

Use of Rammed Aggregate Pier as a mechanism to accelerate consolidation at a site where an Automated Distribution Center was built

Uso de Pilas de Grava Compactada como mecanismo para acelerar la consolidación en un predio donde se construyó un Centro de Distribución Automatizado

Francisco A. Flores

Geotecnia, IGM Ingenieros Geotecnistas Mexicanos, México, alonso.faf@igmmexico.com

Kord Wissmann & Jorge Arroyo

Geopier, USA/México

Héctor de la Fuente, Erika Bernal & José Luis Aguirre

Soilsolutions, Mexico

ABSTRACT: This paper presents the analysis, design and construction of ground improvement for a CEDIS in an area of 35,600 m² in Cunduacan, Tabasco. The subsoil is composed of sandy clay and loose silt-sandy sand up to 10 m deep, follow by a stiff to very stiff clay up to 15 m deep. Water table was found between 0.3 and 1.9 m deep. A ground improvement system based on preload and Rammed Aggregate Pier was designed and built for the reinforcement of soft to semi-rigid cohesive soils and sandy soils. This, due to the large size of the project, the excess of settlements and time for consolidation, and the adjusted time of the work program.

KEYWORDS: preload, settlements, consolidation, Rammed Aggregate Pier.

1 INTRODUCTION

First paragraph (no indentation). Please use this template to format your paper. La cimentación de un Centro de Distribución Automatizado, CEDIS, representa un reto geotécnico debido a las cargas de almacenamiento que comúnmente se manejan. Además, estos CEDIS se plantean en grandes extensiones de terreno, generalmente de varios miles de m². Por lo cual, la solución geotécnica debe incluir un proceso de optimización que permita disminuir el costo de construcción de la cimentación. Cuando se proyectan plataformas industriales sobre estratos superficiales de arcilla, turba o materia orgánica de consistencia muy blanda y con un contenido de agua elevado, es de esperarse grandes asentamientos debido al fenómeno de consolidación, los cuales pueden tardar desde meses hasta años para presentarse. Ocasionando grandes dificultades y contratiempos en los procesos constructivos para la cimentación de infraestructura. En este trabajo se presenta el análisis, diseño y construcción de cimentaciones de un CEDIS en un área de 35,600 m² en Villahermosa, Tabasco. El suelo del sitio este compuesto por arcilla arenosa blanda y arena limo-arenosa suelta hasta los 10 m de profundidad, por debajo de este material se tiene arcilla rígida a muy rígida hasta los 15 m de prof. El nivel freático se encontró entre los 0.3 y 1.9 m de profundidad. Se diseñó y construyó un sistema a base de precarga y Pilas de Grava Compacta, para el refuerzo de los suelos cohesivos blandos a semi-rígidos y los suelos arenosos suelos. Esto, debido al gran tamaño del proyecto, al exceso de asentamientos y tiempo por consolidación, y al tiempo ajustado del programa de obra de la partida de cimentación. Los

elementos de las Pilas de Agregado Compactado, PAC's, son diseñados para controlar los asentamientos de las estructuras de acuerdo con el criterio de asentamiento permisible. Se determinó un terraplén de precarga de 3.1 m de altura para ejercer una presión de 4 ton/m². La precarga combinada con el refuerzo mediante Pilas de Grava Compactada de 12 m de profundidad y 2m de separación centro a centro, solo tardaría un tiempo de 3 meses para alcanzar el 90 % de consolidación y se tendría un aproximado de 23 cm. Así mismo, el asentamiento después de la construcción de la estructura proyectada sería de 6 cm. Para llevar a cabo el control de asentamientos, se instaló una estación piezométrica al centro del terraplén y placas de asentamiento distribuidas estratégicamente a lo largo del terraplén de precarga, para verificar el tiempo de consolidación al 90 % y su magnitud, respectivamente. El mejoramiento de suelos mediante Pilas de Grava Compacta representó una alternativa adecuada para la cimentación de grandes extensiones de terreno como los que se emplean en la construcción de centros de distribución

2 TÉCNICA DE LA PRECARGA

Se conoce como precarga a la acción aplicar una presión sobre el terreno antes de colocar la estructura de proyecto con la finalidad de aumentar la resistencia del suelo y disminuir los asentamientos posteriores a la construcción del proyecto.

La técnica de la precarga principalmente aplicada en suelos blandos consiste en provocar el fenómeno de consolidación del suelo antes de construir la estructura de proyecto mediante la

colocación de una carga cuya magnitud en peso sea igual o mayor a la que se pretende desplantar; es decir, se busca que el esfuerzo de preconsolidación sea mayor al generado por el peso de la nueva estructura. Cuando el proceso de consolidación del suelo termina, la precarga es retirada y la estructura proyectada puede comenzar a ser construida sin esperar deformaciones excesivas. Comúnmente, la precarga construida con un terraplén de material térreo que puede ser tomado directamente del sitio. El factor clave para determinar el tiempo de duración de la precarga para acelerar el proceso de consolidación es la permeabilidad y la longitud de drenaje del estrato fino compresible, además de la premura de construcción del proyecto.

2.1 Uso de pilas de grava compactada en el proceso de consolidación de suelos finos

Cuando el tiempo es demasiado largo y/o la sobrecarga muy alta, el proceso puede ser acelerado mediante el uso de Pilas de Grava Compactada que se instalan a partir del nivel de desplante del terraplén de precarga. De acuerdo con la experiencia con varios proyectos realizados en varios países de América, las Columnas o Pilas de Grava Compactada han permitido disminuir el tiempo requerido para la consolidación hasta en un 80%. Alonso (2014) indica que las Columnas de Grava constituyen drenes verticales de alta eficiencia, lo que permite, además de reducir los asentamientos, aceleran la consolidación de los suelos blandos de manera notable.

Las Columnas o Pilas de Agregado Compactado, PAC, son un sistema de mejoramiento de suelos a base de elementos rígidos contruidos con grava triturada de aproximadamente ¾" a 1 ½" contruidas con el método de vibro compactación para refuerzo de los suelos cohesivos compresibles en los cuales proveen una reducción en la duración y magnitud de los asentamientos por consolidación mediante dos efectos I) Drenaje radial y II) Densificación.

2.1.1 Drenaje radial

Las Columnas de Grava Compactada actúan como elementos de drenaje, debido al material que las conforma, ver Figura 1. La incorporación de drenaje radial reduce las longitudes de las trayectorias de drenaje, reduciendo así el tiempo de ocurrencia de los asentamientos.

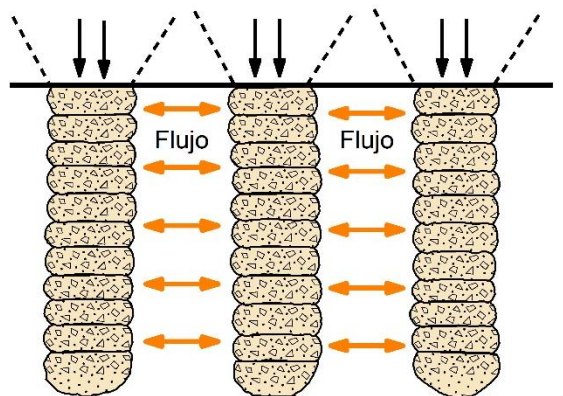


Figure 1. Efecto de Arco y Drenaje Radial hacia las Pilas de Grava Compactada. (Modificado de GFC, 2016).

Los métodos de diseño para drenaje radial se basan en las metodologías descritas en NAVFAC (1986), y Han & Ye (2001). Las Columnas de Grava Compactada se pueden instalar para proveer una reducción en la duración de los asentamientos de estratos compresibles de las siguientes maneras.

a) Las Pilas de Grava Compactada actúan como elementos de drenaje, cuando se construyen usando grava limpia relativamente uniforme. La incorporación de drenaje radial reduce las longitudes de las trayectorias de drenaje, reduciendo así el tiempo de ocurrencia de los asentamientos.

b) La concentración de esfuerzos en las Columnas de Grava Compactada rígidas reduce la cantidad de presión en la matriz de suelo, lo cual se traduce en una reducción de asentamientos entre pilas (Han & Ye 2001). Un coeficiente de consolidación radial modificado (C'_r) se puede incorporar en los cálculos de drenaje radial para tomar en cuenta la concentración de esfuerzos en la velocidad de drenaje.

$$C'_r = C_r \left[1 + n_s \left[\frac{1}{n^2 - 1} \right] \right] \quad (1)$$

Donde C_r es el coeficiente de consolidación radial, n_s es relación de concentración de esfuerzos, y n es la relación de cambio del diámetro de las columnas al diámetro efectivo.

El drenaje radial hacia las columnas de grava compactada se calcula mediante la metodología desarrollada por Barron (1948), en la cual la duración del asentamiento (t) se estima en función del factor de tiempo (T_r), el coeficiente radial de consolidación (C_r) y la longitud efectiva de drenaje (d_e) de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$t = \frac{T_r d_e^2}{C_r} \quad (2)$$

La longitud efectiva de drenaje (d_e) se calcula en función al espaciamiento centro a centro entre las columnas de grava compactadas (o drenes). El factor tiempo (T_r) se obtiene de la Figura 2, a partir de la relación n calculada tomando la relación entre la longitud efectiva de drenaje (d_e) y el diámetro de la columna de grava construida (d_w).

La curva mostrada en la Figura 2 aplica para el caso de las Pilas o Columnas de Grava Compactada usadas en el proyecto en referencia como medio de reforzamiento del subsuelo, aunque en dicha figura se haga alusión a drenes de arena. El esquema presentado debe ser considerado como ilustrativo, ya que es utilizado para mostrar el concepto del drenaje radial hacia los elementos de mejoramiento de suelos, el cual se hace extensivo a las Columnas de Grava Compactada, y que conservadoramente usamos teniendo en cuenta que las Pilas de Grava permiten drenar el agua con mayor rapidez que los drenes de arena, debido al material que las conforma. Como se mencionó antes, el efecto del drenaje radial hacia las Columnas de Grava Compactada se estima haciendo uso de la metodología propuesta por Barrón (1948) para drenes de arena, la cual ha sido usada por otros autores (Han & Ye, 2001) para evaluar el drenaje radial en suelos reforzados con columnas de grava.

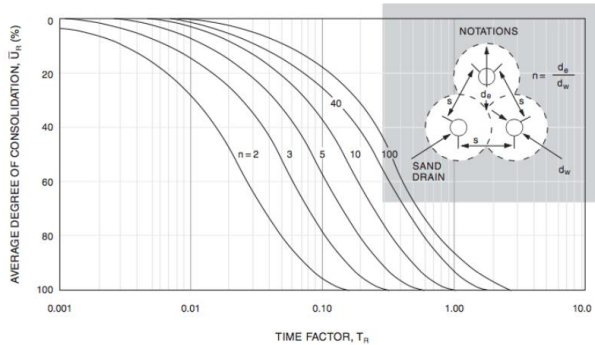


Figure 2. Grado de Consolidación por Drenaje Radial (NAVFAC, 1986).

2.1.2 Densificación

Las Columnas o Pilas de Grava Compactada son construidas utilizando métodos de desplazamiento y de vibro compactación de alta energía, ocasionando una densificación lateral en el suelo generando un aumento en los esfuerzos de confinamiento y dando como resultado un suelo con propiedades de compresibilidad mejoradas, Figura. 3.

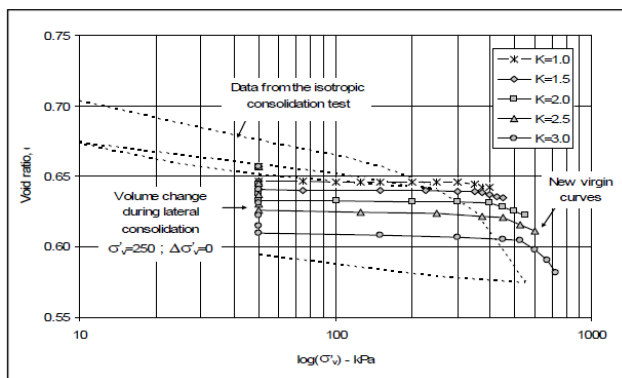


Figure 3. Aumento de la presión de pre-consolidación con el aumento del esfuerzo de confinamiento horizontal (GFC, 2016).

3 CASO DE ESTUDIO

En el 2020 se realizó un mejoramiento de suelos para un Centro de Distribución Automatizado, CEDIS, en un área de 35,600 m². La ubicación del proyecto se encuentra en el estado de Tabasco. La caracterización geotécnica se basó principalmente en 21 sondeos de SPT de los cuales 15 fueron ejecutados a 15 m de profundidad y 3 a 30 m, en los cuales se identificó la siguiente estratigrafía: de 0 a 10 m de profundidad, arcilla arenosa de consistencia blanda con intercalaciones de arena limosa/arcillosa de compactidad suelta; de 10 a 15 m de profundidad. El nivel freático se encontró entre 0.3 y 1.9 m de profundidad.

Para ilustrar las concisiones del terreno encontradas, en la Figura 4 se muestran uno de los perfiles estratigráficos obtenido de la exploración de campo y laboratorio.

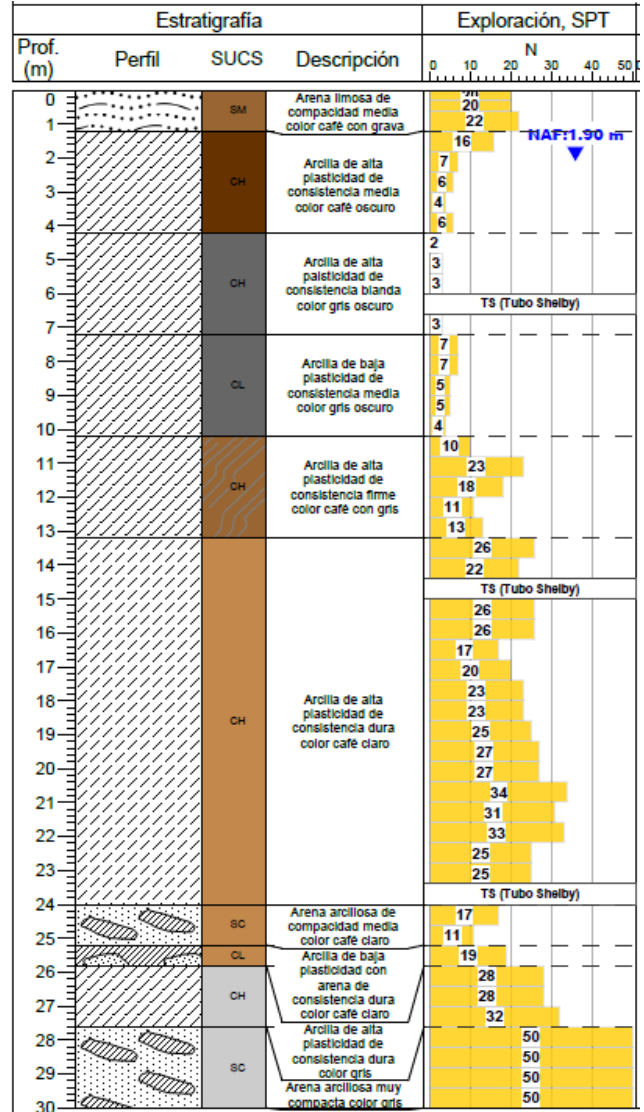


Figure 4. Perfil estratigráfico 01

Debido a las condiciones del terreno, se diseñó una solución a base de precarga y Pilas de Agregado Compactado, esto debido principalmente al tiempo ajustado del programa de obra y a la rapidez con la que se pueden instalar las PAC's.

Para condiciones *in situ* (sin mejoramiento) se estimaron deformaciones verticales del orden de 65 cm, las cuales se presentarán en un periodo de tiempo de 550 días (18 meses).

3.1 Solución propuesta

Como propuesta de solución se determinó un terraplén de precarga de 3.1 m de altura para ejercer una presión de 4 ton/m² según su peso volumétrico seco suelto considerado de 1.3 t/m³. El cual combinado con la instalación de 9500+ Pilas de Grava Compactada de 0.5 m de diámetro, 12 m de profundidad y 2m de separación centro a centro, se estimó que tardaría un tiempo de 3 meses para alcanzar el 90 % de consolidación y se tendría un aproximado de

23 cm. Así mismo, el asentamiento después de la construcción de la estructura proyectada sería de tan solo 6 cm. La Figura 5 muestra un esquema de la solución propuesta.

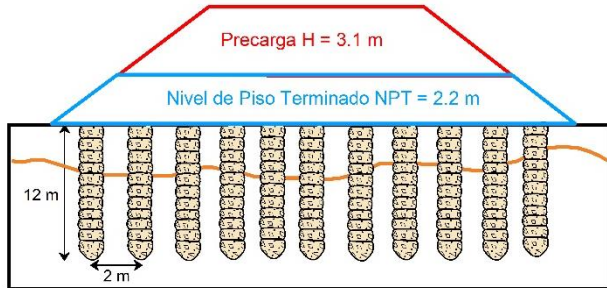


Figure 5. Esquema de la solución propuesta a base de precarga y columnas de grava compactada.

3.2 Estimación de asentamientos

Las Columnas de Grava Compactada son diseñadas para controlar asentamientos en las cimentaciones del proyecto de acuerdo con el criterio de asentamiento permisible. Los asentamientos de las cimentaciones son estimados como la suma de los asentamientos en la “zona superior” reforzada con elementos y el asentamiento estimado en la “zona inferior” bajo el fondo de las Pilas de Agregado Compactado de acuerdo con la metodología descrita por Lawton et al. (1994). Los asentamientos en la zona superior comúnmente implementan la analogía de resortes. Las Pilas de Grava Compactada actúan como resortes rígidos; el suelo matriz entre los elementos actúa como un sistema de resortes blandos. Los resortes rígidos (PGC) absorben un mayor porcentaje de los esfuerzos aplicados por la cimentación en comparación a los resortes más blandos del suelo matriz. El detalle de las expresiones usadas en el cálculo de asentamientos se puede consultar en Flores et al., 2022.

Para la zona de almacén, los resultados de los asentamientos total y post-construcción estimados empleando el software Settle3D de Rocscience considerando la precarga son de 22.7 cm y 6.1 cm respectivamente. Mientras que para la etapa de construcción de plataforma y colocación de precarga son de 3.4 cm. Al final de la consolidación por la precarga los asentamientos estimados son de 15.8 cm y considerando un tiempo de 10 años posterior a la construcción de la nave con las cargas de servicio, el asentamiento esperado es de 23 cm. Estos resultados se muestran de forma gráfica en las figuras 6 a 9.

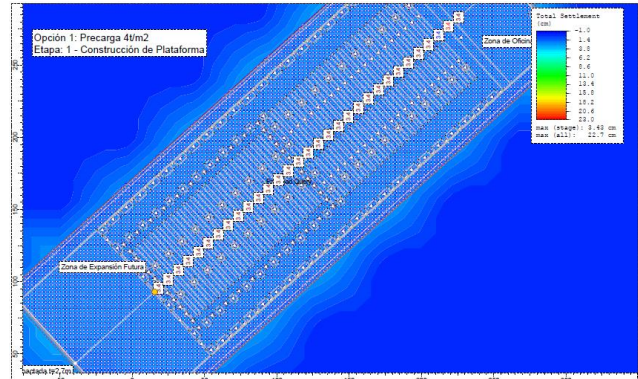


Figure 6. Asentamientos estimados para la etapa de construcción de plataforma y colocación de precarga.

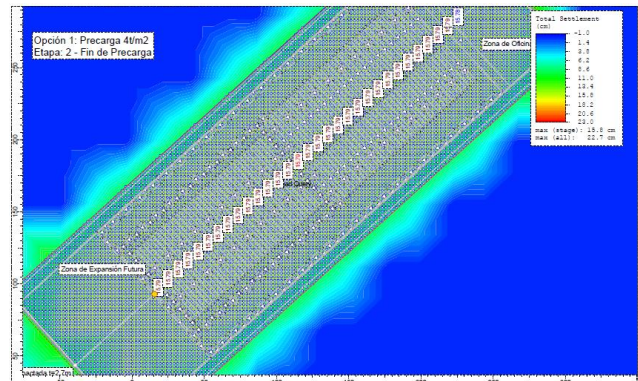


Figure 7. Asentamientos estimados al finalizar de la consolidación efectos de la precarga.

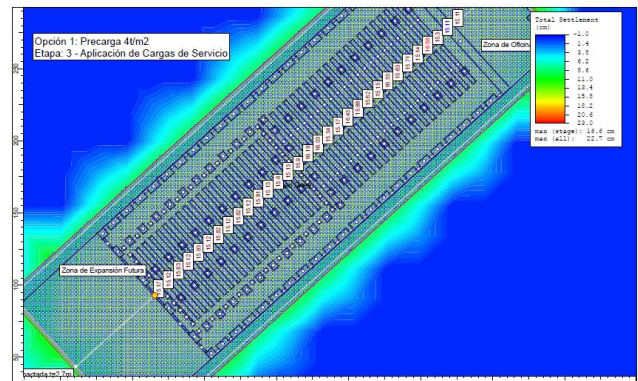


Figure 8. Asentamientos estimados después del retiro de la precarga y colocación de las cargas de servicio.

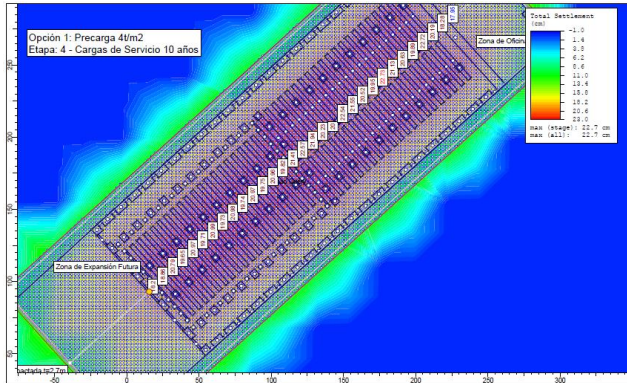


Figure 9. Asentamientos estimados a los 10 años de colocadas las cargas de servicio.

3.3 Procedimiento constructivo del sistema de precarga y pilas de grava compactada

El objetivo principal de usar una presión de precarga es que se logre reducir la magnitud de asentamientos post-construcción. El procedimiento constructivo propuesto incluye el uso de la superficie de terreno natural con una ligera nivelación para que sea aprovechado como plataforma de trabajo para la instalación de las pilas de grava compactada. Posteriormente se construyen las pilas de grava compactada de 12 m de longitud y 50 cm de diámetro (Figura 10). Construcción de la plataforma definitiva del área de almacén. Colocación del material granular hasta el nivel de precarga (3.1 m de altura, promedio), el material granular se extenderá suelto y seco con un peso estimado de 1.3 t/m³. El material de precarga se estima permanezca colocado durante 3 meses aproximadamente. Los asentamientos deberán ser monitoreados para validar que se ha presentado al menos el 90% de la consolidación primaria del estrato reforzado. Una vez presentados dichos asentamientos se procederán con la remoción del terraplén de precarga. El asentamiento presentado durante la precarga deberá ser compensado en la plataforma definitiva para volver a alcanzar la elevación de nivel de piso terminado. Una vez removida la precarga se procede con la construcción del almacén.



Figure 10. Instalación de las pilas de grava compactada en el área a acelerar el proceso de consolidación.

4 MONITOREO DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA

Para llevar a cabo el control de asentamientos, se instaló una estación piezométrica al centro del terraplén y placas de asentamiento distribuidas estratégicamente a lo largo del terraplén de precarga, para verificar el tiempo de consolidación al 90 % y su magnitud, respectivamente.

En la Figura 11 se aprecia un esquema de la distribución de los tres piezómetros tipo Casagrande instalados al centro del terraplén de precarga, a 3, 6 y 10 m de profundidad con respecto a la cabeza de la pila; y en la Figura 12 se muestran fotografías de la toma de lecturas del monitoreo de cada piezómetro. La toma de lecturas en los tres piezómetros se realizó semanalmente durante más de 3 meses.

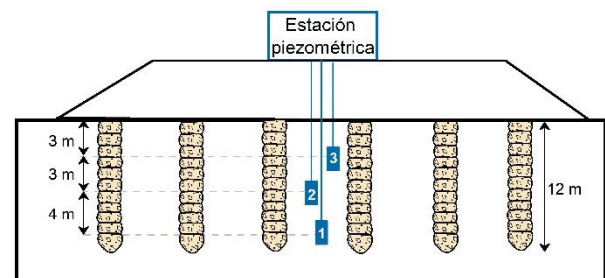


Figure 11. Esquema de distribución de la estación piezométrica.



Figure 12. Tomas de lectura en campo en la estación piezométrica.

A partir de los registros de las tomas de lectura semanales en los piezómetros, se construyó la gráfica de la Figura 13. El incremento del nivel piezométrico después de colocar la precarga es evidente a partir de la segunda lectura y posteriormente ésta tiende a disminuir con el paso del tiempo, retornando a su estado inicial de manera más rápida para el piezómetro instalado a 10 m de profundidad. Los niveles piezométricos oscilan en los 13.60 msnm antes del a colocación de la precarga e incrementan hasta valores de 16 msnm después de colocada la precarga. Para ilustrar mejor el incremento del nivel de columna de agua en los piezómetros, se restaron al valor inicial, los valores de las lecturas tomadas semanalmente, dando como resultado la gráfica de la Figura 14. El mayor incremento del nivel piezométrico fue de 1.58 m, 2.38 m y 1.24 m, para los piezómetros 1, 2 y 3 m, respectivamente. Y a partir de la décima semana el piezómetro 1 a 10 m de profundidad, practicante regreso al nivel previo a la precarga. Los dos piezómetros restantes mantuvieron una tasa de disminución relativamente constante en el nivel piezométrico.

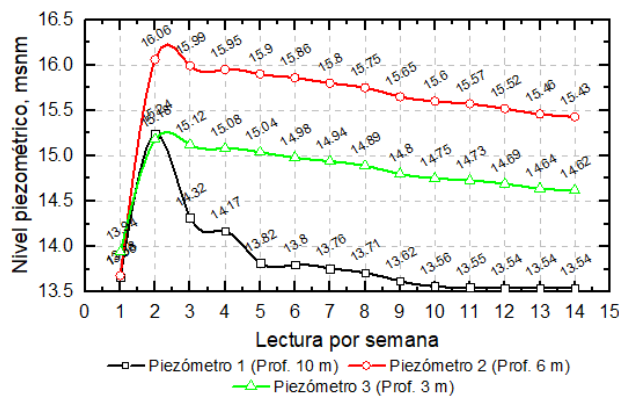


Figure 13. Lecturas piezométricas por semana.

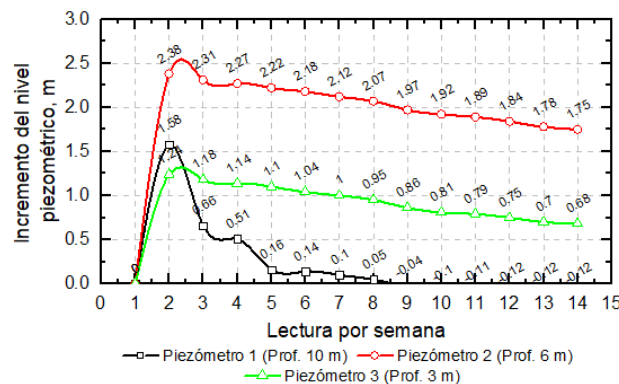


Figure 14. Incrementos del nivel piezométrico en los tres piezómetros.

Las placas de asentamiento se pueden observar en la figura 15. Se colocaron 10 placas de manera estratégica en el área mejorada como se indica en la Figura 16. Las lecturas fueron tomadas diariamente durante 120 días, aproximadamente. Debido a que la zona a mejorar es muy extensa, la precarga se fue colocando por franjas, por lo que, en algunas placas, la toma de lecturas inicio con cierto desfase como se puede ver en la Figura 17.



Figure 15. Placas de asiento para monitorear los asentamientos posteriores a la colocación de la precarga.

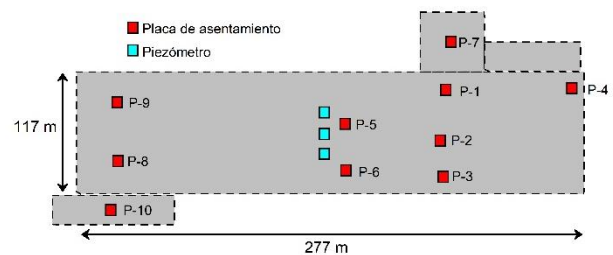


Figure 16. Ubicación de las placas de asentamiento.

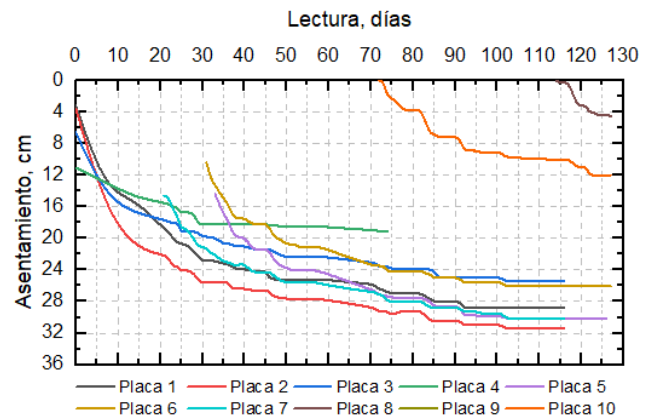


Figure 17. Asentamientos medidos en las placas de asentamiento durante un periodo de 120 días.

Los asentamientos medidos a 120 días (Asent120) oscilan entre 26 y 30 cm, donde se observa claramente que tienen a valores asintóticos después de los 80 días. Para evaluar la evolución del porcentaje de asentamiento total medidos (Asent120) se generó una gráfica de las placas 1, 2 y 3 (Ver Figura 18). En esta gráfica se puede ver que, para las tres placas, a los 30 días ya se había presentado el 80% del asentamiento medido a los 120 días, esto muestra el importante drenaje aportado por las pilas de grava compactada. Los asentamientos medidos a los 120 días son mayores a los estimados con la teoría de consolidación radial propuesta por Han & Ye (2001) para evaluar el drenaje radial en suelos reforzados con columnas de grava, lo que sugiere que la estimación de asentamientos está del lado conservador.

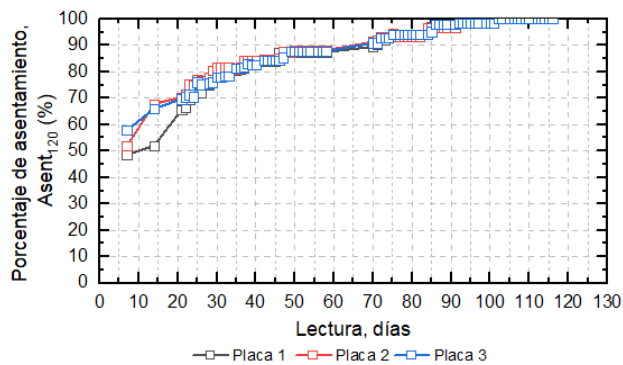


Figure 18. Porcentaje de asentamientos medidos en las placas de asentamiento durante un periodo de 120 días.

Se destaca la precisión entre los resultados medidos en campo y los obtenidos en el modelado numérico (Figura 7 y Figura 17), validando la efectividad en la solución y confiabilidad en la ingeniería de diseño de Pilas de Grava Compactada.

5 RESUMEN Y CONCLUSIONES

El uso de la precarga en conjunto con las Pilas de Gravas Compactada, permitió no solo reforzar considerablemente el suelo sino también acelerar drásticamente el proceso de consolidación antes de colocar las estructuras definitivas, logrando así un buen funcionamiento de la cimentación durante la vida útil de la nave disminuyendo considerablemente los asentamientos esperados cuando entre en operación la estructura. Esto se pudo lograr en un periodo de duración de la precarga de tan solo 3 meses.

La medición del nivel piezométrico y los asentamientos con el tiempo medidos en este tipo de proyectos es fundamental para garantizar que se cumplan las hipótesis planteadas en el diseño. Con las mediciones de los niveles se pudo cuantificar el incremento de presiones en el agua debido a la precarga y su posterior disipación con el paso del tiempo. Las curvas piezométricas empiezan a tener un comportamiento asintótico a los 3 meses. El mayor incremento del nivel piezométrico fue de 1.58 m, 2.38 m y 1.24 m, para los piezómetros 1, 2 y 3 m, respectivamente.

De acuerdo con lo medido en campo con las placas de asiento, se obtuvieron asentamientos de 26 a 30 cm. Con las lecturas tomadas se construyeron gráficas de asentamiento con el tiempo determinándose que los asentamientos muestran una tendencia asintótica después de los 80 días. Además, del análisis de las lecturas, el 80% del asentamiento medido se da en el primer mes de haberse colocado la precarga, esto muestra el importante drenaje aportado por las pilas de grava compactada.

El sistema de precarga combinado con Pilas de Grava Compactada permitió generar ahorros en la cimentación debido a la reducción del tiempo de precarga. El factor determinante para decidir por una solución u otra comúnmente es el tiempo del cual se dispone para ejecutar la obra ya que en ocasiones las necesidades de inversión no permiten esperar el tiempo suficiente para alcanzar el 90% de la consolidación requerida con el método de la precarga. En estos casos, es necesario recurrir a un proceso de aceleración de la consolidación que complementa a la técnica de precargar el suelo, tales como el uso de Pilas o Columnas de Grava Compactada

6 REFERENCES

- 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.
- Barron, R.A. (1948). "Consolidation of Fine-Grained Soils by Drain Wells." Trans. ASCE, Vol. 113, pp. 718-742.
- 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, Gualdajara Jalisco México.
- Fox, N.S. and Cowell, M.J. (1998). "Geopier Soil Reinforcement Manual." Geopier Foundation Company, Inc., Blacksburg, Virginia.
- Han, J. Ye, (2001), S.L. Simplified Method for Consolidation Rate of Stone Column Reinforced Foundations. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. Vol. 127, No.7; ASCE; July 2001. p. 597-603.
- Lawton, E.C., Fox, N. S., y Handy, R. L. 1994. Control of settlement and uplift of structures using short aggregate piers. In-situ Deep Soil Improvement, Geotechnical Special Publication No. 45, American Society of Civil Engineers, 121-132.
- NAVFAC (1986) "Soil Mechanics Design Manual 7.01" Naval Facilities Engineering Command, Alexandria, Virginia.
- Geopier Foundation Company (2016). Technical Bulletin No. 6 – Settlement Control for Embankments and Transportation Related Structures Using Geopier® Soil Reinforcement.