membrana hermética

Nota. Modificado de “Consolidation of estuarine marine clays for coastal reclamation using vacuum and surcharge loading”, por Indraratna et al., 2014.

Indraratna (2013) analizó y discutió el desempeño del terreno mejorado y consolidado en el puerto de Brisbane, Australia. En este proyecto se seleccionaron un total de 8 subáreas para examinar el comportamiento de la consolidación por vacío y la influencia del espaciamiento de los drenajes y los tipos de drenajes. En ella se implementó un sistema de consolidación al vacío de tipo membrana con una serie de instrumentos de monitoreo, incluidos celdas de asentamientos, piezómetros e inclinómetros, registrando un grado promedio de consolidación superior al 85% después de un año. Asimismo, Lei et al. (2017) concluyó (para las condiciones de su modelo) que aplicar el tratamiento de precarga con vacío con membrana bajo un método de carga múltiple podría incrementar el grado medio de consolidación del llenado del relleno dragado hasta en un 94,5%, mientras que el método tradicional de precarga al vacío solo aumentó en un 69,09% (ver Figura 21). También manifiesta que este sistema de carga múltiple es mucho más beneficiosa para el refuerzo de cimientos, lo que significa que el método de

precarga al vacío de múltiples etapas debe usarse ampliamente en cimientos de llenado hidráulico similares.

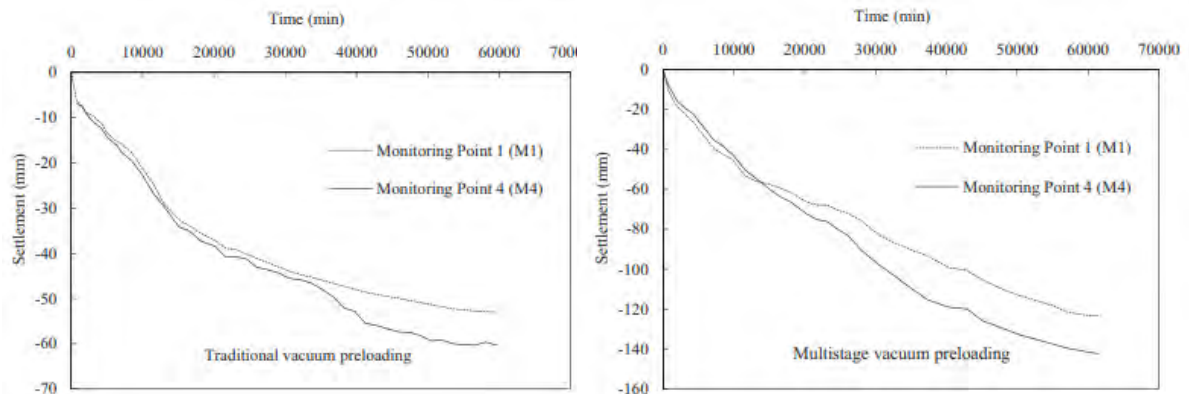


Figura 21. Comparación de asentamientos entre la precarga con vacío tradicional con el método de múltiples etapas.

Nota. Tomado de “Experimental study of the Clogging of dredger fills under vacuum preloading”, por Lei et al., 2017.

3.3.2 Sistema dren a dren (sin membrana hermética)

Cuando un área debe subdividirse y realizar la mejora con precarga con vacío individualmente, el sistema de membrana puede no ser una solución razonable. Para evitar este problema, las bombas de vacío se unen directamente a cada PVD individual mediante el sistema de tuberías (ver Figura 22). A diferencia del sistema de membranas donde cualquier fuga de aire puede afectar a todo el sistema, cada drenaje actúa de forma independiente. Algunas desventajas del sistema dren a dren son el mayor tiempo de instalación y un posible costo mayor en comparación con el sistema con membrana, debido a la mayor cantidad de tuberías a instalarse (B. Indraratna et al., 2013; Buddhima Indraratna et al., 2014; Acosta et al., 2016).

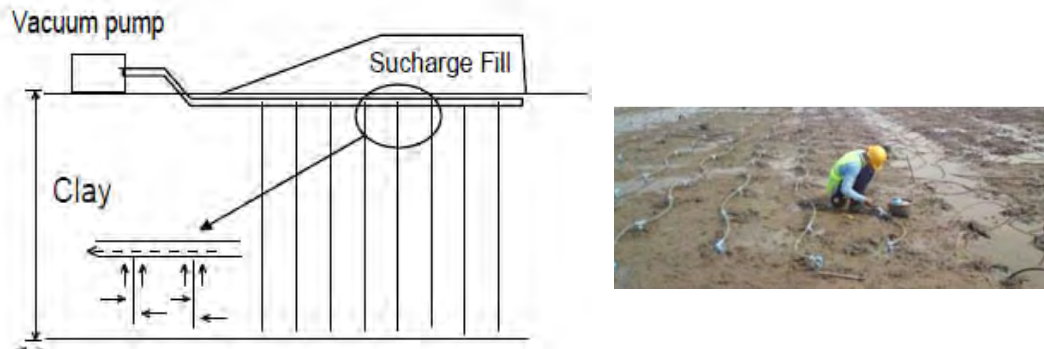


Figura 22. Sistema de precarga con vacío dren a dren (sin membrana hermética)

Nota. Modificado de “Consolidation of esturine marine clays for coastal reclamation using vacuum and surcharge loading”, por Indraratna et al., 2014.

Indraratna et al. (2014) concluye que la aplicación del sistema de vacío sin membrana es más eficaz en términos de controlar los desplazamientos laterales. En la Figura 23, se observa que para el sistema MS 34 del contratista B ha obtenido una relación de desplazamiento lateral con el esfuerzo total efectivo aplicado menor que los otros sistemas. Este sistema MS 34 comprende un sistema de precarga con vacío sin membrana hermética. Sin embargo, los investigadores resaltan que los datos del inclinómetro de campo son muy limitados para formular conclusiones generales.

Tanto el sistema de precarga con vacío con membrana y dren a dren, en base a la lectura técnica, han tenido buenos resultados en los proyectos donde se han implementado (Lopez, 2010). Long et al. (2015) para un proyecto de carretera en Vietnam construyeron y monitorearon ambos sistemas, obteniendo resultados similares en lo que respecta a asentamientos.

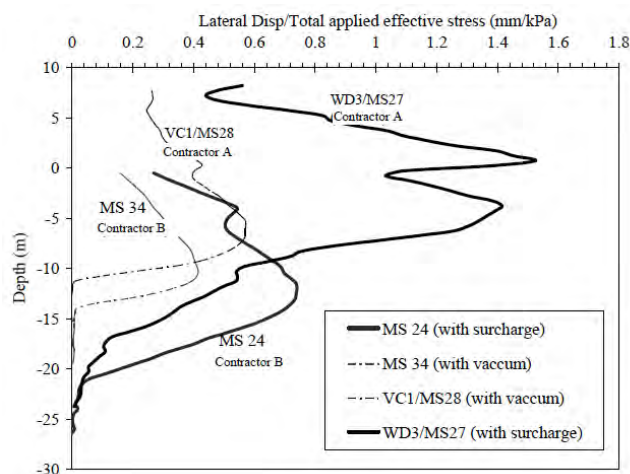


Figura 23. Comparación del desplazamiento lateral entre distintos sistemas de precarga.

Nota. Tomado de “Consolidation of estuarine marine clays for coastal reclamation using vacuum and surcharge loading”, por Indraratna et al., 2014

3.3.3 Implementación de precarga convencional con la de vacío

Según Jie Han (2015) la presión de vacío máxima para la precarga con este sistema está limitada por la presión atmosférica (teóricamente 100 kPa). Sin embargo, en la práctica, este valor oscila entre 60 y 80 kPa (Bergado et al., 1998; Tang y Shang, 2000; Chu y Yan, 2005) debido a la pérdida de vacío en el sistema. Cuando la presión requerida es superior a 80 kPa, se puede colocar un relleno adicional en el sistema de vacío creando así una precarga combinada de vacío y de material de relleno (Chu et al., 2000; Yan y Chu, 2005). Se conoce que la carga de relleno induce un desplazamiento horizontal hacia afuera mientras que la carga de vacío induce un desplazamiento horizontal hacia adentro. Si se utilizan por separado, ambos desplazamientos horizontales pueden llegar a ser indeseables. Sin embargo, cuando se combinan, el desplazamiento horizontal se contrarresta debido a los desplazamientos opuestos, lo que genera una disminución en el cizallamiento del suelo, lo que aumenta la estabilidad del terraplén (Tang & Shang, 2000; Chai, 2006).

Por ende, la precarga combinada con material de relleno (sobrecarga), presión de vacío y drenes verticales, se puede considerar como una estrategia completa para mejorar el suelo (ver Figura 24). Este sistema unificado permite reducir los asentamientos posteriores a la construcción debido a su eficiencia de tiempo y costos de construcción en comparación con otros enfoques. Las presiones de vacío se pueden aplicar inmediatamente en lugar de en etapas solo para la precarga de sobrecarga, pero sin el riesgo de inestabilidad geotécnica. También se pueden reducir las cantidades requeridas de relleno para lograr una consolidación de consolidación completa o cercana en un período de tiempo económicamente viable (Griffin & O’Kelly, 2014).

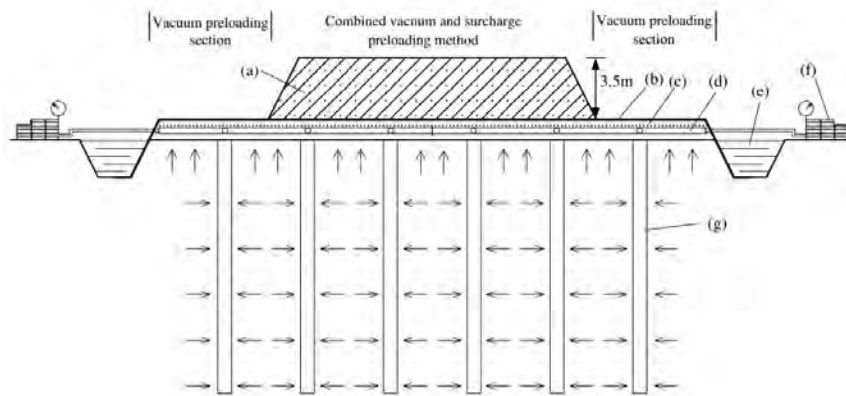


Figura 24. Método de sobrecarga de relleno y de vacío combinado

Nota. Tomado de “Case study: Ground improvement of Yangtze river floodplain soils with combined vacuum and surcharge preloading method”, por Din et al., 2019

Mohamedelhassan y Shang (2002) obtuvieron una solución para la consolidación unidimensional de vacío y precarga combinada. Ellos consideraron que la presión de agua de poro en exceso bajo carga combinada es la suma de las presiones de agua de poro en exceso bajo carga de vacío y carga debido al relleno por separado. Con base en las condiciones iniciales y de contorno, obtuvieron el grado medio de consolidación bajo carga combinada, que es el mismo que el de la solución de consolidación unidimensional de Terzaghi. Confirmaron además que el coeficiente de consolidación del suelo bajo vacío, relleno o carga combinada es

casi idéntico. Asimismo, Chai y Carter (2013) desarrollaron las soluciones para la consolidación del suelo bajo presión combinada de vacío y sobrecarga considerando el flujo vertical y radial (Han, 2015).

Idraratna et al., 2013 propuso la teoría de la celda unitaria que considera una carga de sobrecarga dependiente del tiempo y la aplicación de vacío para predecir el asentamiento y el exceso de presión de poro asociado, los cuales coincidían con las mediciones de campo tal y como se muestra en la Figura 25. El modelo analítico que propuso es una herramienta útil para predecir el rendimiento de arcillas blandas bajo este sistema combinado.

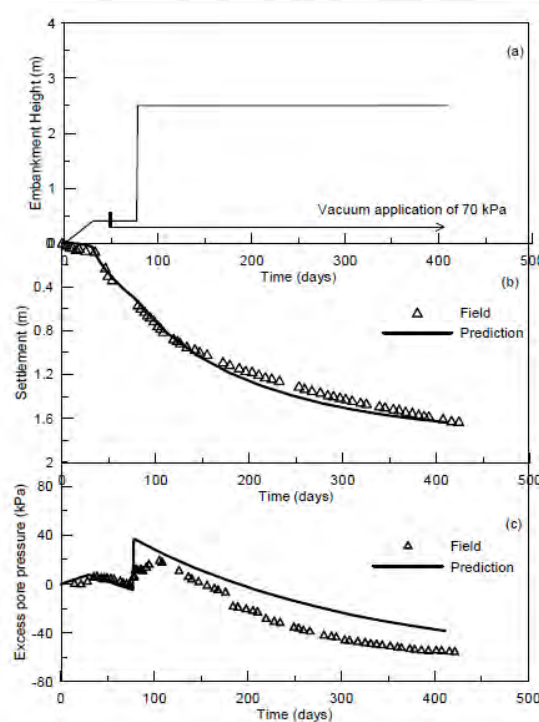


Figura 25. Comparación de resultados de instrumentación con el modelo analítico en asentamiento y exceso de presión de poros

Nota. Tomado de “Ground Improvement at the port of Brisbane, Australia using vertical drains and vacuum assisted preloading”, por Indraratna et. al., 2013.

3.3.4 Resumen comparativo de sistemas

En base a resultados y conclusiones de las investigaciones presentadas, así como grandes aportes en la evaluación de ventajas y desventajas de los distintos métodos de precarga por

parte de Jian Chu et al., 2008; Griffin & O’Kelly, 2014; Han, 2015 y Acosta et al., 2016, se presentan las siguientes tablas comparativas de los distintos métodos de precarga.

Tabla 4.

Comparación entre sistema de precarga con material de relleno y con vacío

Sistema de precarga	Aplicabilidad y ventajas	Limitaciones y desventajas
Precarga con material de relleno	<p>Induce tensiones verticales y horizontales distintas</p> <p>Ha sido aplicada de forma exitosa en muchos proyectos para la mejora de suelos blandos.</p> <p>La construcción del relleno de sobrecarga no es una tarea compleja.</p> <p>Los cambios en la resistencia al corte del material mejorado pueden ser descritos mediante la envolvente de Mohr-Coulomb. Se puede modelar el proceso de consolidación en programas de análisis numérico obteniendo resultados muy cercanos a lo medido (fuerte capacidad predictiva).</p>	<p>Genera exceso de presiones de poros positivas, el cual puede reducir el esfuerzo efectivo.</p> <p>Ante la necesidad de altas presiones, el terraplén debe tener una mayor altura, lo que conlleva a un mayor costo de operación principalmente por las partidas de movimiento de tierras.</p> <p>Genera exceso de presiones de poros positivas, el cual puede reducir el esfuerzo efectivo.</p> <p>Genera desplazamientos laterales hacia afuera del área de tratamiento.</p>
Precarga con vacío	<p>Induce tensiones de la misma magnitud en todas las direcciones.</p> <p>No existe peligro de falla por capacidad de carga al aplicar la presión de vacío instantáneamente.</p> <p>Si se combina con una sobrecarga de relleno, permite que el terraplén posea una menor altura. Esto puede evitar fallas no drenadas en las arcillas blandas tratadas.</p> <p>Ha sido aplicada de forma exitosa en muchos proyectos para la mejora de suelos blandos.</p> <p>El método, para una carga equivalente, es más rápido y barato que el método con material de relleno</p> <p>Se obtienen grados de consolidación mayores en menor tiempo que el método con material de relleno</p> <p>Los cambios en la resistencia al corte del material mejorado pueden ser descritas mediante la envolvente de Mohr-Coulomb extendida u otra donde se tome en cuenta la las propiedades de un suelo no saturado.</p>	<p>Posible desarrollo de grietas por tracción cercanas al área de tratamiento</p> <p>Lo sobrecarga de relleno a utilizar en combinación con este método debe estar libre de enrocado y material muy afilado para evitar el riesgo de perforar la membrana.</p> <p>Como la presión de agua intersticial puede ser negativa, los cambios de presión suelen ser complicados. Por ende, se debe monitorear la variación de la presión de poros durante la consolidación.</p> <p>Se suele llegar a niveles de presión de vacío de 80 kPa. En caso se necesiten presiones mayores, es necesario adicionar una sobrecarga de relleno encima del sistema.</p> <p>Genera desplazamientos laterales hacia dentro del área de tratamiento</p> <p>Puede provocar que el suelo tratado se convierte en no saturado debido a la aplicación de presiones negativas de poros</p> <p>Se necesita un equipo especializado para la implementación del método</p> <p>Se debe tener esencial cuidado de que área del terreno a tratar esté sellado y aislado de cualquier suelo permeable próximo, de esta manera evitar fugas y pérdidas de la presión de vacío.</p>

Dependiendo del tipo de precarga con vacío, será necesario subdividir el área tratada si esta tiene una gran extensión.

Tabla 5.

Comparación entre los tipos de sistema con vacío

	Aplicabilidad y ventajas	Limitaciones y desventajas
Membrana hermética	El vacío se puede propagar dentro de la plataforma de arena, a lo largo de la superficie del suelo y por los PVD	<p>Su eficiencia se basa principalmente en la capacidad del sistema hermético para evitar cualquier fuga de aire durante un período de tiempo significativo</p> <p>El sistema no funciona correctamente en áreas extensas, por lo que es necesario dividir la zona e instalar una membrana en cada división.</p> <p>Requiere pantallas impermeabilizantes si el área a tratar va a ser subdividida</p>
Dren a dren	<p>Cada drenaje actúa de forma independiente, por lo que una fuga en alguna línea no compromete completamente a todo el sistema</p> <p>Puede existir un mejor control de los desplazamientos laterales comparándolo con el sistema con membrana.</p>	Mayor tiempo de instalación y un posible costo mayor en comparación con el sistema con membrana debido a la mayor cantidad de tuberías necesarias

Capítulo 4. Conclusiones y Recomendaciones

4.1 Conclusiones

- Se evalúan los distintos sistemas de precarga y se pone en evidencia que con el sistema de precarga con vacío obtenemos grados de consolidación mayores en menor tiempo que el sistema de precarga con material de relleno. Asimismo, comparando los tipos de precarga con vacío, se concluye que no existe una investigación que demuestre que con uno se obtengan mejores resultados en lo que respecta al mejoramiento de las propiedades del suelo; sin embargo, con el sistema de dren a dren podemos abarcar mayores áreas de terreno y mayor eficacia en lo que respecta a reparar fugas.
- Se recopiló y se sintetizó información de los distintos sistemas de precarga. En el cual se presentaron la evolución en la historia de estos sistemas, características propias de cada uno, así como también recomendaciones para el diseño, limitaciones y aplicabilidad.
- Se analizó la efectividad del desempeño de los distintos sistemas de precarga en diversas obras de ingeniería e investigaciones en laboratorio. Se presentaron gráficas de presiones de poros, asentamientos y desplazamientos para observar el comportamiento del geomaterial sometido a estos sistemas. Asimismo, se presentaron conclusiones y recomendaciones de los distintos investigadores, así como también algunos comentarios propios.
- Se determinaron las ventajas, desventajas, limitaciones y aplicabilidad de los distintos sistemas de precarga; los cuales fueron presentados en tablas comparativas. De esta manera, es posible evaluar estos sistemas con el fin de identificar cual sistema sería el más eficiente para algún proyecto en específico.

- Se concluye que el proceso de consolidación producida por la precarga aumenta la rigidez y la resistencia del suelo. Asimismo, disminuye el asentamiento que se produce luego de la construcción de la estructura. Esto último evita tener grandes asentamientos totales y diferenciales que ponen en riesgo la serviciabilidad de la estructura.
- Se puede concluir que los drenes prefabricados de tipo NPVD, donde el filtro se adhiere al núcleo mediante fusión térmica para formar un cuerpo integrado, poseen un mejor rendimiento que los convencionales para mejorar suelos dragados.
- Se observa en los resultados mostrados que existe una diferencia cuantitativa en la mejora de la resistencia al corte cuando el suelo se somete a precarga con material de relleno y con vacío.
- Se concluye que los sistemas de precarga con material de relleno y con vacío aceleran el proceso de consolidación y mejoran las propiedades mecánicas del suelo de distinta forma. El sistema de precarga con material de relleno induce esfuerzos de poros positivos, esfuerzos verticales y horizontales desiguales y desplazamientos laterales hacia afuera del área tratada. El sistema de precarga con vacío induce esfuerzos de poros negativos, esfuerzos verticales y horizontales iguales y desplazamientos laterales hacia dentro del área tratada.
- Se concluye que la diferencia fundamental entre los dos tipos de sistemas de precarga con vacío es por las limitaciones que existen cuando se tratan grandes áreas de terreno y el proceso constructivo. Ambos sistemas han obtenido resultados similares en lo que respecta a asentamientos y grados de consolidación.
- Cuando se implementa un sistema combinado, el cual consiste en una precarga de material de relleno y el sistema con vacío, se reducen los desplazamientos laterales, ya que ambos sistemas generan desplazamientos laterales en direcciones opuestas. Estas

reducciones de desplazamientos reducen los esfuerzos de corte inducidos al suelo, por lo que reduce el riesgo de alguna inestabilidad.

4.2 Recomendaciones

- Se recomienda utilizar siempre que sea viable el sistema combinado, ya que permite aprovechar las ventajas de cada sistema y eliminar algunas limitaciones que se pueden originar si se implementan por separado.
- Se recomienda utilizar para cada sistema la envolvente de criterio de falla correcto para analizar los cambios de resistencia al corte del suelo. Para el caso de la precarga con vacío, es necesario tener conocimientos del comportamiento del suelo en estado no saturado, ya que la succión mátrica tiene gran importancia en el análisis de resistencia.
- Se recomienda implementar este sistema de tratamiento de terreno en el país (Perú), ya que es una tecnología barata y eficaz. Sin embargo, también se exhorta una correcta planificación en los proyectos, ya que ese tratamiento si requiere un tiempo “considerable” para alcanzar grados de consolidación requeridos que a veces puede provocar que algún proyecto sea inviable.

Referencias

- Acosta, N. P. ., López, M. J. M., Santiago, A. L. E., & Lopez, A. O. (2016). Sistemas de precarga con vacío para consolidación acelerada de suelos: membrana hermética o dren a dren. *Sociedad Mexicana de Ingeniería GEotécnica*, 18(December), 8.
- Alfaro Soto, M. (2008). Geotecnia en suelos no saturados. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 32(125), 471–482.
- Briaud, J.-L. (2013). *Geotechnical Engineering: Unsaturated and Saturated Soils* (1ra ed.). Wiley.
- Cai, Y., Qiao, H., Wang, J., Geng, X., Wang, P., & Cai, Y. (2017). Experimental tests on effect of deformed prefabricated vertical drains in dredged soil on consolidation via vacuum preloading. *Engineering Geology*, 222, 10–19. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.03.020>
- Canero, E., & Carnero, G. (2018). Análisis numérico de infiltración de agua en un suelo residual no saturado utilizando la curva de retención de agua. *Journal of High Andean Research*, 20(4), 439–450.
- Chu, J., & Yan, S. W. (2005). Estimation of degree of consolidation for vacuum preloading projects. *International Journal of Geomechanics*, 5(2), 158–165. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1532-3641\(2005\)5:2\(158\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1532-3641(2005)5:2(158))
- Chu, Jian, Yan, S., & Indraranita, B. (2008). Vacuum Preloading Techniques - Recent Developments and Applications. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 586–595. [https://doi.org/https://doi.org/10.1061/40971\(310\)73](https://doi.org/https://doi.org/10.1061/40971(310)73)
- Conte, E. (2004). Consolidation analysis for unsaturated soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 41(4), 599–612. <https://doi.org/10.1139/T04-017>
- Fredlund, D. G., & Rahardjo, H. (1993). *Soils Mechanics for Unsaturated Soils* (1ra ed.). John

- Wiley & Sons, Inc. [https://doi.org/10.1016/0267-7261\(93\)90011-f](https://doi.org/10.1016/0267-7261(93)90011-f)
- Fredlund, D. G., Rahardjo, H., & Fredlund, M. D. (2012). *Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice*. John Wiley & Sons, Inc.
- Griffin, H., & O'Kelly, B. (2014). Sustainability Of Combined Vacuum And Surcharge Preloading. *Geo-Congress*, 3826–3835.
- Han, J. (2015). *Principles and Practice of Ground Improvement* (Vol. 11, Issue 3). John Wiley & Sons, Inc. https://www.m-culture.go.th/mculture_th/download/king9/Glossary_about_HM_King_Bhumibol_Adulyadej's_Funeral.pdf
- Indraratna, B., Geng, X. Y., & Rujikiatkamjorn, C. (2012). Consolidation of Ground with Prefabricated Vertical Drains Combined with Time-Dependent Surcharge Loading in Membrane System. *GeoCongress 2012*.
- Indraratna, B., Rujikiatkamjorn, C., & Balasubramaniam, A. S. (2013). Ground Improvement at the Port of Brisbane, Australia Using Vertical Drains and Vacuum Assisted Preloading. *Sound Geotechnical Research to Practice*.
- Indraratna, Buddhima, Rujikiatkamjorn, C., & Balasubramaniam, A. S. (2014). Consolidation of estuarine marine clays for coastal reclamation using vacuum and surcharge loading. *Geotechnical Special Publication*, 233, 358–369. <https://doi.org/10.1061/9780784413265.029>
- Lei, H., Lu, H., Liu, J., & Zheng, G. (2017). Experimental study of the clogging of dredger fills under vacuum preloading. *International Journal of Geomechanics*, 17(12), 1–14. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0001028](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001028)
- Lei, H., Qi, Z., Zhang, Z., & Zheng, G. (2017). New Vacuum-Preloading Technique for Ultrasoft-Soil Foundations Using Model Tests. *International Journal of Geomechanics*, 17(9), 04017049. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gm.1943-5622.0000934](https://doi.org/10.1061/(asce)gm.1943-5622.0000934)

- Leong, E. C., Soemitro, R. A. A., & Rahardjo, H. (2000). Soil improvement by surcharge and vacuum preloadings. *Geotechnique*, 50(5), 601–605. <https://doi.org/10.1680/geot.2000.50.5.601>
- Lopez, N. P. (2010). *Incertidumbre en el análisis de flujo de agua en suelos*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Mesri, G., & Khan, A. Q. (2012). Ground Improvement Using Vacuum Loading Together with Vertical Drains. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 138(6), 680–689. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000640](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000640)
- Murray, E. ., & Sivakumar, V. (2010). *Unsaturated Soils* (1ra ed.). John Wilery & Sons, Inc.
- Ng, C. W. W., & Menzies, B. (2007). *Advanced Unsaturated Soils Mechanics and Engineering* (1ra ed.). CRC Press.
- Rahardjo, H., & Fredlund, D. G. (1995). *Xperimental Verifi Theory of Consolid Unsaturated Soils*. 766, 749–766.
- Tang, M., & Shang, J. Q. (2000). Vacuum preloading consolidation of Yaoqiang Airport runway. *Geotechnique*, 50(6), 613–623. <https://doi.org/10.1680/geot.2000.50.6.613>
- Ye, G. B., Zhang, Z., Han, J., Xing, H. F., Huang, M. S., & Xiang, P. L. (2013). Performance evaluation of an embankment on soft soil improved by deep mixed columns and prefabricated vertical drains. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 27(5), 614–623. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0000369](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000369)