

SOLUCIONES GEOPIER® PARA LA MEJORA Y REFUERZO DE SUELOS

Javier Moreno

Terratest, S.A. Juan de Arespachoga y Felipe, 12. 28.037 Madrid. fjavier-ms@terratest.com

ABSTRACT

1.- DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

Los sistemas de refuerzo y mejora de suelos GEOPIER® System consisten en la ejecución de columnas de agregados de grava compactados o inclusiones rígidas, con el objeto de incrementar la capacidad portante del terreno y reducir los asentamientos de las estructuras soportadas, además de incrementar la resistencia al corte del terreno en la estabilidad global de terraplenes y muros de contención, y para la mitigación de la licuefacción en suelos de zonas de alta sismicidad.

Se trata de soluciones intermedias o semi-profundas de cimentación, alternativas a las soluciones tradicionales de excavación y sustitución del terreno, rellenos estructurales, pozos de cimentación y precargas, para el soporte de estructuras, zapatas, losas de cimentación, tanques, aerogeneradores, terraplenes, etc.

Se construyen bien 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 consiguen elevados ángulos de fricción interna, que suelen variar entre 48-52°, mientras que los módulos de elasticidad de la columna alcanzan valores entre 150 y 250 MPa, muy superiores a los alcanzados con las columnas de grava construidas mediante vibro-sustitución.

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 asentamientos de manera muy eficaz. Se puede 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 asentamientos diferenciales.

Para suelos de muy baja rigidez y muy compresibles, 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.

Las columnas de agregados de grava compactados (Rammed Aggregate Piers, RAP por sus siglas en inglés) se desarrollaron en Estados Unidos en los años ochenta, y desde entonces se han empleado en innumerables proyectos por todo el mundo.

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 asentamientos o bien limitar los asentamientos diferenciales, como soluciones alternativas, tanto técnica como económicamente, a las cimentaciones profundas (Ver figura 1).

Se puede diferenciar entre columnas de agregados de grava compactados:

- **Geopier System (GP3):** hasta 5-7 m de profundidad, donde la capacidad del suelo requiere una perforación previa, para su posterior relleno y compactación con el agregado de grava, para la conformación de la columna.
- **XI System (XI):** hasta 15-17 m de profundidad, como en el caso anterior, en terrenos donde la capacidad el mismo, requiere una perforación previa y relleno y compactación de la columna con el agregado de grava.

- **Geopier Impact (IMPACT):** hasta 25-27 m de profundidad en terreno 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, 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.

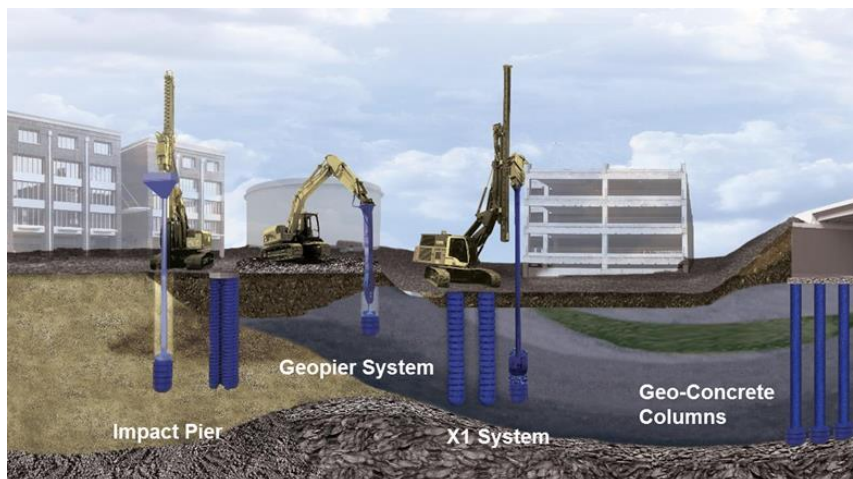


Figura 1. Soluciones Intermedias de cimentación GEOPIER® System

En todos los casos, los sistemas GEOPIER® permiten reducir los plazos de ejecución; se trata de soluciones rápidas y seguras, con un elevado control de calidad, cuyos resultados son verificados con ensayos de carga estáticas para comprobar el módulo de rigidez de la columna y garantizar los asientos estimados.

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 (S_{Zs}) 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 (S_{Zi}) 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 transferencia de las cargas y el nivel de asientos admisible, de acuerdo a las tolerancias de la estructura, y en función 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 60 a 90 cm 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.

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.

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 hincada 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.

En este caso, durante la hincada del mandril se produce una primera mejora del terreno debido al proceso de hincada 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 incremento 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.

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/m². 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 (A_c) versus el área de la zapata (A_s), 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.

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 columnas de geo-concreto, *GEO-CONCRETE COLUMNS® (GCC®)*. El proceso de construcción es similar al sistema *IMPACT®*, mediante la hincada 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 hincada, 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.

Por tanto, se trata de una solución de 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 asentos.

La carga soportada por la columna va a depender de su diámetro y de la resistencia característica del hormigón; 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 y refuerzo de suelos se utilizan para el incremento de la capacidad portante o la cimentación 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 asentos diferenciales.

Son el resultado de un continuo desarrollo e investigación para ofrecer soluciones de cimentación y control de asentos, 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 Aggregate 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 Analy of Short Aggregate 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.