

Mejoramiento de Suelos aplicado a los proyectos de parques eólicos en Chile

Ground improvement for wind farms project in Chile

Remi Chatte

Menard LATAM, Chile, remi.chatte@menard-mail.com

Pierre Krop

Soletanche Bachy, Chile

ABSTRACT: Chile has been actively investing in wind energy in recent years. Several wind farms have been established across the country to harness its abundant wind resources. These green projects contribute to Chile's efforts to diversify its energy mix and reduce its dependence on fossil fuels. Over the past few years, Chile has rapidly expanded its wind energy capacity and has become one of the leaders in wind power generation in South America. In 2019, a major wind farm project has been developed in the province of Malleco with a total capacity of 272 MW. As an alternative to stone columns and piles, a ground improvement solution has been developed using Controlled Modulus Columns (CMC rigid inclusion) to enable more economical solution for the various and stringent windmill manufacturer requirements. This paper presents an overview of the ground improvement solution, the design generated and the work carried out on site to support the gravity-based wind turbine foundations on CMC.

RESUMEN: Chile ha invertido activamente en energías renovables en los últimos años. Se han construido varios parques eólicos en todo el país para aprovechar sus abundantes recursos eólicos. Estos proyectos contribuyen a los esfuerzos de Chile por diversificar su combinación energética y reducir su dependencia de los combustibles fósiles. En los últimos 10 años, Chile ha ampliado rápidamente su capacidad de energía eólica y se ha convertido en uno de los líderes en energía eólica en América del Sur. En 2019, se ha desarrollado un importante proyecto de parque eólico en la provincia de Malleco con una capacidad total de 272 MW. Como alternativa a las columnas de grava y los pilotes, se ha desarrollado una solución de mejoramiento de suelo utilizando inclusiones rígidas tipo Columnas de Módulo Controlado (CMC) para permitir una solución de fundación más atractiva y adaptada a los requisitos del fabricante de los aerogeneradores. Este documento presenta de forma general la solución de mejoramiento de suelo, el diseño realizado y el trabajo ejecutado in situ para las fundaciones de los aerogeneradores sobre CMC.

KEYWORDS: mejoramiento de suelos, inclusiones rígidas, Columnas de Modulo Controlado, parques eólicos.

1 INTRODUCCIÓN

En Chile, la política de energía renovable ha experimentado grandes avances en los últimos años. El país ha buscado diversificar su matriz energética, fomentando el uso de energía limpia y sostenible. El desarrollo de proyectos de energías renovables es parte de este impulso. Chile ha visto un aumento importante en la implementación de parques eólicos y solares, así como en proyectos de energía hidroeléctrica y geotérmica.

Con su extensa línea costera, el país se beneficia de un gran recurso eólico gracias a los vientos constantes llegando del Pacífico Sur. A comienzos de los años 2000, los primeros parques eólicos fueron construidos. En Chile, a enero de 2024, existen 4,510 MW de instalaciones de energía eólica sobre un total de 33,584 MW de capacidad instalada (Comisión Nacional de Energía, Reporte de Capacidad Instalada – Enero 2024).

Varios proyectos de parques eólicos fueron desarrollados en el sector de Los Ángeles en la región del Biobío, sobre terrenos constituidos por predios agrícolas, forestales y ganaderos.

Estos proyectos se ubican en la unidad geomorfológica llamada Depresión Intermedia, entre la Cordillera de los Andes y las Cordillera de la Costa. Los suelos de la región consisten en sedimentos de grava, arena, limos y arcilla. Esta elevada variabilidad de composición de terreno dificulta la fundación de

los parques eólicos y en particular las zapatas superficiales de las torres. Por esta razón, varias técnicas de fundación y de mejoramiento de suelo han sido aplicadas últimamente para garantizar la estabilidad de las torres eólicas.

2 REQUISITOS TÉCNICOS NECESARIOS PARA EL MEJORAMIENTO DE SUELOS

2.1 Introducción a las técnicas de mejoramiento de suelos

En el contexto de los retos geotécnicos del sector de Los Ángeles en Chile, las técnicas de mejoramiento de suelo pueden desempeñar un papel importante. El mejoramiento de suelo consiste en utilizar la capacidad del suelo y complementarla con alguna densificación o reforzamiento para alcanzar los criterios del proyecto. A veces, esto puede hacerse sin añadir material mediante densificación o añadiendo materiales de origen local, incluido, entre otros, material procedente del propio emplazamiento si es factible. Las ventajas de estas optimizaciones son numerosas, entre otras, la reducción de las cantidades de materiales importados y, en consecuencia, una reducción significativa de la necesidad de retirar materiales fuera del emplazamiento.

Las técnicas de mejoramiento de suelos suelen ser sencillas, reducen la complicada interacción entre el suelo y la infraestructura.

2.2 Diseño de la fundación de una torre eólica

Las fundaciones de los aerogeneradores suelen ser octogonales o circulares, con diámetros que varían entre 15 y 30 metros aproximadamente.

Para definir las condiciones de carga de la fundación de un aerogenerador, se analizan varios escenarios conceptuales que consideran las distintas etapas de la vida útil del diseño de la turbina, incluido el montaje, la generación de energía, los vientos extremos, el modo de seguridad, la avería y el desmontaje. Se revisan múltiples casos de carga conceptuales diferentes para determinar la envolvente de casos de carga.

Figure 1. Fuerzas de carga y flexión actuantes sobre la zapata de una torre eólica.



Los

resultados en términos de combinaciones de cargas son identificados en 3 categorías:

- Casi-permanente,
- Variable,
- Accidental.

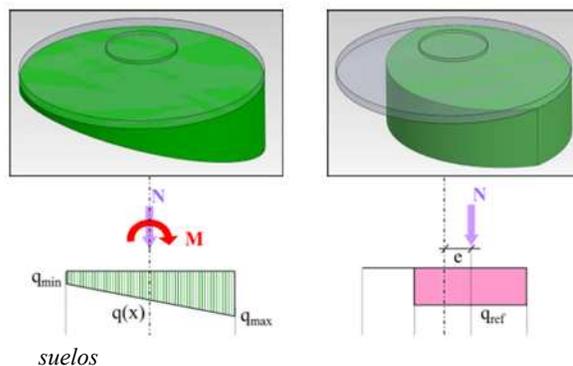
Para cada combinación de cargas, se consideran los valores de las fuerzas resultantes verticales y horizontales, así que el momento de torsión, de volcamiento, teniendo también en cuenta la flotabilidad cuando corresponda. Se aplican factores sobre estas combinaciones de cargas para obtener las cargas al estado de servicio (SLS – Serviceability Load State) y las cargas al estado límite último (ULS – Ultimate Load State).

Una vez establecidas las tensiones actuantes sobre la base de la zapata, se puede definir la zona comprimida debajo de la fundación utilizando el factor de ponderación relevante para cada

caso de carga individual. A continuación, se muestran dos casos de zonas comprimidas debajo de una zapata de fundación.

Figure 2. Áreas comprimidas para tensiones de contacto debajo de una zapata de fundación (Racinais et al, 2016).

2.3 Requisitos técnicos necesarios para el mejoramiento de



Una vez finalizado el análisis de tensiones actuantes debajo de la zapata de fundación, se puede determinar las especificaciones siguientes, definidas por el fabricante de las turbinas, para el diseño de la zapata y del mejoramiento de suelos:

- Asentamientos totales y diferenciales de la zapata sobre el suelo mejorado,
- Rigideces mínimas:
 - o Rigidez rotacional dinámica $K\phi_{Din}$,
 - o Rigidez relacionada con la deformación,
- Verificación de la resistencia al deslizamiento y al volcamiento de la zapata,
- Capacidad portante considerando el estado límite de servicio,
- Capacidad portante considerando el estado límite último,
- Capacidad portante considerando el caso de carga accidental.

3 TÉCNICAS DE MEJORAMIENTO DE SUELOS Y PREDISEÑO

3.1 Selección de una técnica de mejoramiento de suelo

Para definir la solución de mejoramiento de suelos más adecuada para un proyecto se debe considerar varios factores:

- Tipo de carga y de estructura que se debe cimentar,
- Tipo de suelo y características del perfil de suelo (profundidad de las capas de suelo por mejorar, posición de la napa freática, etc.),
- Especificaciones y requisitos de la zapata de fundación.
- Disponibilidad de los materiales en la zona de trabajo (hormigón, cemento, grava, arena, etc.),
- Condiciones de acceso al sitio y condiciones de trabajo (presencia de una plataforma, presencia de redes o ductos, etc.).

Para que una técnica de mejora del suelo sea plenamente eficaz, debe adaptarse al problema geotécnico que se pretende resolver. Una sola técnica de mejora del suelo no es adecuada ni aplicable a todas las condiciones del suelo, Hamidi & Varaksin (2012).

Se pueden clasificar las técnicas de mejoramiento de suelo en 2 principales familias:

- Reforzamiento de suelos:
 - o Inserción de inclusiones granulares (columnas de grava, sustitución dinámica, columnas bi-módulo),

- o Inserción de inclusiones rígidas (Columnas de Módulo Controlado (CMC), inyección de compactación, jet grouting, soil mixing).
- Mejoramiento masivo de suelos:
 - o Métodos estáticos (drenes prefabricados con precarga, consolidación por vacío - Vacuum),
 - o Métodos dinámicos (compactación dinámica, vibro-compactación).

3.2 Referencias de proyectos de mejoramiento de suelos para parques eólicos en varias condiciones de suelos

Como se ha comentado anteriormente, al implementar una técnica de mejoramiento de suelos, el objetivo es alcanzar las especificaciones necesarias para una optimización adecuada de las fundaciones o la estructura limitando los volúmenes de material excavado y reducir, en la medida de lo posible, el volumen de material importado en el sitio. El objetivo es aprovechar y utilizar el suelo del sitio donde se llevará a cabo la construcción. Evidentemente, hay ventajas económicas asociadas, junto con una reducción del impacto generado por los transportes del material excavado e importado.

En el pasado se ha utilizado una gran variedad de técnicas de mejoramiento del terreno para mejorar las características del suelo bajo las fundaciones de las turbinas.

En el contexto de los proyectos de parques eólicos, las técnicas empleadas pueden variar dependiendo de las condiciones geotécnicas y estructurales. Las técnicas de inclusiones permiten reforzar el suelo con la aportación de materiales externos a suelos blandos o finos sueltos para obtener los criterios necesarios según las necesidades. Las técnicas de densificación generan una densificación de suelos sueltos sin necesidad de material adicional. En algunos casos, puede ser una combinación de ambas.

Las técnicas de consolidación acelerada mediante drenes verticales prefabricados no suelen ser aplicadas para mejorar el suelo de fundación de las turbinas debido a las altas tensiones generadas por las zapatas.

A continuación, se presentan 3 referencias de parques eólicos para los cuales se aplicaron un mejoramiento de suelo para la fundación de los aerogeneradores.

3.2.1 Proyecto Ilza Wind Farm II, Polonia – Soil Mixing

El proyecto se ubica al sur de Varsovia, en una zona de rocas jurásicas. En las depresiones entre los afloramientos rocosos, se encuentran depósitos sedimentarios fluviales compuestos por arenas finas y medias así como que arcillas blandas.

Para reforzar los suelos de fundación, se implementó la técnica de Soil Mixing, creando columnas de suelo-cemento mezclando el suelo con una lechada de agua con cemento. En total, se realizaron 796 columnas de Soil Mixing bajo 12 posiciones de aerogeneradores.

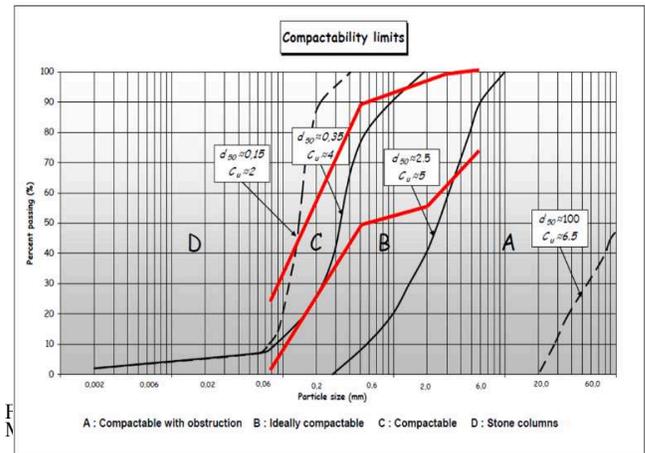
Esta solución permitió la mejora necesaria del suelo para garantizar los requisitos técnicos de las fundaciones y permitió reducir la importación de materiales externos (grava y/o hormigón) para cimentar los aerogeneradores.



Figure 3. Ejecución de columnas de Soil Mixing para el proyecto Ilza Wind Farm II en Polonia.

3.2.2 Proyecto Nouakchott, Mauritania – Vibro-compactacion y Columnas de Grava

Inicialmente, para este proyecto se contemplaba un mejoramiento de suelo mediante Columnas de Grava. Una campaña de investigación geotécnica adicional permitió identificar capas granulares compactables dentro del perfil de suelo. Gracias a los bajos contenidos de finos y una granulometría relativamente bien graduada, se ha podido ejecutar una parte del proyecto con vibro-compactación, sin aportaciones externas de material.



Al igual que el proyecto Ilza en Polonia, se ha podido ahorrar materiales externos (grava) durante la implementación del mejoramiento de suelos. Este ahorro fue sumamente importante considerando la ubicación aislada del proyecto y la dificultad para conseguir material pétreo.



Figure 5. Ejecución de Vibro-Compactación y Columnas de Grava para el proyecto Nouakchott en Mauritania.

3.2.3 Proyecto Cape Bridge Wind Farm, Australia – Compactación Dinámica

La Compactación Dinámica es una de las técnicas más eficientes y económicas disponibles para la ejecución de mejoramiento de suelos. Desarrollada por Louis Menard en Francia en la década de 1960, esta técnica se utiliza actualmente en todo el mundo en proyectos de todo tipo, desde puertos hasta almacenes y energía.

La aplicación de la Compactación Dinámica en este proyecto de Cape Bridge en Australia permitió garantizar los criterios para la estabilidad de los 29 aerogeneradores, eliminando la necesidad de importar cualquier material externo para mejorar el terreno.

La profundidad del mejoramiento requerida variaba entre 3 y 10 m por debajo del nivel de fundación. El suelo existente tenía una resistencia de cono CPT de entre 5 y 10 MPa y se desarrolló un programa de compactación para aumentar la resistencia de cono hasta 15 MPa en un área de 18 m de diámetro bajo cada zapata.



4 CASO DE ESTUDIO: PROYECTO DE PARQUE EOLICO EN LOS ANGELES, CHILE

4.1 Descripción del Proyecto

El proyecto del parque eólico en Los Ángeles está situado en la región chilena de la Araucanía, cerca de la localidad de Collipulli. El desarrollo contemplaba la construcción de 77 aerogeneradores con una potencia entre 3,45 y 3,60 MW para una capacidad combinada de 273 MW. La altura de las turbinas oscilaba entre 120 y 140 m.

La ubicación del proyecto se extiende en un radio aproximado de 10 km con un terreno con un ligero relieve, como es típico en los proyectos de parques eólicos. De las 77 turbinas del parque eólico, 74 presentaban malas condiciones del suelo y requerían una intervención para garantizar el cumplimiento de las especificaciones de capacidad portante, control de asentamientos y rigidez mínima.

4.2 Condiciones del suelo

A continuación, se describe el perfil de suelo representativo para el proyecto:

- Arcilla y limo, de consistencia blanda a firme con presencia de grava,
- Arcilla limosa compacta a muy compacta, con arena y grava,
- Gravas de origen volcánica cementadas.

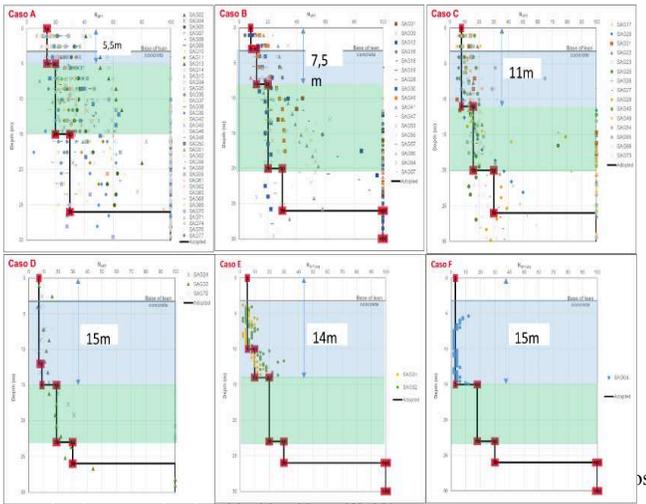
A pesar de que el proyecto se extendía sobre una gran superficie, el perfil del suelo resultó ser bastante uniforme, aunque el espesor de la arcilla y limo superficial tendía a variar.

De forma general, esta capa presentaba un contenido de finos relativamente alto con una plasticidad de media a baja. El rango de valores para esta capa se presenta a continuación:

- Límite líquido: 40 % a 78 %,
- Índice de plasticidad: 5 % a 30 %.

El contenido de finos variaba mucho dependiendo de la zona del proyecto, con valores entre 4 % y 90 %. Esta gran variabilidad puede explicarse por la presencia de capas intermitentes de material granular dentro del estrato por mejorar.

Teniendo en cuenta toda la información de la investigación del suelo, para optimizar el proceso de definición de tratamiento se definieron seis perfiles típicos de suelo con estratigrafías distintas y profundidades por mejorar entre 5.5 y 15 m (ver Figura 7).



4.3 Especificaciones técnicas

Las especificaciones requeridas para las fundaciones de los aerogeneradores son las siguientes:

- Verificación de las capacidades de carga al estado de servicio (SLS) y al estado límite últimos (ULS),
- Asentamiento diferencial $\Delta h_{\text{dir}} < 3 \text{ mm/m}$,
- Rigidez rotacional dinámica de la zapata $K\phi_{\text{Din}} > 57 \text{ GN.m/rad}$,
- Rigidez horizontal dinámica de la zapata $Kh_{\text{Din}} > 12 \text{ GN.m/rad}$.

4.4 Solución de mejoramiento de suelo aplicada

La construcción de las zapatas de los aerogeneradores no era posible sin un mejoramiento previo debido a condiciones de suelo insuficientes en términos de capacidad portante, asentamiento diferencial y rigidez rotacional y dinámica. En paralelo, se revisó el riesgo de licuación con el método de Boulanger & Idriss (2014), integrando los análisis de los parámetros intrínsecos de los suelos siguientes:

- método del Eurocódigo 8 Part 5 (EN 1998-5:2005),
- método del criterio chino modificado, Wang (1979), Seed & Idriss (1982), Andrews & Martin (2000),
- método de Seed & al. (2003),
- método de Bray & Sancio (2006).

Se concluyó que la licuación no era un problema en el sector del proyecto.

Dos soluciones fueron inicialmente estudiadas para mitigar los riesgos geotécnicos:

- Pilotes de fundación profunda,
- Columnas de Módulo Controlado (CMC).

La Columna de Módulo Controlado es una técnica desarrollada por Menard en Francia en la década de 1990 y, como todas las técnicas de mejoramiento de suelo, el principio de la CMC no es necesariamente impedir el asentamiento, sino controlarlo dentro de límites aceptables. El sistema CMC funciona con una capa de transferencia de carga (o capa de repartición) para optimizar la distribución de esfuerzos entre las columnas y la capa de suelo blando. Esta capa de material granular se implementa en la cabeza de las CMC y permite también limitar la transmisión de esfuerzos horizontales hacia las columnas.

Para el proyecto del parque eólico en Los Ángeles, se optó por la solución de CMC por las siguientes razones:

- La solución de CMC era más económica que los pilotes debido a una optimización sustancial de los volúmenes de hormigón y acero necesarios para las zapatas de fundación.
- En un contexto de plazos muy ajustados, el riesgo de planificación del alcance de las fundaciones se redujo gracias a la reducción de la necesidad de hormigón, junto con la eliminación de la necesidad de acero en el proyecto, lo que significa una menor dependencia de la importación de materiales. Este punto fue clave para cumplir con la fecha de entrega de las propias turbinas y de las torres más adelante en el proyecto.
- La rapidez de ejecución de las CMC también aportó importantes ventajas a la planificación del proyecto. Una combinación de la maniobrabilidad de la máquina de CMC y la secuencia de trabajos propuesta en el proyecto por el subcontratista permitió completar hasta una turbina completa al día.
- El mejoramiento mediante CMC permite una interacción más sencilla entre el subcontratista y el contratista general. La ausencia de conexión mecánica con acero entre la base de las zapatas y las inclusiones CMC simplifica de forma importante las interacciones en sitio.
- Las CMC se construyen utilizando una barrena de desplazamiento que mueve lateralmente el suelo durante la fase de perforación. La ausencia de desechos generados durante la instalación de las CMC favorece una entrega rápida de la plataforma de trabajo.
- El diseño de la zapata de fundación por gravedad puede optimizarse debido al hecho de que el mejoramiento de suelo ofrece una rigidez uniforme debajo de la base de la zapata en lugar de numerosas cargas puntuales con la solución de pilotes. También permite un proceso de diseño más sencillo.

Figure 8. Ejecución de Columnas de Módulo Controlado (CMC) para el proyecto del parque eólico en Los Ángeles, Chile.

4.5 Secuencia constructiva aplicada

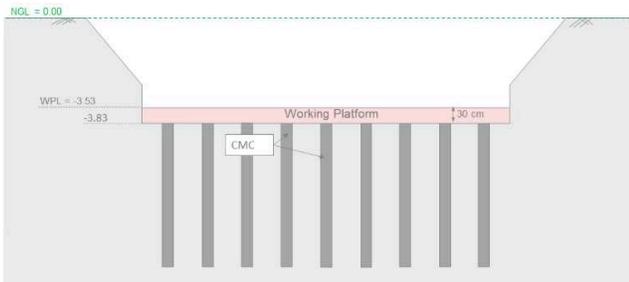
La secuencia de los trabajos relacionados con el mejoramiento de suelo fue la siguiente:

Etapa 1 – Excavación previa de la huella de la fundación e instalación de la plataforma de trabajo.

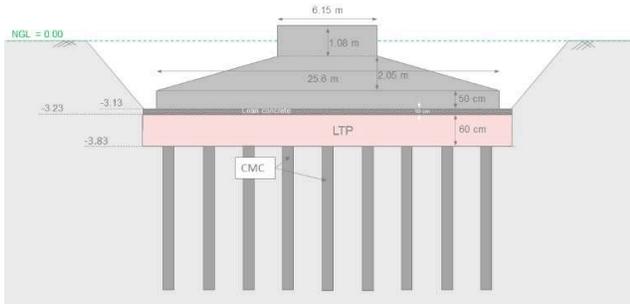
4.6 Diseño de las Columnas de Modulo Controlado (CMC)

Los diámetros de las CMC suelen variar entre 200 mm y 500 mm. Para el proyecto del PE en Los Ángeles, se optó por la utilización de barrenas de desplazamiento de 320mm de diámetro. Las CMC pueden también ser ejecutadas con barrenas helicoidales tipo CFA (Continuous Flight Auger) cuando el suelo presenta capas duras

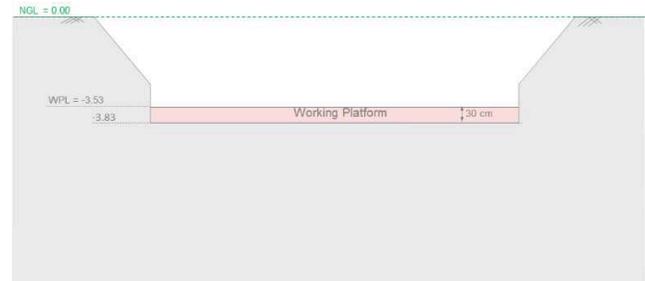
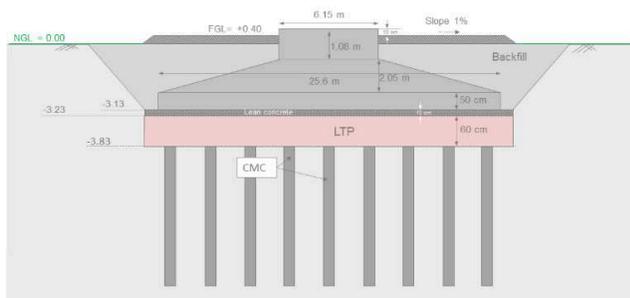
Etapa 2 – Ejecución de las CMC



Etapa 3 – Construcción de la zapata de fundación y la capa de repartición (LTP)



Etapa 5 – Instalación del relleno



que aumentan el riesgo de rechazo durante la perforación. Para el proyecto en el sector de Los Ángeles, el tipo de barrenas a utilizar fue elegido considerando las razones siguientes:

- Las condiciones del suelo permitían implementar un desplazamiento lateral del suelo,
- El método constructivo mediante desplazamiento no genera desechos en la superficie,
- Las capas con pocos finos pueden densificarse y mejorarse durante el proceso de ejecución.

Estos factores contribuyeron en gran medida a la elección del método de ejecución, siendo este último muy beneficioso para el diseño del sistema de fundación de las torres eólicas.

A partir de los distintos casos de carga (ver párrafo 2.2), se realizó un análisis del comportamiento de la zapata de fundación. Se definió la distribución de tensiones por debajo de la zapata y a continuación se calculó la grilla de los elementos CMC.

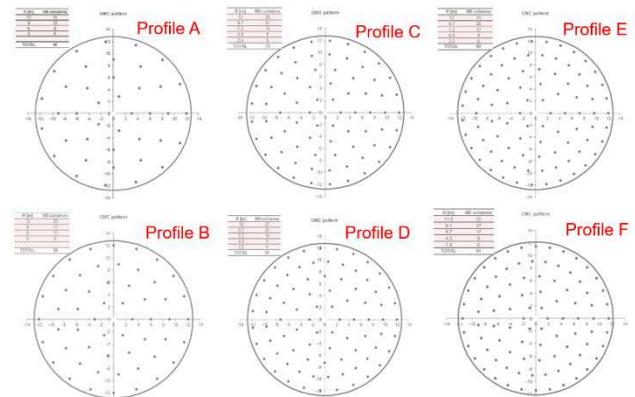
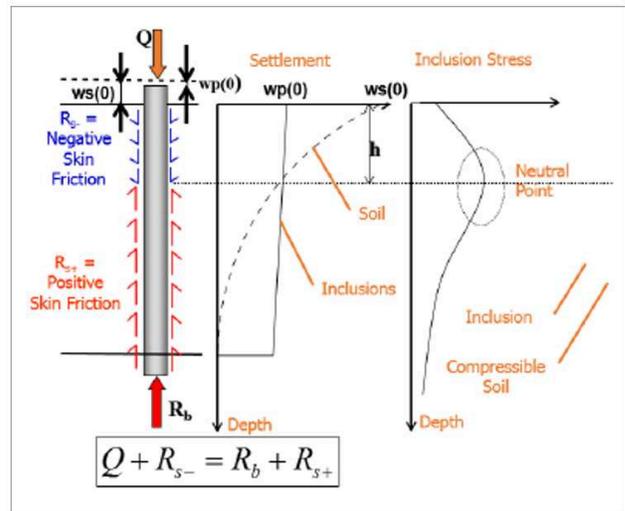


Figure 9. Repartición de las Columnas de Módulo Controlado (CMC) en función del perfil geotécnico

La solución de CMC puede adaptarse a las variaciones de las condiciones de suelo. De las 74 turbinas ejecutadas, como se ha mencionado anteriormente, se definieron seis perfiles de suelo, como se muestra en la Figura 7. Este ejercicio se realizó con el fin de tener un diseño optimizado de la disposición de las CMC y simplificar tanto la fase de diseño como la de ejecución.

Las características de la capa de repartición de cargas también se definen en esta fase considerando un material granular bien compactado con un alto módulo de deformación y ángulo de fricción. En este proyecto, el material utilizado fue un material

granular con una granulometría de 20-60mm y un espesor de 60cm. Se colocó en dos capas de 30cm.



La solución de CMC tiene la ventaja que la plataforma de trabajo puede ser utilizada como parte de la capa de repartición constituida de material granular. La plataforma de trabajo, mediante pruebas de carga de placa antes del inicio de los trabajos, debe cumplir los siguientes requisitos de control:

- o $Ev2 > 50 \text{ MPa}$
- o $Ev2 / Ev1 < 2$

A continuación, se muestran las distintas comprobaciones de cálculo utilizando el software interno Menard, que se basa en el modelo analítico definido según ASIRI (IREX, 2012), como se muestra en la figura 10.

Etapa 3: Cálculo de los asentamientos

Se realizan las comprobaciones para garantizar que las deformaciones se encuentran dentro de los límites permitidos:

- Asentamientos máximos y mínimos,
- Asentamiento medio en el centro de la cimentación,
- Rotación,
- Asentamiento diferencial considerando los asentamientos máximos y mínimos.

Etapa 4: Capacidad de carga

Para las capacidades de carga, se realiza una primera verificación de la capacidad de carga "global" del suelo en la zona comprimida para todas las combinaciones de cargas. También se

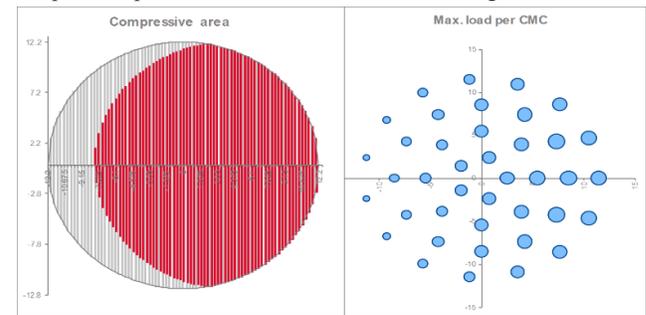


Figure 10. Distribución de las tensiones en la base de la fundación y repartición de cargas por cada CMC

realiza una comprobación de la capacidad de carga "local" considerando la CMC más cargada.

Las principales etapas de este diseño son las siguientes:

Etapa 1: Módulo de deformación equivalente

Se realiza un primer cálculo considerando la grilla de CMC, la carga aplicada y la interacción suelo-columna para definir el módulo de Young equivalente $E_{Y,eq,LT}$ de la capa de suelo tratado.

Etapa 2: Valores de las rigideces

Los valores mínimos de rigidez se definen posteriormente utilizando el $E_{Y,eq,LT}$ calculado en la etapa 1:

- La rigidez vertical estática a largo plazo $K_{v,LT}$,
- La rigidez rotacional estática a largo plazo $K_{\phi,LT}$,
- La rigidez horizontal estática a largo plazo $K_{h,LT}$,
- La rigidez rotacional $K_{\phi,dyn}$ y la rigidez horizontal $K_{h,dyn}$.

Figure 11. Mecanismo de distribución de carga entre las CMC y el suelo

Etapa 5: Verificación de la integridad de las CMC

La última etapa del diseño de las CMC consiste en la verificación de la integridad de las inclusiones. En esta etapa del diseño, se suman las sollicitaciones cíclicas del aerogenerador y las sollicitaciones dinámicas (momento de flexión y esfuerzo de corte) bajo carga sísmica.

El evento sísmico, genera un desplazamiento cinemático en el suelo, con un valor de desplazamiento máximo d_{max} en la superficie proporcionado en el informe de riesgo sísmico. Del

punto de vista inercial de los efectos sísmicos, se generan cargas horizontales definidas en el cálculo estructural.

Conociendo el valor del desplazamiento del suelo con la profundidad (cinemático + inercial o cinemático – inercial), es entonces posible conocer los valores del momento de flexión M y el esfuerzo de corte T aplicados a las CMC a cada profundidad.

Se comprueba que la tensión de compresión aplicada no supera la resistencia admisible a la compresión f_{cd} del hormigón o mortero utilizado.

La comprobación de la integridad en términos de fuerza axial y momento de flexión en la inclusión se lleva a cabo de acuerdo con el método de la “media luna” derivado del Eurocódigo 2, sección 12:

$$N_{Ed} \leq N_{Rd} = A_{ref} \cdot f_{cd} \quad (1)$$

Con:

- N_{Ed} es el valor de diseño de la fuerza axial aplicada,
- f_{cd} es la resistencia a la compresión del hormigón o mortero,
- A_{ref} es el área de compresión de la sección de CMC bajo carga vertical y momento de flexión.

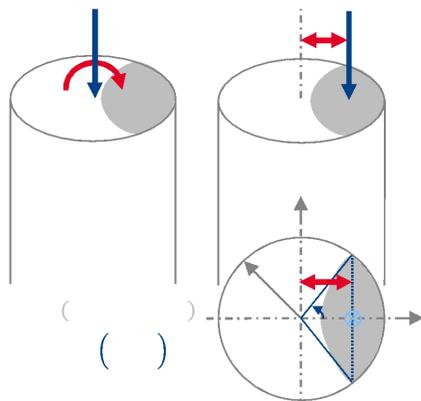


Figure 12. Verificación de la integridad de la sección de CMC

4 CONCLUSIONES

Implementadas por primera vez en Chile para un proyecto de parque eólico, las inclusiones rígidas tipo CMC han permitido resolver todos los retos geotécnicos presentados por las condiciones de suelos.

La rapidez de ejecución, la optimización de sistema de fundación y el uso limitado de hormigón y/o grava han sido parámetros claves para la elección de la técnica.

Al nivel mundial, se ejecutan anualmente 500 proyectos de CMC para todos tipos de suelos y estructuras. En el 2010, el proyecto del parque eólico de Fantanele/Cogealac en Rumania, el más grande de Europa con una capacidad de 600 MW, fue fundado en su totalidad sobre Columnas de Modulo Controlado (CMC).

5 REFERENCES

Briet S, Plomteux C. (2010) *Integrated Ground Improvement solution for Windmill Foundation support in soft soils*; GeoCalgary 2010; the 63rd Canadian geotechnical conference and 6th Canadian permafrost conference, Calgary, AB (Canada), 12-15 Sep 2010

(CFMS) Comité Français de la Mécanique des Sols et De Géotechnique (2011a). *Recommendations for the Design, Calculation, Installation and Inspection of Wind-Turbine Foundations, Revision 1.1.* 109.

(CFMS) Comité Français de la Mécanique des Sols et De Géotechnique (2011b). *Recommendations for the Design, Calculation, Construction and Quality Control of Stone Columns Under Buildings and Sensitive Structures, Version No. 2*

Coghlan K, Plomteux C, Racinais J. (2016). *Execution & Engineering Principles of Control Modulus Column (grouting)* First South African Geotechnical Conference; 5-6th May 2016

Hung V. Pham, Daniel Dias, Tiago Miranda, Nuno Cristelo, Nuno Araújo (2018). *3D Numerical Modeling of Foundation Solutions for Wind Turbines*

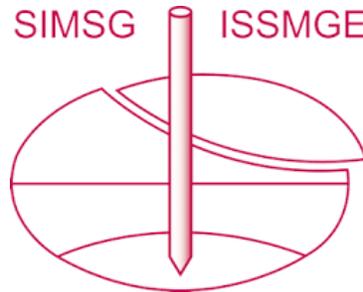
Hamidi B. and Varaksin S. (2012) *Lessons Learned from Millions of Square Metres of Ground Improvement*. ISSMGE - TC 211 International Symposium on Ground Improvement IS-GI Brussels 31 May & 1 June 2012

(IREX) Institute for Applied Research and Experimentation in Civil Engineering (2012) *ASIRI National Project. Recommendations for the design, construction and control of rigid inclusion ground improvements*.

J.Jong. (2020). *Ground Improvement of Rigid Inclusions under Wind Turbine Foundations*, SA, NT Symposium

Plomteux, C. and Ciortan, R. (2010). *Integrated Ground improvement solution for the largest wind farm project in Europe*. Proc 14th Danube-European Conference on Geotechnical Engineering ‘From Research to Design in European Practice, 2010. Bratislava, Slovakia.

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

The paper was published in the proceedings of the 17th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVII PCSMGE) and was edited by Gonzalo Montalva, Daniel Pollak, Claudio Roman and Luis Valenzuela. The conference was held from November 12th to November 16th 2024 in Chile.