Tecnologías plenamente contrastadas que presentan numerosas ventajas debido a su costo-efectividad y a los ahorros en los plazos de construcción que proporcionan

Tecnologías Geopier para la mejora de suelos y cimentaciones intermedias

Las tecnologías Geopier fueron desarrollas en los Estados Unidos, en los años ochenta del pasado siglo, como soluciones de cimentación intermedia para el apoyo de cimentaciones directas sobre suelos pobres, compresibles y de muy baja capacidad portante, en los que se venía llevando a cabo la retirada y sustitución del terreno por un material seleccionado de mejores prestaciones, generalmente áridos, gravas o suelos granulares de alta capacidad y reducido contenido de finos, o bien mediante hormigón pobre o ciclópeo. Generalmente, estas soluciones suponían un elevado coste, además de la necesidad de enviar los materiales retirados a vertedero y la problemática de ejecución cuando había presencia de niveles freáticos en las excavaciones y rellenos practicados.

Javier Moreno.
Director Pilotes Prefabricados y Mejora de Suelos.
Terratest, S.A. fjavier-ms@terratest.

Terratest, S.A.
Juan de Arespacochaga y Felipe, 12. 28037 Madrid.
www.terratest.com

1.- Introducción

Se buscaba, por tanto, un procedimiento práctico y eficiente para reemplazar suelos pobres por materiales más rígidos y resistentes, mediante el empleo de equipos ligeros de obra civil que se encontraban disponibles, para aprovechar al máximo las propiedades del terreno existente y que dieran como resultado un bloque de terreno mejorado, que en su conjunto ofreciera la suficiente capacidad portante y rigidez para el apoyo de cimentaciones directas.

El resultado fue la construcción de elementos mediante el reemplazo y/o desplazamiento del terreno en columnas conformadas por sucesivas capas compactadas de agregados de grava, utilizando herramientas especialmente patentadas para aplicar una alta energía de compactación vertical, de alta frecuencia y baja amplitud de impacto con lo que se consigue, además de producir la densificación de la grava, un desplazamiento lateral del terreno, pre-esforzando y pre-deformando la cavidad de la perforación, lo que genera un incremento de las presiones laterales en el suelo matriz en las proximidades de la columna, llevándolo hasta la movilización de su empuje pasivo de Rankie. El elevado empuje radial que se genera en el entorno del Geopier es el responsable de que la deformabilidad del elemento sea muy reducida; el módulo de deformación de los materiales granulares crece con la tensión de confinamiento. Lo que hace que éste presente un mayor módulo de deformación que las columnas tradicionales de grava ejecutadas, simplemente, por vibración.

Las columnas de grava convencionales se diseñan considerando un coeficiente de empuje horizontal k=1, cuando el pasivo de Rankie es en todo caso mayor (Kp>1). Por tanto, suponiendo idénticas características en el material utilizado para la conformación de la columna, un Geopier manifestará un módulo deformación K_p^m veces mayor que una columna de grava, siendo 'm' el exponente de la ley potencial de variación del módulo con la tensión de confinamiento. La medición del empuje horizontal generado por la instalación de las columnas Geopier se puede observar en la Figura 1. Se ha realizado usando el K_0-Stepped Blade Test así como presiómetros, y se ha podido comprobar de forma indirecta mediante el análisis retrospectivo de ensayos de tracción. El resultado son módulos de deformación que pueden variar entre 65 MPa, en suelos muy pobres y comprensibles, que proporcionan un menor confinamiento, hasta valores que pueden alcanzar los 300 MPa en suelos firmes o a mayor profundidad.

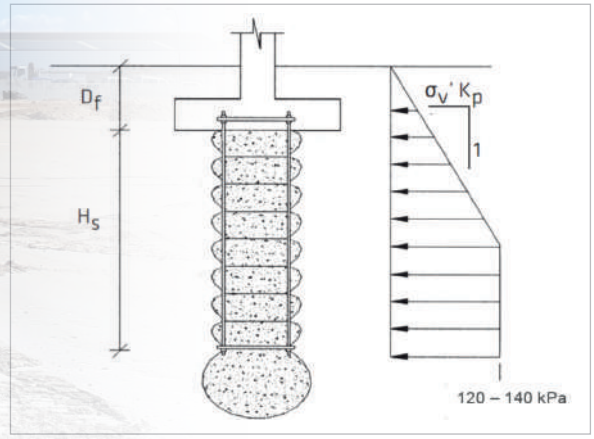

Figura 1. Empuje lateral generado al ejecutar columnas Geopier.

Normalmente, en la construcción de los Geopier suelen emplearse gravas bien graduadas (GW, well-graded) o más uniformes y abiertas (GP, open -graded) en caso de la presencia de nivel freático y se busque su funcionamiento como elemento drenante. Debido a la elevada densidad de compactación que se llega a alcanzar, superando el 100% del teórico de laboratorio, se obtienen ángulos de rozamiento interno muy superiores a los documentados en las columnas de grava por vibración.

En los ensayos de corte directo realizados 'in situ' sobre columnas reales se han obteniendo valores de 49 a 51°, que fueron corroborados en ensayos triaxiales sobre muestras recompactadas, a densidades relativamente similares, dando como resultado ángulos de rozamiento de 51° (Ver figura 2).

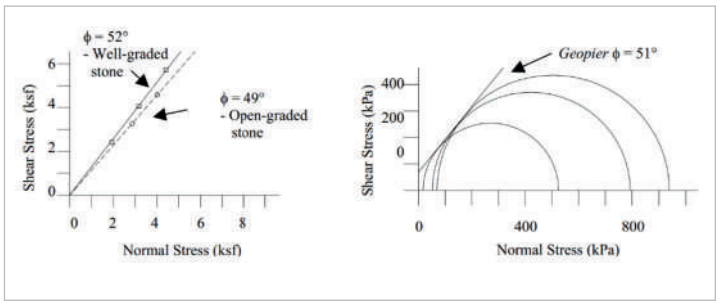

Figura 2. Ángulo de rozamiento en gravas usadas en Geopiers.

La acción de compactación vertical aumenta la presión lateral y mejora la capacidad y resistencia de los suelos circundantes dando como resultado una sobre-consolidación del suelo alrededor de la columna que, junto con la elevada rigidez del elemento construido, permite la reducción y control de los asientos de manera muy eficaz.

La acción de la compactación aumenta los esfuerzos laterales en la matriz del suelo alrededor del Geopier, produciendo un aumento en la rigidez y resistencia al esfuerzo cortante del suelo adyacente. Este incremento en las presiones laterales resulta de un significativo aumento de la resistencia y rigidez, que permite alcanzar una mayor capacidad de carga y proveer un mejor control de los asentamientos.

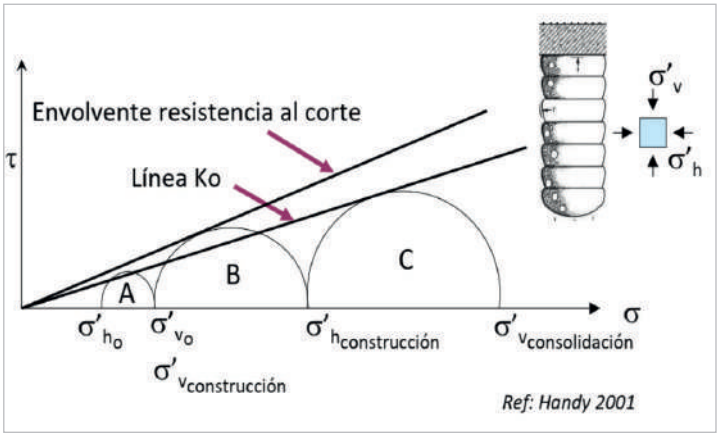

Figura 3. Efecto del pre-esfuerzo lateral en el aumento de resistencia al corte y capacidad portante.

El efecto del pre-esfuerzo lateral en el aumento de la resistencia al corte y el aumento de la capacidad de carga del suelo se muestra esquemáticamente en el diagrama del círculo de Morh en la Figura 3. En este diagrama se puede observar cómo al incrementar los esfuerzos laterales se provoca una rotación de los esfuerzos principales, siendo ahora, después de la instalación del Geopier, el esfuerzo horizontal el principal. El aumento de la tensión horizontal va a provocar una disminución de la compresibilidad de la matriz del suelo, como resultado de su incremento de rigidez o el efecto de sobre-consolidación alrededor del elemento.

Se pueden aplicar en terrenos flojos, cohesivos blandos o terrenos compresibles: arcillas y limos blandos, arenas sueltas, en rellenos no controlados, arcillas y limos rígidos y arenas de mediana densidad a densas, que requieran una mejora para reducir o evitar los asientos diferenciales. Con estas características, y dada su sencillez, rapidez y eficacia, esta técnica es altamente competitiva frente a soluciones masivas de sustitución del terreno por rellenos estructurales, ya sea bajo losas ya sea bajo zapatas, frente a pozos de cimentación, frente a otras alternativas de mejora de suelos, así como frente a cimentaciones profundas, que deben alcanzar un sustrato bastante competente. Mientras que los Geopiers sólo deben tratar el espesor de terreno afectado por las tensiones más elevadas, pudiendo dejar debajo terrenos no especialmente competentes. Siempre y cuando el asiento calculado bajo la zona mejorada resulte admisible.

Asimismo, aparte de su aplicabilidad como mejora de suelos bajo cimentaciones para aumentar la capacidad portante y reducir los asientos totales y diferenciales, su elevada resistencia al corte convierte los geopiers en una magnifica técnica de mejora para incrementar la estabilidad global de terraplenes y muros, en todas sus variantes, y para mitigar el potencial de licuefacción en suelos susceptibles de padecer este fenómeno en zonas sísmicas, a lo que contribuye además el efecto drenante si se emplean agregados de granulometría abierta/uniforme. Es decir, como inclusiones granulares, son siempre aplicables en aquellas soluciones geotécnicas en las que este tipo de inclusiones son de utilidad, ya sean columnas de grava, ya sean de arena, si bien la particular puesta en obra mediante compactación bajo presión e impacto vertical dota a los elementos ejecutados de las máximas prestaciones alcanzables, lo que repercute en una optimización de los costes: menor número de columnas, menor diámetro, menor relación de sustitución y por lo tanto, menor medición y especialmente menor consumo de grava.

Para suelos de muy baja rigidez y muy comprensibles, donde la tensión lateral no es suficiente para contener y confinar la columna de agregados compactados, se podrá ejecutar un elemento de muy alto módulo de rigidez a base de la adición de una lechada de cemento durante la compactación de la grava o bien mediante la construcción de una columna de hormigón, compactada y agrandada en la punta en los terrenos potencialmente mejorables, con el objeto de incrementar la capacidad geotécnica de la columna.

2.- Soluciones Geopier

Son técnicas que cubren, prácticamente, la totalidad del espectro de soluciones de cimentación donde se requiere una mejora del suelo, para incrementar su capacidad portante, reducir los asientos o bien limitar los asientos diferenciales, como soluciones alternativas, tanto técnica como económicamente, a las cimentaciones profundas (Ver figura 4).

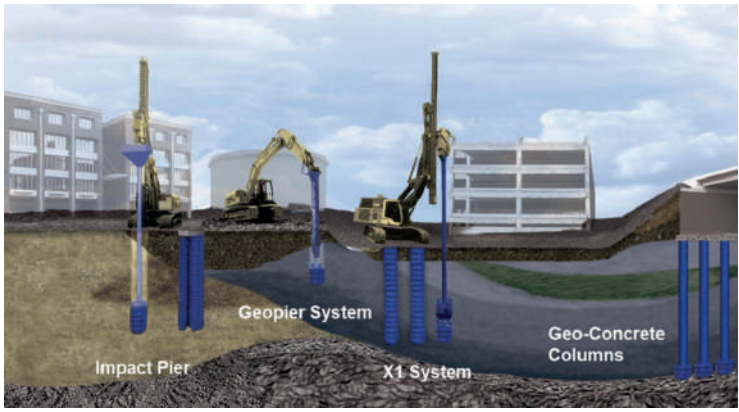

Figura 4. Soluciones Intermedias de cimentación Geopier System.

Se puede diferenciar entre columnas de agregados de grava compactados:

- **Geopier System (GP3):** hasta 5-7 m de profundidad, donde la compacidad del suelo requiere una perforación previa, para su posterior relleno y compactación con el agregado de grava, para la conformación de la columna.
- **X1 System (X1):** hasta 15-17 m de profundidad, como en el caso anterior, en terrenos donde la compacidad del mismo requiere una perforación previa y relleno y compactación de la columna con el agregado de grava.
- **Geopier Impact (Impact):** hasta 25 m de profundidad en terrenos arenosos saturados o cohesivos, potencialmente colapsables, donde la columna se construye mediante desplazamiento del terreno y compactación del agregado de grava.

En terrenos muy comprensibles y deformables, las soluciones Geopier contemplan las inclusiones rígidas:

- **Grouted Impact Pier (GIP):** es la misma solución que el Impact pero introduciendo una lechada de cemento, que se mezcla con el agregado compactado de grava, con lo que se consigue una columna con un elevado módulo de rigidez.
- **Geo-Concrete Columns (GCC):** es una columna de hormigón de hasta 25-27 m de profundidad, de un elevado módulo de rigidez, que se construye mediante el desplazamiento del terreno instalando una base o punta de mayor diámetro que el fuste de la columna, mediante la compactación del hormigón y el desplazamiento o deformación lateral del terreno circundante. De esta forma se incrementa la resistencia geotécnica de la columna, incrementando la capacidad portante en suelos blandos y muy deformables, trasladando las cargas a la capa inmediatamente inferior que ha sido mejorada durante la construcción de la columna.

Las columnas de agregados de grava compactados se diseñan, típicamente, para cubrir el área bajo la huella de la zapata de las cimentaciones, con una superficie de sustitución entre un 25-40% para los sistemas de reemplazo y entre un 10-15% para los sistemas de desplazamiento.

Las cimentaciones soportadas sobre suelos reforzados con columnas de agregados compactados pueden soportar esfuerzos de 200 a 450 kN/m^2. La capacidad portante permisible va a depender de la rigidez de las columnas de agregados compactados, de la consistencia del suelo matriz y del porcentaje de cobertura de

las columnas, es decir de la relación de área de las columnas (Ac) versus el área de la zapata (As), llegando a soportar una carga por columna entre 200 y 750 kN.

Las columnas de agregados compactados son empleadas para mejorar y rigidizar los estratos más superficiales del terreno con el objeto de cumplir con el criterio de diseño, y no para soportar las cargas de forma directa, como elementos independientes rígidos o estructurales. Por tanto, no se consideran elementos que transmiten sus cargas a la punta, como es el caso de los pilotes, sino que las cargas son adsorbidas por el fuste, por tal razón no es necesario que alcancen un estrato de suelo competente para su empleo como elemento de cimentación.

Ante eventos sísmicos, al tratarse de elementos considerablemente más rígidos que el suelo que los rodea, tomarán un porcentaje mayor de esfuerzos de corte, reduciendo así la carga al suelo. Adicionalmente, debido a la alta permeabilidad del elemento, proporcionarán un drenaje radial para disipar el exceso de presión de poro que pudiera generarse durante el sismo.

El diseño de las columnas de agregados de grava compactados se basa en los principios clásicos de la mecánica de suelos y de las técnicas de análisis geotécnicos. El cálculo de asientos se realiza subdividiendo el perfil estratigráfico del terreno en dos capas. La primera, denominada zona superior, involucra los estratos reforzados con las columnas de agregados compactados, mientras que la segunda, llamada zona inferior, se refiere a los estratos debajo de la zona reforzada, pero que se localiza a una profundidad tal donde el esfuerzo recibido es mayor al 10% del esfuerzo total aplicado a nivel de la cota de cimentación.

El asentamiento en la zona superior (SZS) o zona reforzada, va a depender de tres factores: (a) de la rigidez del agregado de grava compactado, (b) de la rigidez original del suelo matriz, y (c) del área de sustitución que ocupan los agregados compactados bajo la losa de cimentación o de la zapata.

El asentamiento en la zona inferior (SZi) o la zona no reforzada, se podrá estimar utilizando las técnicas clásicas de la mecánica de suelos, lo que incluye el análisis y selección de los parámetros de compresibilidad de los estratos de la zona inferior y el concepto de distribución de esfuerzos bajo cimentaciones, empleando las teorías convencionales de la elasticidad de suelos. Al tratarse de elementos de elevada rigidez frente a la del terreno circundante, se va a producir una concentración de las cargas sobre la cabeza de las columnas que se puede mejorar mediante la instalación de una capa de transferencia de carga, con o sin geomallas de refuerzo.

Por tanto, en el diseño se debe contemplar la magnitud y medio de trasferencia de las cargas y el nivel de asientos admisible, de acuerdo a las tolerancias de la estructura, y en función de ello se establecerá el número, el espaciamiento de la malla y el dimensionamiento de las columnas.

3.- Proceso de construcción

El método tradicional Geopier System (GP3) comprende el barrenado de perforaciones de 600 a 900 mm de diámetro, en suelos con cierta capacidad portante, exentos de nivel freático, donde una vez alcanzada la profundidad de diseño de la columna, se procede a la instalación y compactación de capas sucesivas de agregados de grava, con un espesor aproximado de 30 cm, mediante una herramienta-apisonador denominado 'Tamper', especialmente biselado, al que se le aplica una alta energía de compactación vertical mediante un martillo hidráulico (Ver Figura 5).

Figura 5. Columnas sistema Geopier - GP3 (Nuevo Seseña, Toledo)

Durante la construcción del elemento, la elevada energía aplicada con el 'Tamper' en combinación con su forma biselada conduce a la densificación vertical del agregado de grava, provocando un desplazamiento lateral de la grava, pre-esforzando y pre-deformando la cavidad de la perforación, resultando un incremento de las presiones laterales en el suelo matriz, llevándolo hasta la movilización de su pasivo de Rankie.

Para terrenos de similares características pero donde se requiera un tratamiento a mayor profundidad, Geopier Foundation Company desarrolló y patentó el sistema X1, en los que el proceso de ejecución es parecido al GP3; se requiere una perforación previa y la retirada del terreno, mientras que para la compactación del elemento se utiliza un mandril dotado de un sistema de cadenas para la restricción del flujo de la grava que al ser accionado por un martillo vibrador instalado en la cabeza del elemento, evita que el mandril se hinque y permite la acción de la compactación vertical y el desplazamiento lateral de la grava contra las paredes de la cavidad, dando como resultado la construcción del Geopier. Salvo estas diferencias, las columnas X1 son equivalentes de mayor longitud que las columnas GP3 (Ver Figura 6).

Figura 6. Columnas sistema Geopier - X1.

El sistema Geopier Impact se utiliza en suelos de menor rigidez, en suelos blandos o granulares sin cohesión, o bajo el nivel freático; en terrenos susceptibles de sufrir un colapso durante la pre-perforación de la columna. Para la introducción de la grava se utiliza una tubería de revestimiento, tipo 'tremi' o mandril, al que se la ha dotado en la punta de un 'pisón' con un sistema de restricción de flujo del agregado de grava.

Este sistema permite la hinca del mandril mediante el desplazamiento lateral del terreno, accionado por un martillo vibrador situado en la cabeza del elemento, hasta la máxima profundidad de diseño, para ir en retirada, paulatinamente, vertiendo y compactando la grava en el interior de la cavidad, en capas de unos 30 cm de espesor, hasta la conformación total de la columna con un diámetro variable entre 500 y 600 mm.

En este caso, durante la hinca del mandril se produce una primera mejora del terreno debido al proceso de hinca y desplazamiento del terreno circundante. Mientras que durante el proceso de vertido y compactación de la grava se produce un segundo proceso de refuerzo de la matriz del terreno, debido al desplazamiento o empuje lateral de la grava, incrementando el diámetro de la columna, pre-esforzando y pre-deformando la cavidad, dando lugar, del mismo modo, al incremento de las presiones laterales en el suelo matriz. Se produce un incrementando de la rigidez del conjunto columna y suelo circundante y, por tanto, un incremento de la resistencia a los esfuerzos aplicados por las cargas de las cimentaciones actuantes (Ver Figura 7).

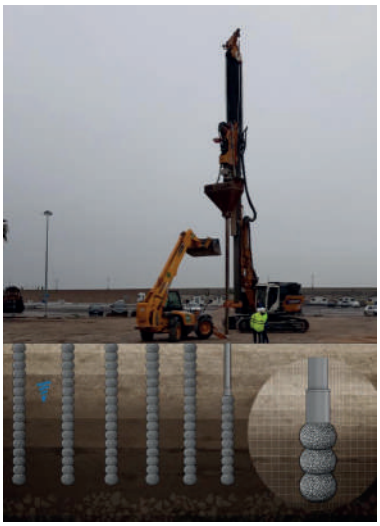

Figura 7. Columnas sistema Geopier - Impact (Puerto de Tarragona).

El sistema Geopier Impact se utiliza en suelos de menor rigidez, en suelos blandos o granulares sin cohesión, o bajo el nivel freático; en terrenos susceptibles de sufrir un colapso durante la pre-perforación de la columna

En ocasiones, los geopier Impact deben tratar capas de terreno extremadamente pobres y compresibles, como arcillas fangosas, turbas y suelos con muy elevado contenido orgánico, que por sus malas características resistentes y deformacionales, ofrecen poco confinamiento al agregado, de modo que su rigidez resulta mucho menor y el modo de fallo de abarrilamiento (bulging) hacia estos suelos se produce a tensiones bajas, pudiendo reducir mucho las prestaciones de las columnas.

En estos casos puede añadirse una lechada de cemento durante la instalación del Geopier Impact, de forma que la función de rigidización y de resistencia que no puede proporcionar el suelo blando y de baja capacidad pasa a ser asumida por la lechada, y el conjunto lechada-agregado adquiere propiedades de inclusión rígida. Bien aplicando esta metodología sólo en el tramo inferior de la columna hasta el techo de la capa orgánica y dejando el tramo superior como un Impact convencional o bien confeccionando por completo una columna Grouted Impact cuyos mecanismos de funcionamiento y diseño son análogos a los de cualquier otro tipo de inclusión rígida.

En el caso de suelos muy blandos y comprensibles, incluso con contenidos en material orgánica, los sistemas Geopier ofrecen una inclusión rígida mediante columnas de hormigón o Geo-Concrete Columns (GCC). El proceso de construcción es similar al sistema Impact, mediante la hinca en el terreno de una tubería de revestimiento o mandril accionado por un vibrador instalado en cabeza, mientras se bombea hormigón, lo que da lugar al desplazamiento lateral del terreno, sin extracción alguna de detritus.

Al finalizar la hinca, una vez alcanzado el rechazo práctico se construye una punta agrandada, de mayor diámetro que el fuste de la columna, lo que permite aprovechar una mayor resistencia desde el punto de vista geotécnico. No sólo por el mayor diámetro de la punta, sino y sobre todo por la reducción de la comprensibilidad de la matriz del terreno en la punta, como consecuencia de la deformación lateral que se realiza mediante la compactación del hormigón, creando un bulbo de fondo.

Posteriormente, se procede a la retirada de la herramienta mientras se bombea simultáneamente el hormigón, controlando la presión de inyección en el fuste de la columna, para evitar cortes en el hormigonado y asegurar la continuidad de la columna (Ver Figura 8).

Figura 8. Geopier - Geo-Concrete Columns (Puerto Real, Cádiz).

Por tanto, se trata de una solución intermedia entre cimentación superficial y cimentación profunda (pilotes), donde la mejora del suelo se realiza en la base o punta de la columna. Debido a la elevada relación de rigidez entre la columna y el suelo, se va a producir una concentración de la carga sobre la columna, transmitiendo buena parte de ésta al sustrato más profundo, de tal forma que se produce una descarga del suelo comprensible, reduciendo la magnitud de los asientos. La carga soportada por la columna va a depender de su diámetro, variable entre 350 a 500 mm, y de la resistencia característica del hormigón, de 15 a 35 MPa; mientras que la resistencia de la columna va a depender, fundamentalmente, del diámetro de la punta y de la contribución de las capas subyacentes mejoradas durante la construcción del bulbo, por lo que la carga por columna puede variar entre 400 y 1.500 kN.

4.- Conclusiones

Las soluciones Geopier para la mejora de suelos y cimentaciones intermedias se utilizan para el incremento de la capacidad portante y/o la cimentación directa en terrenos flojos, cohesivos blandos o terrenos compresibles, arcillas y limos blandos, arenas sueltas, en rellenos no controlados, arcillas y limos rígidos y arenas de mediana densidad a densas, que requieran una mejora para reducir o evitar asientos diferenciales.

Son el resultado de un continuo desarrollo e investigación para ofrecer soluciones de cimentación y control de asientos, aportando aumentos significativos en la capacidad portante permisible del terreno o bien limitando el asiento de las estructuras soportadas

de acuerdo con los requisitos del proyecto. Ante un evento sísmico las columnas de agregados de grava tomarán un mayor porcentaje de los esfuerzos de corte, debido a que son considerablemente más rígidos que el suelo que los rodea, y ayudarán a drenar radialmente el exceso de las presiones intersticiales. Se trata de tecnologías plenamente contrastadas, presentando ventajas debido a su costo-efectividad y ahorros en los plazos de construcción. •

Referencias

- *Rodriguez-Claudio, J.P., Wissmann, K. (2016). El uso de pilas de agregado compactado para refuerzo de suelos de cimentación. 18 Conferencia Científica de Ingeniería y Arquitectura. La Habana.*
- *ICC-ES, ESR-1685. "Rammed Agreegate Pier Intermediate Foundation – Soil Reinforcement System". International Code Council (ICC). Evaluation Service. LLC, 2016. 3pp.*
- *Martínez, G., Morales, A., Parra, J., Salguero, F. (2012). Mitigación de licuación empleando Pilas de Agregado Apisonado en la UMF-4 del IMSS, Ejido Durango, Mexicali, B.C. XXVI Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica. Cancún, México.*
- *Wissmann, Kord J; Fox, Nathaniel S. "Design and Analysis of Short Agreegate Piers Used to Reinforce Soils for Foundation Support. Geotechnical Colloquium. Technical University Darmstadt. Germany, March-2000.*
- *Kempfert, H.G: Gebreselassie, B. Excavation and Foundations in Soft Soils, Springer Berlin Heidelberg, New York, 2006, p 472, ISBN 3-540-32894-7.*
- *Wissman, K. J; Lawton E.C.; Farrell, T.M. 1999. "Behavior of Geopier supported foundation systems during seismic events". Geopier Foundation Company, Inc., Technical bulletin nº 1.*
- *Balaam, N. P., Booker, J.R.; Poulos, H.G. "Analysis of granular pile behavior using finite elements". Conference on finite Elements Methods in Engineering. Adelaide, Austria. 1976, pp 1-13.*
- *Terzaghi, Karl; Peck, Ralph B. Soil Mechanics in Engineering Practice.2nd ed. New York, John Wiley & Sons, 1967, 752 pp. ISBN 978-1446510391.*