

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

Rafael Tafur ^a, Daniel Martínez ^b, Enmanuel Carvajal ^{c,1}

^a Dpto. Técnico Keller Cimentaciones -España

^b Ingeniero de Proyecto – Keller Cimentaciones México

^{c,1} Gerente Dpto. Técnico Keller Cimentaciones-España

¹ Autor Correspondiente, Keller Cimentaciones, Enmanuel Carvajal Díaz, Calle Argentina 15, 28806 Alcalá de Henares Madrid-España; E-mail: enmanuel.carvajal@keller.com

Resumen. La mayoría de los parques eólicos ubicados en Oaxaca-México se encuentran emplazados en terrenos no adecuados, por ello fue necesario realizar tratamientos al terreno. En este artículo se muestran comentarios acerca de un proyecto en específico realizado en el año 2013 y con el impacto del sismo ocurrido en septiembre del 2017 cercano a la zona donde se realizaron los trabajos. Para ello se realiza una breve descripción de los aspectos importantes del proyecto desde su ubicación, geotecnia, diseño y finalmente enfatizar en el buen uso de los sistemas de mejora del terreno.

Palabras clave: Aerogeneradores, columnas de grava, sismo

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 Eoliatic del Pacífico-EDP, situado en el municipio de Santo Domingo Ingenio, en la región de Oaxaca (México).

Para esta mejora se aplicó la técnica de tratamiento del terreno por vibración profunda mediante incorporación de grava o también llamado vibro sustitución o columnas de grava.

Las estructuras están compuestas básicamente por torres eólicas de 24.0 metros de diámetro y una torre de 70.0 metros de altura, con un canto variable de 0.50 y 3.80 metros, 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.

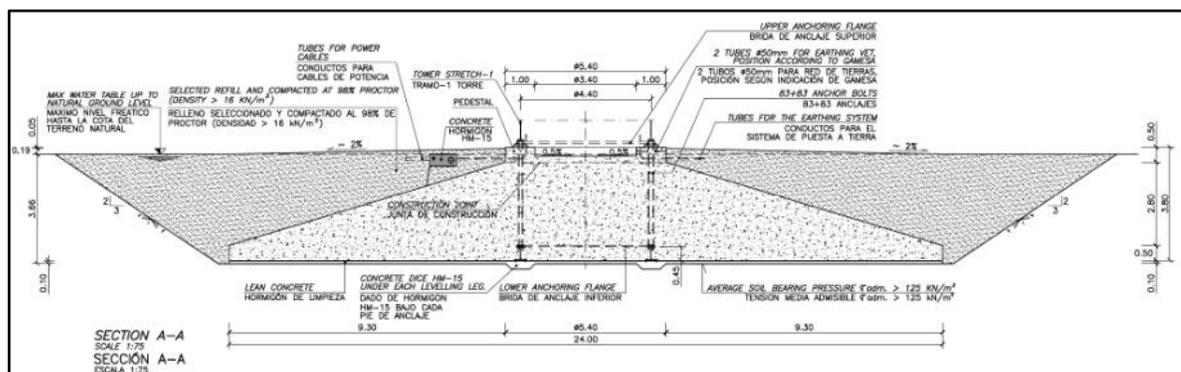


Figura 1. Plano de la zapata de un aerogenerador

Además de la visible mejora del terreno, el objetivo de dicho proyecto fue obtener el porqué de la necesidad de realizar este tipo de mejoras y como pueden comportarse en un sismo. Cabe mencionar que los sismos producidos en septiembre del 2017 en México pasaron a ser de los mayores con energía librada en su historial sísmico.

Los resultados del proyecto fueron favorables desde el diseño hasta la ejecución, pasando por un sismo muy fuerte en el cual el comportamiento de las columnas ayudo a que se evitara algún problema en las cimentaciones de estas estructuras.

2. Condiciones de los emplazamientos

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

A su vez el emplazamiento se ha dividido en dos partes: emplazamiento sísmico, según la zona la aceleración corresponde a 0.52g donde “g” es la aceleración de la gravedad (9.81 m/s^2), y emplazamiento geotécnico, 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 Eolicos en Oaxaca-México

Cód.	Proyecto	Ubicación
K12090V	P.E Proyecto EDI	Juchitán de Zaragoza
K12266V	P.E Piedra Larga	Unión Hidalgo
K13029V	P.E Bif 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

De acuerdo al informe de mecánica de suelos, el terreno estaba conformado en su mayoría por arenas limosas hasta los 6.0 metros, arenas con grava hasta los 9.0 metros, un estrato de 1.50 de limos con poca arena y grava, seguidamente de 7.0 metros de arena con grava y limo de compacidad densa, y finalmente, un terreno más competente de grava arenosa. El nivel freático fue detectado a los 3.0 metros, bajo la cota de terreno natural. Por las condiciones de suelo mencionadas principalmente es importante analizar, Figura 1:

- La deformabilidad,
- la capacidad portante y
- el potencial de licuación.

Con respecto a la información sísmica está fue muy representativa para con la ayuda de la información geotécnica realizar un análisis del potencial de licuación a las profundidades definidas por el cliente en su momento. Este método 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.

Por tal motivo, 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 y controlarlos.

Tabla 2. Parámetros adoptados según la información geotécnica

WTG-06 / SPT-07 ESTRATO BAJO CIMENTACIÓN	Z (m) (0,00-3,90 m)	TERRENO NATURAL				
		ANGULO DE ROZAMIENTO INTERNO ϕ	MÓDULO EDOMÉTRICO E_m (Mpa)	COEFICIENTE DE POISSON ν	DENSIDAD (kN/m^3)	COHESIÓN (kN/m^2)
Colchón Granular	0,00 0,50	40,0	60,0	0,30	20,00	0,00
Arena limosa	0,50 4,40	25,0	23,0	0,35	17,50	5,00
Limo con poca arena	4,40 6,20	20,0	18,0	0,40	16,50	30,00
Arena con grava y limo	6,20 15,20	34,0	65,0	0,30	18,00	5,00
Grava	15,20 18,40	36,0	85,0	0,25	18,50	0,00
Arena gruesa a fina	18,40 20,02	35,0	70,0	0,25	18,00	5,00
Limo con arena	20,02 Fin de sondeo	20,0	35,0	0,40	17,00	50,00

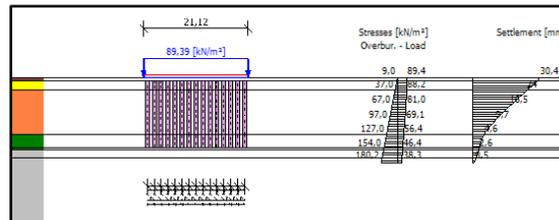


Figura 2. Salida del Programa KID (Keller Improvement Design)

2.3. Metodología del diseño

Tradicionalmente las columnas de grava aparecen en literaturas geotécnicas como uno de los tratamientos de mejora de terreno 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 de Priebe (1976), 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 (1) que representa la relación de asentamientos de una misma cimentación considerada apoyada sobre un terreno sin ningún tipo de tratamiento de mejora o sobre un terreno mejorado, así como en la determinación del factor de reparto de cargas m_s (2), el cual representa la proporción de cargas que absorben las columnas de grava respecto a la carga total actuante.

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

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

$$l - m_s = \frac{\sigma_c}{\sigma} \quad (3)$$

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_s elaboradas a partir de la formulación del método.

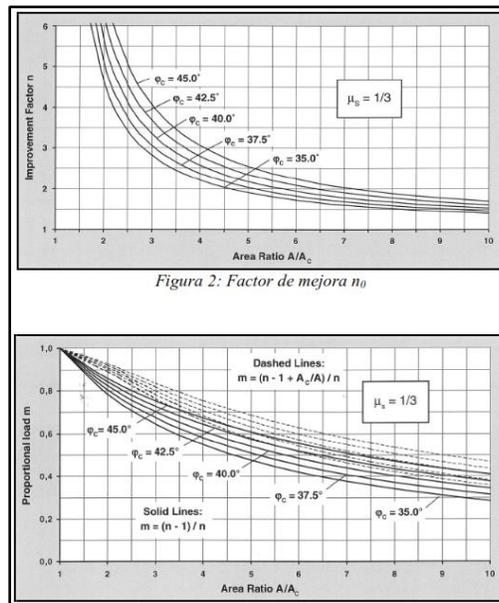


Figura 3. Soluciones gráficas de los factores n_0 y m_0

Los conceptos teóricos introducidos por el método de Priebe (1995) 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 ecuación (4).

$$n_0 = \frac{S}{S_c} = \frac{\sigma}{\sigma_s} \quad (4)$$

De este modo, la inversa del factor de mejora proporciona la relación entre la tensión en el terreno circundante a la columna de grava (con mejora) y la tensión del terreno considerado sin mejora. 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 tensiones en el terreno al introducir la mejora.

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 desarrollada por Keller y que se detalla en el apartado 2.

3.1. Cálculo de las columnas de grava

Se analizaron las cargas transmitidas a la cimentación por medio de hojas de cálculo, así como la rigidez rotacional en el suelo con mejora y asentamientos en el suelo con mejora con el programa KID (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.

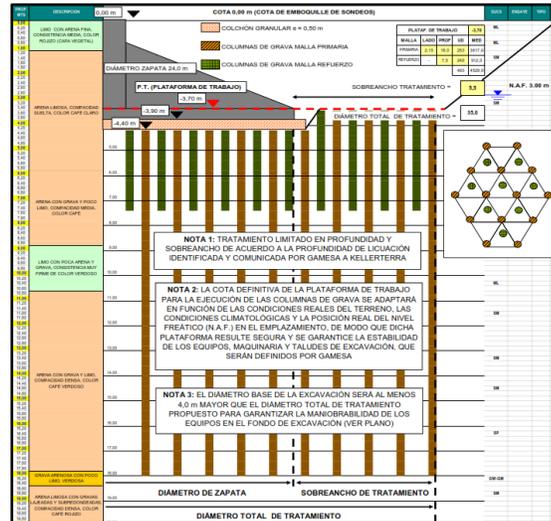


Figura 4. Propuesta de tratamiento + Estratos Geotécnicos

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 & Bass	$K_u \geq 71300$ MN·m/rad	162243	CUMPLE
3 Rigidez rotacional en terreno con mejora (método indirecto)	A partir de asentamientos con programa GRETA®, aplicando método de Priebe	$K_u \geq 71300$ MN·m/rad	80924 102761	CUMPLE CUMPLE
4 Asentamientos diferenciales en terreno con mejora	A partir de asentamientos con programa GRETA®, aplicando método de Priebe. Criterio CFMS.	$\Delta s \leq 3$ mm/m	0,59	CUMPLE

WTG-06	SPT-07	D.CIM.		D.TRAT		L.MALLA	REFUERZO	TOTAL	Rebaje plataforma de trabajo a cota -3,70 m.
		24,0 m	35,0 m	Ud.	PROF.				
				253	18,0 m	4.554,0 m			
				240	7,5 m	1.800,0 m			
				493	-	6.354,0 m			
						4.529,9 m			

Las columnas de grava reducen el asiento del terreno tratado porque su actuación es más rígida. Por tal motivo, su comportamiento está influenciado por las deformaciones diferidas y asientos de consolidación asociadas a este tipo de suelos. Además se constató que las columnas cumplieron su función ante el sismo producido en septiembre de 2017. El cálculo 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 se realizó la distribución de las columnas tal como se detalla en la Figura 5, asimismo se puede apreciar una vista hacia la zona de tratamiento en la Figura 6.

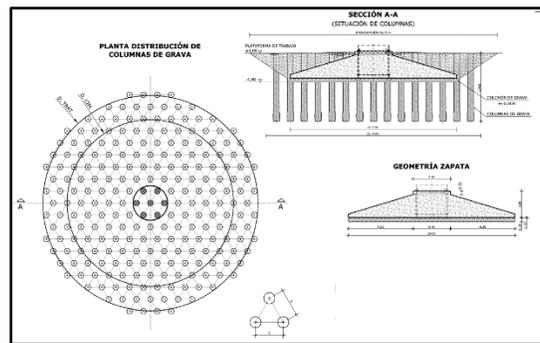


Figura 5. Distribución de las columnas de grava en planta y sección



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 en las costas de Oaxaca, 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, México es considerado una zona de peligro sísmico.

Además, cabe resaltar que los sismos producidos en México en septiembre de 2017 pasaron a ser parte de los de mayor energía liberada en su historia sísmica.

4.1. Resumen del sismo de México 2017

Los sismos ocurridos en 2017 se detallan en la Tabla 4 donde se especifican los sismos 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, bases para el buen desarrollo de este sistema de mejora.

Tabla 4. Resumen del sismo ocurrido en dos fechas en el mes de Septiembre

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

4.2. Posibles impactos que suceden 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

Ante la presencia de este tipo de suelos compresibles, sueltos y susceptibles a licuación, se pueden revisar los datos de salida propuestos en su momento y variar 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 desarrollo integral post construcción se podría realizar una ficha de inspección visual de los emplazamientos, con la finalidad de observar posibles reacciones post sísmicas, como vuelco, anomalías en las estructuras, asentamientos, y clasificar estos daños.

Se constató que la instalación de las columnas de grava no generaron ningún nivel de daño en los parques eólicos y que actuaron conforme a lo que estaba previsto.

Es muy importante la verificación de las pruebas de carga para verificar el diseño, de tal manera que cumplan satisfactoriamente con el comportamiento y rigidez esperada.

Finalmente se puede mencionar que este tratamiento es eficaz para mitigar el potencial de licuación y actúa muy bien como elemento drenante que atrae los esfuerzos cortantes generados por sismos y reduce el esfuerzo del suelo.

Referencias

- [1] M.Pinilla, Informe de tratamiento de mejora, Parque Eólico "Eoliatec del Pacifico (EDP) Santo Domingo Ingenio, Keller, Oaxaca, 2013
- [2] Kirsch, K. & Kirsch, F. 2010. Ground Improvement by deep vibratory methods, New York: Spoon Press, 2010
- [3] E. Carvajal, Jorge Castro. Análisis Numérico de los Efectos de ejecución de las columnas de grava, Keller, 2013
- [4] SSN Servicio Sismológico Nacional –México, Resumen Mensual, 2017