



GEO-
INSTITUTE



6.º SIMPOSIO INTERNACIONAL DE CIMENTACIONES PROFUNDAS
Y MEJORAMIENTO DE SUELOS

Octubre 19-20, 2023 – CDMX, México



Visualización de la aceleración de la consolidación en un depósito arcilloso utilizando columnas de grava compactada

Visualization of consolidation acceleration in a clay deposit using Rammed Aggregated Piers

Luis SAUCEDO¹, José BIMBRERA¹ y Adrián CERINO¹

¹ Soilsolution

RESUMEN: Se llevó a cabo el modelado y visualización de la aceleración en la consolidación de un depósito arcilloso mediante el mejoramiento del suelo con Pilas de Agregado Compactado (PAC), utilizando el programa SIGMA de GEOSTUDIO. Inicialmente se generaron dos modelos 2D en los cuales se establecieron las condiciones necesarias para generar la consolidación. El primer modelo consistió en la simulación del comportamiento del depósito de arcilla bajo la acción de una carga axial, mientras que en el segundo modelo se añadieron las pilas de agregado compactado. Para la medición de los resultados, se analizó el cambio en la presión de poro en ambos modelos, en los mismos intervalos de tiempo, así como la deformación en la superficie.

ABSTRACT: Modeling and visualization of the acceleration in the consolidation of a clay deposit by soil improvement with Rammed Aggregate Piers (RAP) was carried out using GEOSTUDIO's SIGMA program. Initially, two 2D models were generated in which the conditions necessary to generate the consolidation were established. The first model consisted of the simulation of the behavior of the clay deposit under the action of an axial load, while in the second model the compacted aggregate piles were added. To measure the results, the change in pore pressure was analyzed in both models, at the same time intervals, as well as the deformation at the surface.

1 INTRODUCCIÓN

1.1 *Objetivo*

Llevar a cabo una comparación detallada del proceso de consolidación que se experimenta en un depósito arcilloso, tanto en situaciones en las que se ha implementado un mejoramiento mediante columnas de grava compactada, como en situaciones en las que no se ha realizado ningún tipo de mejora.

1.2 *Alcances*

Se desarrollaron 4 modelos con diferentes condiciones de saturación, en los cuales se comparó la velocidad con la que se disipa el exceso de presión de poro producida por las cargas del proyecto.

Los primeros dos modelos realizados tienen el nivel de aguas freáticas al nivel de terreno natural, por lo que se encuentran completamente saturados. El modelo A no cuenta con mejoramiento de terreno, mientras que el modelo B sí se encuentra mejorado.

Para los siguientes dos modelos, el nivel de aguas freáticas se posicionó a 2 m de profundidad, con lo que se replican las condiciones *in situ*. El modelo C no cuenta con mejoramiento de terreno, mientras que el modelo D sí se encuentra mejorado. En la Tabla 1, se resumen los parámetros de cada modelo.

Tabla 1. Condiciones de modelos analizados.

Modelo	Saturación	Mejoramiento
A	Total	No
B	Total	Sí
C	Parcial	No
D	Parcial	Sí

2 CONDICIONES DEL PROYECTO

2.1 *Descripción de la cimentación*

La cimentación se compone de una losa, la cual descarga al terreno una presión de 40 kPa y tiene una extensión de aproximadamente 3700 m².

2.2 *Condiciones Geotécnicas*

La exploración geotécnica realizada se compuso de una serie de sondeos SPT, los cuales revelaron que debajo del nivel de perforación se encontraban 9.5 m de arcilla de alta plasticidad y de consistencia media (CH), subyacente por limo de alta plasticidad y de consistencia blanda (MH), el cual se extendía hasta los 12.5 m de profundidad. Debajo de esto, se localizó limo de alta plasticidad y de consistencia firme (MH) hasta la profundidad máxima de exploración, la cual fue de 21 m.

El nivel de aguas freáticas se localizó a los 2 m de profundidad. En la Figura 1, se presenta el perfil estratigráfico idealizado con la exploración realizada.

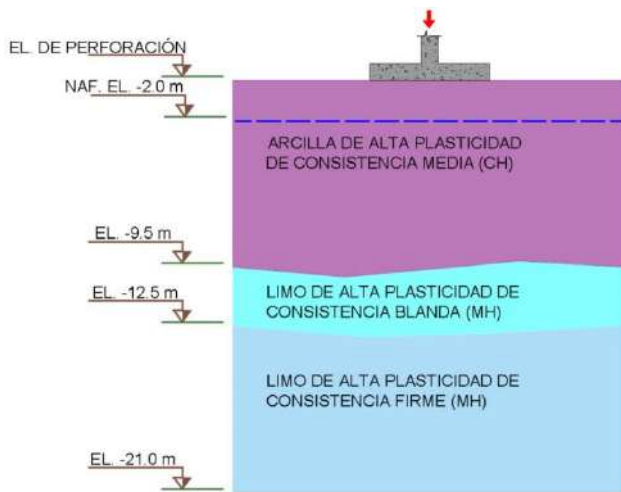


Figura 1. Estratigrafía del proyecto.

2.3 Características del mejoramiento

Después de revisar la información geotécnica, y realizar el análisis de asentamientos correspondientes, se determinó que el asentamiento a largo plazo de la estructura era mayor al límite permisible, por lo que se requería de un mejoramiento de terreno.

El mejoramiento se diseñó con Pilas de Agregado Compactado (PAC) con una longitud efectiva de 12 m, que ayudarán a reducir el asentamiento en los dos primeros estratos, ya que estos fueron los que presentaron un asentamiento mayor.

El diámetro de cada PAC es de 0.5 m (20 in), y tienen una separación de 2.5 m medidos centro a centro.

3 PILAS DE AGREGADO COMPACTADO

3.1 Definición

Las Pilas de Agregado Compactado (PAC) son un método de mejoramiento de suelo que consiste en la construcción de columnas en una malla regular que atraviesan suelos blandos y/o deformables (Alonso, 2014).

Estas columnas son rellenas con grava angular, de un tamaño que va de $\frac{3}{4}$ " a $1\frac{1}{2}$ " y con un bajo contenido de finos (menor al 5%), la cual se compacta por medios dinámicos para generar elementos poco deformables.

Debido a que las columnas tienen una rigidez superior a la del suelo circundante, éstas atraen una parte importante de la carga aplicada en superficie, mientras que la carga tomada por el suelo se puede reducir a niveles aceptables en términos de capacidad o asentamientos admisibles (Alonso, 2014).

3.2 Reducción de asentamientos por consolidación

Las PAC generan una reducción los asentamientos por consolidación, debido a que proveen al suelo de dos tipos de mejoramiento: drenaje radial y densificación.

La compactación de la PAC genera una densificación lateral (Figura 2), lo que provoca un aumento en el esfuerzo de preconsolidación, que a su vez se traduce en una mejora de las propiedades de compresibilidad.

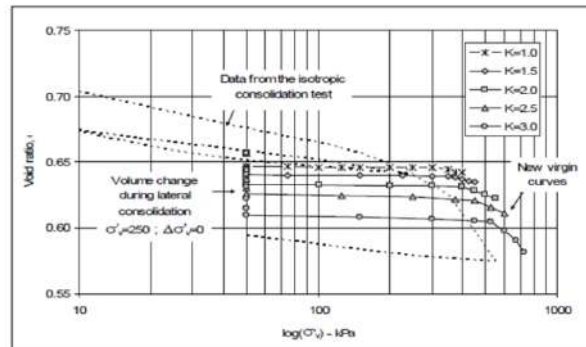


Figura 2. Aumento de la presión de preconsolidación con el aumento del esfuerzo de confinamiento horizontal (GFC, 2016)

El drenaje radial del suelo se acelera debido a que la grava utilizada para la construcción de las PAC genera espacios vacíos, además de que tiene un muy bajo contenido de finos, facilitando el flujo de agua a través de estos.

En la Figura 3 se puede observar un esquema de la aceleración que se generaría en el drenaje con la presencia de las PAC.

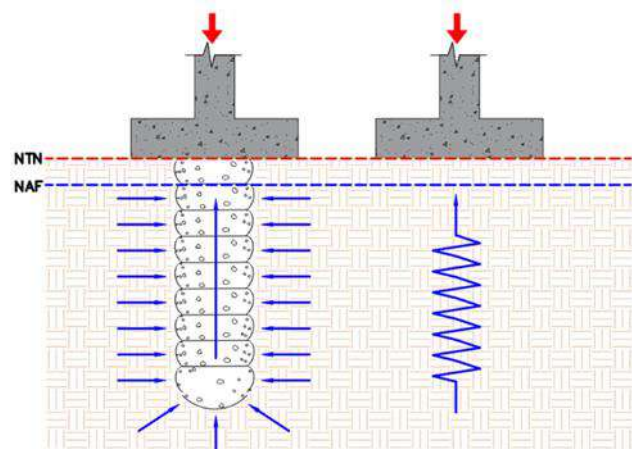


Figura 3. Reducción de trayectorias de drenaje al utilizar PACs.

Con la generación de la matriz de PAC las trayectorias de drenaje se ven acortadas, facilitando la disipación de la presión de poro generada en el suelo y acelerando el proceso de consolidación.

4 PARÁMETROS DE DISEÑO

El proceso de simulación *in situ* del terreno y su posterior mejoramiento se ejecutó mediante el software SIGMA, una herramienta integrada en el conjunto de aplicaciones GEOSTUDIO, en su versión de prueba.

Con el fin de simplificar el análisis, se creó un modelo geotécnico que representa un tramo de terreno con un ancho de 6 metros, en el cual se instalaron 3 PACs. La representación de la profundidad del terreno se ajustó de acuerdo con las especificaciones mostradas en el modelo geotécnico detallado en la Tabla 2.

Tabla 2. Modelo geotécnico utilizado.

No. de estrato	Espesor m	SUCS	γ_m kN/m ³	k m/s
1	9.5	CH	11	1×10^{-9}
2	3	MH	12.2	1×10^{-9}
3	8.5	MH	14.3	1×10^{-9}

Tabla 2 (continuación) Modelo geotécnico utilizado.

No. de estrato	C_c	C_r	OCR	ν
1	0.402	0.075	3.79	0.4
2	0.133	0.043	1.12	0.3
3	0.316	0.083	1.94	0.3

4.1 Condiciones de borde

En las fronteras laterales del modelo se impidieron las deformaciones horizontales. Asimismo, en la frontera inferior se impidieron las deformaciones horizontales y verticales. De esta manera, se garantiza que todas las deformaciones del modelo se vean traducidas a la superficie del mismo.

En la superficie se colocó una condición de borde de *Zero Pressure*, la cual tiene una carga de presión hidráulica constante de 0 kPa, y que simula la presión atmosférica, provocando que el flujo de agua ocurra en esa dirección.

También se definió una condición de borde (Figura 4) que simula una carga en la superficie y la cual provoca el exceso de presión de poro que posteriormente se disipará por medio de las PACs. Puesto que se requiere que el suelo reaccione a la carga, esta se definió con una función escalón, comenzando en 0 kPa y después manteniéndose en 40 kPa.

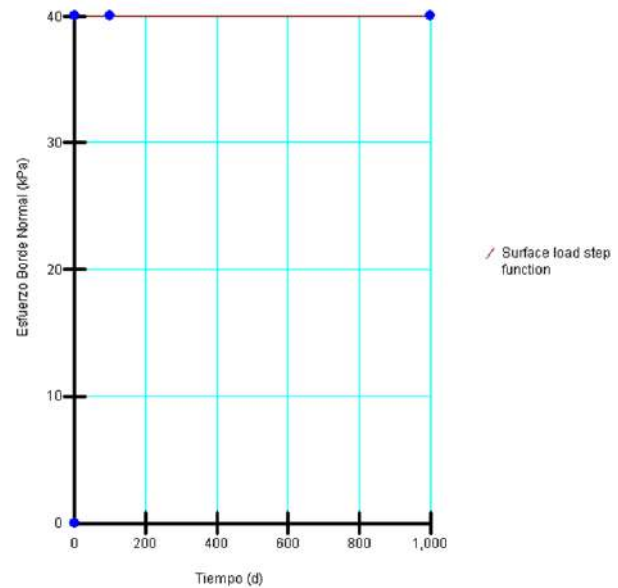


Figura 4. Función escalón utilizada.

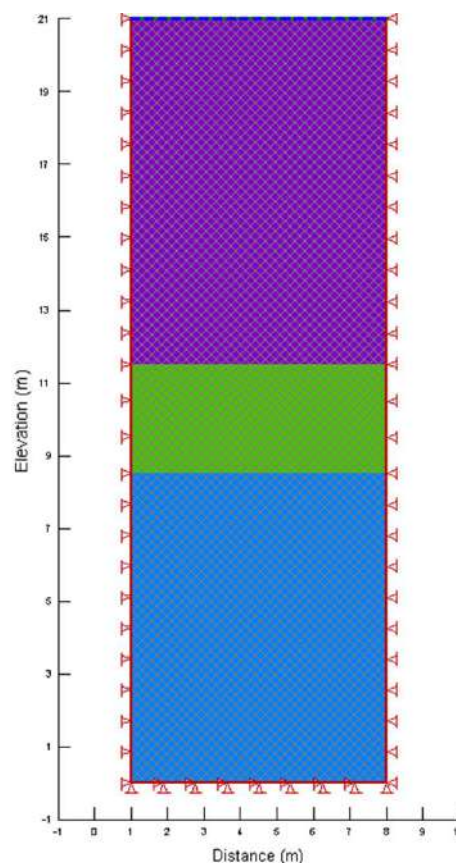


Figura 5. Condición *in situ* para los modelos A y B.

En los modelos A y B, el nivel de aguas freáticas se colocó en la superficie para simular una condición de suelo saturada. La condición *in situ* de estos modelos se presenta en la Figura 5. En los otros dos modelos, C y D, el nivel de aguas freáticas se colocó a 2 m de profundidad.

4.2 Condición parcialmente saturada

Puesto que, en las condiciones reales del proyecto, el NAF se encuentra a 2 m de profundidad, resulta necesario realizar un modelo con parámetros parcialmente saturados.

Para el modelado del comportamiento parcialmente saturado se estimó la curva característica de los materiales haciendo uso de los datos de granulometría y el límite líquido

5 RESULTADOS

Con el fin de comparar el proceso de disipación de la presión de poro entre los distintos modelos, se procedió a realizar mediciones en las siguientes áreas:

- En una línea vertical que se extiende entre las PACs, abarcando desde la superficie hasta alcanzar la profundidad máxima en la que se ha implementado el mejoramiento.
- En una línea horizontal ubicada a una profundidad de 1 metro en los casos de los modelos A y B.
- En una línea horizontal situada a 2 metros de profundidad para los modelos C y D.

5.1 Condición saturada

Como se puede observar en la Figura 6, la presión de poro se disipa más rápidamente que cuando no se tiene un mejoramiento (Figura 7), además, aunque el exceso de presión de poro parece estabilizarse, es claro que este se mantiene por encima de la condición hidrostática, mientras que en el modelo mejorado el exceso se disipa casi por completo.

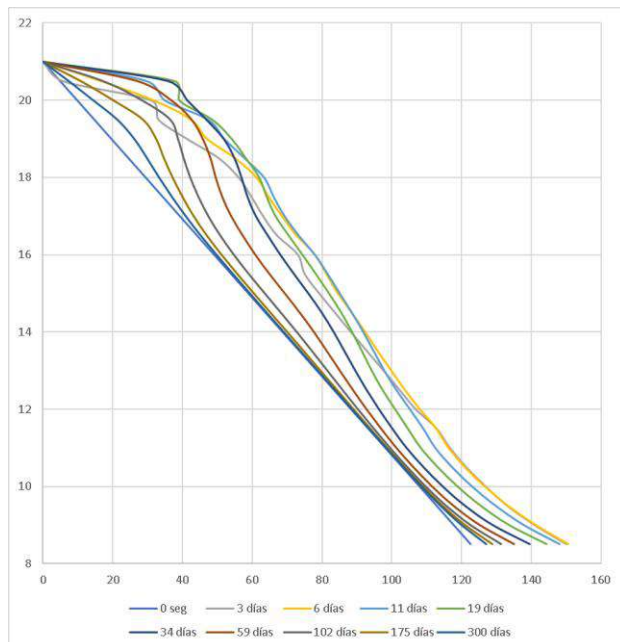


Figura 6. Presión de poro medida verticalmente entre las PACs en condición saturada.

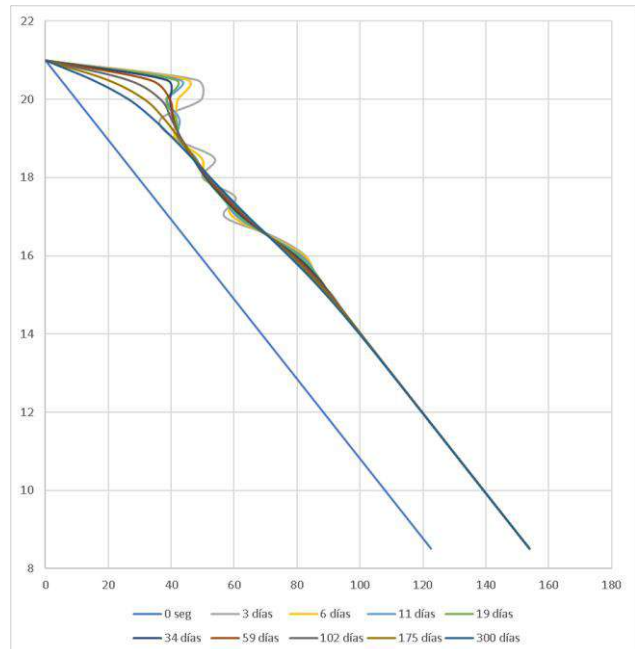


Figura 7. Presión de poro medida verticalmente sin PACs en condición saturada.

Por su parte, en las Figuras 8 y 9, se aprecia que cuando no se tiene un mejoramiento, el exceso de presión de poro se presenta en el centro de la cimentación y se disipa lentamente. Mientras que en el modelo con mejoramiento, el exceso de presión de poro solamente se presenta en las regiones entre las PACs, puesto estas lo disipan de manera mucho más rápida.

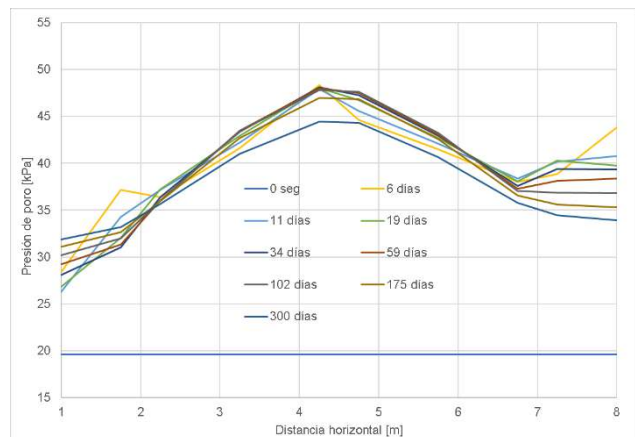


Figura 8. Presión de poro medida horizontalmente a un metro de profundidad en condición saturada sin mejoramiento

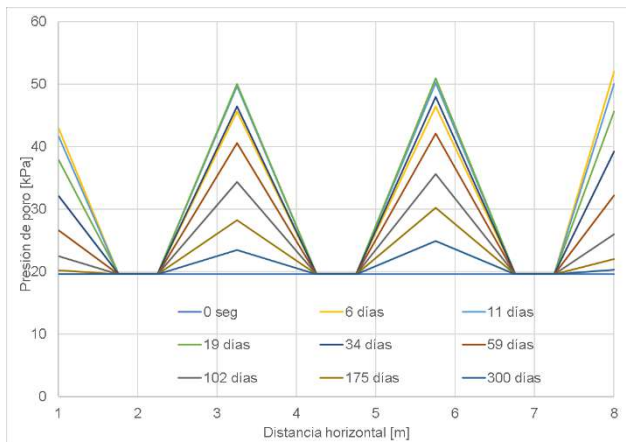


Figura 9. Presión de poro medida horizontalmente a un metro de profundidad en condición saturada con PACs.

5.2 Condición parcialmente saturada

En la comparación de las Figuras 10 y 11, nuevamente se observa que el exceso de presión de poro se disipa más fácilmente en el modelo que tiene el mejoramiento, además se observa que la disipación se lleva a cabo en toda la profundidad mejorada.

En las Figuras 12 y 13, se reafirma la observación de que las PACs ejercen un impacto favorable en el proceso de disipación del exceso de presión de poro, logrando una distribución más uniforme en toda la extensión del área de cimentación.

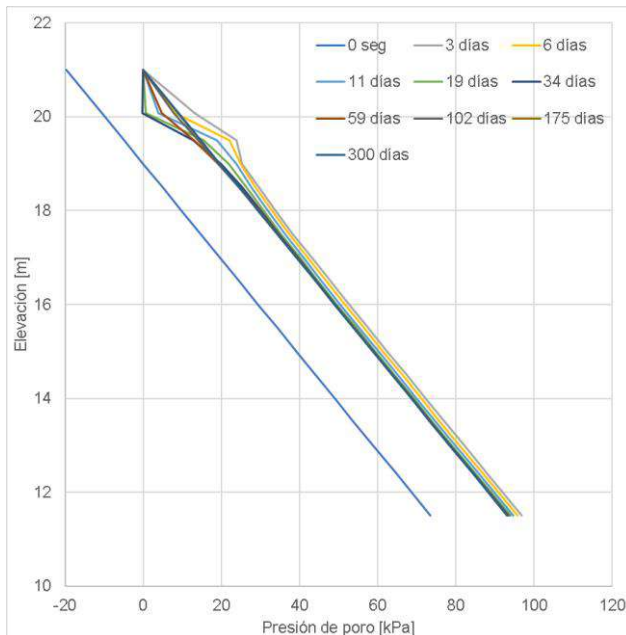


Figura 10. Presión de poro medida verticalmente entre las PACs en condición parcialmente saturada.

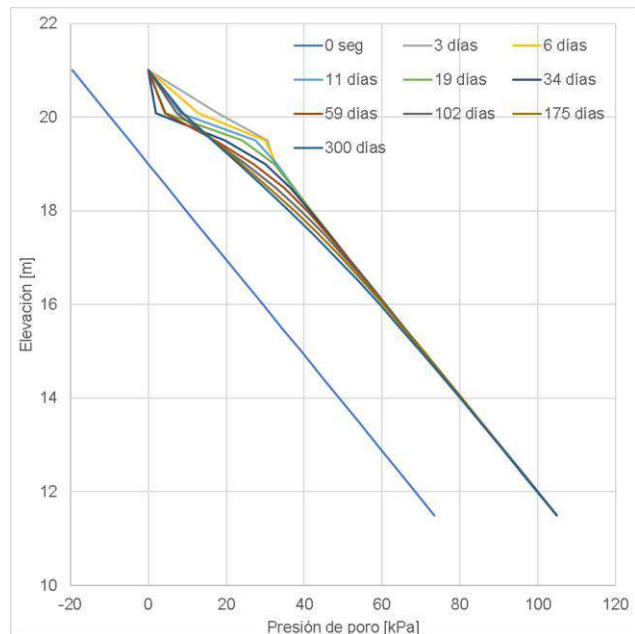


Figura 11. Presión de poro medida verticalmente sin PACs en condición parcialmente saturada.

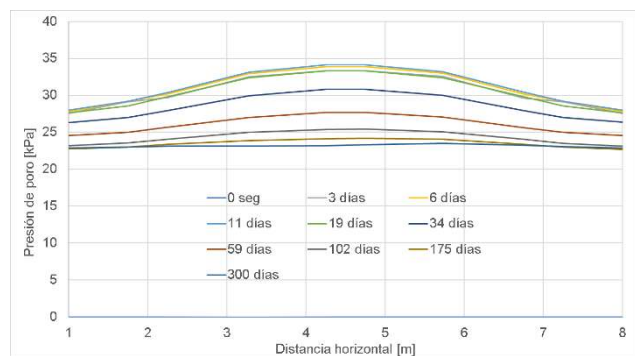


Figura 12. Presión de poro medida horizontalmente a dos metros de profundidad en condición parcialmente saturada sin mejoramiento.

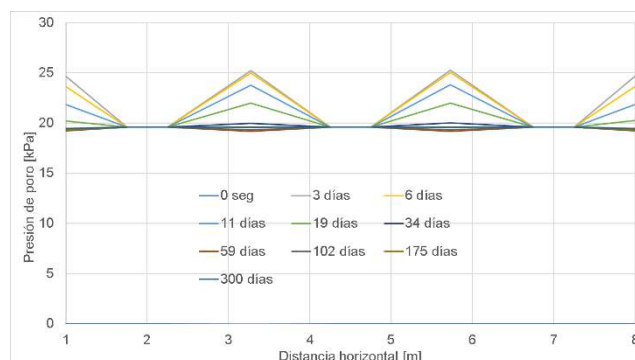


Figura 13. Presión de poro medida horizontalmente a un metro de profundidad en condición parcialmente saturada con PACs.

6 CONCLUSIONES

Después de modelar el proceso de consolidación que se lleva a cabo en un depósito arcilloso con mejoramiento y sin este, se compararon los resultados para llegar a las siguientes conclusiones

1. Las PACs ayudan a que la disipación de presión de poro se lleve a cabo en toda la profundidad de mejoramiento, lo que acelera el proceso de consolidación.
2. Las PACs ayudan a que el proceso de disipación de presión de poro se realice de manera uniforme en toda el área de la cimentación, lo que favorece a evitar los asentamientos diferenciales que podrían presentarse.
3. Comparando los resultados obtenidos, se concluye que las PACs aceleran el proceso de disipación de presión de poro.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a SEEQUENT por brindarnos un periodo de prueba de GEOSTUDIO, con el cual fue posible realizar este artículo con fines académicos.

REFERENCIAS

- Alonso J. (2014). "Diseño basado en técnicas de fiabilidad del tratamiento de mejora del terreno mediante columnas de grava". *Tesis doctoral*. Universidad Politécnica de Madrid.
- Flores F.A. Arroyo J. De la Fuente H. Bernal E. y Aguirre J.L. (2022). "Mitigación del riesgo de licuación en tanques de almacenamiento mediante Columnas de Grava Compactada". XXXI RNIG, SMIG, Guadalajara, Jalisco México.
- Geopier Foundation Company (2016). "Technical Bulletin No. 6 – Settlement Control for Embankments and Transportation Related Structures Using Geopier® Soil Reinforcement."