

Cimentaciones de aerogeneradores reforzados con columnas de grava y su impacto en el sismo de septiembre de 2017 en Oaxaca-México

Rafael TAFUR CORDOVA^{a,1}, Daniel MARTÍNEZ OVIEDO^b
y Enmanuel CARVAJAL DÍAZ^a

^aKeller Cimentaciones S.L.U.

^bKeller Cimentaciones de Latinoamérica, S.A. de C.V.

Resumen. Muchos de los parques eólicos ubicados en el Estado de Oaxaca, México se encuentran emplazados en terrenos de bajas capacidades geotécnicas, por ello fue necesario realizar tratamientos al terreno para la cimentación de los aerogeneradores. En este artículo se describen las condiciones de un proyecto en específico realizado en el año 2013, localizado próximo a la zona de influencia del sismo de septiembre del 2017. Para ello se realiza una breve descripción de los aspectos importantes del proyecto desde su ubicación, geotecnia, diseño y finalmente se comprueba el buen comportamiento de los aerogeneradores cimentados sobre columnas de grava por Vibrosustitución.

Palabras Clave. Aerogeneradores, columnas de grava, vibrosustitución, sismo, licuación.

1. Introducción

En el presente artículo se muestra un resumen de un proyecto de mejoramiento de suelos que se llevó a cabo en el año 2013 en el Parque Eólico “Eoliatec del Pacífico-EDP”, situado en el municipio de Santo Domingo Ingenio, en el Estado de Oaxaca, México. Para esta mejora se aplicó la técnica de tratamiento del terreno por vibración profunda mediante incorporación de grava o también llamado Vibrosustitución o columnas de grava.

Las estructuras están compuestas básicamente por torres eólicas con una cimentación circular de 24.0 m de diámetro y una torre de 70.0 m de altura, la zapata tiene un canto variable de 0.50 y 3.80 m, Figura 1. Para este tipo de estructuras, el beneficio con la mejora del terreno es aumentar la capacidad portante, reducir los asentamientos, incrementar la rigidez rotacional, mitigar el potencial de licuación, y controlar los asentamientos diferenciales.

Además de la visible mejora del terreno, en el presente artículo se analiza la necesidad de realizar este tipo de mejoras y como pueden comportarse en un sismo. Cabe

¹ Rafael Tafur Cordova, Keller Cimentaciones S.L.U. 28806. Madrid, España.
E-mail: rafael.tafur@keller.com

mencionar que los sismos producidos en septiembre del 2017 en México pasaron a ser de los mayores con energía librada en su historial sísmico.

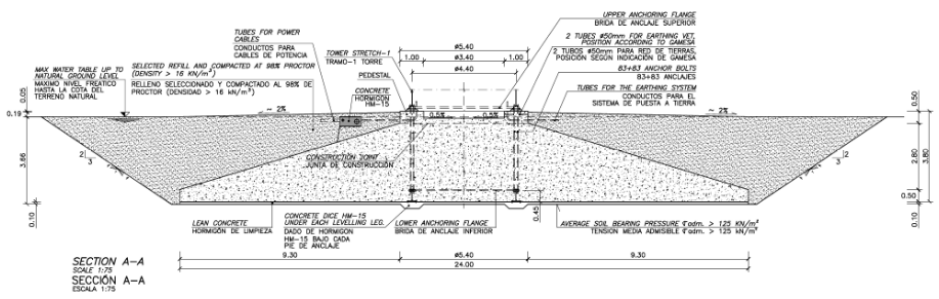


Figura 1. Plano de la zapata de un aerogenerador.

Los resultados del proyecto han sido favorables tras la ejecución de los trabajos y puesta en servicio de las estructuras, incluso considerando la afectación de los sismos de septiembre de 2017, en los cuales el comportamiento de las columnas de grava ayudó a que se evitara algún problema en las cimentaciones de los aerogeneradores.

2. Condiciones de los emplazamientos

En este apartado se incluye tanto el emplazamiento de los parques eólicos construidos, como una síntesis de toda la información geotécnica y sísmica reunida de la documentación del proyecto, así como la metodología del diseño.

A su vez el emplazamiento puede describirse mediante dos enfoques: (i) el emplazamiento sísmico, que dependiendo de la zona puede caracterizarse por una aceleración máxima que corresponde a 0.52g, donde “g” es la aceleración de la gravedad (9.81 m/s²), y (ii) el emplazamiento geotécnico, que se refiere a estratos conformados por limos con arenas finas, arenas limosas, y gravas arenosas de acuerdo al informe geotécnico.

2.1. Parques eólicos realizados

Se realizaron trabajos de mejora de la cimentación para aerogeneradores entre los años 2012 y 2014, ubicados entre los valles centrales y el Istmo, utilizando columnas de grava. La Tabla 1 muestra un inventario de algunos de los Parques Eólicos ejecutados.

Tabla 1. Inventario de Parques Eólicos en Oaxaca-México.

Cód.	Proyecto	Ubicación
K12090V	P.E Proyecto EDI	Juchitán de Zaragoza
K12266V	P.E Piedra Larga	Unión Hidalgo
K13029V	P.E Bii Hioxo	Juchitán de Zaragoza
K13030V	P.E EDP	Oaxaca
K13031V	P.E Dos Arbolitos el Retiro	Oaxaca
K13452V	P.E Piedra Larga II	Juchitán de Zaragoza
K14006V	P.E Dos Arbolitos	Juchitán de Zaragoza
K14205V	P.E Ingenio	Santo Domingo Ingenio

2.2. Resumen de la información geotécnica y sísmica

Como ejemplo del estudio de estos parques eólicos, en los siguientes Apartados se describirá la aplicación de columnas de grava para la cimentación de uno de los aerogeneradores del P.E. Ingenio.

De acuerdo al informe de mecánica de suelos, el terreno estaba conformado en su mayoría por arenas limosas hasta los 6.0 m, arenas con grava hasta los 9.0 m, un estrato de 1.50 m de limos con poca arena y grava, seguidamente de 7.0 m de arena con grava y limo de compacidad densa, y finalmente, un terreno más competente de grava arenosa. El nivel freático se detectó a 3.0 m bajo la cota de terreno natural. Por las condiciones de suelo mencionadas es importante analizar la deformabilidad del suelo, la capacidad portante y el potencial de licuación. En la Tabla 2 se resumen los parámetros y profundidades de las distintas capas de suelo adoptados para los cálculos de comprobación. En la Figura 2 se muestra el resultado del análisis de asentos en el centro de un aerogenerador tipo, así como la distribución de presiones en profundidad, para el caso del terreno mejorado mediante columnas de grava.

La información del sismo se diseño está fue utilizada junto a la información geotécnica para realizar un análisis del potencial de licuación a las profundidades definidas en el proyecto. Para el análisis de la licuación se empleó el método propuesto por [2], el cual se fundamenta en la determinación de dos parámetros, el CSR (Cyclic Stress Ratio), que representa la sollicitación ocasionada por el sismo en un determinado estrato de terreno, y el CRR (Cyclic Stress Resistance), que representa la capacidad de dicho estrato para resistir los esfuerzos de corte de carácter cíclico ocasionados por un sismo. Definiendo el factor de seguridad frente a la licuación como el cociente entre el CRR y el CSR.

Tras identificar un riesgo considerable de licuación, se optó por realizar la mejora del terreno bajo las cimentaciones de los aerogeneradores con las columnas de grava, siendo la mejor alternativa para solucionar los problemas asociados a la licuación.

Tabla 2. Parámetros adoptados según la información geotécnica.

WTG-06 / SPT-07		TERRENO NATURAL				
ESTRATO BAJO CIMENTACIÓN	Z (m) (0,00-3,90 m)	ÁNGULO DE ROZAMIENTO INTERNO Ø	MÓDULO EDOMÉTRICO Em (Mpa)	COEFICIENTE DE POISSON ν	DENSIDAD (kN/m³)	COHESIÓN (kN/m²)
Colchón Granular	0,00	40,0	60,0	0,30	20,00	0,00
	0,50					
Arena limosa	0,50	25,0	23,0	0,35	17,50	5,00
	4,40					
Limo con poca arena	4,40	20,0	18,0	0,40	16,50	30,00
	6,20					
Arena con grava y limo	6,20	34,0	65,0	0,30	18,00	5,00
	15,20					
Grava	15,20	36,0	85,0	0,25	18,50	0,00
	18,40					
Arena gruesa a fina	18,40	35,0	70,0	0,25	18,00	5,00
	20,02					
Limo con arena	20,02	20,0	35,0	0,40	17,00	50,00
	Fin de sondeo					

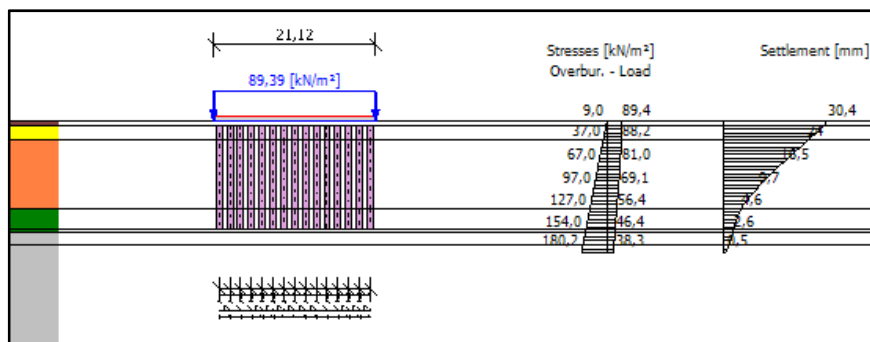


Figura 2. Salida del Software KID (Keller Improvement Design).

2.3. Metodología del diseño

Tradicionalmente las columnas de grava aparecen en la literatura geotécnica como uno de los tratamientos de mejora de terreno más eficaces para la mejora del suelo con el objetivo de garantizar la capacidad portante y unos asientos admisibles. De igual modo, se reconocido y comprobado como uno de los métodos más eficaces para mitigar el riesgo de licuación asociado a fenómenos sísmicos.

El método más utilizado para el análisis y diseño de las columnas de grava es el desarrollo por Priebe [3] el cual ha sido revisado en varias ocasiones hasta su versión más reciente (1995). Este método se fundamenta en la determinación del factor de mejora n_0 indicado en la expresión (1) que representa la relación de asientos de una misma cimentación considerada apoyada sobre un terreno sin ningún tipo de tratamiento de mejora y sobre un terreno mejorado mediante columnas de grava, así como en la determinación del factor de reparto de cargas m_s , indicado en la expresión (2), el cual representa la proporción de cargas que absorben las columnas de grava respecto a la carga total actuante.

$$n_0 = \frac{S}{S_c} \quad (1)$$

$$m_s = \frac{\sigma_c}{\sigma} \quad (2)$$

donde S : asientos de la cimentación sobre terreno sin mejora; S_c : asientos de la cimentación sobre terreno con mejora; σ_c : carga absorbida por la columna de grava; σ_s : carga absorbida por el terreno circundante a la columna; σ : carga total en la cimentación.

Las descripciones anteriores de n_0 y m_s , son conceptuales, esto es, si conociésemos la solución del problema y efectuásemos los cocientes de las magnitudes anteriores, obtendríamos los valores de ambos factores.

El método de Priebe desarrolla una formulación de cálculo pormenorizada para la determinación de ambos factores a partir de unos parámetros concretos, asumiendo una serie de hipótesis de cálculo. Los parámetros básicos del método son la relación de áreas (A_c/A), el módulo de Poisson del terreno circundante (μ_s) y el ángulo de rozamiento de la columna de grava (ϕ_c), además de otros factores adicionales como la profundidad y el peso específico de los materiales. La relación de áreas (A_c/A) representa el área ocupada

por la columna de grava respecto a la superficie de su zona de influencia o área de celda unidad (A) sobre la que actúa. En la Figura 3 se muestran las soluciones gráficas de los factores n_0 y m elaboradas a partir de la formulación del método.

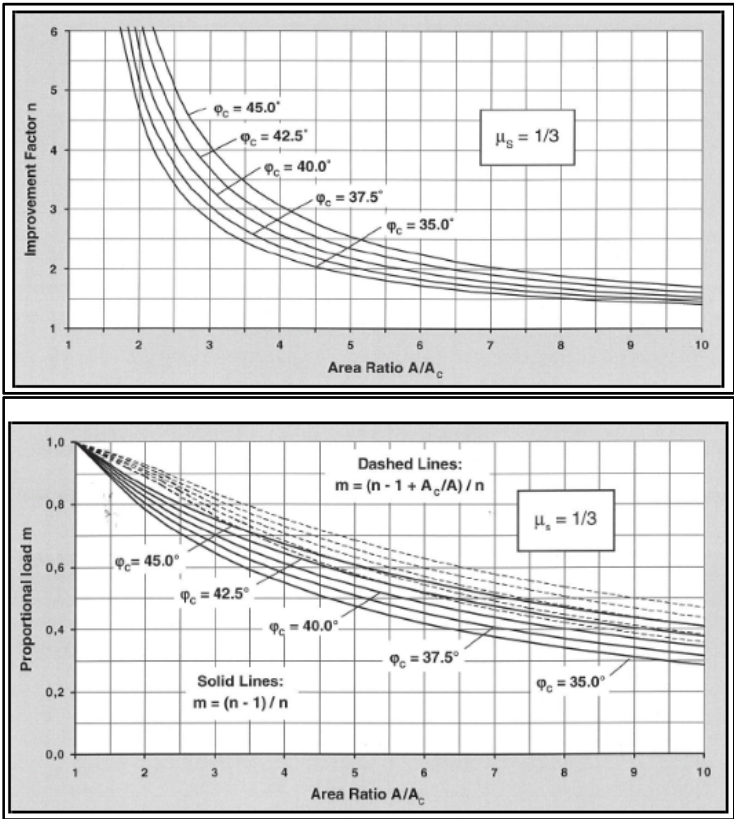


Figura 3. Soluciones gráficas de los factores n_0 y m_0 .

Los conceptos teóricos introducidos por el método [3] para el estudio de los tratamientos de mejora del terreno con columnas de grava, permiten su aplicación en la estimación de la reducción del riesgo de licuación a través del factor n_0 .

Al expresar analíticamente el factor n_0 en términos de tensiones desarrollando la formulación a partir de su expresión general, se obtiene la Ec. (3).

$$n_0 = \frac{S}{S_c} = \frac{\sigma}{\sigma_s} \tag{3}$$

De este modo, la inversa del factor de mejora proporciona la relación entre el esfuerzo reducido en el terreno circundante a la columna de grava y el esfuerzo actuante; por lo que representa una medida del nivel de carga que absorben las columnas. Este parámetro ($\alpha = 1/n_0$) puede emplearse como un factor de reducción del parámetro CSR (Cyclic Stress Ratio) utilizado en los métodos de evaluación del potencial de licuación, al cuantificar de forma aproximada la reducción de esfuerzos cortantes en el terreno al introducir la mejora con columnas de grava. Habitualmente, este efecto se refiere como

“mejora por refuerzo para mitigar la licuación”. Por otra parte, es importante mencionar el fuerte efecto de drenaje proporcionado por las columnas de grava para mitigar la licuación, el cual puede analizarse mediante el método de Seed y Booker [4]. Este método sale del alcance del presente artículo.

3. Revisión del diseño de mejora

El diseño de la mejora se ha revisado mediante el cálculo de las columnas de grava que se describe en el Apartado 3.1, utilizando la metodología detallada en el Apartado 2.

3.1. Cálculo de las columnas de grava

Se analizaron las cargas transmitidas a la cimentación, así como la rigidez rotacional en el suelo con mejora, así como los asientos generales en el suelo con mejora mediante el uso del software KID (Keller Improvement Designer) basado en el método de Priebe. La solución propuesta para el proyecto se describe en la Figura 4 y en la Tabla 3. Resultados de las comprobaciones para los aerogeneradores.

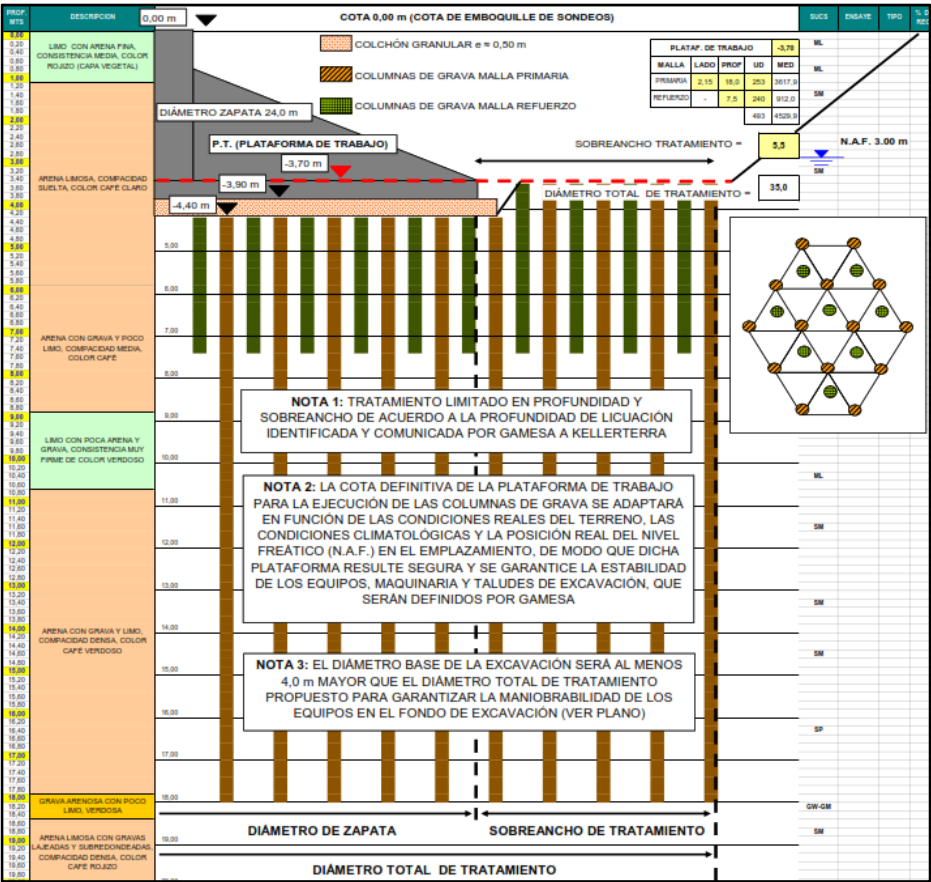
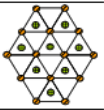


Figura 4. Propuesta de tratamiento y estratos Geotécnicos.

Tabla 3. Resultados de las comprobaciones para los aerogeneradores.

COMPROBACIÓN	TEORÍA	CRITERIO	VALOR OBTENIDO	ESTADO
1 Reducción riesgo de licuación	1996 NCEER&1998 NCEER/NSF Workshops, Método de Priebe	$FS'_{cs} \geq 1,0$	$\geq 1,0$	CUMPLE
2 Rigidez rotacional en terreno con mejora (método directo)	Smoltczyk & Buss	$K_r \geq 71300$ MN·m/rad	162243	CUMPLE
3 Rigidez rotacional en terreno con mejora (método indirecto)	A partir de asientos obtenidos con programa GRETA®, aplicando método de Priebe	$K_r \geq 71300$ MN·m/rad	80924	CUMPLE
4 Asientos diferenciales en terreno con mejora	A partir de asientos obtenidos con programa GRETA®, aplicando método de Priebe. Criterio CFMS.	$\Delta\delta \leq 3$ mm·m	102761 0,59	CUMPLE CUMPLE

WTG-06	SPT-07	D.CIM.	24,0 m	UD.	PROF.	MED.	
		D.TRAT	35,0 m				
		L.MALLA	2,15 m				
		REFUERZO	SI				
		TOTAL	-				
Rebaje plataforma de trabajo a cota -3,70 m.							

Las columnas de grava reducen el asiento del terreno tratado gracias a su mayor rigidez respecto al suelo circundante. Además, el terreno mejorado alcanza una importante reducción de las deformaciones diferidas y los tiempos de consolidación asociados a los perfiles de suelo analizados. Además se constató que las columnas cumplieron su función ante el sismo producido en septiembre de 2017.

El cálculo de comprobación para la situación estática se realizó de la siguiente manera:

- Tensión de cimentación: 88.39 kN/m² (estática)
- Malla primaria y secundaria de tratamiento zona superficial l= 7.50 m
- Malla Primaria en toda la profundidad l= 18.0 m

En base a los resultados aceptables de diseño, se realizó la distribución de las columnas tal como se detalla en la Figura 5, asimismo se puede apreciar una fotografía de la zona de tratamiento en la Figura 6.

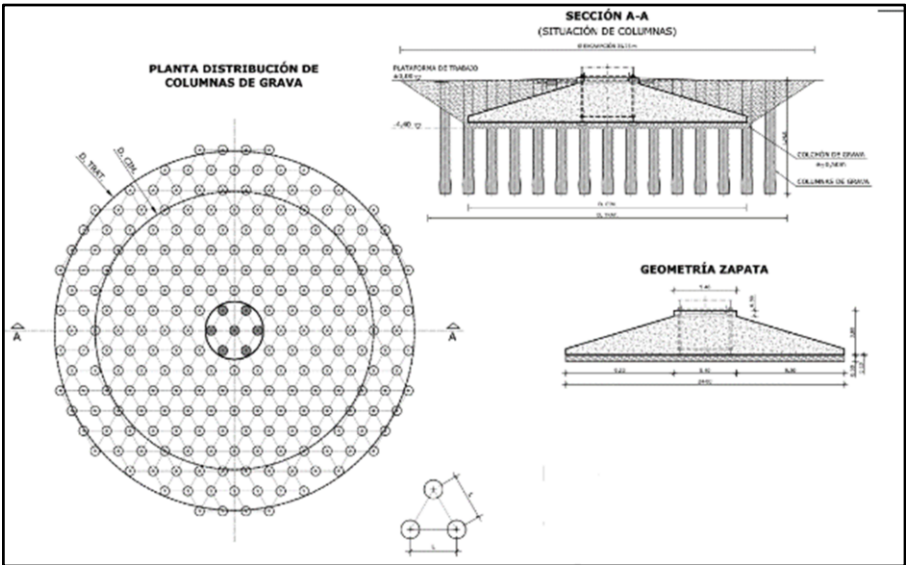


Figura 5. Distribución de las columnas de grava en planta y sección.



Figura 6. Vista hacia los trabajos en la zona de la cimentación de los aerogeneradores.

4. Sismo de México – Septiembre 2017

Desde el año 1787 existen evidencias de sismos en las costas del pacifico mexicano, incluyendo el de hace 32 años en las costas de Michoacán. Éstos generaron grandes pérdidas humanas y daños estructurales en las infraestructuras. Cabe mencionar que según la geología y ubicación, el área del proyecto es considerada una zona de peligro sísmico. Además, cabe resaltar que los sismos producidos en septiembre de 2017 pasaron a ser parte de los de mayor energía liberada en la historia sísmica de México.

4.1. Resumen del sismo de México 2017

Los sismos ocurridos en 2017 se detallan en la Tabla 4, donde se especifican el día, la hora, magnitud, etc. La localización del primer sismo fue cercana al emplazamiento de los aerogeneradores construidos.

Aun siendo el emplazamiento cercano a la localización del primer sismo, las cimentaciones construidas no sufrieron mayores daños, el tratamiento funcionó como se esperaba, se mejoró el terreno de tal manera que las estructuras pudieran cumplir sus funciones ante este tipo de eventos, enfocándose en sus tres aspectos principales: densificar, reforzar y drenar, como bases para el buen desarrollo de este sistema de mejora.

Tabla 4. Resumen los sismos ocurrido en el mes de Septiembre 2017.

Fecha del evento	07/09/2017	19/09/2017
Hora	4:50:10	13:14:40
PGA (cm/s ²)	8.9	58.83
Registrado en C.U.		
Duración según sensación humana (min)	x	2
Magnitud	8.2	7.1
Profundidad	58	57
Tipo de Sismo	L	R
Localización	SO Pijijiapan	SE Axochiapan
Réplicas (hasta el 8 de oct 2017)	6286	39

4.2. Posibles impactos en los aerogeneradores

El diseño y ejecución del tratamiento es muy importante. El punto clave es el efecto del momento que provoca fuertes excentricidades y concentración de tensiones. Lo más crítico es comprobar el “no despegue” de la cimentación con diferentes hipótesis de cargas, el sismo y lo que produciría un evento de licuación y como consecuencia el vuelco de una torre de aerogenerador, Figura 7.



Figura 7. Vuelco de una torre de aerogeneradores.

5. Conclusiones

Se presenta un caso de estudio de un aerogenerador tipo, situado en el P.E. Ingenio, y realizado en 2013. En el emplazamiento se detectó la presencia de suelos compresibles, sueltos y susceptibles de licuación. Para el estudio, se revisaron los datos y resultados correspondientes al diseño elaborado en el momento de su ejecución, y se variaron los parámetros de magnitud y aceleración pico como un enfoque de investigación, tomando como puntos clave los datos del sismo de septiembre del 2017.

Como parte de un control post construcción, tras el sismo de septiembre de 2017 se realizó una inspección visual de los emplazamientos, con la finalidad de observar posibles afecciones relevantes post-sísmicas, como vuelco, anomalías en las estructuras, asientos, y otros daños.

Se constató que la instalación de las columnas de grava contribuyó de modo esencial a la preservación de las estructuras, evitando daños apreciables en las cimentaciones de los aerogeneradores. Dicho comportamiento corresponde a la experiencia en muchas otras obras similares con riesgo de licuación.

Finalmente puede mencionarse que el método de mejora mediante columnas de grava por Vibrosustitución es eficaz para mitigar el potencial de licuación y se comporta adecuadamente de acuerdo a los efectos de mejora que incorpora, como son: drenaje, refuerzo y densificación.

Referencias

- [1] Carvajal Díaz, E. y Mora-Rey, C. (2014). Columnas de grava mediante Vibrosustitución: Evolución tecnológica, diseño y casos prácticos. XXVII Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica. Noviembre, Puerto de Vallarta, Jalisco, México.
- [2] Boulanger R.W. and Idriss, I.M. (2014) "CPT and SPT based liquefaction triggering procedures". *Report UCD/CGM-14/01*. Center for Geotechnical Modeling. Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Davis, California
- [3] Priebe H. (1995). "Design of vibro replacement". *Ground Engineering* 28(10): 31-31.
- [4] Seed H.B. y Booker J.R. (1976). "Stabilization of potentially liquefiable sand deposits using gravel drain systems". Berkeley, California: Report No. EERC 76-10. University of California.
- Kirsch, K. & Kirsch, F. 2010. *Ground Improvement by deep vibratory methods*, New York: Spoon Press, 2010