

## Nuevos sistemas de mejoramiento de suelo en México: Impact, Rampact y Densipact

New soil improvement systems in Mexico: Impact, Rampact and Densipact

**Carlos BARRERA<sup>1</sup> y Héctor VALVERDE<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Cimentec S.A. de C.V.

**RESUMEN:** El mejoramiento de suelos a base de pilas de grava compactada Geopier se ha implementado exitosamente en nuestro país, ya que es una solución geotécnica que funciona para muchos de los problemas que se presentan en los proyectos que se tienen en México y en el mundo. Se han desarrollado nuevas tecnologías para el mejoramiento de suelos, cómo son los sistemas Impact, Rampact y Densipact; los cuales ya se pueden aplicar en nuestro país. Los sistemas Impact y Rampact son similares al sistema Geopier, usando un proceso de compactación vertical. Sin embargo, estos sistemas son más aplicables y económicos para instalaciones en suelos susceptibles a derrumbes durante la perforación, porque la construcción se ve facilitada usando un mandril de desplazamiento. El sistema Densipact, es adecuado para tratar arenas sueltas hasta 7.6 m de profundidad, por medio de vibración, con ayuda de unos dientes que densifican las arenas de manera rápida y económica, ya que se puede utilizar la misma arena del sitio, evitando la necesidad de importar materiales de banco. En este documento se hace una descripción de cada sistema, indicando en que suelos son más adecuados para su uso.

**ABSTRACT:** The soil improvement based on compacted gravel piles Geopier has been successfully implemented in our country, as it is a geotechnical solution that works for many of the problems that arise in the projects that are in Mexico and the world. Geopier Foundation Company has developed new technologies for soil improvement, such as the Impact, Rampact and Densipact, which can already be applied in our country. Impact and Rampact systems are similar to the Geopier system, producing compacted aggregate rigid piers, using a patented vertical compaction process. However, these systems are more applicable and affordable for facilities in soils susceptible to collapse during drilling, because the construction is facilitated using a patented displacement mandrel. Densipact system is very suitable for treating loose sands to 7.6 m deep, by means of vibration, with the aid of tines that densify sands quickly and economically, since it can use the same site sand, avoiding the need to import bank materials. This paper provides a description of each system, indicating which soils are suitable for its use.

### 1 INTRODUCCIÓN

El uso de los sistemas de pilas de agregado compactado (Rammed Aggregate Pier, RAP) está bien documentado en la literatura de los últimos 20 años. Los sistemas RAP se han utilizado en México, Estados Unidos, Canadá, Sur América, Europa y Asia para diferentes estructuras como escuelas, tanques, edificios, plantas de tratamiento, terraplenes, parques eólicos, etc. Los principios de ingeniería de los sistemas de mejoramiento de suelo RAP son 1) instalación de un RAP muy denso y rígido dentro de la matriz de suelo, 2) incrementar la densidad o rigidez de la matriz de suelo que lo rodea, y 3) incrementar el esfuerzo lateral en la matriz de suelo. La construcción de los RAP crea un

compuesto de RAP/Matriz de suelo con propiedades incrementadas de rigidez y resistencia.

La amplia aceptación del uso de los sistemas RAP está evidenciada por los más de 3000 proyectos terminados en todo el mundo y recientemente también en México.

Los tipos de RAP que son comunes hoy en día incluyen construcción por remplazo, conocidos como Geopier y los sistemas RAP por desplazamiento, conocidos como pilas Impact, Rampact y Densipact.

Los sistemas de desplazamiento RAP con comúnmente utilizados en sitios con arenas sueltas y niveles de aguas freáticas someros o en sitios con suelos contaminados. El sistema de desplazamiento RAP es comúnmente utilizado cuando el suelo es fácilmente perforado y necesita de ademe para realizar una perforación.

## 2 DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS

### 2.1 Sistema Impact

El sistema Impact pier es un método de desplazamiento vibratorio donde se deposita la grava por la parte superior, por medio de una tolva (Figura 1), es un método que utiliza técnicas de instalación en seco, por lo tanto elimina el potencial de generar desperdicios, manejo de agua y la saturación de los estratos arcillosos.



Figura 1. Equipo para el sistema Impact.

Este sistema RAP incrementa la densidad de la matriz de suelo por medio de un mandril vibratorio dirigido, especialmente diseñado con una cabeza apisonadora, que se introduce en el suelo con la ayuda de una alta fuerza vertical aplicada por un equipo pesado (Figura 1). Después de que el mandril es llevado a la elevación de diseño, se carga con agregado para colocarlo en el fondo del suelo desplazado. El mandril es levantado para rellenar con grava el orificio originado por el desplazamiento, y luego apisonarla de vuelta incrementando la densidad, desplazando y compactando en capas delgadas de agregado dentro de la matriz de suelo. La densificación se logra con golpes sucesivos del RAP, usando una fuerza vertical aplicada por el equipo y energía de impacto provista por un martillo vibratorio de alta frecuencia.

Los avances de éste método incluyen 1) instalación por desplazamiento de suelo en seco,

rellenado con agregado selecto, 2) compactación vertical del agregado, creando una inclusión rígida, 3) compactación del agregado utilizando una fuerza vertical hidráulica y un martillo de alta frecuencia que desplaza el agregado lateralmente dentro del suelo y expandiendo aún más la cavidad desplazada, rigidizando la matriz de suelo e incrementando la densidad en el caso de las arenas sueltas.

### 2.2 Sistema Rampact

El sistema Rampact es extremadamente competitivo para instalaciones en suelos que tengan problemas de inestabilidad en las perforaciones, debido a que, al igual que el sistema Impact, su construcción está facilitada por el uso de un mandril especial de desplazamiento patentado, el cual elimina los riesgos del uso de ademe. Este sistema es ideal para sitios contaminados donde la sobre excavación o el manejo del material producto de las perforaciones no son opciones viables. La solución de Rampact reemplaza sistemas tradicionales como sobre excavación y remplazo con suelo de banco, pilas y pilotes.



Figura 2. Sistema Rampact.

Proceso constructivo del sistema Rampact:

1) Un mandril especialmente diseñado (Figura 2) es dirigido dentro del suelo usando una poderosa fuerza estática, aumentada por una energía vertical de impacto de alta frecuencia. Las profundidades normalmente varían de 3 a 6 m, dependiendo de los requerimientos de diseño. Se utiliza una placa de sacrificio que no permita el ingreso de suelo al mandril mientras este es introducido en el suelo. Debido a que no hay retiro de material, el sistema



desplaza al suelo lateralmente, densificando y reforzando los suelos existentes.

2) Después de penetrar el mandril hasta la profundidad de diseño, éste sirve como un conducto para colocar el agregado, el cual es colocado dentro de dicho mandril (Figura 3). El mandril es luego levantado y recolocado hacia abajo para formar una delgada capa compacta. La compactación es lograda a través de la fuerza estática vertical y con el apisonamiento del martillo. El proceso densifica el agregado verticalmente, y el mandril lo compacta lateralmente hacia la matriz de suelo. Los resultados con el mejoramiento de suelo y el incremento del esfuerzo lateral logran controlar el asentamiento, además mejorar la resistencia y rigidez del suelo.

3) Después de la instalación, los elementos de grava apisonada (RAP), pueden soportar zapatas, losas de piso y losas estructurales. Los esfuerzos aplicados son atraídos a los elementos rígidos RAP, resultando en un asentamiento controlado. El sistema también reduce el potencial de licuación de arenas e incrementa la estabilidad para terraplenes, muros y tanques.

En general, el sistema Rampact tiene las mismas ventajas y aplicaciones que el sistema Impact, la diferencia principal es que el primero aplica para mejorar suelos a menores profundidades, logrando incrementar los rendimientos que se tienen con el segundo, ya que se tiene un mandril de menor profundidad. Donde se requiera un mejoramiento de suelo con problemas de caídos a una profundidad mayor a 6 m, el sistema más adecuado seguiría siendo el Impact Pier.



Figura 3. Construcción de una pila de grava mediante el sistema Rampact

### 2.3 Sistema Densipact

El sistema Densipact es relativamente nuevo, pero debido a su rapidez y eficacia ha tenido una gran aceptación, al igual que el sistema Impact y Rampact, se utiliza el mismo equipo con un martillo

vibratorio, funciona muy bien en suelos arenosos sueltos, ya que los densifica como su nombre lo indica, introduciendo unos dientes que desplazan al suelo existente (Figura 4).

Proceso constructivo del sistema Densipact:

1) La cavidad se crea introduciendo unos dientes de sección cuadrada en forma de pirámide, diseñados especialmente usando fuerza estática aumentada por la energía de impacto vertical dinámica. El número de dientes a utilizar varía de 5, 8 y 11 elementos, dependiendo de la longitud de los mismos, que varía de 2 a 6 m, y de los requisitos de diseño. Es posible mejorar profundidades mayores debido a que la influencia del mejoramiento es del orden de 2 veces el largo de los dientes. Este método también elimina los desechos que resultarían del proceso de perforación ya que todos los suelos penetrados se desplazan lateralmente durante la penetración inicial.



Figura 4. Dientes del sistema Densipact

2) Después de introducir los dientes a la profundidad de diseño, estos se retiran, dejando unos orificios, en los cuales se coloca arena hasta rellenarlos completamente. Una vez colocada la arena se vuelven a introducir los dientes hasta lograr el rechazo del equipo, el número de pasadas o veces que se introducen nuevamente los dientes dependerá de la densidad de la arena. La densificación se logra mediante fuerza estática y energía de impacto dinámica del martillo. El martillo de impacto densifica la arena verticalmente y los dientes desplazan el agregado en sentido lateral

dentro de la cavidad. Esto resulta en un acoplamiento excelente con los suelos circundantes y un control fiable con una resistencia y rigidez insuperables.

3) Tras la instalación, el sistema Densipact, los esfuerzos de las cimentaciones son atraídos a las zonas mejoradas, que además mejoran el suelo circundante, ya que la vibración densifica las arenas de alrededor, resultando en un control de asentamientos.

### 3 PROPIEDADES DE LOS SISTEMAS RAP

#### 3.1 *Resultados de construcción*

Los elementos RAP son aproximadamente de 10 a 55 veces más rígidos que los suelos sin refuerzo, y exhiben altos ángulos de fricción interna. El proceso de apisonamiento incrementa las presiones laterales de la matriz de suelo cerca de los elementos y entre ellos, mejorando la matriz de suelo y haciéndola más rígida. Debido a que el suelo mejorado es más rígido, se reduce la magnitud de los asentamientos cuando está sujeto a una carga. El drenaje del suelo es también mejorado por éstas inclusiones, especialmente cuando se usa grava tipo "open-graded", es decir, de granulometría abierta para el fuste de los elementos. También pueden funcionar como anclas a tensión, cuando están equipados con arneses de acero.

Debido a las altas concentraciones de esfuerzo en los elementos RAP y la naturaleza dúctil del sistema, se ha probado que es altamente efectivo al reducir los esfuerzos de cortante inducidos por los sismos en los suelos y de esa forma reducen el potencial de licuación de arenas y las deformaciones asociadas al fenómeno (Wissmann et al. 1999).

#### 3.2 *Control de asentamientos*

El control de asentamientos es una de las principales aplicaciones de los sistemas RAP, debido a que la matriz de suelo adyacente es mejorada, no principalmente por densificación, sino por el pre-esfuerzo lateral en dicha matriz de suelo. La acumulación de estos esfuerzos laterales en los suelos circundantes desarrolla un suelo sobre-consolidado alrededor de cada elemento.

Las altas presiones laterales en la matriz de suelo "confinan" a las pilas de grava, incrementando la resistencia al esfuerzo cortante a lo largo de la interfaz del elemento RAP con la matriz de suelo. Al mismo tiempo, la matriz de suelo más compresible es preesforzada por la aplicación de esfuerzos durante la instalación, el resultado final es una matriz de suelo más rígida, lo cual se traduce en menores asentamientos (Fox and Cowell 1998).

#### 3.3 *Incremento de esfuerzo lateral en el suelo*

Un principio fundamental en la construcción de los elementos RAP es el uso de un pisón biselado que

permita el empuje del agregado lateralmente en las paredes del suelo, en el caso del sistema Densipact, debido a la forma de los dientes produce el mismo fenómeno. Al forzar al agregado hacia el suelo, se crea un esfuerzo lateral, básicamente se logra un empuje pasivo del suelo. Se han hecho mediciones del  $K_0$  (Handy *et al.* 1990, White *et al.* 2000, Handy 2001) para determinar la magnitud y la extensión horizontal del esfuerzo lateral durante el proceso de instalación de los RAP, los resultados han indicado consistentemente que se desarrollan las condiciones de empuje pasivo en los suelos que están cercanos y entre los elementos RAP. Éstas medidas también indican que ocurre un incremento significativo del esfuerzo lateral a una distancia del orden de tres a cuatro veces el diámetro del RAP.

Se ha observado que las estructuras reforzadas con elementos RAP se han asentado menos que lo estimado (Lawton and Fox 1994, Lawton *et al.* 1994). En un estudio que investiga la influencia del esfuerzo lateral en el asentamiento de una cimentación, (Handy 2001), concluye que los altos esfuerzos laterales disminuyen el asentamiento por consolidación. Adicionalmente, las mediciones a tensión de los elementos RAP por un periodo de más de diez años muestran respuestas de carga-deformación casi lineales, con un comportamiento elástico. Estos resultados proveen una segura indicación de que existe un cambio fundamental en el comportamiento del suelo como resultado del incremento del esfuerzo lateral durante la instalación de los elementos RAP.

#### 3.4 *Resistencia a cargas de tensión*

Debido al incremento de los esfuerzos laterales en el suelo, a los altos ángulos de fricción interna de los elementos RAP y su superficie irregular ondulada, estos elementos proveen una alta resistencia a la tensión incluso con sus profundidades y longitudes limitadas. Son instalados unos arneses de acero a tensión durante la construcción del RAP para transferir las cargas de la cimentación. Se instala típicamente una placa de acero en el fondo, sobre el bulbo inferior del elemento, con barras de acero que se extienden hacia arriba a lo largo de la periferia de la perforación, para que permita el paso del mandril entre las barras durante el apisonamiento del agregado. Se han realizado muchas pruebas a tensión para determinar su comportamiento ante la carga, los diseños típicos resultan de 20 a 40 toneladas por elemento, dependiendo de su longitud y del tipo de suelo.

El sistema Densipact solo se ha aplicado en proyectos con esfuerzos a compresión, ya que por su proceso constructivo se dificulta la colocación de los arneses.



### 3.5 Resistencia a cargas laterales

Las cargas laterales son aplicadas en las cimentaciones por el viento, presiones laterales del suelo y sismos. Debido a las altas concentraciones de esfuerzo en los elementos RAP y el alto ángulo de fricción interna, se produce una resistencia a la carga lateral relativamente alta en comparación a un suelo sin refuerzo. La resistencia al deslizamiento para una cimentación reforzada con los elementos RAP, es la suma de la resistencia entre la cimentación y la matriz de suelo (Fox and Cowell 1998). Debido a la alta concentración de los esfuerzos normales y de los altos grados de fricción interna de los elementos RAP, la mayor parte de la resistencia se atribuye a la generada por éstos elementos.

### 3.6 Protección ante el fenómeno de licuación

La instalación de éstos elementos, sea con el sistema Impact, Rampact o Densipact, provee una reducción en el potencial de licuación de arenas dentro de las zonas mejoradas, dependiendo de la graduación del agregado utilizado en los elementos RAP, la intensidad del sismo, las características del suelo, y el espaciamiento del mejoramiento.

Con estos sistemas se tiene un comportamiento dúctil y pueden experimentar deformaciones sin perder resistencia, en contraste con las cimentaciones profundas que son relativamente frágiles y rígidas, como son las pilas o pilotes de concreto. De tal forma de que estos sistemas de mejoramiento proveen una mayor confianza en retener la integridad después de un sismo que la ofrecida por los sistemas tradicionales de cimentación profunda. Se confirmó la ductilidad, la retención de la integridad y rigidez de los elementos RAP durante un sismo de escala 7.5 Richter que se presentó durante un proyecto de investigación de vibración a escala completa de un puente en Salt Lake City, Utah, a finales de 1990 (Lawton 2000).

### 3.7 Tipos de suelo

El sistema Geopier fue desarrollado inicialmente para remplazar la sobre excavación y remplazo con material de banco en sitios que pueden incluir depósitos orgánicos, rellenos sin compactar, arenas sueltas, limos y arcillas blandas.

Los sistemas Impact, Rampact y Densipact nacen debido a los problemas y necesidades que se presentan en los diferentes tipos de suelo y cada uno es más adecuado en cierto tipo de suelo como se muestra en la Figura 5.

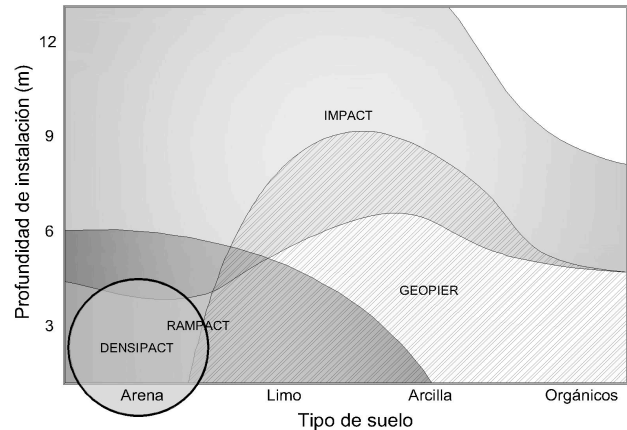


Figura 5. Profundidad de mejoramiento y tipo de suelo más adecuado para cada sistema.

## 4 CONCLUSIONES

El refuerzo de suelos con los sistemas Impact, Rampact y Densipact, a diferencia del sistema Geopier, no necesitan de ademe cuando se trabaja en suelos colapsables, como son las arenas sueltas, y en el caso particular del sistema Impact, se puede mejorar suelos a mayor profundidad (hasta 16 m).

Debido a que el proceso constructivo de estos sistemas utiliza un martillo vibratorio para introducir ya sea el mandril o los dientes del sistema Densipact, son muy adecuados para aplicarlos donde se encuentran arenas sueltas ya que además de construir elementos rígidos, se densifica el suelo circundante, logrando resistencias al corte y capacidades de carga mejoradas en una mayor área, reduciendo el área de remplazo necesaria para soportar las cargas de diseño.

Como se observa en la Figura 5, cada sistema tiene su rango de aplicación, donde dependiendo del tipo de suelo a tratar, puede que un sistema sea más adecuado que otro, y esto se ve reflejado en los rendimientos y esto a su vez en el costo de la solución.

El desarrollo de grandes proyectos, el rápido crecimiento de la ciudades y de los servicios que estás requieren en zonas de suelos de consistencia blanda o compacidad suelta, ha creado la necesidad de tener técnicas que garanticen un buen comportamiento de las estructuras, a bajos costos y en tiempos de construcción cortos, por lo que técnicas como las aquí señaladas, han venido a cambiar la forma de cimentar en suelos de condiciones difíciles, sistemas constructivos que seguramente serán usados cada vez con más frecuencia en el futuro.

## REFERENCIAS

- Fox N.S. y Cowell M.J. (1998). "Geopier Foundation and Soil Reinforcement Manual". *Geopier Foundation Company, Inc.*, Scottsdale, AZ.
- Handy R. L., Mings C., Retz D. and Eichener D. (1990). "Field experience with the Ko stepped blade" *Transp. Res. Rec.1278, Transportation Research Board*, Washington, D.C., 125-134.
- Handy R. L. (2001). "Does Lateral Stress Really Influence Settlement?" *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 127 (7) (623-626).
- Lawton E. C., y N. S. Fox (1994). "Settlement of structures supported on marginal or inadequate soils stiffened with short aggregate piers." *Geotechnical Specialty Publication No. 40: Vertical and Horizontal Deformations of Foundations and Embankments*, ASCE, 2, 962-974.
- Lawton E. C., Fox N. S. y Handy R.L. (1994). "Control of settlement and uplift structures using short aggregate piers." *In-Situ Deep Soil Improvement, Proc. ASCE National Convention*, Atlanta, Georgia, 121-132.
- Lawton E.C. (2000). "Performance of Geopier foundations during simulated seismic tests at South Temple Bridge on Interstate 15, Salt Lake City, Utah." *Report No. UUCVEEN 99-05, University of Utah Department of Civil and Environmental Engineering*, Salt Lake City, Utah.
- White D. J., Lawton E.C. and Pitt J.M. (2000). "Lateral Earth Pressure Induced by Rammed Aggregate Piers". *Proceedings Canadian Geotechnical Conference*. Toronto, Canada.
- Wissmann K.J. Farrell T.M. and Lawton E.C. (1999). "Behavior of Geopier-Suppodrtd Foundation Systems During Seismic Events." *Technical Bulletin No. 1. Geopier Foundation Company, Inc.* Scottsdale, Arizona.