

Columnas/Pilas de Agregado Compactado para el apoyo de muros mecánicamente estabilizados (MME) para el Aeropuerto Internacional Felipe Ángeles

Rammed Aggregate Piers for support of Mechanically Stabilized Earth (MSE) Retaining Walls at Felipe Angeles International Airport

Mayra NOLASCO¹, José Luis AGUIRRE² y Héctor DE LA FUENTE³

¹Soilsolution S.A. De C.V.

²Soilsolution S.A. De C.V.

³Soilsolution S.A. De C.V.

RESUMEN: El crecimiento de las ciudades implica un aumento en los servicios que se ofrecen para satisfacer las necesidades de la población, de los cuales se destacan los servicios de transporte que nos permiten desplazarnos de un lugar a otro y nos mantienen comunicados. Tal es el caso de la Ciudad de México, cuyo aeropuerto presenta problemas de operación por una alta demanda, ya que es el aeropuerto mejor conectado de Latino América y cuenta con diversas rutas tanto nacionales como internacionales. Recientemente, se propuso una nueva red aeroportuaria para la zona metropolitana de la Ciudad de México integrada por el Aeropuerto Internacional Felipe Ángeles, el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México y el Aeropuerto Internacional de Toluca. En las vías de acceso al Aeropuerto Internacional Felipe Ángeles se emplearán muros mecánicamente estabilizados de hasta 14.0 m de altura para los cuales se diseñó un mejoramiento de suelos mediante Pilas/Columnas de Grava Compactada que permitió incrementar la capacidad de carga del suelo de cimentación, disminuir los asentamientos totales de la estructura, acelerar el tiempo en el que se presentan los asentamientos por consolidación y brindar estabilidad global contra deslizamiento.

ABSTRACT: The growth of cities involves an increase in the services offered to satisfy population needs, of which transportation services stand out because they allow us to travel from one place to another and keep us communicated. Such is the case of Mexico City, whose airport presents operating problems due to high demand since it is the best-connected airport in Latin America and has several national and international routes. Recently, a new airport network was proposed for the Mexico City's metropolitan area integrated by Felipe Angeles International Airport, Mexico City International Airport and Toluca International Airport. A ground improvement was designed using rammed aggregate piers that allowed improving bearing capacity and slope stability, as well as providing settlement control for support of Mechanically Stabilized Walls (MSE) of up to 14.0 m height that will be part of the Felipe Angeles International Airport access roads.

1 INTRODUCCIÓN

La Ciudad de México ha presentado un incremento importante en su población y, por ende, el desarrollo de infraestructura también se ha visto beneficiado. Uno de los sectores más importantes es el de transporte.

El Aeropuerto Internacional Benito Juárez de la Ciudad de México (AICM) tiene sus orígenes en el Aeródromo de Balbuena, inaugurado en 1911, el cual fue remodelado en años posteriores, y finalmente, a partir del año 1952, este aeropuerto comenzó a parecerse más a lo que podemos ver hoy en día.

Actualmente el AICM presenta problemas de operación, ya que es el aeropuerto de Latino América que se encuentra mejor conectado por sus diversas rutas tanto nacionales como internacionales, y cuya capacidad comienza a verse limitada.

A raíz de lo anterior se propuso la construcción del Aeropuerto Internacional Felipe Ángeles, en la Base Aérea Militar de Santa Lucía, que formará parte de la nueva red aeroportuaria de la zona metropolitana de la Ciudad de México, junto con el AICM y el Aeropuerto Internacional de Toluca.

En nuestros días es común que las nuevas construcciones se lleven a cabo en suelos que no nos brindan la capacidad de carga suficiente para

utilizar una cimentación superficial y/o pueden presentar grandes deformaciones ante la aplicación de las cargas.

Para resolver este problema se tienen diferentes opciones como: rediseñar la estructura con la finalidad de hacerla más ligera, mejorar el suelo de cimentación o bien, cambiar la cimentación superficial por una de tipo profunda. La primera opción no siempre es viable, pues afecta los intereses del inversionista y, en muchos casos, utilizar cimentaciones profundas tiene un impacto significativo en el presupuesto de construcción.

Es por eso que los métodos de mejoramiento de suelos se han vuelto populares en las últimas décadas, ya que permiten modificar favorablemente las propiedades mecánicas y de deformación de los suelos a un menor costo y con un menor tiempo de ejecución comparado con la construcción de cimentaciones profundas, en la mayoría de los casos.

2 MUROS MECÁNICAMENTE ESTABILIZADOS

Los muros mecánicamente estabilizados (M.M.E.) son terraplenes sin taludes laterales, es decir, sus extremos tienen una inclinación a 90° , los cuales se estabilizan por medio de un elemento de contención dividido en fragmentos, conocidos como paramentos o paneles, que se unen entre sí y que quedan sujetos a la cara del talud por medio de la colocación, perpendicular a este, de elementos de refuerzo longitudinales conectados a los paramentos y que quedan embebidos en el material compactado del que está hecho el terraplén.

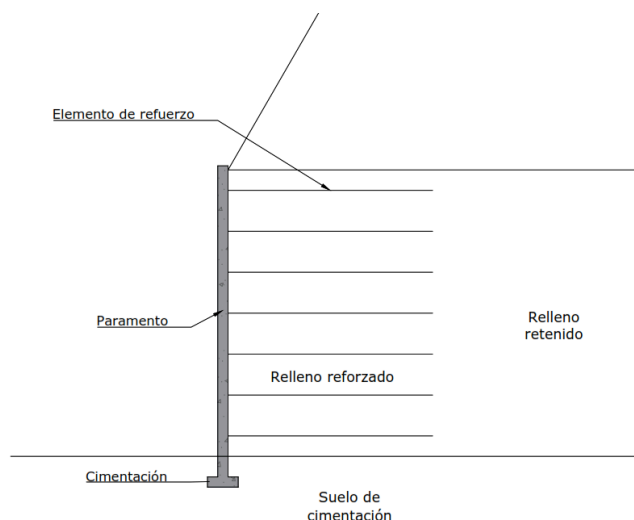


Figura 1. Esquema de muro mecánicamente estabilizado.

Los M.M.E. son ampliamente utilizados en la construcción de puentes y pasos a desnivel de las vías terrestres, ya que no ocupan una gran extensión, son fáciles de construir y tienen un buen desempeño durante su vida útil.

3 MEJORAMIENTO DE SUELOS CON PILAS DE AGREGADO COMPACTADO (PAC)

La Pila o Columna de Agregado Compactado es un elemento vertical conformado por grava triturada de tamaño nominal entre $\frac{3}{4}$ " y $1\frac{1}{2}$ ", con menos del 5% de finos, la cual se coloca en capas que se apisonan hasta compactarlas, alcanzando una alta rigidez, que es el principal diferenciador de este método de mejoramiento comparado con otro tipo de mejoramiento de suelos mediante inclusiones.

Los sistemas constructivos de Columnas/Pilas de Grava Compactada se encuentran patentados por la compañía Geopier; estos sistemas comenzaron a utilizarse a partir de 1989 para incrementar la capacidad de carga del suelo, controlar asentamientos y reducir los tiempos de ejecución, entre otros.

Las columnas de grava compactada pueden tener diámetros variables entre 0.40 m y 0.75 m, y su longitud puede llegar hasta 12.0 m, con posibilidad de incrementarse dependiendo de la maquinaria y los accesorios que se utilicen.

Se identifican dos grupos de métodos constructivos de pilas de grava compactada con base en la acción que se produce en el suelo: sustitución y desplazamiento (Fig. 2).

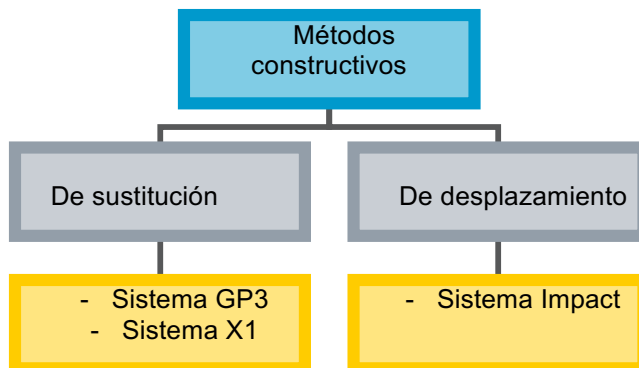


Figura 2. Métodos constructivos para Pilas/Columnas de Grava Compactada Geopier.

Los métodos constructivos por sustitución de material consisten en realizar una excavación del diámetro de la pila de agregado compactado deseado y rellenarla con grava compactada de las características mencionadas anteriormente.

Por otro lado, los métodos constructivos por desplazamiento no requieren una perforación previa para introducir la grava, sino que la herramienta descende en el suelo por medio de vibración y la grava es expulsada desde la parte inferior; el pisón ocupado en este método constructivo está diseñado para permitir el paso de la grava cuando la herramienta se mueve verticalmente hacia arriba y bloquea su salida cuando la herramienta tiene un movimiento en sentido contrario.

En ambos métodos, el proceso de compactación de la grava genera un desplazamiento lateral del

suelo adyacente, lo que disminuye su relación de vacíos e incrementa su esfuerzo horizontal.

3.1 Sistema Constructivo X1

Con el Sistema X1 se puede mejorar el suelo hasta una profundidad de 12.0 m y su procedimiento se puede ejecutar con una cuadrilla integrada por un ayudante, una perforadora, una máquina de perforación o hincado provista con un vibrohincador y el pisón de compactación, un cargador para acarrear la grava, cada una con su respectivo operador.

Este sistema constructivo permite mejorar hasta 12.0 m de profundidad. Su rendimiento promedio es cercano a los 300 m de pila de grava compactada por jornada de 8 hr, el cual está en función de la cantidad de maniobras y la facilidad que tengan las máquinas para realizarlas, principalmente.

El procedimiento constructivo se describe a continuación:

1. Se realiza una perforación de 24" (0.61 m) de diámetro.
2. Se introduce la herramienta de compactación dentro de la perforación y desde la parte superior de esta se deposita una capa de grava angulosa sin finos de diámetro nominal entre 3/4" y 1 1/2".
3. Se apisona la grava hasta formar un bulbo estabilizado en la parte inferior de la pila de grava compactada, con el fin de pre-esforzar el suelo hasta una profundidad mínima de un diámetro por debajo de la profundidad de perforación.
4. Se depositan, de forma sucesiva, capas de la grava con las mismas características y se compactan para que tengan un espesor aproximado de 0.3 metros, hasta llegar a la cota superior. La grava se introduce en la perforación desde la parte superior mientras la herramienta se encuentra dentro de esta. (Fig. 3).



Figura 3. Construcción de Pila de Agregado Compactado con el sistema X1.

El sistema X1, al igual que los demás sistemas constructivos de columnas/pilas de grava compactada, emplean energía de compactación de alta frecuencia de vibración y baja amplitud de onda.

4 MEJORAMIENTO PARA EL APOYO DE MUROS MME EN EL AEROPUERTO INTERNACIONAL FELIPE ÁNGELES (AIFA)

4.1 Antecedentes del proyecto

Para las vías de acceso al Aeropuerto Internacional Felipe Ángeles se proyectó la construcción de varios distribuidores viales que cuentan con pasos a desnivel, para los cuales se emplearán Muros Mecánicamente estabilizados con un ancho de 36.0 m y alturas máximas de 14.0 m que transmiten una presión al suelo de cimentación de hasta 37 t/m².

Los suelos caracterizados en la zona del proyecto son principalmente limos y arcillas tanto de baja como de alta plasticidad de consistencia variable de media a firme. El nivel de agua freática se detectó a 10.0 m de profundidad.

4.2 Alternativas de mejoramiento

Como los asentamientos totales para los MME resultaban excesivos, y la capacidad de carga del suelo era insuficiente para alturas de MME mayores a 4.0 m, se tenía proyectado realizar una sustitución del suelo del sitio de 3.0 a 5.0 m de profundidad bajo el área del muro mecánicamente estabilizado.

Dicha propuesta implicaba un volumen de movimiento de tierras bastante considerable, ya que el MME ocupa un área cercana a los 46,000.0 m², y alargaba mucho los tiempos de construcción, además de que los costos de ejecución eran elevados.

Una alternativa de mejoramiento de suelos consistió en construir pilas de grava compactada de 24" de diámetro y 5.2 m de longitud por debajo de la zapata de cimentación del MME y por debajo del material de relleno del muro en toda su longitud, empleando el sistema constructivo Geopier X1, espaciadas centro-centro a una distancia conveniente para cada altura del muro mecánicamente estabilizado para lograr compatibilidad de las deformaciones.

4.3 Análisis geotécnicos

– Estabilidad global

Tanto en terraplenes como en muros mecánicamente estabilizados es necesario obtener el factor de seguridad contra deslizamiento de los taludes. Los métodos más utilizados para este fin son los de equilibrio límite, ya que son bastante sencillos, donde el factor de seguridad se obtiene en función de la relación fuerza cortante resistente-

fuerza cortante actuante a lo largo de una superficie de falla circular.

El mejoramiento de suelos con Pilas/Columnas de Grava Compactada permite incrementar las fuerzas resistentes en un análisis de estabilidad de talud, debido a que densifican el suelo y, en consecuencia, la rigidez de este aumenta. Además, las columnas de grava compactada tienen ángulos de fricción interna de hasta 50° .

Se realizó un análisis de estabilidad de taludes empleando el método de equilibrio límite Morgenstern-Price para verificar que el factor de seguridad en la revisión de la estabilidad global de los taludes del MME se encontrara en un rango permisible.

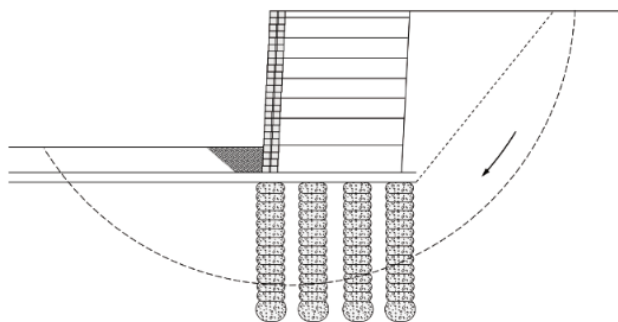


Figura 4. Esquema de un muro MME reforzado con columnas de grava compactada (Wissman & FitzPatrick).

Para los taludes de los muros en sus distintas alturas, con condiciones del suelo de cimentación In Situ, se obtuvieron factores de seguridad por encima de la unidad, lo que se considera aceptable. A pesar de que las Pilas/Columnas de Grava Compactada incrementan las fuerzas resistentes de los taludes, la estabilidad global del MME no fue un factor determinante en el diseño del mejoramiento.

– Capacidad de carga con mejoramiento

La capacidad de carga de un suelo mejorado con pilas de agregado compactado (PAC) está en función de los esfuerzos transmitidos de la cimentación al tope de las pilas de agregado compactado y a su vez, de la distribución de esfuerzos en un suelo que está integrado tanto por las Columnas/Pilas de Grava Compactada como por el suelo identificado en el sitio del proyecto previamente densificado.

La PAC tiene propiedades mecánicas y de deformación superiores a las propiedades los suelos depositados de forma natural, por tanto, el esfuerzo sobre las Columnas/Pilas de Grava Compactada también será mayor que el esfuerzo que actúa sobre el suelo, incluso cuando este ya se encuentre mejorado, lo que incrementa, en conjunto, la capacidad de carga del suelo a nivel de desplante de las cimentaciones.

La capacidad de carga con mejoramiento que se obtuvo con base en las características de los suelos encontrados en el sitio donde se proyectó la

construcción de los muros mecánicamente estabilizados, el sistema constructivo y el diámetro de las pilas de grava compactada, es de 38.5 t/m^2 , la cual es suficiente para soportar hasta las secciones más altas de los muros MME.

En los análisis de capacidad de carga de estructuras apoyadas sobre suelos mejorados con pilas de grava compactada se verifican cuatro modos de falla probables en el sistema Suelo mejorado-PAC (Fig. 5):

- Falla por abultamiento de la PAC.
- Falla por cortante bajo la punta de la PAC.
- Falla por cortante en el sistema suelo mejorado-PAC.
- Falla por cortante bajo el sistema suelo mejorado-PAC.

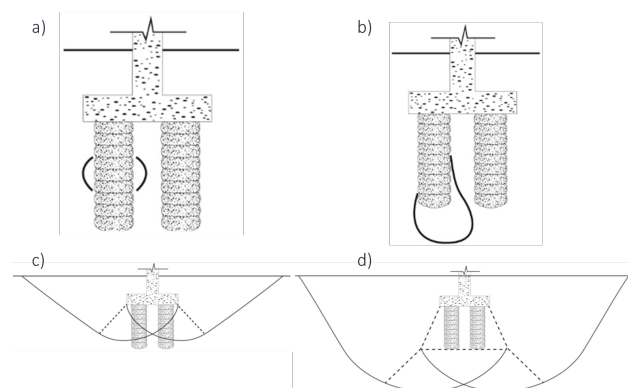


Figura 5. Esquema de los modos de falla de las pilas de agregado compactado (modificado de Wissman, K.).

– Asentamientos

Para obtener los asentamientos de los suelos mejorados se emplea la analogía de resortes (Fig. 6) donde se emplea una lógica similar a la tomada en cuenta en los cálculos de la capacidad de carga de los suelos post-mejoramiento; únicamente se involucran las propiedades elásticas: módulo de Young, E , y módulo de rigidez, k .

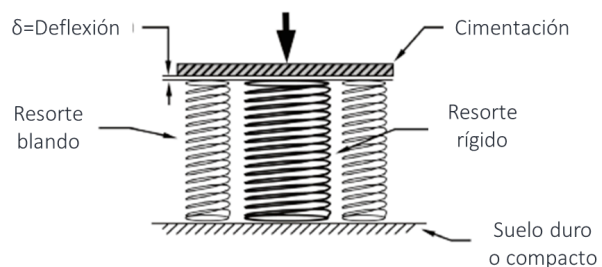


Figura 6. Esquema de la analogía de resortes para el cálculo de asentamientos con mejoramiento.

Los asentamientos de todos los suelos que se encuentran por debajo de la profundidad de

mejoramiento se obtienen con la metodología tradicional de la mecánica de suelos.

Un atributo de las columnas de grava compactada importante para este proyecto es el drenaje radial que proporcionan en el suelo, contribuyendo con la reducción del tiempo en el que se presentan los asentamientos por consolidación. Se estima que el 90% de los asentamientos por consolidación se presentarán durante el periodo de construcción de los muros MME.

4.4 Resultados de construcción

El mejoramiento de suelos para la construcción de muros mecánicamente estabilizados en las vías de acceso al Aeropuerto Internacional Felipe Ángeles pertenecientes al municipio de Zumpango, Estado de México, consistió en instalar 18,552 pilas de agregado compactado Geopier X1 de 24" (0.61 m) de diámetro y 5.2 m de longitud, lo cual se llevó a cabo en dos meses.

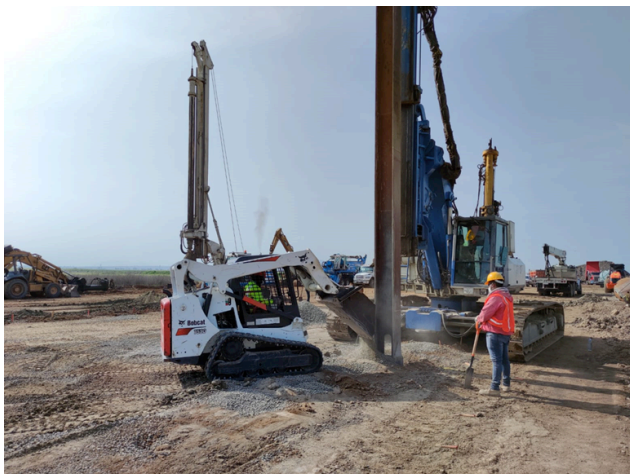


Figura 7. Construcción de Pilas/Columnas de Grava Compactada para el Aeropuerto Internacional Felipe Ángeles con el sistema Geopier X1.

El mejoramiento de suelos de este proyecto se llevó a cabo con cuatro cuadrillas del sistema constructivo Geopier X1 trabajando doble turno para cumplir con el tiempo de construcción solicitado por el cliente; por cuadrilla, el rendimiento promedio en una jornada laboral de 8 hr fue de 370 metros de pila de agregado compactado, registrándose rendimientos máximos de hasta 1000 m/jor.

El rendimiento de construcción se vio favorecido principalmente porque no se presentaron inconvenientes durante las actividades de perforación y las pilas de agregado compactado tenían un arreglo reticular que disminuyó el número de maniobras de la maquinaria, así como el tiempo que les tomaba realizarlas.

5 CONCLUSIONES

Las Columnas/Pilas de grava compactada son una buena alternativa de mejoramiento de suelos, ya que tienen diferentes variantes según las condiciones del suelo en el sitio del proyecto. Además, contribuyen con la disminución de asentamientos totales de la estructura y el tiempo en el que se presentan los asentamientos por consolidación, incrementan la capacidad de carga del suelo, así como el factor de seguridad contra el deslizamiento en el caso de taludes.

Para el mejoramiento de suelos de los muros mecánicamente estabilizados de las vías de acceso al Aeropuerto Internacional Felipe Ángeles se construyeron 18,552 pilas de agregado compactado en un periodo de dos meses, alcanzándose rendimientos de construcción promedio de 370 metros de PAC por jornada laboral de 8 horas, y máximos de hasta 1000 m/jor.

REFERENCIAS

- Wissmann, K. "Bearing capacity of Geopier supported foundations systems". *Technical Bulletin No. 2. Geopier*.
- Wissmann, K., FitzPatrick B. "Geopier shear reinforcement for global stability and slope stability". *Technical Bulletin No. 5. Geopier*.
- Wissmann, K., FitzPatrick B., White, D. "Settlement control for embankments and transportation related structures using Geopier". *Technical Bulletin No. 6. Geopier*.