

Geotechnical Improvement in Container Terminals: Liquefaction Mitigation and Settlement Control in Stratified Soils using Rammed Aggregate Piers®

Mejoramiento Geotécnico en Terminales de Contenedores: Mitigación de Licuación y Control de Asentamientos en Suelos Estratificados mediante Pilas de Agregado Compactado®

[José Miguel] [Bimbrera] & [José Luis] [Aguirre]

[Ingeniería], [SOILSOLUTION], [México], [jbimbrera@soilsolution.com.mx]

ABSTRACT: Este artículo se centra en el mejoramiento del suelo de una terminal de contenedores en México, abordando los desafíos geotécnicos planteados por la actividad sísmica y las diversas condiciones del suelo. Se destaca la aplicación exitosa de Pilas de Agregado Compactado (RAP, por sus siglas en inglés) para mejorar la capacidad de carga tanto de suelos arenosos como arcillosos, mitigando eficazmente los riesgos de licuación. El estudio incluye un análisis comparativo antes y después de la implementación del mejoramiento, demostrando un aumento en la resistencia del suelo. Se detalla la metodología para el diseño y la construcción de las pilas, así como su impacto en la reducción del riesgo de licuación, concluyendo que los RAP ofrecen una solución eficaz para estabilizar y fortalecer suelos en áreas costeras sísmicas.

KEYWORDS: Rammed aggregate piers, liquefaction, soil improvement, settlements.

1 INTRODUCCIÓN

El enfoque principal de este artículo se centra en el proceso de mejoramiento del suelo en una terminal de contenedores en México. Esta terminal está situada en la costa del Pacífico, en el Occidente de México, una zona tectónica con diferentes fuentes sísmicas provenientes del lecho marino y del continente. Dentro de las placas oceánicas se encuentran las placas de Cocos y Rivera, que se hunden debajo de la placa continental norteamericana a lo largo de la trinchera Mesoamericana, formando zonas de subducción donde ocurren muchos terremotos. Además, las zonas oceánicas de fracturas de Tamayo y de Rivera, en conjunto con el Dorsal del Pacífico, producen también un gran número de sismos con magnitudes elevadas. En el continente, las fallas normales de Tepic-Zacoalco, Colima y Chapala forman una triple conexión de fallas tectónicas con gran potencial de actividad sísmica.

Geotécnicamente, el predio estaba caracterizado por la presencia de capas intercaladas de arena de compacidad suelta y arcilla de consistencia media, de acuerdo con el estudio de mecánica de suelos efectuado. Este trabajo presenta un análisis detallado que resalta la eficacia de las Pilas de Agregado Compactado (PAC) como técnica de mejoramiento del suelo, aplicable tanto a suelos arcillosos como arenosos.

El empleo de Pilas de Agregado Compactado en las capas de arenas sueltas de la terminal ha demostrado ser altamente eficiente para densificar el material, mejorando así su capacidad de carga y proporcionando una base sólida y segura para las infraestructuras en esta ubicación. Es importante resaltar que, a lo largo de la línea costera de México, la licuación es un fenómeno común que puede tener efectos devastadores en estructuras construidas sobre materiales susceptibles a este proceso. Las Pilas de Agregado Compactado han mostrado su eficacia tanto en condiciones estáticas como dinámicas, contribuyendo significativamente a mitigar la licuación.

En cuanto a las arcillas presentes, las PAC tienen la ventaja de generar un pre esfuerzo en estos materiales, además aceleran el proceso de consolidación del suelo al funcionar como drenes,

resultando en un aumento sustancial de la capacidad de carga y una optimización del control de asentamientos por consolidación, en un período de tiempo más breve de lo habitual.

Finalmente, se llevó a cabo un análisis comparativo entre sondeos realizados antes y después del proceso de mejoramiento, lo cual evidenció la efectividad de la densificación en los estratos de arena al ver un incremento en los valores de q_c para pruebas CPT como se muestra en la parte 5 de este artículo, así como la disminución de asentamientos con base en los análisis realizados donde disminuyeron en un orden de 16 cm.

2 DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA DEL PROYECTO

De acuerdo a la información geotécnica recibida las condiciones estratigráficas por debajo del nivel de perforación (+2.60 m) consistían de manera general en arena limosa (SM) muy suelta a suelta hasta una elevación de -2.4 a -4.4 m, subyacida por arcilla (CL) de rigidez media a rígida comprendida de la elevación -4.4 m. a -8.4 m, seguida de arena limosa de compacidad media a densa (SM) hasta aproximadamente -10.4 m de elevación, posteriormente se presentaba una arena con limos de compacidad media (SP-SM) hasta la elevación aproximada de -16.4 m, subyacida por una arcilla muy rígida (CL) hasta la elevación aproximada de -22.4 m, seguida de una arcilla muy rígida a dura (CL) hasta la elevación máxima de exploración de aproximadamente -27.4 m. Se encontró el Nivel de Agua Freática a aproximadamente +0.6 m de elevación.

Esta estratigrafía generaba una gran complejidad geotécnica de doble índole en la terminal de contenedores. En primer lugar, la frecuencia sísmica en México, con más de 90 sismos anuales registrados de magnitud superior a cuatro en la escala de Richter, es un factor crítico. Estos eventos, derivados de las fallas geológicas en las costas del Pacífico, propician el fenómeno de licuación de los suelos propensos a este, como lo son las arenas sueltas y saturadas encontradas en el sitio de estudio. Donde se llevó a cabo un análisis

de licuación, obteniendo valores de asentamientos post licuación en condiciones de campo libre de hasta 24 cm, mientras que el asentamiento permisible en estas condiciones post-licuación era de 12.7 cm. Esta diferencia evidenciaba la inminente necesidad de mitigar estos efectos y mantener la estabilidad estructural en condiciones de licuación. Mientras tanto, los estratos arcillosos generaban inquietudes por asentamientos excesivos a largo plazo.

De acuerdo a los análisis realizados los asentamientos en condiciones in situ eran de alrededor de 50 cm, superando por mucho los valores requeridos de 30 cm en 20 años. La interacción compleja entre estos factores geotécnicos era un desafío esencial que requería atención urgente para asegurar la seguridad y la funcionalidad de las instalaciones. En la tabla 1 se resumen algunos de los datos más relevantes del proyecto.

Tabla 1. Área Propuesta para el Mejoramiento de Suelos con Pilas de Agregado Compactado.

Estructura	Área Aproximada m ²	Presión Aplicada por Contenedor (KPa)	Presión Relleno (kPa)	Asentamientos Totales Admisibles
Terminal de contenedores	106,000	51.1	16.0	300 mm en un periodo de 20 años
				150 mm en un periodo de 5 años
				100 mm en un periodo de 2 años

3 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE PILAS DE AGREGADO COMPACTADO®

Las Pilas de Agregado Compactado® son columnas de grava altamente densificadas que gracias a su particular proceso constructivo también rigidizan al suelo matriz circundante a las mismas. Como resultado, se obtiene una masa de suelo reforzada que exhibe una mayor capacidad de carga, una mayor rigidez y por ende, un buen control de asentamientos. Además, en suelos arenosos sueltos permite la densificación y la mitigación del fenómeno de licuación.

3.1 Construcción y diseño de las PAC.

Los elementos se construyen ya sea por desplazamiento o por perforación y reemplazo. En el primer método (Figura 1), los elementos PAC se construyeron en este proyecto utilizando la técnica de desplazamiento, donde una máquina hincadora inserta un mandril de tubo de extremo abierto en el suelo. El método empleado combina presión hidráulica con energía vertical del martillo vibratorio para desplazar y densificar los suelos susceptibles a la licuación. Se introduce grava triturada con un tamaño nominal máximo típicamente de 1.5 pulgadas y un tamaño nominal mínimo típicamente de 0.5 pulgadas a través del mandril desde una tolva montada en la parte superior y se compacta en las cavidades desplazadas, generando Pilas de Agregado densas y rígidas.

Además, el proceso de instalación densifica verticalmente el agregado y a su vez fuerza lateralmente el agregado hacia las paredes laterales de la cavidad. Se ha demostrado que los métodos de construcción aumentan la densidad del agregado de la PAC proporcionando un ángulo de fricción superior a 45° (White et al. 2002).

Estas pilas suelen diseñarse y construirse empleando un patrón de disposición triangular o cuadrada, ajustando el espaciado de centro a centro para alcanzar la relación de área de reemplazo objetivo.



Figura 1. Secuencia de construcción de PAC® por el método de desplazamiento.

3.2 Construcción y diseño de las PAC.

La metodología de control de asentamientos de las Pilas de Agregado Compactado se basa en un enfoque de dos capas, como se describe en los trabajos de Lawton et al. (1994), Fox y Cowell (1998) y Wissmann et al. (2002). Dentro de la zona reforzada con PAC, conocida como la zona superior, se crea una zona reforzada con menor compresibilidad que reduce el asentamiento de las estructuras. El asentamiento por debajo de la zona reforzada, denominada zona inferior, se evalúa utilizando los enfoques convencionales de análisis geotécnico. El asentamiento total (s_{tot}) se evalúa como la suma del asentamiento de la zona superior (s_{uz}) y el asentamiento de la zona inferior (s_{iz}).

El asentamiento de la zona reforzada (zona superior) se estima con la ley de Hooke:

$$S_{uz} = \frac{q I_{\sigma} H_{uz}}{E_{comp}} \quad (1)$$

donde: q = es la presión aplicada del silo, I_{σ} = es el factor de influencia de esfuerzos en la zona superior, H_{uz} = es el espesor de la zona superior reforzada; y E_{comp} = es el módulo elástico compuesto de la zona superior reforzada y se obtiene de:

$$E_{comp} = E_g R_a + E_m (1 - R_a) \quad (2)$$

Donde: R_a = es la relación de área de reemplazo, E_g = es el módulo elástico del agregado; y E_m = módulo elástico de la matriz de suelo.

3.3 Drenaje Radial.

Los métodos de diseño para el drenaje radial se basan en las metodologías descritas en NAVFAC (1982) y Han & Ye (2001). Las Pilas de Agregado Compactado se pueden instalar para generar una reducción en la duración del asentamiento de los estratos compresibles de las siguientes maneras:

-Las Pilas de Agregado Compactado actúan como elementos de drenaje cuando se construyen con grava limpia. La incorporación de drenaje radial reduce las longitudes de las trayectorias de drenaje, reduciendo así el tiempo de ocurrencia de asentamientos.

-La concentración de esfuerzos en las Pilas de Agregado Compactado reduce la cantidad de presión en la matriz del suelo, lo que se traduce en una reducción del asentamiento entre elementos (Han & Ye 2001).

El drenaje radial hacia las Pilas de Agregado Compactado se calcula mediante la metodología desarrollada por Barron (1948) quien desarrollo su solución para drenes verticales de arena basándose en la teoría de la consolidación unidimensional propuesta por Terzaghi en donde el suelo es homogéneo y completamente saturado, el agua y las partículas del suelo son incompresibles y el flujo de agua y la compresión ocurren en una sola dirección. La ley de Darcy para el flujo de agua es válida, y la permeabilidad y compresibilidad del suelo son constantes durante el incremento de esfuerzos (FHWA 2017). 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:

$$t = \frac{T_r d_e^2}{C_r} \quad (3)$$

El factor tiempo se calcula evaluando primero la relación de diámetro (n), que es la relación entre el diámetro efectivo del drenaje y el diámetro construido del dren instalado (d_w). Los diámetros de drenaje efectivos se evalúan en función de la geometría de los elementos espaciados en cuadrículas triangulares o cuadradas.

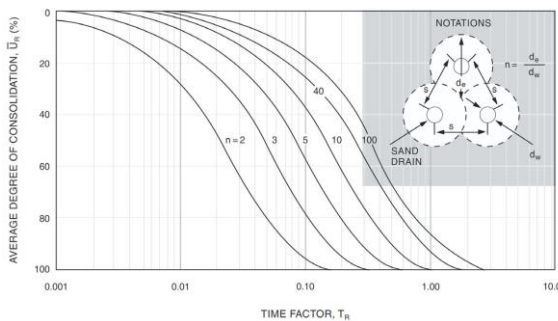


Figura 2. Grado de Consolidación por Drenaje Radial (NAVFAC, 1986).

Comúnmente se supone que el valor del coeficiente de consolidación radial está entre 1.5 y 4 veces (NAVFAC 2022) el valor del coeficiente de consolidación vertical (c_v). Esta relación puede ser significativamente mayor en suelos estratificados

horizontalmente. Los valores del coeficiente de consolidación (c_v) están relacionados con muchos factores, incluida la mineralogía del suelo, la granulometría y la historia de depósito del suelo matriz (Terzaghi et al. 1996). Para suelos cohesivos, estos valores se evalúan a partir de pruebas de consolidación o se pueden estimar a partir de valores de límite líquido e historial de esfuerzos (sobre-consolidación).

4 FENÓMENO DE LICUACIÓN

La licuación se presenta principalmente en arenas con bajo contenido de finos y limos de baja plasticidad con índices plásticos menores al 7% y una relación de contenido de agua / límite líquido menor a 0.85 (Bray & Sancio, 2006), la licuación hace que este tipo de suelos pierdan su resistencia al corte de manera temporal, adquiriendo el comportamiento de un fluido viscoso.

4.3 Análisis de Susceptibilidad de Licuación (Idriss & Boulanger 2008)

El potencial de licuación del sitio se analizó utilizando la metodología descrita por Idriss & Boulanger (2008) basada en el método simplificado desarrollado por Seed & Idriss (1971). Esta metodología expresa el potencial de licuación como un factor de seguridad:

$$FS_{Liq} = \frac{CRR}{CSR} \quad (4)$$

Donde CRR es una estimación de la resistencia al corte de la masa de suelo para resistir el movimiento sísmico y CSR es una estimación del esfuerzo cortante aplicado a una masa de suelo durante un evento sísmico. Para cualquier profundidad analizada, es probable que ocurra licuación cuando FS_{Liq} es menor que la unidad. La demanda sísmica CSR se puede calcular si se conoce la magnitud máxima esperada de un sismo, así como la aceleración máxima en la superficie del terreno que generaría. Comúnmente, el valor de CRR se calcula empleando correlaciones de parámetros obtenidos mediante pruebas de campo, como el número de golpes (N) de la prueba SPT y la resistencia por punta (q_c) de la prueba CPT.

4.2 Índice de Potencial de Licuación LPI

El Índice de Potencial de Licuación (LPI) cuantifica la gravedad de la licuación y predice las manifestaciones superficiales, el daño por licuación o el potencial de falla de un área propensa a la licuación. El LPI en un sitio se calcula integrando los factores de seguridad (FS) a lo largo de la columna de suelo hasta un máximo de 20 m de profundidad. Además, se agrega una función de ponderación para dar más peso a las capas cercanas a la superficie del suelo. El índice de potencial de licuación (LPI) propuesto por Iwasaki et al. (1978, 1982) se expresa de la siguiente manera:

$$LPI = \int_0^{20} Fw(z) dz \quad (5)$$

donde $F = 1 - F_{sliq}$ para $F_{sliq} < 1$ y $F = 0$ para $F_{sliq} > 1$; $w(z)$ es una función de ponderación dada por $w(z) = 10 - 0.5z$ para $z < 20$ m y $w(z) = 0$ para $z > 20$ m; and z es la profundidad en metros por debajo de la superficie del suelo.

Por lo tanto, se supone que la severidad de la manifestación de licuación es proporcional al espesor de una capa licuada, la proximidad de la capa a la superficie del suelo y la cantidad por la cual F_{sliq} es menor que 1.0. Dada esta definición, LPI puede variar de 0 a un máximo de 100.

Tabla 2. Severidad de Licuación Evaluada a partir del Índice de potencial de Licuación (Iwasaki et al.; 1982).

LPI	Liquefaction Potential
LPI = 0	Very Low
0 < LPI < 5	Low
5 < LPI < 15	High
15 < LPI	Very High
LPI	Liquefaction Potential

5 TERMINAL DE CONTENEDORES EN MÉXICO

El diseño de Pilas de Agregado Compactado para este alcance consistió en la ejecución de 23,159 elementos con un diámetro instalado promedio de 0.50 m (20 Pulgadas) de 11.0 a 13.0 m de longitud por debajo de la plataforma de relleno, con un espaciamiento máximo de 2.2 m (7.2 pies) centro a centro en un arreglo cuadrangular para la huella de la zona. Las PAC alcanzaron valores de rigidez del orden de 25,000 t/m³, garantizando un correcto funcionamiento de los elementos.

5.1 Parámetros empleados en el Diseño y Análisis de Asentamientos Estáticos

Para este proyecto se utilizó la metodología del módulo elástico compuesto para estimar los asentamientos totales inducidos por el terraplén y los contenedores. Los valores de los parámetros de diseño utilizados en el análisis se muestran a continuación en la Tabla 3.

Tabla 3. Modelo geotécnico mejorado en la zona de contenedores.

Unidad geotécnica	SUCS	Elevación (m)	E_m (MPa)	E_g (MPa)	E_{comp} (MPa)
UG-01 (PAC)	SM FC%17	+2.6 a -4.4	15.0	215.0	23.4
UG-02 (PAC)	CL FC%60	-4.4 a -8.4	2.0	134.0	$C_{ec}=0.04$
UG-02	CL FC%60	-4.4 a -8.4	2.0	134.0	$C_{ec}=0.04$
UG-03	SM FC%14	-8.4 a -10.4	15.0	-	-
UG-04	SP-SM FC%9.5	-10.4 a -16.4	30.0	-	-
UG-05	CL FC%55	-16.4 a -22.4		$C_{ec}=0.117$	$C_{er}=0.015$
UG-06	CL FC%65	-22.4 a -27.4		$C_{ec}=0.086$	$C_{er}=0.011$

La Figura 3 muestra los asentamientos totales vs. tiempo, correspondiente a la zona mejorada donde el 90% de los asentamientos presentados ocurren en un periodo de tiempo de aproximadamente 2 meses después de la aplicación de las cargas de servicio.

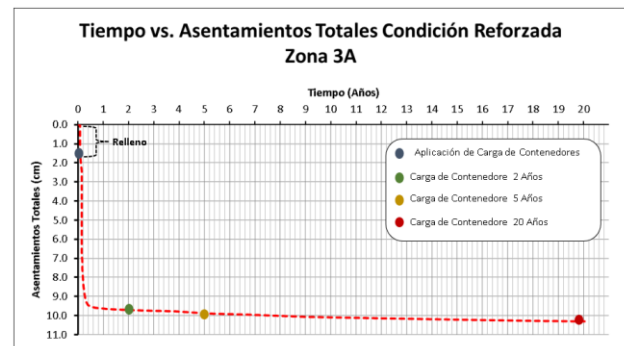


Figura 3. Asentamientos totales en condiciones reforzadas, considerando carga de contenedores.

Se realizó un análisis tridimensional utilizando el software Settle 3 de Rocscience para evaluar el posible traslape de esfuerzos y verificar que las deformaciones verticales máximas se encuentran dentro de los criterios permisibles. Los asentamientos calculados considerando el mejoramiento con Pilas de Agregado Compactado está dentro de los criterios de asentamiento permitidos.

5.2 Mitigación del Riesgo de licuación.

Se realizó un análisis de susceptibilidad de licuación utilizando la metodología de Idriss & Boulanger (2008), con base en los sondeos de penetración estándar SPT, considerando los parámetros obtenidos del estudio de espectro de sitio realizado para este proyecto, del que se extrajeron los valores de $M_w=7.8$ y $PGA=0.3g$.

Los asentamientos inducidos después de la licuación para las condiciones de campo libre se estimaron en aproximadamente 24 cm, utilizando la metodología de Ishihara y Yoshimine (1992).

Se realizó el mismo análisis para una condición reforzada con PAC, para lo cual se emplean factores de mejoramiento del qc estimados con base en los diferentes estudios elaborados para este tipo de mejoramiento (Smith y Wissmann en 2018; Amoroso et al. en 2020) que se pueden consultar en las publicaciones de estos autores, los resultados muestran una disminución en los asentamientos inducidos posteriores a la licuación en un valor aproximado de 3.5 cm. La Tabla 4 presenta los asentamientos inducidos Post-Licuación resumidos para condiciones de campo libre y reforzadas de igual manera en la Tabla 5 se muestra el índice de potencial de licuación para ambas condiciones.

Tabla 4. Cálculo de asentamientos Post-Licuación para condiciones de campo libre y reforzadas.

Sondeo	Asentamientos Post-Licuación en condiciones de campo libre, cm	Asentamientos Post-Licuación en condiciones reforzadas, cm
YS-02	19.0	3.5
YS-03	15.0	0.5
YS-04	9.0	1.0
YS-10	11.0	1.0
YS-12	24.0	2.0
YS-18	14.0	2.0
YS-24	19.0	2.0
YS-26	20.0	3.3

Tabla 5. Cálculo del índice Potencial de Licuación (Iwasaki;1982) para condiciones de campo libre y reforzadas.

Sondeo	Índice de Potencial de Licuación en campo libre	Índice de Potencial de Licuación en condiciones mejoradas
YS-02	19.0	3.5
YS-03	15.0	0.5
YS-04	9.0	1.0
YS-10	11.0	1.0
YS-12	24.0	2.0
YS-18	14.0	2.0
YS-24	19.0	2.0
YS-26	20.0	3.3

5.3 Validación de los efectos de la instalación de las pilas de agregado compactado.

Diversos estudios llevados a cabo por diferentes autores, como Vautherin E. en 2017 y Amoroso S. en 2022, han proporcionado evidencia concluyente sobre la eficacia de las Pilas de Agregado Compactado®. Después de la instalación de estas pilas, se han observado consistentemente aumentos significativos en los valores de N en las pruebas SPT. En el caso de los sondeos CPT, se registran incrementos en los valores de la resistencia por punta (qc) y en el módulo edométrico (M), superando comúnmente el 200% del valor original. Esto demuestra de manera contundente que la instalación de las PAC contribuye a aumentar la rigidez del suelo. Esta aproximación se presenta como una solución prometedora, especialmente en suelos limosos y arenas limosas, no solo para mejorar su densidad, sino también para incrementar el esfuerzo lateral y la rigidez (Smith y Wissmann en 2018; Amoroso et al. en 2020).

Adicionalmente, se ha comprobado un incremento significativo en los esfuerzos horizontales derivado de la construcción de las Pilas de Agregado Compactado, lo que genera un aumento en la presión lateral del suelo en reposo (K_0), según lo estudiado por Baldi et al. en 1986. Este incremento del esfuerzo lateral aplicado sobre un suelo normalmente consolidado origina una trayectoria de esfuerzo AB como se muestra en la Figura 4, y puede ser tan alta como el límite pasivo. La carga posterior ejercida por la cimentación sigue entonces una trayectoria de esfuerzo BC, que está en la zona antes de llegar a la envolvente de consolidación. En C, el círculo de Mohr intersecta la envolvente de consolidación, terminando la respuesta elástica lineal e iniciando la consolidación. Las cargas de la cimentación sobre un suelo normalmente consolidado confinado por un esfuerzo lateral como el generado por las pilas de agregado compactado deberían, por lo tanto, provocar una respuesta casi elástica lineal en lugar de iniciar inmediatamente la consolidación.

Siempre y cuando los respectivos valores de las envolventes de falla y de consolidación sean constantes, se pueden extrapolar al origen, independientemente de si el suelo es granular o cohesivo (Lambe y Whitman 1969).

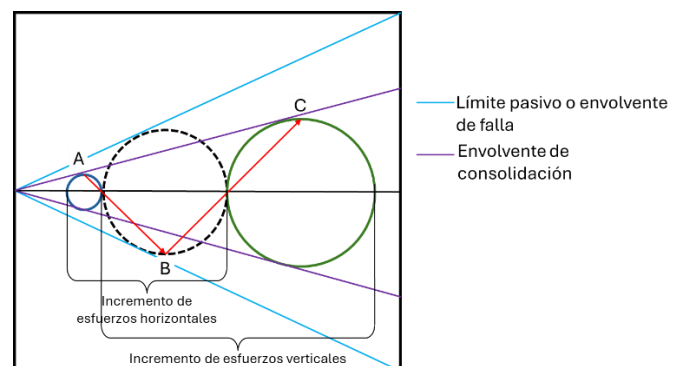


Figura 4. Inversión de los esfuerzos.

Los efectos del incremento del esfuerzo lateral sobre la compresibilidad también se estudiaron en una serie de pruebas de laboratorio en la Universidad Estatal de Iowa, cuyos resultados se presentan en la Figura 5 que ilustra el aumento de la presión de preconsolidación con el incremento del esfuerzo de confinamiento horizontal. También se observa que la pendiente de la respuesta de recompresión se reduce (indicando una respuesta más rígida del suelo de la matriz).

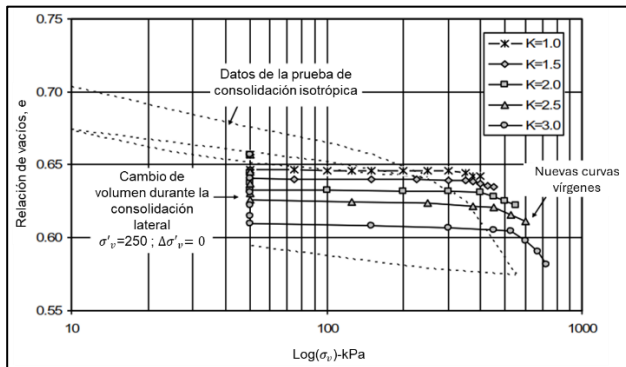


Figura 5. Incremento de la presión de preconsolidación derivado del aumento del esfuerzo de confinamiento horizontal.

Para comprobar los puntos anteriores se realizó una campaña de exploración que consistió en la ejecución de sondeos CPT pre y post la instalación de los elementos PAC. Con los resultados se llevó a cabo una comparativa para comprobar que el mejoramiento de suelo hubiese sido efectivo. En el siguiente gráfico (Figura 6) se muestra los resultados de q_c para los sondeos CPT.

Con base en las gráficas de las Figura 6 a 11, se observa un aumento en la resistencia por punta, q_c , en el estrato comprendido entre 2.8 y 5 m, principalmente. En este intervalo, el valor de q_c experimenta un incremento del orden de 1.5 veces. Es relevante señalar que, de acuerdo con la estratigrafía y el índice de plasticidad (I_c), el incremento se manifestó en los suelos clasificados como arena limosa. Resultados similares se han registrado en otros estudios, como los realizados por S. van Ballegooy (2015), quien concluyó que el uso de las Pilas de Agregado Compactado es más efectivo para aumentar la resistencia por punta, q_c , cuando el $I_c < 1.8$ (arena gravosa y arena limpia-arena limosa).

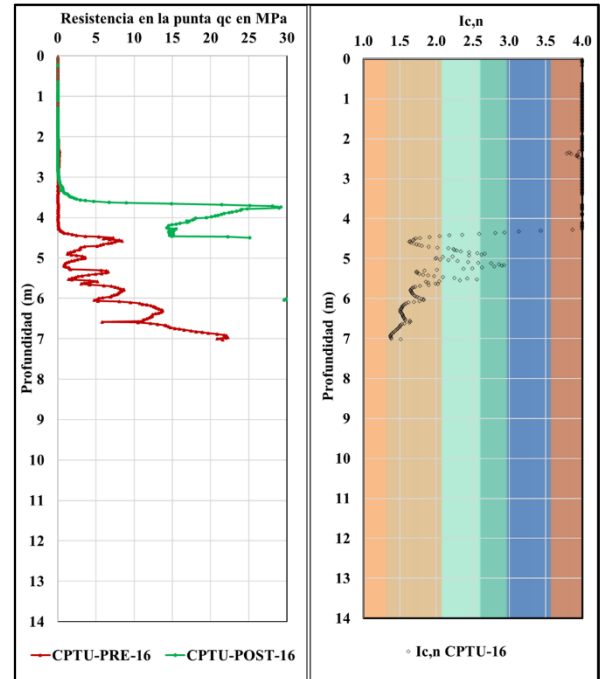


Figura 6. a) Resultados de los sondeos Pre-mejoramiento y Post-mejoramiento del CPTu -16, b) Clasificación de acuerdo al $I_{c,n}$.

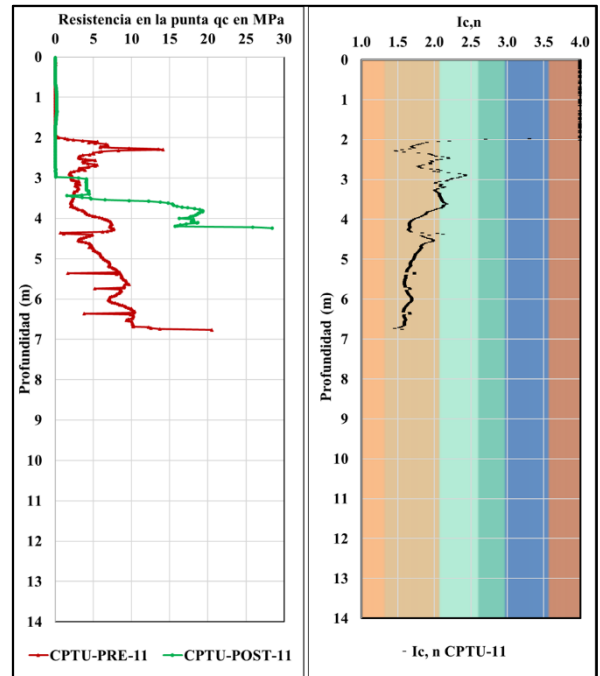


Figura 7. a) Resultados de los sondeos Pre-mejoramiento y Post-mejoramiento del CPTu -11, b) Clasificación de acuerdo al $I_{c,n}$.

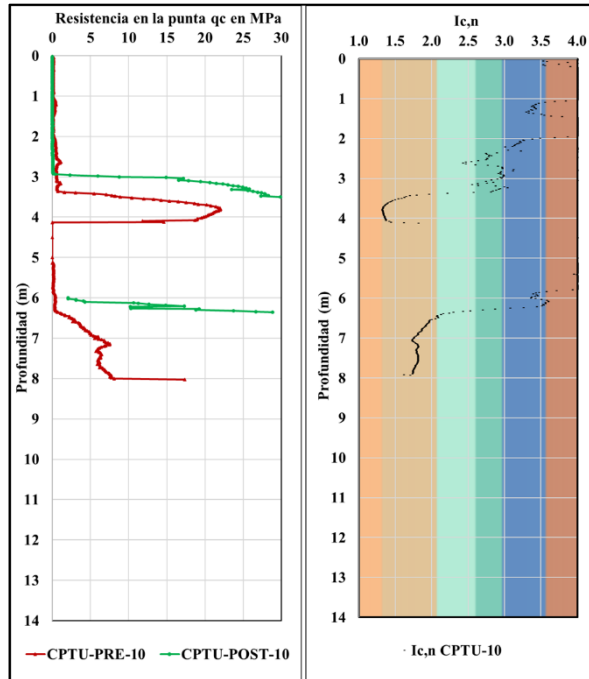


Figura 8. a) Resultados de los sondeos Pre-mejoramiento y Post-mejoramiento del CPTu -10, b) Clasificación de acuerdo al $I_{c,n}$.

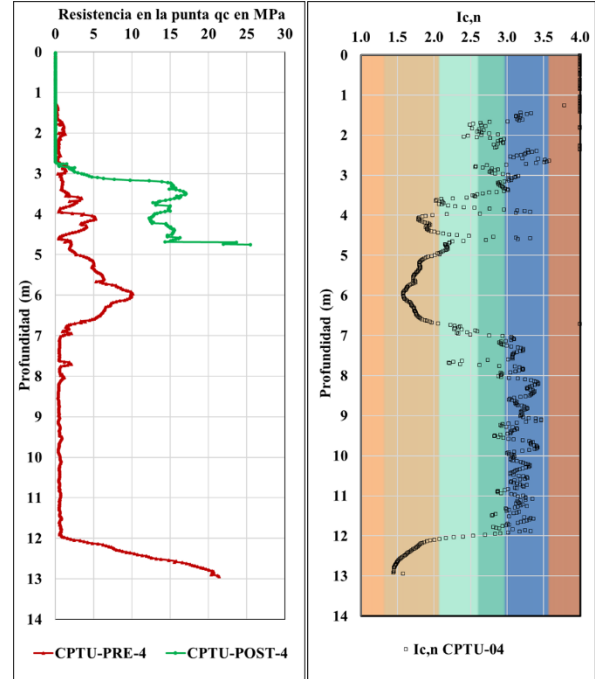


Figura 10. a) Resultados de los sondeos Pre-mejoramiento y Post-mejoramiento del CPTu -4, b) Clasificación de acuerdo al $I_{c,n}$.

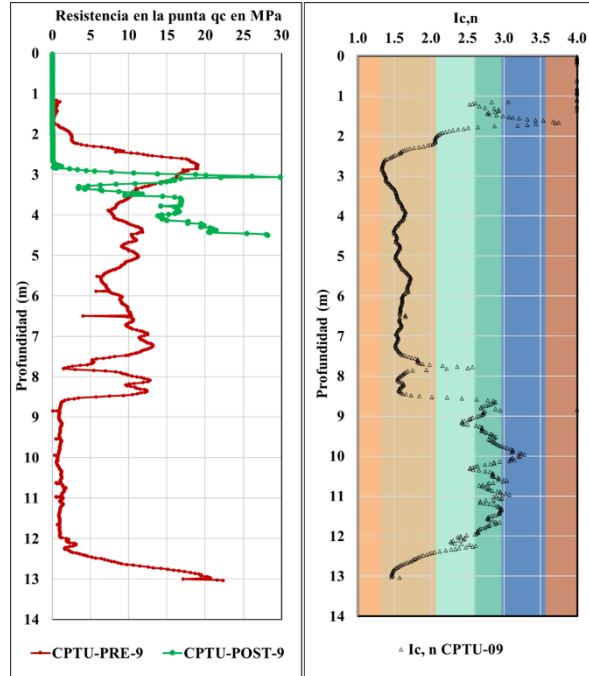


Figura 9. a) Resultados de los sondeos Pre-mejoramiento y Post-mejoramiento del CPTu -9, b) Clasificación de acuerdo al $I_{c,n}$.

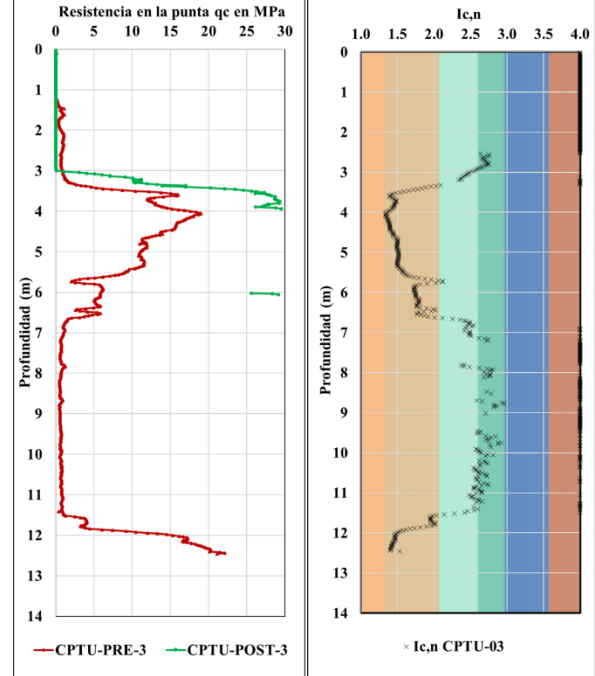


Figura 11. a) Resultados de los sondeos Pre-mejoramiento y Post-mejoramiento del CPTu -3, b) Clasificación de acuerdo al $I_{c,n}$.

6 CONCLUSIONES

- Se demuestra que las PAC son altamente eficientes para densificar estratos de arena intercalado con estratos arcillosos, proporcionando una base segura para el apoyo de cualquier tipo de infraestructura. en zonas con capas intercaladas de arena y arcilla.
- Dada la ubicación geográfica del sitio de estudio, la secuencia estratigráfica y nivel de aguas freáticas, posicionan la licuación como uno de los principales riesgos a mitigar. De las mediciones realizadas, se concluye una reducción en los asentamientos post-licuación al utilizar las PAC.
- Las Pilas de Agregado preesfuerzan los estratos arcillosos aumentando el esfuerzo de preconsolidación, gracias al esfuerzo lateral se puede aplazar el asentamiento de consolidación a una carga ejercida por una cimentación sustancialmente más alta, sin ninguna influencia de la densificación del suelo y sin necesariamente aumentar la presión poro. Además, se acelera el proceso de consolidación del suelo debido al drenaje que aportan las pilas de agregado compactado.
- En los suelos arenosos se genera un efecto de densificación derivado del incremento de esfuerzo lateral.
- Se confirmó la validez de la tesis propuesta por S. van Ballegooy en 2015, la cual se centró en el uso de Pilas de Agregado Compactado en suelos con un índice de plasticidad (Ic) inferior a 1.8, específicamente en categorías como arena gravosa y arena limpia-arena limosa.
- Basándonos en los resultados de los sondeos CPTU pre y post-mejoramiento del suelo, podemos concluir que las PAC es un sistema de mejoramiento altamente efectivo para aumentar la resistencia de punta, qc. Se observó un aumento significativo en la resistencia qc en la zona mejorada en comparación con los sondeos realizados antes del mejoramiento. En los sondeos pre-mejoramiento, los valores máximos de qc en las profundidades de 2 a 9 metros rondaban los 20 MPa, siendo únicamente dos sondeos (CPTU-PRE-10 y CPTU-PRE-16) los que alcanzaban este valor. Sin embargo, en la figura 6 se puede observar que varios sondeos post-mejoramiento alcanzan valores de qc de 25 MPa e incluso casi 30 MPa, lo que indica una mejora significativa en la resistencia del suelo. Estos resultados respaldan la eficacia del sistema de mejoramiento del suelo utilizado en el proyecto.

7 REFERENCIAS

- Adalier, K. and Elgamal, A. (2004). "Mitigation of liquefaction and associated ground deformations by stone columns." *J. Eng. Geol.* 72 (3-4):275-291
- Amoroso, S. et al. (2020). "Blast-induced liquefaction in silty sands for full-scale testing of ground improvement methods : Insights from a multidisciplinary study." *Eng. Geol.* 265 (Feb)
- Amoroso, S., et al. (2022). "Comparative Study of CPTU and SDMT in Liquefaction-Prone Silty Sands with Ground Improvement" ASCE
- Baldi G, Bellotti R, Ghionna VN, Jamiolkowski M and Pasqualini E (1986) Interpretation of CPT's and CPTU's – 2nd part: drained penetration of sands. In Proceedings of 4th International Geotechnical Seminar Field Instrumentation and In-Situ Measurements. Nanyang Technological Institute, Singapore, Singapore
- Barron, R.a. (1948). "consolidation of Fine-Grained Soils by drain Wells." *Trans. ASCE*, Vol. 113
- Bray, J.D. and Sancio, R.B. (2006). Assessment of the liquefaction susceptibility of fine-grained soils. *J. Geotechnical and Geoenvironmental Eng.* ASCE 132 (9)
- D'Appolonia, E. (1954). "Loose sands—Their compaction by vibroflotation." In *Proc., Symp. on ASTM Int.*, 138–162. West Conshohocken, PA: ASTM
- FHWA (2017). "Ground Modification Methods Reference Manual Vol. 1", Washington, DC
- Fox, N.S. and Cowell, M.J. (1998). "Geopier Soil Reinforcement Manual." Geopier Foundation Company, Inc., Blacksburg, Virginia
- Han J. and Ye, S.I. (2001). "Simplified Method for consolidated Rate of Stone column Reinforced Foundations." *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. Vol. 127, no. 7
- Handy R. (2001). "Does lateral stress really influence settlement?" *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. Vol. 127, no. 7
- Idriss. I.M., and Boulanger, R.W. (2008). "Soil Liquefaction During Earthquakes". Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, CA.
- Ishihara, K., and Yoshimine, M. (1992). Evaluation of settlements in sand deposits following liquefaction during earthquakes.
- Iwasaki, T., Tatsuoka, F., Tokida, K. and Yasuda, S. (1978). A Practical Method for Assessing Soil Liquefaction Potential Based on Case Studies at Various site in Japan. 5th Japan Earthquake Engineering Symposium.
- Iwasaki, T., Tokida, K., Tatsuoka, F., Watanabe, S., Yasuda, S., and Sato, H. (1982). Microzonation for soil liquefaction potential using simplified methods. *Proceedings 3rd International Conference on Microzonation*, Seattle, USA
- Lawton, E.C., Fox, N. S., and 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
- Mitchell, J. 1981. "Soil improvement—State-of-the-art report." In *Proc., 10th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 509–565. Rotterdam, Netherlands : A.A. Balkema.
- NAVFAC (1982). *Soil Mechanics—design Manual DM 7.1*. department of the navy naval Facilities Engineering command. alexandria, VA
- NAVFAC (2002). *Soil Mechanics—design Manual DM 6.1*. department of the navy naval Facilities Engineering command. Alexandria VA
- Schmertmann, J.H. (1970) "Static Cone to Compute Static Settlement Over Sand" *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers.* Vol. 96, No. SM3, May 1970
- Seed, H.B., and Idriss, I.M. (1971). "Simplified procedures for evaluating soil liquefaction Potential." *J. Geotech. Engrg. Div., ASCE*, 97(9), pag. 1249-1273
- Smith, M. E., and K. J. Wissmann. (2018). "Ground improvement reinforcement mechanisms determined for the Mw 7.8 Muisne, Ecuador, earthquake." In *Proc., 5th Geotechnical Earthquake*

- Engineering and Soil Dynamics Conf.: Liquefaction Triggering, Consequences, and Mitigation, 286–294. Reston, VA: ASCE
- Van Ballegooy, S et al (2015). “Christchurch Ground Improvement Trial Report.” Report for the New Zealand Earthquake Commission
- Vautherin, E., C. Lambert, D. Barry-Macaulay, and M. Smith. 2017. “Performance of rammed aggregate piers as a soil densification method in sandy and silty soils: Experience from the Christchurch rebuild.” In Proc., 3rd Int. Conf. on Performance-based Design in Earthquake Geotechnical Engineering—PBD-III. London: International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering.
- Vyacheslav M. Zobin. (2015) “Riesgo Sísmico en el Estado de Colima: exposición, peligro sísmico y vulnerabilidad sísmica de la Vivienda”
- White, d.J., et al, (2002). “Embankment Support: a comparison of Stone column and Rammed aggregate Pier Soil Reinforcement.”, Washington, d.c. January 13-17.
- Wissmann, k.J., et al., (2002). “improving Global Stability and controlling Settlement with Geopier Soil Reinforcing Elements.”, Malaysia, 26-28 March