

# **USO DE PILAS DE GRAVA APISONADA COMO SISTEMA INNOVADOR PARA EL MEJORAMIENTO DE SUELOS BLANDOS Y/O POTENCIALMENTE LICUABLES Y SU DIFERENCIA CON LAS COLUMNAS DE GRAVA CONVENCIONALES**

Xavier Vera-Grunauer<sup>1</sup>, Jaime Bravo<sup>2</sup>, Oscar González<sup>3</sup>, Sebastian López<sup>4</sup>, Hector de la Fuente<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Gerente General, Geoestudios / Profesor Universidad Católica de Guayaquil, Guayaquil, Ecuador. Email: xvg@geoestudios.com.ec

<sup>2</sup> Asistente Técnico, Geoestudios. Email: jbravo@geoestudios.com.ec

<sup>3</sup> Asistente Técnico, Geoestudios. Email: ogonzalez@geoestudios.com.ec

<sup>4</sup> Gerente Técnico, Geoestudios. Email: slopez@geoestudios.com.ec

<sup>5</sup> Vicepresidente de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica, Delegación Tabasco / Gerente General, Soilsolution. Email: hdelafuente@soilsolution.com.mx

**RESUMEN:** Debido a la necesidad de cimentar de manera más económica, práctica y creativa, edificaciones en sitios en los que el suelo presenta condiciones desfavorables para resistir la carga de las estructuras o para ofrecer un adecuado desempeño, se ha vuelto usual el uso de sistemas de mejoramiento masivo de suelos en grandes obras de la ingeniería civil. Entre estas soluciones se destaca el sistema de pilas de grava apisonadas, las cuales constituyen una solución innovadora que contribuye tanto a la disminución del nivel de asentamientos en suelos blandos como para mitigar el potencial de licuación en suelos arenosos sueltos. En este documento se exponen rasgos generales sobre el proceso constructivo, metodologías de análisis y resultados obtenidos al utilizar pilas de grava apisonada (con el sistema Geopier) en dos sitios de suelos blandos y con intercalaciones de arenas sueltas potencialmente licuables en donde mediante pruebas en campo y a través de modelos numéricos de elementos finitos se observó los beneficios del uso de dicho sistema de cimentación en comparación a las columnas de grava convencionales (vibrosustitución).

## **1. INTRODUCCIÓN**

Existen numerosos métodos para mejorar el suelo que se enfocan en solucionar cada tipo de problema geotécnico encontrado de acuerdo al tipo de suelo (Figura 1.1), tiempo de construcción y condiciones de diseño (asentamientos permisibles), por ejemplo, para el mejoramiento de suelos arcillosos blandos, el uso de sistemas de precarga en combinación con drenes verticales para acelerar el proceso de consolidación ha permitido optimizar el periodo de construcción (Stark et al., 1999) ó el uso de compactación dinámica en perfiles de suelo arenoso suelto ha sido probado para mejorar el desempeño de terraplenes en vías (Lukas, 1997). Sin embargo, en estratigrafías heterogéneas donde se presentan múltiples problemas geotécnicos, la aplicabilidad de estas metodologías se ve limitada. Las pilas de grava apisonada constituyen una alternativa de solución global mediante el mejoramiento del suelo a través de cuatro mecanismos: a) Densificación del suelo matriz, b) el incremento de esfuerzos laterales en el suelo matriz, c) drenaje y disipación de presión de poros, d) el aumento de la resistencia al esfuerzo cortante del suelo durante un evento sísmico.

Técnicas de mejoramiento de suelo	Arcillas orgánicas o turbas	Arcillas o limos inorgánicas	Limos/arcillas arenosos, arenas limosas/ arcillosas o rellenos	Arenas limpias o gruesas
	PRECARGA			
		PILAS DE GRAVA (GEOPIER) / COLUMNAS DE GRAVA (VIBROSUSTITUCIÓN)		
			COMPACTACIÓN DINÁMICA	
				DENSIPACT / VIBRO-COMPACTACIÓN
	GEOCONCRETE COLUMNS / INCLUSIONES RÍGIDAS			
	JET GROUTING			

Figura 1.1 Técnicas de mejoramiento de suelo

## 2. GENERALIDADES

Tanto las pilas de grava apisonada como las columnas de grava convencionales se construyen con material agregado colocado en capas y en secuencia ascendente. Sin embargo, las columnas de grava convencionales se instalan utilizando sondas vibratorias suspendidas (vibrolanza) que solo proporcionan vibración horizontal, mientras que las pilas de grava apisonada se construyen utilizando un apisonador patentado biselado que permite aplicar una gran magnitud de energía de compactación vertical (**Figura 2.1**) lo cual genera un presfuerzo tanto en las pilas de agregado como en el suelo matriz circundante, aportando mayor confinamiento lateral al suelo y densificándolo (Figura 2.2). El procedimiento constructivo se detalla en Fox & Cowell (1988).

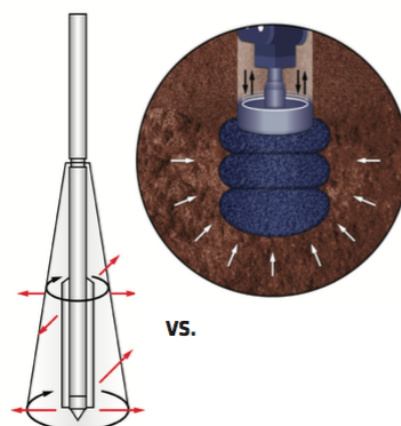


Figura 2.1 Diferencias en el sistema de aplicación de las columnas de grava convecionales (izquierda) y pilas de grava compactada (derecha).

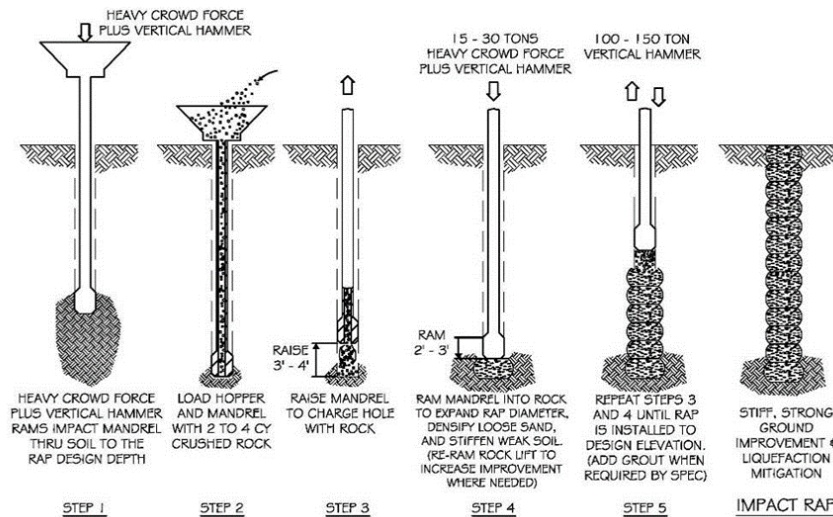


Figura 2.2 Proceso constructivo de las pilas de agregado apisonado (ICC-ES, 2017)

## 2.1 ENFOQUE DE MEJORAMIENTO EN SUELOS BLANDOS

Las pilas de grava apisonada también presentan una solución de mejoramiento para suelos blandos con baja capacidad de carga. A través de su inclusión rígida en el suelo matriz, no solo trabajan resistiendo las cargas axiales del proyecto, sino que también proveen, con el paso del tiempo, un aumento en la resistencia del suelo matriz producto de la densificación y aumento de esfuerzos laterales en el suelo. Para el cálculo del esfuerzo de diseño de un elemento de pilas de grava se considera la analogía de resorte rígido y resortes flexibles. Esta analogía de cálculo supone a la pilas de grava como un “resorte rígido”, y al suelo blando circundante como “resortes flexibles” (Figura 2.3). En base a esta suposición el esfuerzo actuante en el tope de la pila se puede calcular de la siguiente manera:

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

Dónde:

$q_g$ : Presión estática de diseño

$R_s$ : Tasa de rigidez, depende del tipo de suelo. Valores altos son asignados para suelos sueltos y suelos con alto contenido de finos.

$R_a$ : Tasa de reemplazo de área

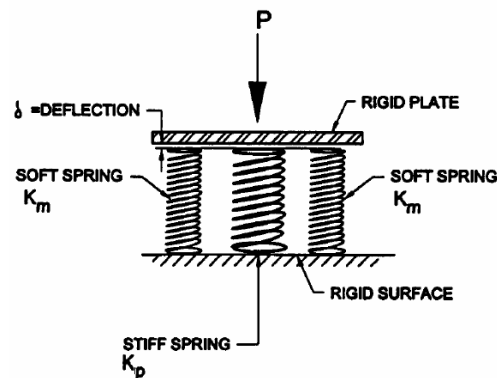


Figura 2.3. Analogía del resorte rígido y resortes flexibles (Fox y Cowell, 1998)

## 2.2 ENFOQUE DE MEJORAMIENTO EN SUELOS POTENCIALMENTE LICUABLES

La licuación de suelos es un fenómeno que suele ocurrir en suelos arenosos - limosos de compacidad suelta y saturados, donde el suelo en estado natural pierde soporte o resistencia debido a los esfuerzos cortantes generados por la actividad sísmica. Las pilas de grava apisonada, a través de su particular proceso constructivo, no solo generan una densificación en el suelo matriz circundante, sino que también toma los esfuerzos cortantes del suelo brindándole mayor soporte o resistencia. Los mecanismos clave de las pilas de grava apisonada para mitigar la licuación son los siguientes:

- Aunque el material de la pilas no cumple los criterios establecidos para un filtro, la reducción gradual de la presión de poros en la pilas es importante ya que crea un efecto similar a un filtro que mantiene el soporte lateral necesario para la capacidad de carga de las pilas y que impide un mayor grado de infiltración del terreno en las pilas
- Los elementos de pilas apisonada producen una densificación de la matriz de suelo
- Transferencia del esfuerzo cortante cíclico hacia las inclusiones rígidas y aumento del esfuerzo confinante del suelo

El cálculo del potencial de licuación de un suelo viene dado de la siguiente manera:

$$FS = \frac{CRR}{CSR}$$

Dónde:

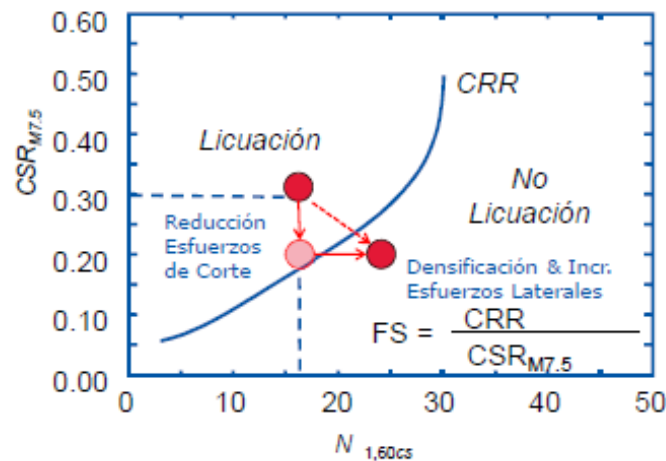
CRR: La tasa de resistencia al esfuerzo cortante cíclico producto del sismo

CSR: La demanda de esfuerzo cortante cíclico

Producto de la instalación de estos elementos de refuerzo, se suman dos factores que afectarán la expresión señalada anteriormente, como lo son el factor de incremento de esfuerzo medio por densificación ( $K_m$ ), y el porcentaje de re-distribución del esfuerzo cortante del suelo matriz hacia los elementos de pilas de grava ( $K_g$ ). Mediante estos dos factores se obtiene la siguiente expresión:

$$FS_{mejorado} = \frac{K_m CRR}{K_g CSR}$$

En la Figura 2.4, se observa cómo se puede mitigar el potencial de licuación debido a una reducción del esfuerzo cortante del suelo ( $K_g$ ), y un incremento en la densificación del suelo ( $K_m$ ) producto de la instalación de las pilas de grava apisonada.



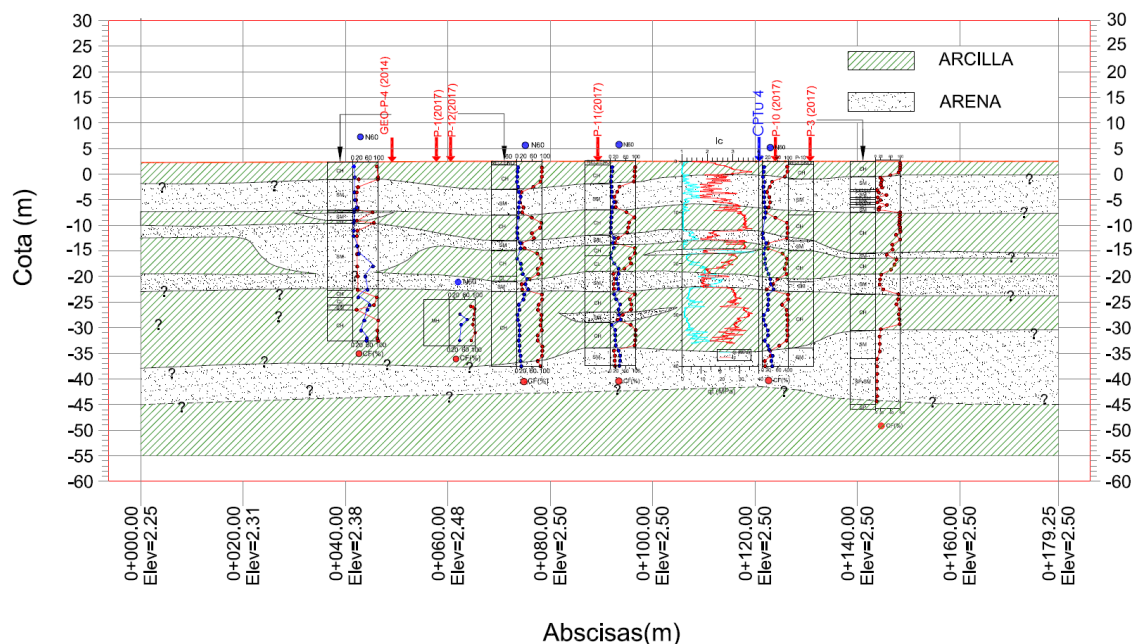
**Figura 2.4 Representación gráfica del efecto de mejoramiento en los suelos con columnas de grava apisonado**

### **3. METODOLOGÍAS DE ANÁLISIS Y RESULTADOS OBTENIDOS AL UTILIZAR PILAS DE GRAVA APISONADA**

#### **3.1 INCREMENTO EN LA RESISTENCIA Y EN EL MÓDULO DE RIGIDEZ EN ESTRATIGRAFÍAS HETEROGÉNEAS**

En la ciudad de Guayaquil, Ecuador se llevó a cabo, para un determinado proyecto (Sitio 1), la instalación de pilas de grava apisonada de prueba con la finalidad de cuantificar el efecto del mejoramiento en el suelo matriz. El sitio del proyecto se ubica en la zona Geotécnica D1 de acuerdo a lo señalado en la Microzonificación Geotécnica de Guayaquil, (Vera *et. al.*, 2014), la cual corresponde a depósitos deltaicos estuarinos. En la Figura 3.1 se presenta un perfil geotécnico característico del Sitio 1 incluyendo la exploración geotécnica realizada en el sitio, CPTu y SPT.

Geomorfológicamente, este proyecto se encuentra en una planicie de inundación, siendo altamente influenciado por el Río Daule, el cual es uno de los motivos de la alta heterogeneidad de la estratificación. Debido a sus características geológicas, estos depósitos se componen de suelos arcillosos blandos con intercalaciones de arena suelta potencialmente licuables, el nivel freático se encuentra a 1.5 m de profundidad desde la superficie del terreno natural.



**Figura 3.1 Perfil estratigráfico para el sitio de proyecto (Sitio 1)**

En este conjunto de pilas de grava se realizó una prueba de carga para estimar el módulo de rigidez de las columnas además de ensayos SPT (con barra AW instrumentada para medir la energía en cada golpe mediante medidores de deformaciones unitarias y acelerómetros), para monitorear el efecto del mejoramiento en el suelo matriz. Para esta prueba se instalaron 7 pilas de grava apisonada de 55 cm de diámetro y 13 m de longitud instaladas en tres-bolillo (arreglo hexagonal) con una separación de 2m entre ejes. En la Figura 3.2 (a) se muestran los resultados de los ensayos SPT en el mismo sitio de proyecto, antes y después de la instalación de las pilas de grava apisonada, evaluando la respuesta del suelo entre columnas, donde se observa el incremento en la resistencia a la penetración  $N_{60}$  a lo largo de 2 meses. En la Figura 3.2(b) se observa que la relación del  $N_{60}$  entre la condición sin mejoramiento, y la mejorada es en promedio de 3. De manera similar, en la Figura 3.3 se presenta el incremento en la resistencia del número de golpes en el sitio en comparación con las mediciones de otros autores (Han, 2015) donde han realizado mejoramientos con columnas de grava convencionales (vibrosustitución). Se puede observar en la Figura 6 que las pilas de agregado apisonado (Proyecto 1, círculos rojo y proyecto Briceño, círculos verdes) tiene relaciones de  $R_a$  menores a 0.10, resaltando la eficiencia del proceso constructivo en el incremento de resistencia. Al existir un incremento en la resistencia del suelo las pilas de grava apisonada disminuyen el potencial de licuación en los estratos de arena suelta que podrían producir daños en las estructuras.

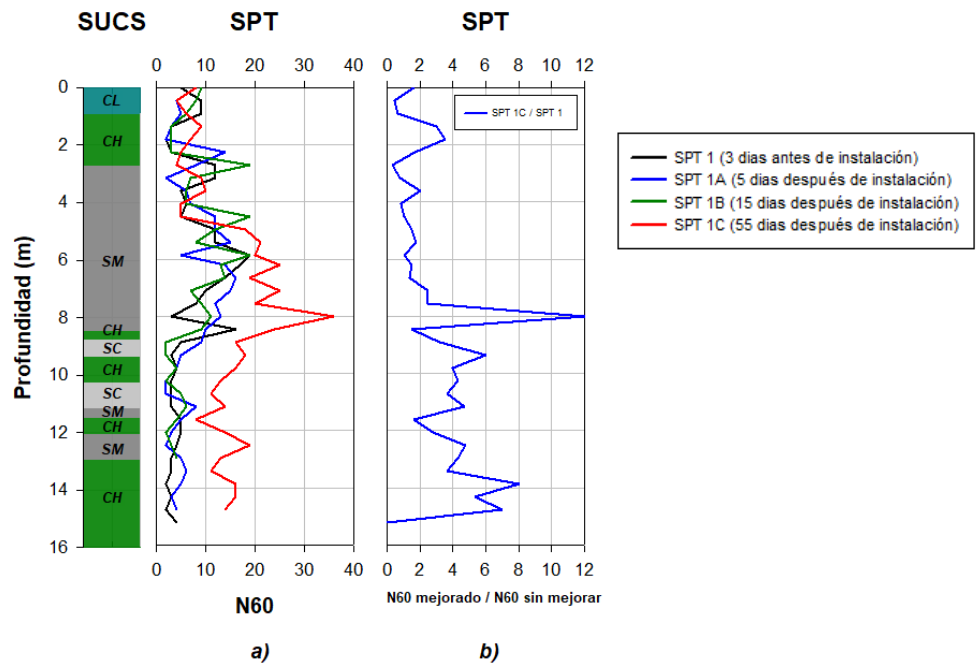


Figura 3.2 a) Resultado ensayos SPT antes y después de instalación de pilas de grava apisonada. b) Relación entre  $N_{60}$  post-mejoramiento y pre-mejoramiento.

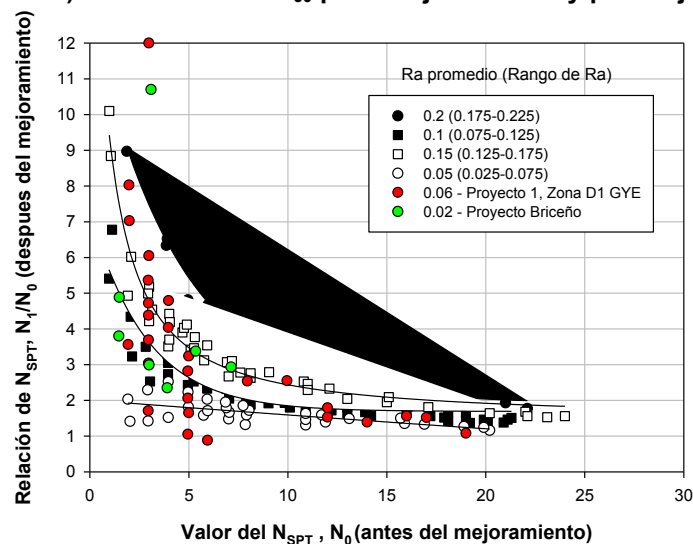
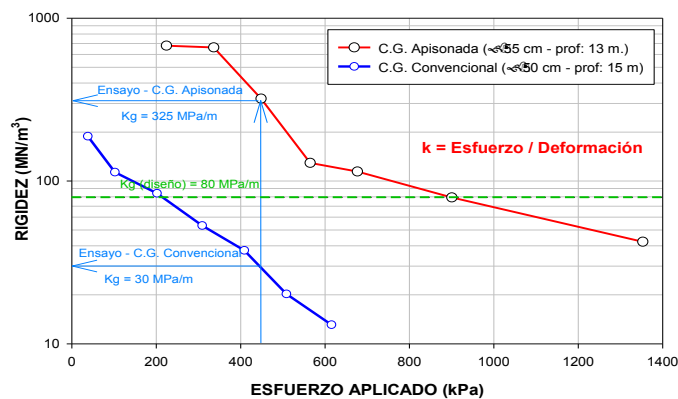


Figura 3.3 Grafica de incremento de la resistencia del  $N_{SPT}$  por mejoramiento con pilas de grava, Han (2015)

Con la finalidad de conocer la rigidez de los elementos de pilas de grava apisonada se procedió a llevar a cabo una prueba de carga para el arreglo hexagonal instalado en sitio. De igual manera, en el mismo proyecto se instaló un arreglo hexagonal de columnas de grava convencionales (vibrosustitución) con un diámetro de 50 cm y 15 m de longitud. Durante la prueba de carga en ambas columnas se procedió a aplicar esfuerzos incrementales sobre la cabeza de las columnas y a medir la deformación de los elementos en cada incremento de esfuerzo. En función de los datos obtenidos de las pruebas, se pudo calcular la rigidez de los elementos para diferentes niveles de esfuerzos aplicados. En la Figura 3.4, se observan los valores de rigidez para las pilas de grava apisonada y las columnas de grava convencionales (vibrosustitución) ensayadas en el mismo sitio y configuración geométrica similares, donde se puede

apreciar que la relación de rigidez entre ellas es de 8 a 10 veces, siendo mucho más rígida la pila de grava apisonada. Específicamente, para el proyecto en la etapa de diseño se especificó un módulo de rigidez de al menos 80 MN/m<sup>3</sup> para un esfuerzo de 420 kPa aplicado en la cabeza del elemento, las pilas de grava apisonada alcanzaron un módulo de rigidez de 325 MN/m<sup>3</sup>, mientras que las columnas convencionales alcanzaron un módulo de 30 MN/m<sup>3</sup>. La metodología de construcción por desplazamiento aplicada para las pilas de grava apisonada, en lugar de excavación y reemplazo aplicada para las columnas convencionales provee mayores rigideces en los elementos, lo que se refleja en menores asentamientos bajo las cargas generadas por la estructura.



**Figura 3.4. Gráfica de Esfuerzo-Rigidez para columnas de grava apisonada y columnas de grava convencionales a partir de resultados de pruebas de carga.**

## 3.2 METODOS DE MODELACION NUMÉRICA

### 3.2.1 MODELOS SIMPLIFICADOS

Es posible utilizar modelos simplificados para reflejar la interacción entre pilas de grava apisonada, el suelo matriz y la sobrecarga que deberá ser resistida por los mismos (ej. relleno granular). Por ejemplo, el software Settle 3D (Rocscience, 2017) permite realizar análisis tridimensionales de consolidación vertical y asentamientos bajo cimentaciones, terraplenes y cargas de superficie; combinando la simplicidad del análisis unidimensional con las características más representativas de un análisis tridimensional.

Con la finalidad de realizar este tipo de análisis simplificados, se puede estimar propiedades de compresibilidad compuestas, que representen el conjunto del suelo matriz y pilas de grava apisonada, lo cual consiste en asumir que los asentamientos elásticos son iguales a los asentamientos por consolidación primaria, lo que permitirá obtener un módulo elástico equivalente a partir de los parámetros de compresibilidad (CR, tasa de compresión y RR, tasa de recompresión). Utilizando el módulo elástico equivalente se estima un módulo elástico compuesto en función de la relación de área de reemplazo y el módulo elástico de las pilas de grava apisonada. Con el módulo elástico compuesto se repite el proceso asumiendo que los asentamientos elásticos son iguales a los asentamientos por consolidación primaria, lo que permite obtener parámetros de compresibilidad compuestos (CR<sub>comp</sub> y RR<sub>comp</sub>). Dicho proceso se



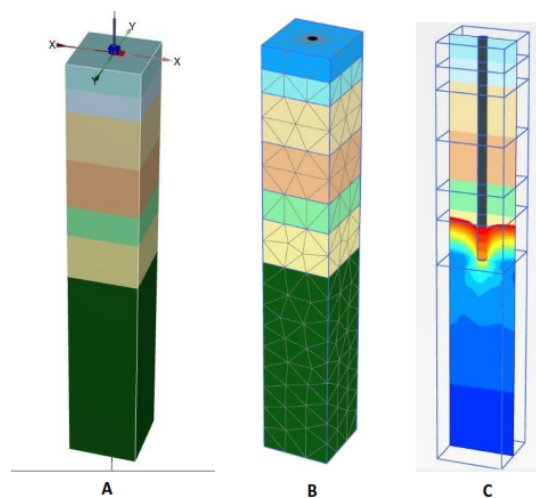
repite para cada uno de los geomateriales arcillosos que van a ser mejorados por la pilas de grava apisonada.

Es importante mencionar que los procedimientos descritos, no capturan el efecto del incremento del confinamiento debido a los esfuerzos laterales aplicados al suelo matriz durante la construcción de las pilas de grava apisonada.

### 3.2.2 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

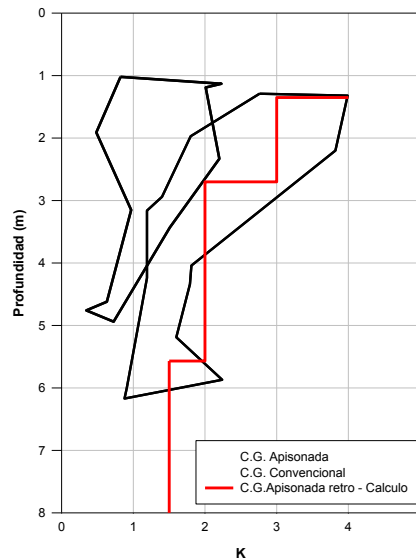
#### 3.2.2.1 SIMULACIÓN DE PRUEBA DE CARGA POR MEDIO DE MODELOS TRIDIMENSIONALES (PLAXIS 3D)

Con la finalidad de capturar el confinamiento adicional que proveen los elementos de grava apisonada, se elaboró un modelo en elementos finitos en Plaxis 3D donde se simula la prueba de carga realizada a la que se hace referencia previamente. Para el modelo de elementos finitos se utilizó la información geotécnica del Sitio 1, donde los suelos blandos fueron representados por medio de un modelo constitutivo en términos de esfuerzos efectivos “Soft Soil”; se modeló las pilas de grava apisonada con geometría y arreglo que se utilizó para la prueba de carga utilizando un modelo elasto-plástico “Mohr-Coulomb” ( $E_{50} = 650\text{MPa}$ ,  $\phi = 45^\circ$ ), y se les aplicó cargas incrementales equivalentes a los esfuerzos aplicados en campo (ver Figura 3.5).



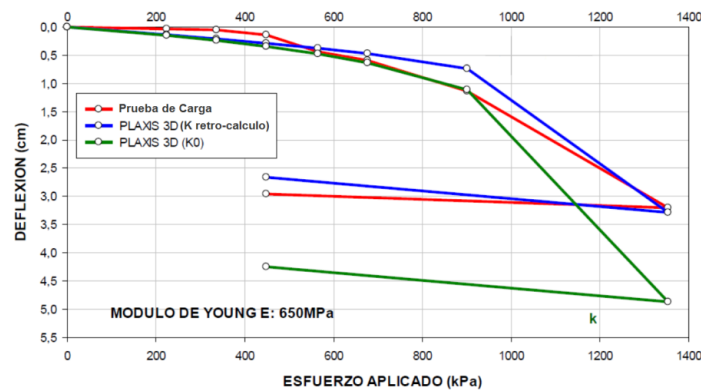
**Figura 3.5. Esquema del modelo en análisis de elementos finitos. A) Perfil de suelo B) Malla generada para el análisis de elementos finitos. C) Desplazamientos producto de la prueba de carga**

Como se mencionó previamente, los procesos constructivos de las pilas de grava apisonada inducen grandes presiones laterales que aportan no solo a la estabilidad sino también a la resistencia y mejoramiento del suelo circundante a la misma. Se observó en la modelación numérica de la prueba de carga, que era necesario representar dicho efecto, para lo cual fue requerido realizar un retro – cálculo del coeficiente de presión lateral ( $K$ ), a partir del cual se estimó el perfil presentado en la Figura 3.6 y que se compara con los rangos estimados por White & Wissmann et. al, (2012) para este tipo de elementos.



**Figura 3.6 Estimación del coeficiente de Presión Lateral (K) producto del proceso constructivo y comparación con rangos estimados por White & Wissmann et. al, (2012) para pilas de grava apisonada y columnas de grava convencionales**

Finalmente, al comparar la curva esfuerzo-deformación obtenida de la prueba de carga con las obtenidas de la numeración numérica considerando el coeficiente de presión lateral en reposo y el coeficiente de presión lateral retro-calculado, se observó que es fundamental representar el efecto del incremento de presión lateral producto de la instalación del elemento para que el modelo constitutivo “Soft Soil” capture la respuesta no lineal de la pila de grava apisonada (después del punto de inflexión de la curva), que se registró durante la prueba de carga. (ver Figura 3.7)

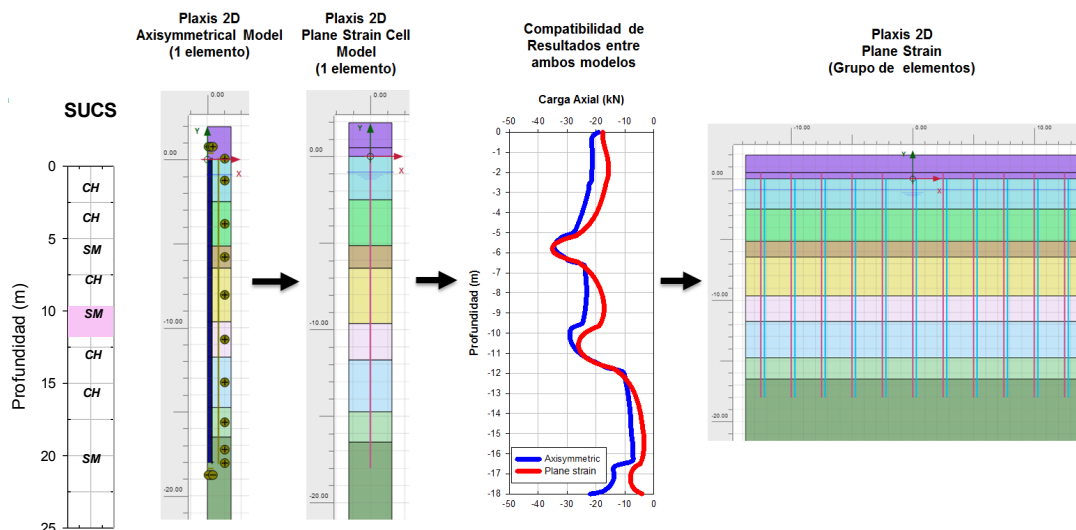


**Figura 3.7. Curvas esfuerzo – deformación registrada y modelos numéricos considerando el incremento del confinamiento lateral representado por el coeficiente K**

### 3.2.2.2 MODELOS BIDIMENSIONALES (PLAXIS 2D)

El complejo problema de interacción existente entre pilas de grava apisonada, el suelo matriz y la sobrecarga que deberá ser resistida por los mismos (ej. relleno granular), también puede ser representado por medio de modelos numéricos bidimensionales con el método de elementos finitos, incorporado en el algoritmo PLAXIS 2D. El proceso para modelar el mejoramiento masivo utilizando pilas de grava apisona en Plaxis 2D se detalla a continuación y se lo presenta esquemáticamente en la Figura 3.8

1. Inicialmente es necesario estimar la estratigrafía del sitio, modelo constitutivo a utilizarse y las propiedades geométricas del sistema de pilas de grava apisonada (diámetro, longitud, y tipo de arreglo), en base a lo cual se genera un modelo axisimétrico, donde se representa la mitad de una pilas de grava apisonada y su ancho de influencia, la pilas está rodeada por el suelo matriz. Posteriormente se aplica una sobrecarga (ej. relleno granular) y se estima la carga axial que toma la pilas de grava con respecto a su profundidad. En este modelo se representa la pilas de grava apisonada como un geomaterial.
2. Posteriormente, se debe generar un modelo de deformaciones planas tipo celda donde se representa una pilas de grava apisonada y su ancho de influencia (área tributaria), la pilas estará rodeada por el suelo matriz. Se aplica una sobrecarga y se estima la carga axial que toma la pila de grava con respecto a su profundidad. En este modelo se representará la pila de grava apisonada como un elemento estructural que refleje la respuesta de la pila de grava apisonada.
3. La respuesta obtenida del modelo de deformaciones planas se lo ajusta de forma que encaje con lo obtenido del modelo axisimétrico.
4. Finalmente, una vez que se tiene compatibilidad entre ambos modelos, se puede proceder a modelar el grupo de elementos y estimar los esfuerzos y asentamientos debido a la colocación de la sobrecarga.

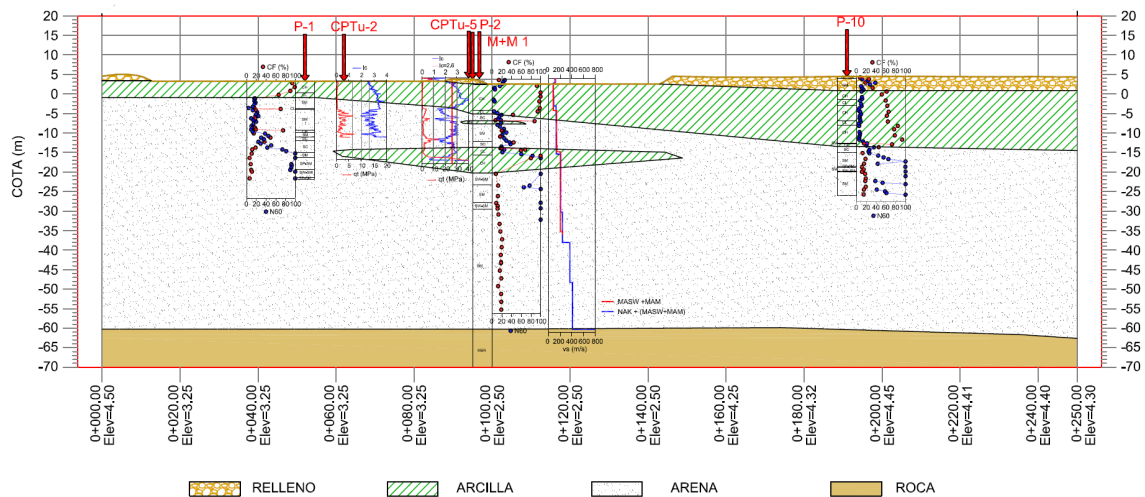


**Figura 3.8. Grafica comparativa de Esfuerzo – Deformación entre la prueba de carga real, y la simulada mediante análisis de elementos finitos**

### 3.2.2.3 RESULTADOS DEL MODELO NUMÉRICO EN LA EVALUACIÓN DE ASENTAMIENTOS

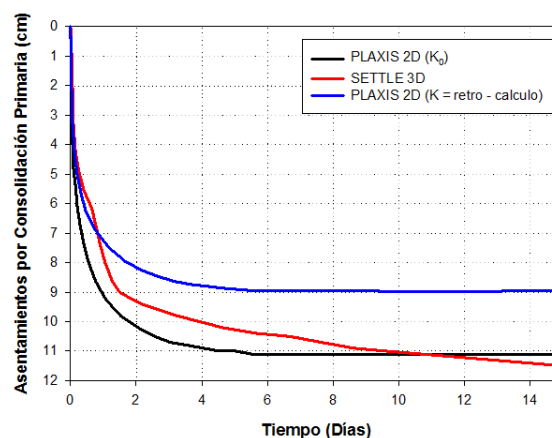
Se realizó la evaluación de asentamientos a través del modelo calibrado en Settle 3D y Plaxis para un proyecto en la ciudad de Guayaquil en el que se planea realizar rellenos para alcanzar la cota del proyecto. El sitio del proyecto (Sitio 2) se ubica en la zona Geotécnica D4 de acuerdo a lo señalado en la Microzonificación Geotécnica de Guayaquil, (Vera et. Al. 2014), la cual corresponde a depósitos aluviales altamente influenciados por las corrientes del Río Daule, similar al sitio donde se realizó la prueba de carga (Sitio 1). Por lo tanto, la estratigrafía y características de los

geomateriales es similar al sitio de la prueba de carga (Sitio 1), siendo válido en este sitio adoptar el retro-análisis realizado para el valor de K en el suelo obtenido con las pilas de grava apisonadas. En la Figura 3.9 se presenta un perfil geotécnico característico del Sitio 2 incluyendo la exploración geotécnica realizada en el sitio, geofísica MASW+MAM, CPTu y SPT. El comportamiento esfuerzo deformación de los suelos arcillosos fueron modelados con el modelo “Soft Soil” y las arenas con el modelo “Mohr-Coulomb”.



**Figura 3.9 Perfil estratigráfico del sitio de proyecto (Sitio 2)**

En la Figura 3.10 se presentan los resultados de los asentamientos mediante la metodología simplificada de Settle 3D y mediante elementos finitos en Plaxis 2D para elementos distanciados 2.5 m con diámetro de 55 cm y longitud de 15 m, en los cuales se ha aplicado un relleno de aproximadamente 3 m de altura. El asentamiento total esperado sin pila de grava apisonada es de 60 a 70 cm alcanzando el 95 % de la consolidación primaria en un lapso de 4 años. Es así que mediante el uso de las pila de grava apisonada se reducen tanto la magnitud como el tiempo de los asentamientos.



**Figura 3.10. Comparación de curvas tiempo – asentamiento por consolidación primaria considerando el incremento del confinamiento lateral representado por el coeficiente K**

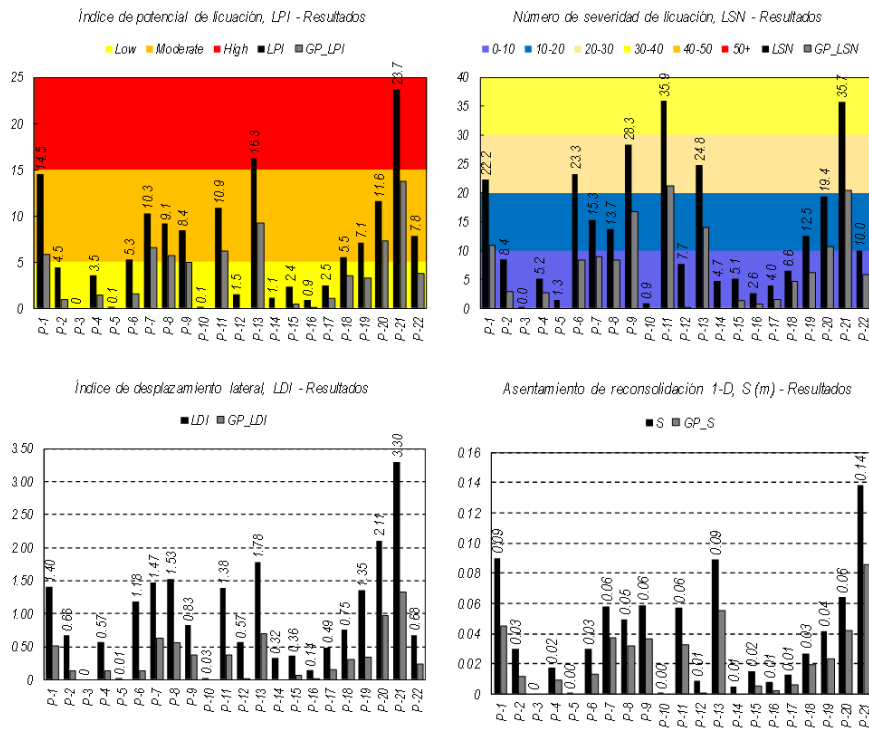
Es importante mencionar que en el procedimiento descrito se debe considerar el efecto del incremento de los esfuerzos laterales aplicados al suelo matriz durante la

construcción de las pilas de grava apisonada por medio del coeficiente de presión lateral (K); el incremento del confinamiento contribuye directamente a la reducción de la magnitud de los asentamientos por consolidación primaria como se observa en la Figura 3.10

#### **4. PILAS DE GRAVA APISONADA COMO ALTERNATIVA DE MITIGACION DE LICUACION**

Se ha evaluado el potencial de licuación para el sitio 2, a través de los resultados de los ensayos SPT utilizando la metodología de Boulanger e Idriss (2014), en el que se detectó presencia de grandes estratos de arcilla compresible con intercalaciones de arenas sueltas licuables. La metodología utilizada para evaluar el efecto de las pilas de grava apisonada como medida de mitigación de licuefacción, tal como se mencionó previamente, contempla: la densificación de la arena, redistribución del esfuerzo cortante y aumento del esfuerzo lateral resultante del procedimiento de instalación del sistema de desplazamiento por impacto. De forma adicional, debido a la alta permeabilidad de las pilas de grava, su presencia ayuda a disipar el exceso de presión de agua de poros rápidamente durante un evento sísmico, reduciendo el potencial de licuefacción. Sin embargo, este efecto de drenaje no se tiene en cuenta en la metodología de mitigación de licuefacción utilizada. La densificación de la arena después de la instalación del sistema se introduce en el cálculo del fenómeno de licuación indicando un aumento en los valores  $N_{SPT}$ , el cual depende del contenido de finos del suelo, del arreglo geométrico, espaciamiento, diámetro de las pilas, entre otros.

En la Figura 4.1, se presenta a modo de ejemplo los resultados del análisis cuantitativo del potencial de licuación sin (barras color negro) y con pilas de grava apisonada (barras color gris) evaluando varios parámetros que definen el potencial de licuación y el nivel de daños reflejados. Se incluyen el Índice de Potencial de Licuación (LPI) (Iwasaki et al, 1978), Número de Severidad de Licuación (LSN) (Van Ballegooy et al., 2014), y asentamiento vertical de re-consolidación e índice de desplazamiento lateral evaluados con la metodología de Idriss & Boulanger (2008).



**Figura 4.1. Resultados del análisis cuantitativo del potencial de licuación: LPI, LSN, LDI, S a partir del ensayo SPT, sin/con columnas de grava apisonada.**

Tanto el aumento del valor NSPT como la introducción de un factor de reducción por redistribución de esfuerzo de corte (KGr) y un factor de incremento de esfuerzo lateral (Km) resultan en una disminución de la razón de esfuerzo cíclico (CSR) y un aumento de la razón de resistencia cíclica del suelo (CRR), respectivamente. Consecuentemente, se logra un aumento del valor de factor de seguridad contra la licuación.

## 5. CONCLUSIONES

Este artículo refleja claramente la versatilidad de las pilas de grava apisonada como alternativa de mejoramiento masivo de suelos. Se demostró su efectividad como medida de mitigación de licuación densificando, aumentando el confinamiento, y capacidad de disipación de presión de poros. De forma similar, han probado un excelente desempeño como medida de mejoramiento para suelos blandos con baja capacidad de carga, proveyendo un aumento en la resistencia del suelo matriz producto de la densificación y aumento de esfuerzos laterales en el suelo y una reducción significativa en los asentamientos producto de sobrecargas.

Finalmente, se resumieron varios procedimientos de análisis, que varían desde formulaciones simplificadas hasta complejos modelos de elemento finito bidimensional y tridimensional, que permiten capturar las principales características mecánicas de las columnas de grava apisonada y la compleja interacción con el suelo, lo que facilita su aplicación en diversos proyectos de ingeniería civil.

## 6. REFERENCIAS

Boulanger, R. W., & Idriss, I. M. (2014). CPT and SPT based liquefaction triggering procedures. University of California, Center for Geotechnical Modeling, Department of Civil and Environmental Engineering, Davis, CA.

Fox, N.S. and M.J. Cowell, 1998. "Geopier Soil Reinforcement Manual." Geopier Foundation Company, Blacksburg, Virginia.

Han, J (2015). Principles and Practices of Ground Improvement, John Wiley / Sons, New Jersey, 143 pp. Fig 5.11

Idriss, I. M., & Boulanger, R. W. (2008). Soil liquefaction during earthquakes. Oakland, CA: Earthquake Engineering Research Institute (EERI)

Iwasaki, T., Tokida, K., Tatsuko, F., & Yasuda, S. (1978). A practical method for assessing soil liquefaction potential based on case studies at various sites in Japan. En Proceedings of 2nd International Conference on Microzonation (págs. 885–896). San Francisco.

International Code Council Evaluation Service (2017) (ICC-ES) (2017). "ESR-1685. Rammed Aggregate Pier Intermediate Foundation/Soil Reinforcement System", International Code Council (ICC) Evaluation Service, LLC; 2016. 4 pp.

Lawton, E.C., and Fox, N.S. (1994). "Settlement of Structures Supported on Marginal or Inadequate Soils Stiffened with Short Aggregate Piers." Vertical and Horizontal Deformations of Foundations and Embankments, A.T. Yeung and G.Y. Fello (Editors), American Society of Civil Engineers, 2, 962-74.

Lukas RG (1995): Dynamic compaction. Report No. FHWA-SA-95-037, Federal Highway Admin.

PLAXIS 2D [Computer software]. Delft, The Netherlands, PLAXIS.

PLAXIS 3D [Computer software]. Delft, The Netherlands, PLAXIS.

Settle 3D version 3.0 [Computer software]. Rocscience, Toronto.

Stark, T. D., Williamson, T., Fowler, J., Pezza, D., and Gibbons, Y. (1999). "Prefabricated vertical-drain test section in Craney island dredged material management area." J. Perform. Constr. Facil., 13-1, 8–16.

Van Ballegooy, S., Malan, P., Lacrosse, V., Jacka, M. E., Cubrinovski, M., Bray, J. D., Cowan, H. (2014). Assessment of Liquefaction-Induced land damage for residential Christchurch. Earthquake Spectra, 30(1), 31-55. doi:10.1193/031813eqs070m

Vera Grunauer, X. (2014). Elaboración del Documento de la Microzonificación Sísmica y Geotécnica de la Ciudad de Guayaquil según la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC 2011. Guayaquil.

White, D. J., Wissmann, K. J., Barnes, A. G., & Gaul, A. J. (2002). Embankment Support: a comparison of stone column and rammed aggregate pier soil Reinforcement. In Presented, Transportation Research Board. 81st Meeting, Washington, DC January (pp. 13-17).