

## **Aplicación de Método Constructivo de Pilas de Agregado Compactado (RAPs) para el Incremento de la Rigidez del Suelo de Cimentación en el Soporte de Cimentaciones de Torres de Aerogeneradores**

Juan Pablo Rodríguez(1); Iván Cañete(2)

(1) *Director de Ingeniería, Latinoamérica, Geopier Foundation Company, [jrodriguez@geopier.com](mailto:jrodriguez@geopier.com)*  
(2) *Gerente Área Fundaciones, EMIN Sistemas Geotécnicos, [icanete@emin.cl](mailto:icanete@emin.cl)*

### **Resumen**

Las cimentaciones de las Torres de Aerogeneradores deben ser diseñadas de tal forma que se limite la rotación o distorsión angular de la torre. Las Pilas de Agregado Compactado (RAPs, por sus siglas en inglés de Rammed Aggregate Piers®) son usadas comúnmente para incrementar la rigidez disponible del suelo de cimentación, tomando ventaja de su alta rigidez en comparación a la del suelo matriz que refuerzan. Se emplea una metodología de rigidez compuesta, conocida en la literatura como “módulo elástico equivalente”, utilizando los parámetros elásticos-dinámicos del suelo y los elementos RAP para desarrollar una solución que resulte en una rigidez del suelo compuesta que cumpla con los parámetros de diseño de proyecto. Este artículo presenta el procedimiento constructivo de los RAPs, trasfondo técnico y los procedimientos utilizados para desarrollar una solución para incrementar la rigidez del suelo de cimentación utilizando RAPs para el apoyo de cimentaciones de torres de aerogeneradores. Se presenta también un caso histórico de un proyecto en Renaico, Chile, para dar ejemplo de cómo emplear la metodología presentada. También se compara la solución con las tradicionales Columnas de Grava instaladas por métodos de vibración.

**Palabras-Clave:** *Pilas de Agregado Compactado, RAPs, Cimentaciones, Torres de Aerogeneradores*

### **Abstract**

Wind turbine tower foundations must be designed to limit the angular rotation or distortion of the tower. Rammed Aggregate Piers® (RAPs) are commonly used for increasing the available soil stiffness by taking advantage of their higher stiffness compared to that of the matrix soil being reinforced. A composite stiffness approach, known in the literature as “equivalent elasticity modulus” using the elastic dynamic parameters of the soil and the RAP elements is used to develop a solution resulting in a composite soil stiffness, thereby meeting the project design requirements. This paper presents the construction procedure of the RAPs, the technical background and procedures used for developing a solution for increasing the foundation soil stiffness using RAPs for support of wind turbine tower foundations. A case history of a project in Renaico, Chile, is also presented as an example of how the design methodology is used. Also, the solution is compared to the traditional Stone Columns installed by means of vibration methods.

**Keywords:** *Rammed Aggregate Piers, RAPs, Foundations, Wind turbine towers*



**SOCIEDAD CHILENA DE GEOTECNIA**  
CHILEAN GEOTECHNICAL SOCIETY

## 1 Introducción

El diseño de la cimentación de las torres de aerogeneradores debe limitar la rotación angular de la torre bajo condiciones de servicio. Los diseñadores de torres de aerogeneradores generalmente especifican la rigidez rotacional de diseño la cual luego es empleada en combinación con el momento de volteo para estimar la rotación angular. La rotación angular permisible para cimentaciones de torres de aerogeneradores generalmente tiene un valor de 0.003 radianes o su equivalente de 3mm/m.

Una alternativa para incrementar la rigidez rotacional es el refuerzo del suelo mediante Pilas de Agregado Compactado (RAPs), las cuales contribuyen con una rigidez considerablemente mayor al suelo que las rodea. De tal forma se emplea el método de rigidez compuesta usando parámetros elásticos dinámicos, como se ha comentado en [1] y [2], para calcular la rigidez rotacional mejorada y así poder cumplir con los criterios de diseño del proyecto.

## 2 Pilas de Agregado Compactado (RAPs)

Los RAPs son una solución de mejoramiento de suelos que se ha empleado por más de 20 años para múltiples tipos de proyectos como lo son: cimentaciones de edificios, naves industriales, tanques, estructuras de transporte, parques eólicos, entre otros. Estos sistemas de refuerzo y mejoramiento de suelos proveen mayor resistencia y rigidez a suelos blandos y compresibles.

Para su construcción los RAPs pueden usar un proceso de reemplazo o de desplazamiento. El proceso de reemplazo (Fig. 1) consiste en realizar una perforación con diámetros típicos de 0.76 a 0.9m, de acuerdo a las especificaciones de diseño, colocando posteriormente capas delgadas de agregado dentro de la perforación las cuales son luego compactadas usando un martillo de alta energía y un pisón biselado [3]. Durante la compactación de las capas, el martillo de alta energía combinado con el pisón biselado no solo densifica verticalmente el agregado creando un RAP de alta rigidez, sino que también desplaza lateralmente las paredes de la perforación, resultando así en un incremento lateral de esfuerzos en el suelo circundante. El incremento lateral de esfuerzos reduce la compresibilidad del suelo e induce un mejor acoplamiento entre las pilas de agregado y el suelo creando así una zona reforzada compuesta y mejorada.

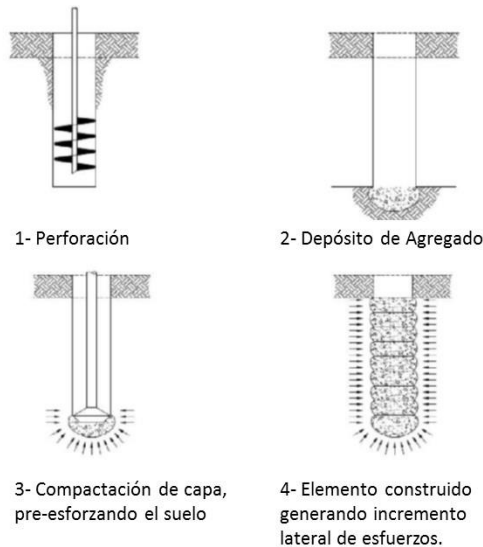


Fig. 1 – Procedimiento constructivo de los RAPs usando el método de remplazo [3].

Una alternativa para aquellos suelos cuyas paredes de perforación no permanezcan estables es usar un procedimiento constructivo de desplazamiento (Fig. 2). Este proceso involucra el hincado de una herramienta tubular por medio de un martillo de alta frecuencia y energía hasta la profundidad de diseño, para posteriormente hacer llegar el agregado hasta la punta de la herramienta, extrayendo la herramienta y luego penetrando nuevamente para compactar así capas delgadas de agregado.

Los RAPs contribuyen a obtener una capacidad de carga mejorada bajo las torres de aerogeneradores, controlando los asentamientos totales y diferenciales, por lo tanto, también controlan la distorsión angular y mejoran la rigidez rotacional, para así lograr un desempeño adecuado de las cimentaciones de torres de aerogeneradores.

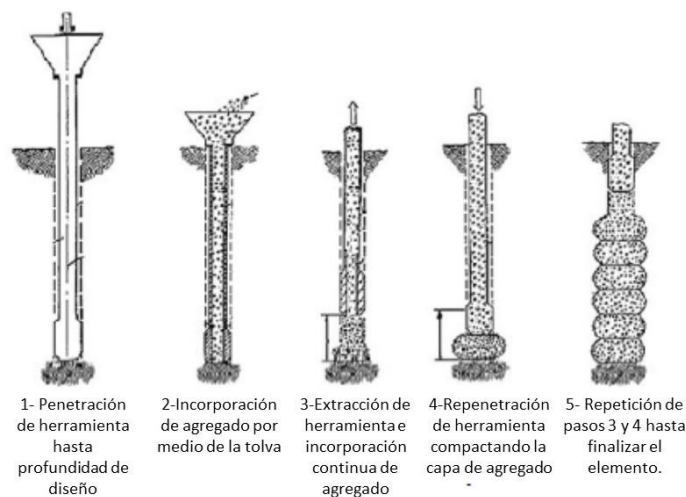


Fig. 2 – Procedimiento constructivo de los RAPs usando el método de desplazamiento [3]

### 3 Cálculo de rigidez rotacional

#### 3.1 Cálculos de rigidez rotacional para la condición sin mejora de suelo

Existen múltiples tipos de revisiones de rigidez que deben realizarse en una cimentación como se puede observar en la Fig. 3. Sin embargo, la rigidez rotacional frecuentemente es el parámetro que controla el diseño de torres de aerogeneradores. La rigidez vertical, horizontal y torsional raramente controlan el diseño.

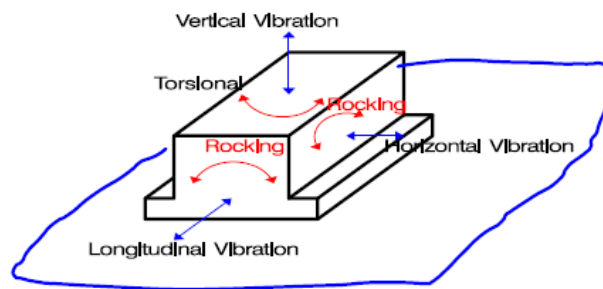


Fig. 3 – Modos de vibraciones en maquinaria y revisiones de rigidez [4].

La rigidez rotacional se define como la relación del momento aplicado y la rotación angular en radianes como se expresa en la siguiente ecuación:

$$K_{\phi} = \frac{M}{\theta} \quad (1)$$

Donde:

$K_{\phi}$ = rigidez rotacional,

M= momento aplicado, y

$\theta$ = distorsión angular en radianes.

Para una cimentación circular rígida apoyada sobre un medio elástico infinito y sujeta a volteo, la ecuación general para estimar la rigidez rotacional es la siguiente [5]:

$$K_{\phi} = \frac{8GR^3}{3(1-\nu)} \quad (2)$$

Donde:

G= módulo de corte del suelo,

R= radio de la cimentación, y

$\nu$ = relación de Poisson.

Para una cimentación circular que está apoyada sobre un estrato de dos capas y sujeta a volteo como se ilustra en la Fig. 4, y donde  $0.75 \leq H/R \leq 2$ , y  $0 \leq G_1/G_2 \leq 1$ , la rigidez rotacional es calculada usando la siguiente ecuación [6]:

$$K_{\phi} = \frac{8G_1R^3}{3(1-\nu)} \frac{1 + \frac{R}{6H}}{1 + \frac{RG_1}{6HG_2}} \quad (3)$$

Donde:

$G_1$ = módulo de corte a la deformación de corte cíclico de diseño para el estrato superficial,

$G_2$ = módulo de corte a la deformación de corte cíclico de diseño para el estrato inferior, y

$H$ = espesor del estrato superficial.

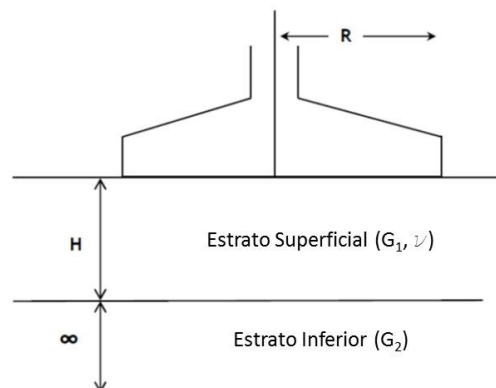


Fig. 4 – Cimentación rígida circular apoyada sobre un sistema discreto elástico de 2 capas [5].

De las Ec. (2) y (3) se puede observar que para el cálculo de la rigidez rotacional se requieren principalmente dos parámetros geotécnicos: la relación de Poisson ( $\nu$ ) y el módulo de corte ( $G$ ). El módulo de corte máximo o dinámico,  $G_{\max}$ , puede ser correlacionado con el módulo elástico máximo o dinámico,  $E_{\max}$ , como se observa en la siguiente ecuación:

$$G_{\max} = \frac{E_{\max}}{2(1+\nu)} \quad (4)$$

Donde:

$G_{\max}$ = módulo de corte dinámico o máximo,

$E_{\max}$ = módulo elástico dinámico o máximo.

El módulo elástico dinámico puede ser estimado usando correlaciones respecto al módulo elástico estático, como se ilustra en la Fig. 5 [7].

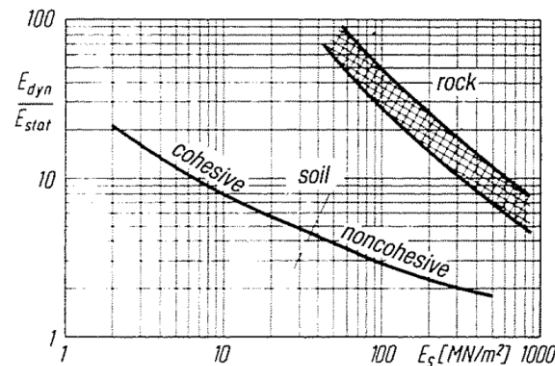


Fig. 5 – Relación del módulo elástico dinámico respecto al módulo elástico estático ( $E_{dyn}/E_{stat}$ ) basada en el módulo elástico estático ( $E_s$ ) [7].

La curva de los suelos representada en la Fig. 5 puede ser expresada matemáticamente mediante la siguiente expresión:

$$\frac{E_{dyn}}{E_{stat}} = 23.118 * E_{stat}^{-0.445} \text{ (MPa).} \quad (5)$$

En la práctica, frecuentemente se limita la relación  $E_{dyn}/E_{stat}$  a un valor de 10 para evitar sobreestimar el módulo elástico máximo en suelos blandos. En la literatura se han publicado valores típicos del módulo elástico y relación de Poisson para distintos tipos de suelos, como en [8].

Es importante señalar que los módulos de corte máximos están generalmente asociados a deformaciones de corte en un rango de 0.0001%. Dado que las cimentaciones de torres de aerogeneradores están sujetas a deformaciones de corte mayores que las asociadas al módulo de corte máximo, las guías de diseño aceptadas por la industria del diseño de torres de aerogeneradores [6] emplean un valor de deformación de corte de 0.1%. Por lo tanto, el módulo de corte máximo deberá ser degradado usando un factor de reducción  $G_s/G_{max}$  para tomar en cuenta la mayor deformación de corte. El factor de reducción es seleccionado en función al tipo de suelo como se indica en la Fig. 6 [9].

$$G_s' = G_{max} \frac{G}{G_{max}}. \quad (6)$$



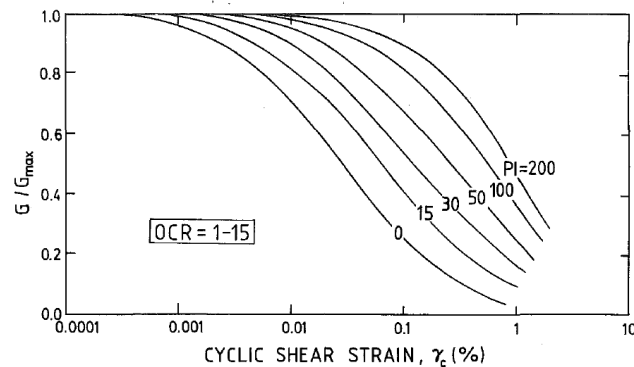


Fig. 6 - Factor de reducción del módulo de corte  $G_s/G_{max}$  en función de la deformación de corte cíclico para distintos tipos de suelo [9].

### 3.2 Cálculos de rigidez compuesta para la condición mejorada con RAPs

Los RAPs son empleados para mejorar y rigidizar el estrato superficial de suelo para cumplir con el criterio de diseño de rigidez rotacional del fabricante del aerogenerador. La metodología de dos estratos de suelo discutida anteriormente puede ser empleada para el uso de RAPs, considerando un estrato equivalente correspondiente al suelo natural con los RAPs, en función de la razón de área de remplazo,  $R_a$ , de los RAPs como se discutirá más adelante. Este tipo de solución ha sido discutido en la literatura como en [1] y [2], para proveer soluciones simplificadas que puedan ser utilizadas en la práctica para la solución de problemas de asentamiento de suelos. La solución esquemática se muestra en la Fig. 7.

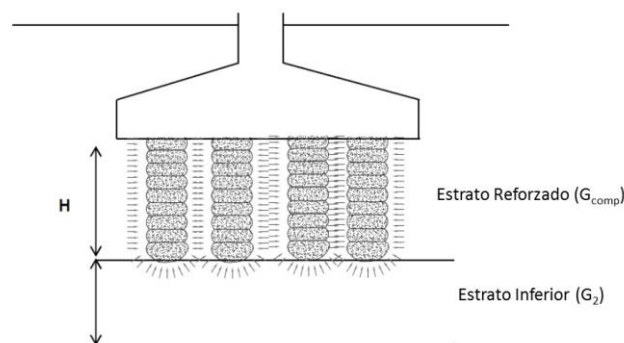


Fig. 7 - Concepto de pilas de agregado compactado para incrementar la rigidez rotacional.

Para tomar en cuenta la contribución de los RAPs se calcula un módulo de corte compuesto usando la siguiente expresión:

$$G_{comp} = R_a G_g' + (1 - R_a) G_s' \quad (7)$$

Donde:

$R_a$ = razón de área de remplazo, definida como la relación del área ocupada por los RAPs respecto al área total de la cimentación,

$G_g$ = módulo de corte del RAP a una deformación de corte cíclico de 0.1%,

$G_s$ = módulo de corte del suelo a una deformación de corte cíclico de 0.1%.

El módulo de corte del RAP se obtiene mediante la Ec. (6) dada anteriormente utilizando un valor de 280MPa para el módulo de corte máximo ( $G_{g,max}$ ) el cual fue determinado con pruebas in-situ realizadas por la universidad de Iowa State [10].

Si se toma en cuenta únicamente el estrato superficial de suelo para calcular la rigidez rotacional de acuerdo a la Ec. (2), entonces la Ec. (7) puede ser simplificada para obtener la razón de área de reemplazo mínima necesaria para alcanzar el criterio de diseño de rigidez rotacional como se muestra a continuación:

$$R_a = \frac{(G_{req} - G_s)}{(G_g - G_s)} \quad (8)$$

#### 4 Caso de estudio

Se analiza a continuación el caso de un parque eólico en Renaico, Chile, en el que las cimentaciones para las torres de aerogeneradores tenían un diámetro de 21m y el criterio de rigidez rotacional fue de 44GN-m/radian. La estratigrafía del suelo consiste de 6 a 9 metros de limo blando a medio-rígido con un módulo elástico estático  $E_{stat} = 2.4$  MPa, seguido de suelos rígidos que no necesitan de mejoramiento de suelos. La relación de Poisson empleada fue de  $\nu=0.4$ .

Basándonos en las condiciones de suelo y el diámetro propuesto de la cimentación, el módulo de corte requerido para cumplir con el criterio de rigidez rotacional se puede estimar mediante la Ec. (2) de la siguiente forma:

$$G_{req} = \frac{3K_\phi(1-\nu)}{8R^3} = \frac{3(44GN-m/rad)(1-0.4)}{8(10.5m)^3} \quad (9)$$

Resultando en un  $G_{req} = 8.6$  MPa.

Seguidamente se estima el módulo de corte del suelo no mejorado para corroborar si el mismo cumple el módulo de corte necesario para el criterio de rigidez rotacional de diseño. El primer paso es determinar el módulo elástico dinámico usando la Fig. 5 o la Ec. (5):

$$E_{dyn} = 2.4MPa * 23.118 * (2.4MPa)^{-0.445}$$

$$E_{dyn} = 37.6MPa > 10(2.4MPa) = 24 MPa$$



Dado que el módulo elástico dinámico determinado resulta mayor a 10 veces el valor del módulo elástico estático, entonces se utiliza como límite 24MPa correspondiente a 10 veces el módulo elástico estático. Luego se estima el módulo de corte máximo  $G_{s,max}$  usando la Ec. (4):

$$G_{s,max} = \frac{24MPa}{2(1+0.4)} = 8.6MPa$$

El módulo de corte de diseño es obtenido luego aplicando el factor de degradación correspondiente basado en el tipo de suelo e índice de plasticidad de acuerdo a la Fig. 5. El factor de degradación obtenido a partir de las propiedades índice resulta en  $G_s/G_{max}=0.35$ . El módulo de corte degradado para altas deformaciones resulta entonces en:

$$G_s = G_{s,max} \left( \frac{G}{G_{max}} \right) = 8.6 \cdot 0.35 = 3MPa$$

El módulo de corte del suelo obtenido resulta menor que el módulo de corte requerido, por lo que se confirma el requerimiento de un mejoramiento de suelos con RAPs para obtener un módulo de corte mejorado.

El módulo de corte de los RAPs promedio determinado por la Universidad de Iowa State [10] con un procedimiento constructivo de RAPs similar al utilizado en el Parque Eólico de Renaico es de 280MPa, el cual al ser degradado aplicando un factor  $G_g/G_0=0.3$  resulta en un módulo de corte degradado de diseño de  $G_g=84$  MPa. Usando la Ec. (8) tenemos:

$$R_a = \frac{(8.6-3)}{(84-3)} = 0.069$$

Por lo tanto, se requiere de una razón de área de reemplazo mínima de RAPs de 6.9% del área total de cimentación para cumplir con el criterio de rigidez rotacional. Para este proyecto en específico se utilizaron RAPs construidas con el procedimiento de remplazo y con un diámetro de 0.76m y por lo tanto un área de 0.45m<sup>2</sup> por elemento RAP. Por tanto, instalando un total de 54 pilas de agregado compactado se cumple con un  $R_a$  de 7% asegurando así cumplir con el criterio de diseño de rigidez rotacional. Debido a revisiones adicionales y a la solicitud del cliente de cubrir con RAPs de manera más uniforme bajo la huella de la cimentación se utilizaron 79 RAPs como se indica en la Fig. 9 proveyendo así un  $R_a$  final de 10.4%. Nótese que los RAPs cuentan con un espaciamiento más cerrado en los anillos cercanos al perímetro exterior de la cimentación y dicho espaciamiento aumenta un poco conforme se acerca al centro de la cimentación. Esto se debe a que la magnitud de las tensiones de compresión es mayor en los bordes de la cimentación.

Debido a que los esfuerzos de la cimentación se concentran mayormente bajo la huella de la misma, por lo general no se requieren elementos RAPs fuera de la huella de la cimentación para el buen desempeño del mejoramiento de suelo.

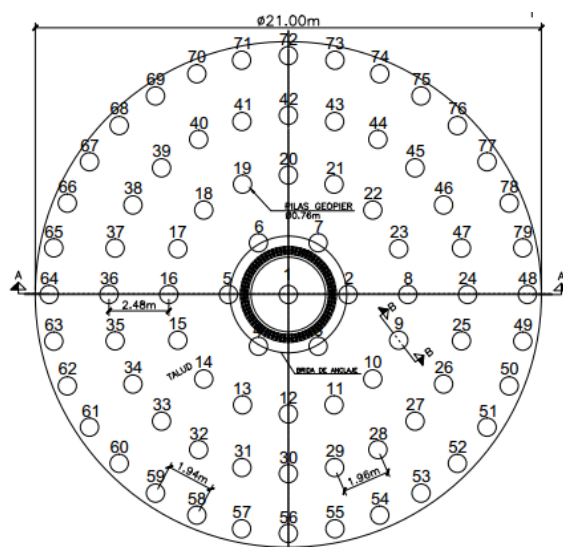


Fig. 8 – Esquema de la distribución de los RAPs para el caso de estudio.

El proyecto de caso de estudio también requería de realizar una revisión de diseño utilizando un mínimo de módulo elástico estático,  $E_{stat}=14\text{MPa}$ , para verificar que la solución cumpliera con los requisitos de diseño. En este caso, se utilizó una metodología de módulo elástico compuesto similar a la usada en la Ec. (7) como  $E_{comp} = E_g R_a + E_{stat} (1-R_a)$ . El módulo elástico medido en campo de los RAPs,  $E_g$ , por medio de una prueba de carga para medir la relación esfuerzo-deformación fue de, al menos,  $140\text{MPa}$ . Por tanto tomando la razón de área de reemplazo provista,  $R_a=0.104$ , se obtuvo un módulo elástico compuesto,  $E_{comp}=140\text{MPa}(0.104)+2.4\text{MPa}(1-0.104)=16.7\text{MPa}$ . Este valor  $E_{comp}$  excede el mínimo requerido de diseño de  $E_{stat}=14\text{MPa}$ .

## 5 Comparación de RAPs con columnas de grava vibradas

Es importante recalcar que el procedimiento constructivo de los RAPs facilita el lograr una rigidez compuesta superior en comparación a otros métodos de mejoramiento de suelos como las columnas de grava vibradas. Por ejemplo, la literatura [11] indica que el valor del módulo elástico de las columnas de grava vibradas es de aproximadamente  $E_c=60\text{MPa}$ . Por tanto, para llegar a un mínimo de  $E_{comp}=14\text{MPa}$ , y utilizando la Ec. (8) para determinar  $R_a$  mínimo en función de los módulos elásticos estáticos, se requiere una razón de área de reemplazo mínima de 0.20 (20%) para cumplir con el mínimo  $E_{stat}$  requerido en diseño. Esta razón de área de reemplazo resultaría en casi el doble de columnas de grava requeridas si se considera el mismo diámetro de instalación del utilizado en los RAPs.

## 6 Conclusiones

El presente artículo presenta un análisis del uso de RAPs para incrementar la rigidez rotacional para cimentaciones de torres de aerogeneradores. La contribución de los RAPs se logra utilizando parámetros compuestos de módulos de corte. Esto conlleva el uso de parámetros elásticos dinámicos usados generalmente para cimentaciones de maquinaria los cuales son ajustados para el caso de las cimentaciones de torres de aerogeneradores y las deformaciones mayores de corte cíclico que ellas inducen. De igual forma se describió brevemente cómo los RAPs contribuyeron en un ejemplo práctico de diseño de un caso de estudio, corroborando así que este tipo de refuerzo y mejoramiento de suelos es una excelente alternativa para alcanzar los criterios de diseño de rigidez rotacional para las cimentaciones de torres de aerogeneradores.

## Referencias

- [1] Balaam, N.P., Booker, J.R. and Poulos H.G., (1976). "Analysis of granular pile behavior using finite elements". Proceedings of the International Conference on Finite Element Methods in Engineering, Adelaide, Australia, p. 1-13.
- [2] Kempfert, H.G. and Gebreselassie, B., (2006). Excavations and Foundations in Soft Soils, Springer Berlin Heidelberg, New York, p. 472.\
- [3] ICC-ES, ESR-1685 (2018). Rammed Aggregate Pier Intermediate Foundation/Soil Reinforcement System, ICC Evaluation Service, LLC, p. 1-3.
- [4] U.S. Department of Defense, (1997). Military Handbook 1007/3– Soil Dynamics and Special Design Aspects, p. 19-39.
- [5] Richart, F.E., Jr., Hall, J.R., and Woods, R.D., (1970). Vibrations of Soils and Foundations, Prentice Hall, p.220.
- [6] Det Norske Veritas, (2002). Guidelines for Design of Wind Turbines, DNV/Riso, Copenhagen, p. 201 – 205.
- [7] Alpan, I., (1970). "The Geotechnical Properties of Soils", Earth-Science Reviews, Vol. 6, p. 5 – 49.
- [8] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), (1995). Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing: Part II: Tests, Sixteenth Edition.
- [9] Vucetic, M. And Dobry, R., (1991). "Effect of Soil Plasticity on Cyclic Response", Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 117, No.1, ASCE, p. 89 – 107.
- [10] White, D., (2004). Personal Communication with Geopier Foundations Co., Inc., 2004.
- [11] CFMS, (2011). "Recommandations sur la conception, le calcul, l'exécution e tle contrôle des fondations d'éoliennes". Comité Français de Mécanique des Sols et de Géotechnique. p.59.