

Mitigación del riesgo de licuación en tanques de almacenamiento mediante Columnas de Grava Compactada

Mitigation liquefaction risk in storage tanks through Rammed Aggregate Piers

Flores F.A., IGM Ingenieros Geotecnistas Mexicanos

Arroyo J., Geopier Foundation Company

De la Fuente H., Soilsolution

Bernal E., Soilsolution

Aguirre J.L., Soilsolution

RESUMEN: En este trabajo se presenta el análisis, diseño y construcción del sistema de mejoramiento de suelos a través de Columnas de Grava Compactada (también denominadas Pilas de Agregado Compactado, PAC) para cimentar cuatro tanques de almacenamiento de Aguas Amargas en la Refinería Dos Bocas, en Tabasco, México. Un total de 980 elementos de 12.5 m de longitud y 0.5 m de diámetro fueron instalados para reforzar el suelo de cimentación, mitigar el potencial de licuación y reducir los asentamientos. El sitio está compuesto por arena fina con arcilla de compacidad suelta a media hasta los 8 m de prof. Por debajo de este material se tiene arena arcillosa de compacidad muy suelta a media con intercalaciones de arcilla. Se presentan también rendimientos de los equipos con los que se construyeron la totalidad de los elementos de grava. Se demuestra que el mejoramiento de suelos mediante Columnas de Grava Compactada representa una alternativa costo-efectiva para cimentar tanques de almacenamiento en zonas potencialmente licuables.

ABSTRACT: This paper presents the analysis, design, and construction of soil improvement for storage tanks foundation support at a site in Tabasco, Mexico. A total of 980 Rammed Aggregate Piers of 12.5 m in length and 0.5 m in diameter were designed and constructed to support four storage tanks. The soil conditions at the site generally consist of loose to medium dense silty/clayey sand to about 8m depth, underlain by very loose to medium dense silty/clayey sand with seams of very soft clay. The use of Rammed Aggregate Piers induced densification of the soil to increase its stiffness and reduce the liquefaction potential to control both static and dynamic induced settlements. Finally, the soil improvement installation rate is presented. Soil improvement using Rammed Aggregate Piers represented a suitable alternative to support storage tanks foundation in potentially liquefiable areas.

1 INSTRUCCIONES GENERALES

1.1 Introducción

En el sector de hidrocarburos, los tanques de almacenamiento representan un reto geotécnico importante debido a las altas descargas que se manejan producto del material almacenado. Aunado a esto, en zonas con suelos potencialmente licuables hacen que este reto sea aún mayor. En casos en los que las condiciones del subsuelo o del proyecto mismo no permiten el uso de sistemas de cimentación superficiales, es común diseñar cimentaciones profundas evaluando la capacidad de carga axial mediante métodos analíticos y en algunos casos, dependiendo de la importancia del proyecto, mediante pruebas de carga *in situ*. Asimismo, la tolerancia de los asentamientos totales y diferenciales es restrictiva, por lo que el uso de grupo de pilotes es recurrente. Siendo los tanques de almacenamiento regularmente circulares, los grupos de pilotes se colocan siguiendo el mismo patrón de geometría con el fin de distribuir cargas tanto estáticas como accidentales de la manera más uniforme posible (Vega *et al.*, 2021). Sin embargo, estos sistemas son poco productivos, costosos y muy complicados de construir. Por lo tanto, una alternativa de cimentación es el uso de Columnas de Grava Compacta que permite mitigar el riesgo de licuación en suelos costeros e incrementar la seguridad de una estructura.

En este trabajo se presenta el análisis, diseño y construcción de cimentaciones de tanques de almacenamiento en la Refinería Dos Bocas, en Tabasco, México. El uso de las Columnas de Grava Compactada (también denominadas Pilas de Agregado Compactado, PAC) permitió incrementar la resistencia del terreno, mitigar el fenómeno de licuación y reducir los asentamientos. Se realizaron sondeos de penetración de cono, CPTu, previo y posterior al mejoramiento de suelos para evaluar la mejora del terreno y los Factores de Seguridad asociados a las dos condiciones.

2 DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO

El proyecto consiste en la construcción de cuatro tanques de almacenamiento de hidrocarburo en Paraíso, Tabasco en el sureste mexicano. Los diámetros de los tanques son de 30.5 m para un tanque, dos tanques de 18.3m y un tanque de 4.6m con alturas entre 7 a 12 m. La Figura 1 muestra un esquema de los tanques y de las condiciones geotécnicas encontradas en el sitio. Se diseñaron y construyeron 941 pilas de grava compacta de 12.5 m de longitud y 0.5 m de diámetro que soportan los cuatro tanques de almacenamiento.

Las condiciones del suelo encontradas en la huella de desplante de los tanques consiste en: 0.0 a 2.8 m, relleno de material de arena con limos (dragado); 2.8 a 6.4m, arcilla

muy blanda color café; 6.4 a 12.6 m (estrato licuable), arena fina de compacidad suelta a media con ligeras intercalaciones de arcilla; 14.7 a 17.5 m, arcilla muy blanda con presencia de materia orgánica; 17.5 a 24.4, arena arcillosa de compacidad muy suelta a media, con intercalaciones de arcilla; 24.4 a 31.5 m, arena arcillosa de compacidad media a densa; 31.5 a 42.0 m, arcilla media a muy firme (Ver Figura 1). El nivel freático se encontró a 3 m de profundidad aproximadamente. La Figura 2 muestra el arreglo de las pilas de grava compacta propuestas para cada uno de los tanques de almacenamiento.

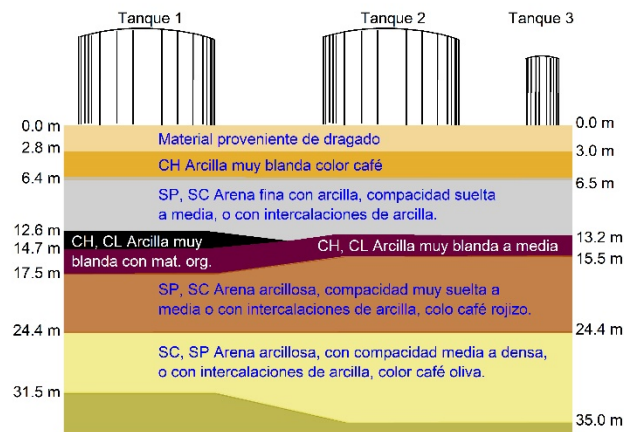


Figura 1. Corte estratigráfico y esquema de los tanques de almacenamiento.

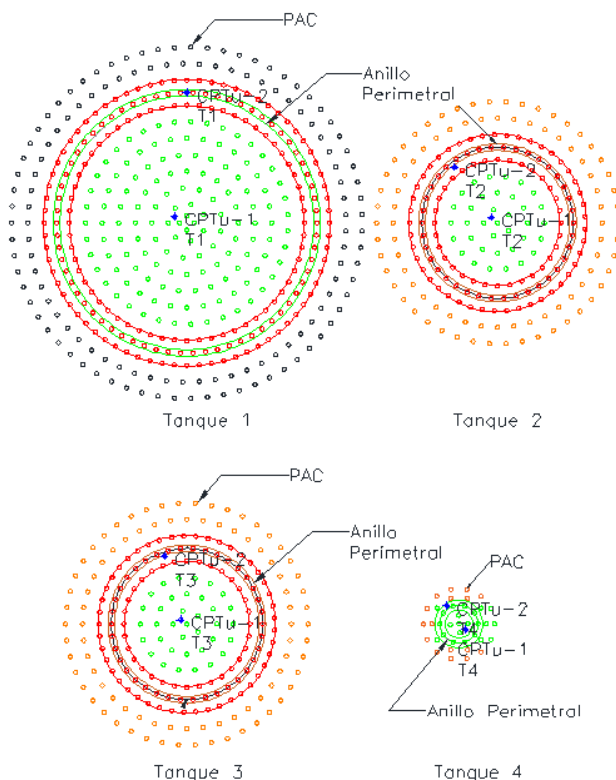


Figura 2. Distribución de Pilas de Agregado Compactado en cada uno de los tanques de almacenamiento.

3 SOLUCIÓN GEOTÉCNICA

De acuerdo con el análisis y diseño geotécnico, se obtuvo un mejoramiento del asentamiento post licuación de 40 cm en condiciones no mejoradas a 5 cm en condiciones mejoradas con la solución Geopier. Así mismo, el arreglo de Columnas de Grava Compactada fue revisado para cumplir con los criterios de falla y de servicio, como, falla por inestabilidad de borde (condición estática y dinámica) y asentamientos estáticos. Las PAC han sido sometidas a estudios rigurosos sobre su efectividad para mitigar el riesgo de licuación de arenas limosas, para ver a detalle el estudio se puede consultar a Rollins et al. (2021).

3.1 Proceso de instalación de las pilas de grava compacta

El procedimiento constructivo se detalla a continuación:

El mandril se hince hasta la profundidad de diseño con fuerza de empuje impuesta por el equipo y energía de impacto vertical impuesta por el martillo. En cada instalación se deposita agregado limpio de tamaño nominal desde ½ a 1 pulgada (12.7 a 25.4 mm) a través de la tolva y el mandril. El equipo se eleva 1.2 metros a un ritmo constante. El equipo se hince nuevamente proporcionando empuje vertical estático y alta energía vertical de impacto proporcionada por un martillo vibro-hincador, produciendo una capa de agregado apisonado de aproximadamente 30 cm de espesor (1 pie). Este proceso se repite hasta llegar a la superficie, resultando en una Columna de Grava Compactada, y en el proceso densificando el suelo circundante mediante la densificación y expansión de la cavidad debido al desplazamiento producido por el proceso (Figura 3).

3.2 Control de asentamientos y metodología de diseño

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) (Figura 4).

3.2.1 Zona Superior – Analogía de Resortes

Los asentamientos en la zona superior comúnmente implementan la analogía de resortes (Figura 4). Las Pilas de Agregado Compactado actúan como resortes rígidos; el suelo matriz entre los elementos actúa como un sistema de resortes blandos. Los resortes rígidos (PAC) absorben un mayor porcentaje de los esfuerzos aplicados por la cimentación en comparación a los resortes más blandos del suelo matriz. Asumiendo que la cimentación es perfectamente rígida, el esfuerzo en el tope de los elementos PAC (q_g) puede calcularse según la siguiente ecuación.

$$q_g = q \frac{R_s}{R_a R_s - R_a + 1} \quad (1)$$

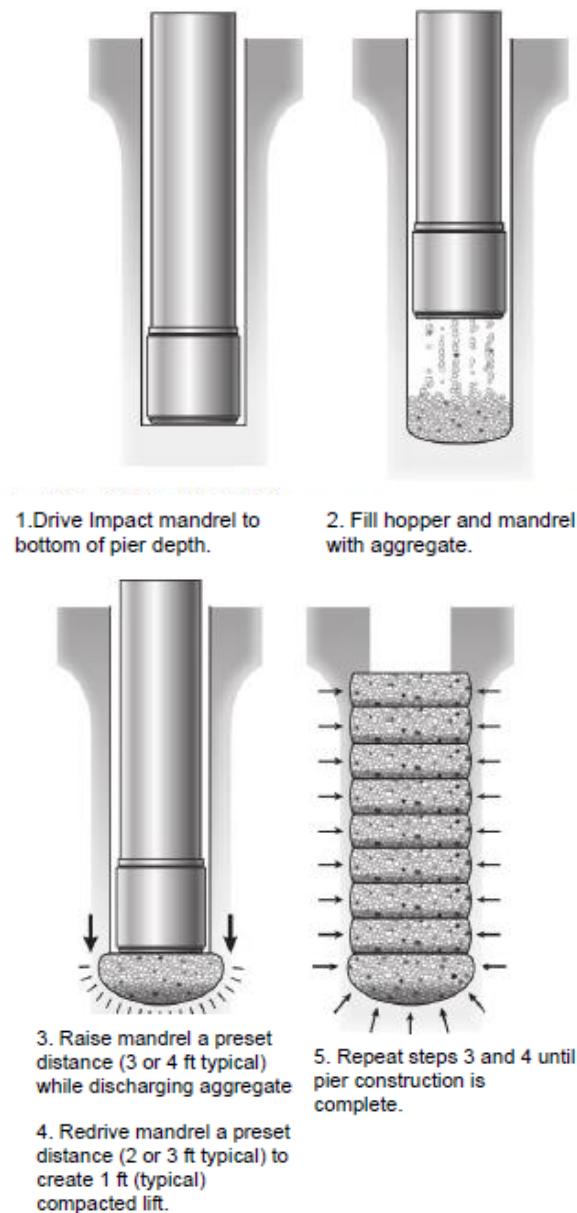


Figura 3. a) Método constructivo de las Pilas de Agregado Compactado y b) fotografía de una PAC instalada en el sitio.

donde q es la presión aplicada promedio bajo la cimentación, R_s es la razón de rigidez entre las Pilas de Agregado Compactado y el suelo matriz, y R_a es la relación de remplazo de área de las Pilas de Agregado Compactado al área total de la cimentación.

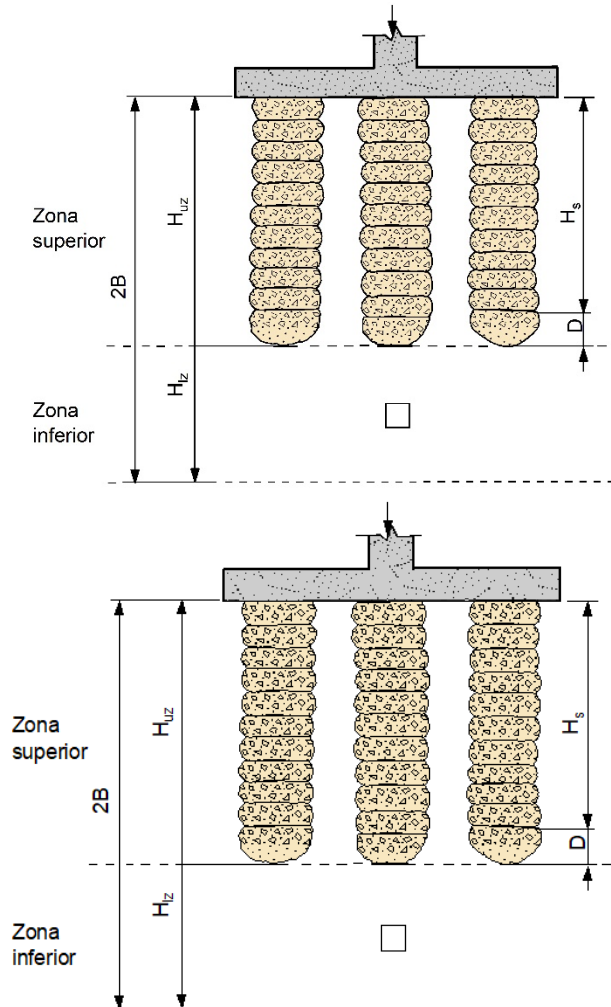


Figura 4. Metodología de Estimado de Asentamiento para Dos Capas, Superior e Inferior.

La relación de rigidez R_s se define como la proporción entre el módulo de rigidez de Pilas de Agregado Compactado (k_g) y el módulo de rigidez del suelo (k_m), Figura 5. El módulo de rigidez (k_g) se define como la relación del esfuerzo aplicado al tope del elemento (PAC) y la deformación vertical resultante. La constante de rigidez del elemento (PAC) se estima usando una base de datos establecida de pruebas de módulo anteriores, y se verifica con una o varias pruebas de módulo que se realizan en el proyecto en caso de ser necesario.

$$R_s = \frac{k_g}{k_m} \quad (2)$$

El asentamiento en la zona superior (S_{uz}), es la relación entre el esfuerzo aplicado en el tope de la Pila de Agregado

Apisonado y el módulo de rigidez del elemento (PAC), se define como:

$$S_{uz} = \frac{q_g}{k_g} \quad (3)$$

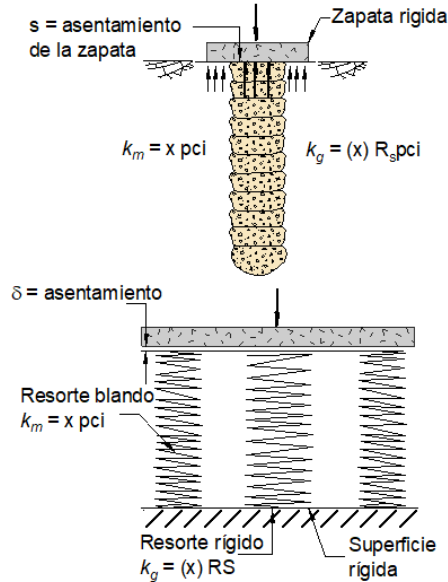


Figura 5. Analogía de Resortes para Diseño de Pilas de Agregado Compactado.

3.2.2 Zona Superior – Módulo Elástico Compuesto

Los asentamientos para losas de cimentación y zapatas grandes, o áreas de gran tamaño asociadas terraplenes, tanques, graneros u otras estructuras pueden ser evaluados usando una metodología de módulo elástico compuesto, donde el asentamiento en la zona superior reforzada (zona de suelo reforzado usando Pilas de Agregado Compactado) es estimado usando cálculos convencionales de asentamiento como se muestra en la siguiente ecuación (Adaptado de Terzaghi, *et al.*, 1996):

$$S_{uz} = \frac{q I_{\sigma} H}{E_{comp}} \quad (4)$$

donde q es la presión aplicada promedio, I_{σ} es el factor de influencia a profundidades del suelo compresible, H es el espesor del estrato compresible y E_{comp} es el valor del módulo elástico compuesto dentro de la zona superior reforzada con elementos PAC. El módulo elástico compuesto es calculado utilizando un promedio ponderado de los valores del módulo elástico de las Pilas de Agregado Compactado y el suelo matriz usando la siguiente expresión:

$$E_{comp} = E_g R_a + E_m (1 - R_a) \quad (5)$$

Donde R_a es la relación de área de remplazo, E_g es el módulo elástico del elemento (PAC), y E_m es el módulo

elástico del suelo matriz. El valor del módulo elástico del elemento (PAC) es estimado en proporción al módulo de rigidez del elemento. El módulo elástico del suelo matriz es comúnmente estimado usando correlaciones empíricas con la resistencia al corte no-drenada, golpes de la Prueba de Penetración Estándar (SPT-N), resistencia de la Prueba de Penetración de Cono (CPT) o determinado de ensayos de consolidación.

3.2.3 Zona Inferior – Asentamiento

Los asentamientos en la zona inferior bajo la zona reforzada con elementos (PAC) se calculan usando métodos geotécnicos convencionales de estimados de asentamiento que involucran: estimar la profundidad de influencia de los esfuerzos bajo la cimentación (típicamente el doble del ancho de la cimentación en el caso de cimentaciones cuadradas), estimar el esfuerzo inducido bajo la cimentación en la zona inferior (usando factores convencionales de influencia según teoría de elasticidad) y estimar la compresibilidad de los estratos de suelos de la zona inferior.

Los asentamientos en la zona inferior (S_{lz}) en los suelos granulares son estimados usando la metodología de asentamientos elásticos con la siguiente ecuación:

$$S_{lz} = \frac{q H_{lz} I_{\sigma}}{E_s} \quad (6)$$

donde q es el esfuerzo de contacto en la base de la cimentación, I_{σ} es el factor de influencia de esfuerzos, H es el espesor del estrato considerado, y E_s es el módulo de elasticidad del suelo en la zona inferior.

Los asentamientos en la zona inferior (S_{lz}) de los suelos cohesivos se estiman típicamente usando la siguiente ecuación mediante un esquema de consolidación.

$$S_{lz} = m_v * \sigma'_{v0} * H_0 \quad (7)$$

Donde σ'_{v0} es el esfuerzo vertical efectivo al centro del estrato H_0 y m_v es el coeficiente de variación volumétrica. Alternativamente, los asentamientos de la zona de inferior en suelos cohesivos pueden ser estimados usando la teoría elástica de asentamientos.

3.2.4 Asentamiento Total

El asentamiento total (s) de las cimentaciones o estructuras apoyadas en Pilas de Agregado Compactado se calcula como:

$$S = S_{uz} + S_{lz} \quad (8)$$

3.3 Análisis de susceptibilidad a la licuación

Los análisis de licuación de arenas realizados al suelo sin mejoramiento fueron realizados con los métodos clásicos semi-empíricos propuestos por Idriss y Boulanger en 2008 y 2014. Por lo que no se da una explicación detallada de los métodos, esto puede consultarse en las referencias citadas. Para el caso de los análisis de licuación de los suelos mejorados, a continuación, se detalla los criterios adoptados.

3.3.1 Análisis de susceptibilidad de licuación considerando mejoramiento a base de pilas de agregado compactado

La instalación de Pilas de Agregado Compactado en suelos licuables reemplaza suelos sueltos con elementos de refuerzo densos y rígidos, aumentando además la densidad del suelo circundante.

El grado de densificación generado por la instalación de Pilas de Agregado Compactado se puede apreciar mediante un incremento en el número de golpes N_{SPT} del ensayo SPT o de resistencia de punta q_c del ensayo de CPTu del suelo matriz en las arenas. Dicho incremento de resistencia depende principalmente del porcentaje de finos de la arena y del N_{SPT} y q_c medidos en campo.

$$N'_{SPT} = N_{SPT} + \Delta N_{(imp)} \quad (9)$$

$$q'_c = q_c + \Delta q_{t(imp)} \quad (10)$$

donde: N'_{SPT} y q'_c es el número de golpes SPT y la resistencia de punta CPTu mejorados al considerar la densificación del suelo matriz; $\Delta N_{(imp)}$ y $\Delta q_{t(imp)}$ es el incremento de Numero de golpes SPT y la resistencia de punta CPTu debido a la densificación producida por la instalación de Pilas de Agregado Compactado y; N_{SPT} y q_c es el número de golpes SPT y la resistencia de punta CPT del terreno en condiciones iniciales (sin mejoramiento).

La compactación-apisonamiento vertical de las PAC aumenta el esfuerzo lateral en el en le suelo cercano. Por lo tanto, un aumento en el esfuerzo lateral resulta en un incremento de la relación de resistencia cíclica CRR (Salgado *et al.*, 1997; Rollins *et al.*, 2021).

4 REVISION POST MEJORAMIENTO

Como resultado del análisis de licuación en condición In-Situ (o Campo Libre), la zona de Aguas Aminas presenta riesgo de licuación en los suelos de cimentación. Los estratos de arena potencialmente licuables se encuentran a partir de una profundidad de 6.5 m hasta los 20 m, y se puede presentar un asentamiento inducido post-licuación de 37 a 45 cm. Con los resultados obtenidos de manera puntual con los datos de los sondeos realizados en la zona y de acuerdo con sus coordenadas se generaron curvas de isovalores empleando el método de interpolación Kriging, el cual supone que la distancia o la dirección entre los puntos de muestra reflejan una correlación espacial que puede utilizarse para explicar la variación de los asentamientos inducidos post-licuación a nivel superficial (Figura 6a). La propuesta de mejoramiento de suelos con Pilas de Agregado Compactado para la cimentación de los tanques consiste en lo siguiente: instalación de elementos con diámetro promedio de 0.50 m (instalados) hasta una profundidad de 12.5 m a partir del nivel de la plataforma; separación centro a centro o-c de 2 m (6.6 ft), en un arreglo de anillos tanto para la huella de cimentación de los tanques como para el arreglo de los elementos exteriores; separación centro a centro o-c de 1.5 m (5 ft) para el apoyo de zapata o anillo perimetral. Con los resultados obtenidos de manera puntual con los datos de los sondeos con el sistema de mejoramiento propuesto y de manera similar al

caso sin mejoramiento, se generaron curvas de isovalores a nivel superficial (Figura 6b). Esta figura muestra de forma cuantitativa el efecto del mejoramiento en la disminución de asentamientos post-licuación.

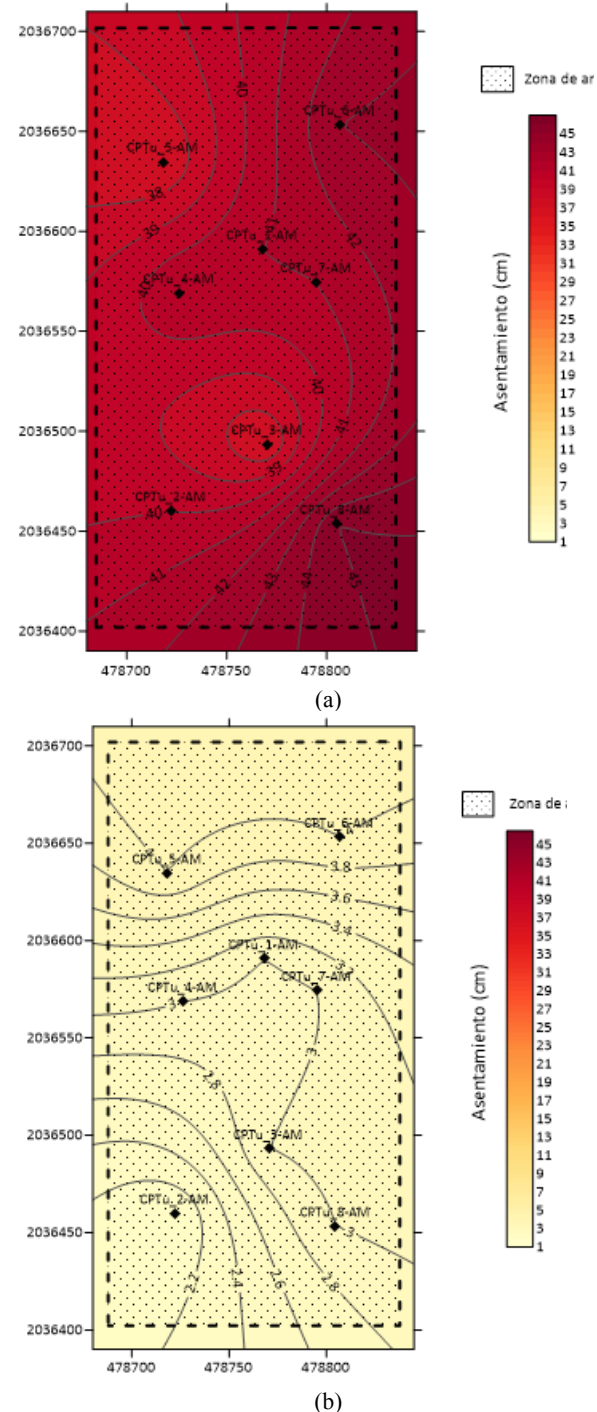


Figura 6. Curvas de Isovalores de Asentamientos Inducidos Post-Licuación a Nivel Superficial para a) la Condición de Campo Libre y b) condición de suelo mejorado.

La propuesta de solución mediante Columnas de Grava Compactada fue construida en un tiempo de 50 días; en condiciones favorables de trabajo se obtuvieron rendimientos de hasta 575 ml/día. Posteriormente, para validar su funcionalidad se realizaron campañas de exploración geotécnicas complementarias mediante pruebas CPTu y SPT. La comparación de las campañas de exploración previas al mejoramiento y post mejoramiento indicó el cumplimiento del objetivo del mejoramiento de suelos, “La mitigación de Licuación de Arenas”. Para cuantificar el mejoramiento de suelos, en cada localización de los tanques se realizaron sondeos antes y después del mejoramiento. Los resultados de los SPT se muestran en la Figura 7, donde se puede observar el incremento significativo de los números de golpes del SPT que se obtuvo en los cuatro sitios después de aplicar el mejoramiento con RAP.

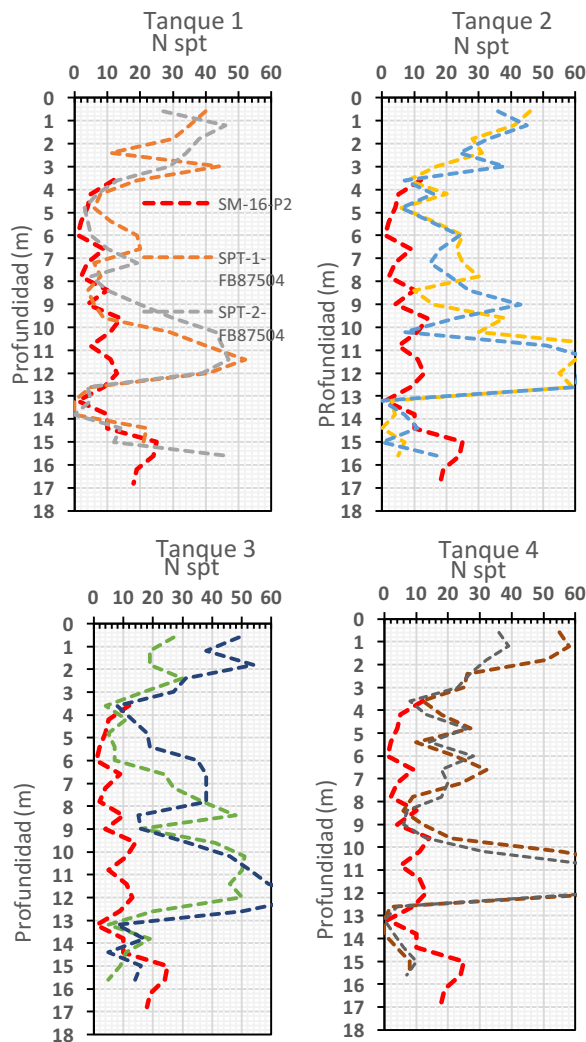


Figura 7. Registros de SPT en los cuatro tanques, antes y después del mejoramiento.

Adicional a las pruebas de SPT, se realizaron sondeos de CPT, las figuras 8 y 9 muestra el incremento de la resistencia de punta del cono en el sitio donde se ubica el tanque 1 y 2, respectivamente. En estas figuras se muestran los Factores de Seguridad calculados antes y después del mejoramiento de suelos.

La Figura 10 presenta la velocidad de instalación diaria que se registró durante la construcción de las 980 PAC's durante 7 semanas que duraron todos los trabajos. El comportamiento promedio de la instalación fue de 35 pilas de 12.5 m por día.

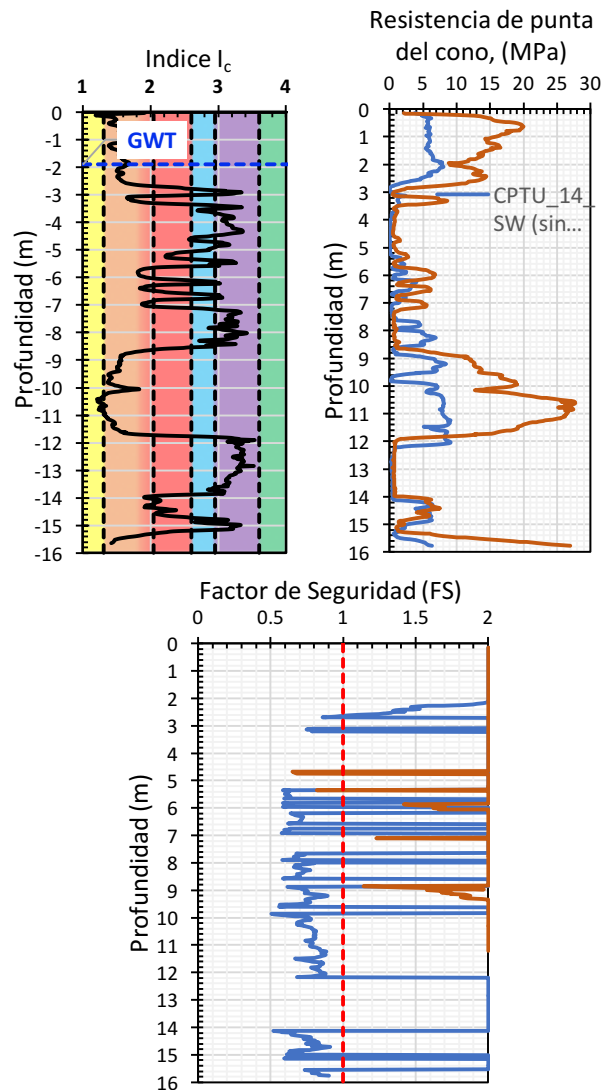


Figura 8. Registros de CPT en el Tanque 1, antes y después del mejoramiento con PAC.

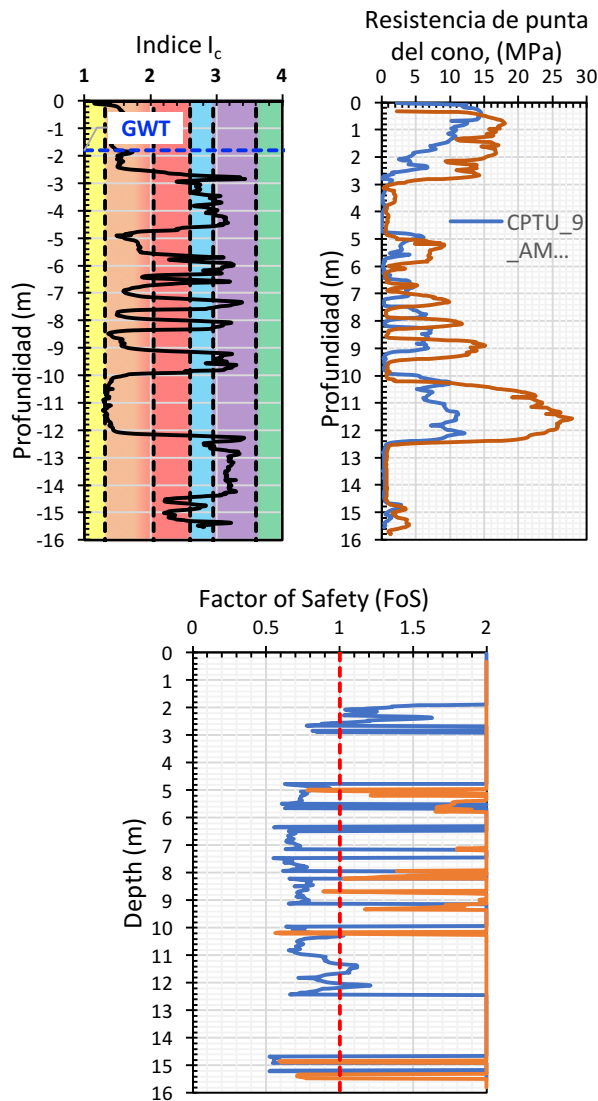


Figura 9. Registros de CPT en el Tanque 2, antes y después del mejoramiento con PAC.

5 RESUMEN Y CONCLUSIONES

En la zona reforzada, las Columnas de Grava Compactada o PAC proporcionan una compactación lateral de la matriz de suelo, lo que induce un aumento en los esfuerzos de confinamiento y en la rigidez de la matriz. Además, proporcionan un drenaje radial de la matriz de suelo que permite una rápida disipación del exceso de presión de poro. El drenaje radial proporcionado por los PAC también acelera el proceso de consolidación de los estratos de arcilla. Esto hace que se produzcan asentamientos relativamente inmediatos en la zona reforzada. Los resultados del análisis de asentamientos para las condiciones de carga de los tanques satisfacen los criterios de asentamientos permisibles adoptados en las bases de diseño del proyecto.

La profundidad de refuerzo de las PAC es de 12.5 m desde el nivel de plataforma y con un espaciamiento de 2 m entre elementos para la base flexible de los tanques. Para las zapatas corridas de la periferia de los tanques se usó un espaciamiento de 1.5 entre elementos y los anillos. El arreglo de las PAC propuesto permitió reducir los asentamientos inducidos post-licuación a 5 cm de manera relativamente uniforme en toda el área mejorada. La eficiencia del mejoramiento se verificó mediante pruebas de SPT y CPT realizadas antes y después del reforzamiento con los elementos.

Adicional se realizó un análisis de equilibrio límite para evaluar la estabilidad del borde bajo condiciones de carga estática considerando los parámetros mejorados de resistencia al corte debido al refuerzo proporcionado por las PAC. La resistencia al corte compuesta de los suelos reforzados con las PAC se calcula empleando el método convencional de promedio ponderado de los componentes de resistencia tanto de los PAC como de los materiales de la matriz de suelo (FHWA, 1999). La resistencia al corte compuesta se puede obtener con la siguiente ecuación (FitzPatrick y Wissman, 2022):

$$\tau_{comp} = \sigma'_v \tan \phi'_{comp} + c'_{comp} \quad (11)$$

La componente cohesiva compuesta puede calcularse con la siguiente ecuación:

$$c'_{comp} = c'_g R_a + c'_m (1 - R_a) \quad (12)$$

Donde c'_g es la cohesión de las PAC agregadas, c'_m es la cohesión de la matriz de suelo y R_a es la relación entre el área de PAC y el área de la huella total de la zona de suelo mejorada. Debido a que el área de la cohesión del área del PAC es de cero, la ecuación se reduce a:

$$c'_{comp} = c'_m (1 - R_a) \quad (13)$$

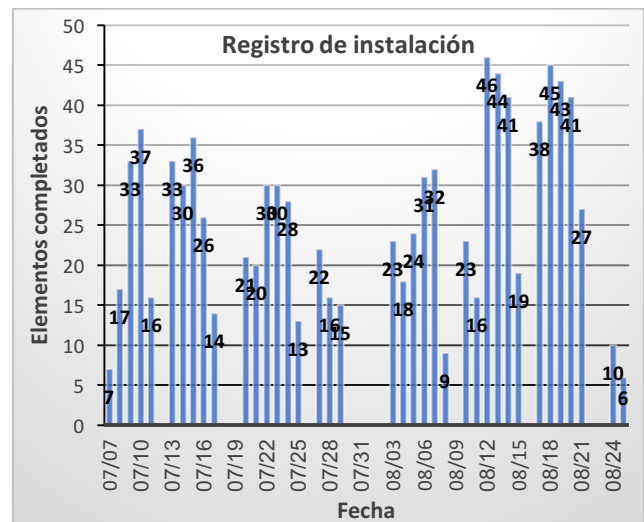


Figura 10. Registros de velocidad de instalación diaria

El ángulo de fricción compuesto (ϕ'_{comp}) se calcula con la expresión 14.

$$\phi'_{comp} = \arctan [R_a \tan \phi'_g + (1 - R_a) \tan \phi'_m] \quad (14)$$

Donde ϕ'_{comp} es el ángulo de fricción de las PAC agregados y ϕ'_m es el ángulo de fricción de la matriz de suelo. Se han medido en el laboratorio y en campo ángulos de fricción de las PAC que varían entre 48 y 52 grados, pero para propósitos de diseño, a menudo se usan ángulos de fricción ligeramente más bajos (típicamente 45 grados).

Como resultado de análisis de equilibrio límite, las presiones producidas en los bordes del tanque se encuentran dentro del rango permisible y no generan inestabilidad en los bordes, que se refleja en un Factor de Seguridad mayor a 1.5.

Para la condición dinámica se realizó un análisis de equilibrio límite pseudo estático considerando las presiones máximas y mínimas correspondientes a la condición hidrodinámica de los tanques. Además, el modelo hidrodinámico fue sometido a un coeficiente sísmico horizontal que fue tomado como el 50% de la aceleración máxima del terreno ($PGA=0.25g$). Como resultado se obtuvo que las presiones que producen los tanques en los bordes están dentro del rango permisible y no generan inestabilidad del borde con un Factor de seguridad superior a 1.1.

El mejoramiento de suelos empleando pilas de agregado compactado representó una alternativa adecuada para la cimentación de tanques de almacenamiento en áreas potencialmente licuables.

REFERENCIAS

- Boulanger, R.W. y Idriss, I.M. 2014. CPT and SPT Based Liquefaction Triggering Procedures. Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, CA.
- Federal Highway Administration, 1999. Ground Improvement Technical Summaries, Volume II. Demonstration Project 116. Publication No. FHWA-SA-98-086.
- FitzPatrick, B.T. y Wissmann, K.J. 2002. "Technical Bulletin No. 5 – Geopier Shear Reinforcement for Global Stability and Slope Stability." Geopier Foundation Company, Inc., Blacksburg, Virginia.
- Idriss, I.M., and Boulanger, R.W. 2008. Soil Liquefaction During Earthquakes. Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, CA.
- 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.
- Rollins K.M., Amoroso S., Andersen P., Tonni L. y Wissmann K., 2021. Liquefaction Mitigation of Silty Sands Using Rammed Aggregate Piers Based on Blast-Induced Liquefaction Testing. J. Geotech. Geoenviron. Eng., 2021, 147(9): 04021085. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0002563](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002563)
- Salgado R., Boulanger R.W. y Mitchell J.K. 1997. Lateral Stress Effects on CPT Liquefaction Resistance Correlations, J. Geotech. Geoenviron. Eng., 1997, 123(8).

Terzaghi, K., Peck, R.B. y Mesri, G. 1996. Soil Mechanics in Engineering Practice. 3rd Edition, John Wiley and Sons, Inc., New York.

Vega E., Flores F.A. y Zarate I., 2021. Evaluación del efecto de grupo de pilotes bajo carga axial en cimentaciones para tanques mediante modelos numéricos, XXX Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica SMIG, Plataforma Online, marzo 2021