



Universidad de Oviedo



Facultad de Geología

TRABAJO FIN DE MÁSTER

ANÁLISIS DE LAS CIMENTACIONES DE LOS AROGENERADORES DEL PARQUE EÓLICO DE BUSECO (ASTURIAS)

JULIA GONZÁLEZ FONTANELLAS

MÁSTER EN RECURSOS GEOLÓGICOS
E INGENIERÍA GEOLÓGICA

FEBRERO - 2023



D^a. JULIA GONZÁLEZ FONTANELLAS autor del Trabajo Fin de Máster titulado “ANÁLISIS DE LAS CIMENTACIONES DE LOS AEROGENERADORES EN EL PARQUE EÓLICO DE BUSECO (ASTURIAS)”, confirma que es un trabajo original y solicita su presentación en el Máster Universitario Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica de la Universidad de Oviedo.

En Oviedo, a 7 de febrero de 2023

Fdo. Julia González Fontanellas

El Dr. Carlos López Fernández, Profesor Titular del Dpto. de Geología de la Univ. de Oviedo y el D. Ramiro García Luna investigador de la Universidad Complutense de Madrid, confirma/n que ha/n tutelado el trabajo “ANÁLISIS DE LAS CIMENTACIONES DE LOS AEROGENERADORES EN EL PARQUE EÓLICO DE BUSECO (ASTURIAS)”, realizado por D^a. Julia González Fontanellas, y autorizan su presentación y defensa como Trabajo Fin de Máster en el Máster Universitario en Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica de la Universidad de Oviedo.

En Oviedo, a 7 de febrero de 2023

Fdo. Carlos López Fernández

Fdo. Ramiro García Luna



ÍNDICE:

1. INTRODUCCIÓN	3
Antecedentes.....	3
Objetivos.....	5
Características generales del parque eólico proyectado	5
2. CONTEXTO GEOLÓGICO.....	8
3. CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DEL TERRENO	10
4. METODOLOGÍA DE CÁLCULO DE CIMENTACIONES	13
Marco legal	13
Definición de acciones.....	14
a. Cimentación directa	17
b. Cimentación anclada	21
5. RESULTADOS.....	23
Cimentación directa	23
Cimentación anclada	27
6. CONCLUSIONES.....	41
AGRADECIMIENTOS.....	42
7. REFERENCIAS	43



ANÁLISIS DE LAS CIMENTACIONES DE LOS AROGENERADORES DEL PARQUE EÓLICO DE BUSECO (ASTURIAS)

1. INTRODUCCIÓN

Este Trabajo Fin de Máster (en adelante, TFM) se desarrolla como asignatura final del Máster en Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica desarrollado en la Universidad de Oviedo. Uno de los módulos obligatorios que se cursan, denominado Ingeniería Geológica, trata aspectos concretos relacionados con los estudios geológicos-geotécnicos, las excavaciones y cimentaciones, desarrollando las competencias relativas a la capacidad de análisis, crítica y resolución que permiten afrontar con garantías problemas propios del ámbito laboral, potenciando la capacidad integradora y la visión global de los proyectos. Además, en el módulo de Aguas y Medioambiente, se tratan diversos aspectos relacionados con el medioambiente y los retos en varios campos para la geología debido al cambio climático antropogénico. En este contexto, este TFM afronta estas temáticas y pone en práctica las competencias adquiridas en el máster a partir de un proyecto real de energías renovables consistente en la construcción de un parque eólico en Asturias, en el cual desarrollé parte de mi actividad profesional.

Antecedentes

La incorporación de las nuevas energías como fuente de abastecimiento eléctrico en España es cada vez más significativa en los últimos años. El desarrollo del sector eléctrico renovable hace uso de las energías provenientes de la naturaleza, utilizando recursos energéticos renovables para la generación de energía, siendo uno de estos el viento, mediante el cual se genera energía eólica a través de la instalación de aerogeneradores en zonas de potencial recurso eólico.

Dentro de la estrategia de transición energética justa en Asturias y con una visión a 2050, se tenderá a un modelo energético descarbonizado, en el que la generación eólica será la tecnología generadora de potencia mayormente instalada en la región en el año 2030, con un crecimiento en torno a un 107 %. Por esto, actualmente la promoción de este tipo de proyectos está en auge en la provincia. Las zonas noroccidental y suroccidental asturianas son en las que se encuentran situados los 24 parques eólicos que funcionan



actualmente en Asturias, porque es donde se localiza un mejor recurso eólico y además las directrices sectoriales son menos restrictivas.

El proyecto que se aborda en este TFM corresponde al Parque Eólico de Buseco (en adelante, P.E. Buseco), el cual fue aprobado por la Consejería de Industria y Empleo, Dirección General de Minería, Industria y Energía del Principado en el año 2003, otorgándole los permisos de interconexión con la Red Estatal en el año 2009 y ratificando su conexión en el año 2018.

El proyecto del P.E. Buseco sufrió varias modificaciones respecto al proyecto inicial, siendo en enero de 2021 cuando se publicó en el BOPA la autorización de construcción según la última modificación. Los terrenos sobre los que se asienta este parque son de uso rústico común y rústico con protección especial y pertenecen a los municipios de Valdés, Villayón y Tineo. Por parte de la Dirección General de Patrimonio del Principado de Asturias se informó favorablemente el proyecto, estableciendo un proceso de seguimiento arqueológico en noviembre de 2019. En la orden ambiental en diciembre de 2019 se hizo pública la resolución positiva de impacto ambiental de este parque eólico, autorizando su explotación. Definiendo lo establecido en el RD 413/2014, según el cual este parque eólico pertenece al tipo de “instalaciones que únicamente utilice como energía primaria la energía eólica y que se encuentren ubicados en tierra”. Siendo el documento definitivo válido para la construcción el “Anexo de Modificación al Proyecto de Ejecución del Parque Eólico de Buseco” de marzo de 2020.

El principal motivo de las modificaciones al proyecto inicial se debió al cambio de potencia en el modelo de aerogenerador a instalar, utilizando en un principio aerogeneradores de 3,75 MW y pasando al uso de aerogeneradores de 5 MW, definitivamente. De esta manera, manteniendo la potencia total del parque eólico, se reduce la instalación de 13 a 10 máquinas. Esta reducción surge por la necesidad de optimizar los trabajos de movimiento de tierras en los trabajos constructivos, ya que dos de ellas coinciden en una zona con alta necesidad de movimiento de tierras para su construcción y otro de ellos por la coincidencia con una vivienda cercana; modificaciones suscitadas por las consideraciones del informe ambiental previo. Finalmente, se definió una instalación de 50 MW de potencia producida por 10 aerogeneradores de 5 MW de potencia unitaria, aprovechando así el desarrollo tecnológico que se produjo en la fabricación de aerogeneradores durante los trámites administrativos y consiguiendo minimizar sustancialmente el impacto ambiental desde el punto de vista civil, así como el riesgo para la fauna.

Para la redacción del proyecto de ejecución se tuvieron en cuenta la normativa, reglamentos e instrucciones técnicas en materia eólica y energética tanto autonómica como nacional, las servidumbres



aeronáuticas, así como la referente a instalaciones eléctricas, obra civil y estructuras, seguridad y salud y medioambiental. Los aspectos incluidos fueron los siguientes:

- El estudio de viento de la zona a partir de los datos disponibles.
- El modelo, altura y características de los aerogeneradores a instalar en el parque en función de los datos de viento.
- Los circuitos eléctricos para la evacuación de la energía producida por el parque eólico.
- La obra civil de la construcción de viales, plataformas de montaje, zanjas, cimentaciones, etc.
- El presupuesto de las obras a ejecutar.
- Los pliegos de contratación y construcción.
- El estudio de seguridad y salud.

Objetivos

El objetivo de este TFM es la definición de la tipología de cimentación de los aerogeneradores sobre el sustrato rocoso, verificando para ello los dos tipos de cimentaciones propuestas en las fases de predimensionado y de licitación.

Características generales del parque eólico proyectado

Este parque eólico fue promovido por Capital Energy y se ubica en la zona occidental de Asturias sobre terrenos que abarcan los concejos de Valdés, Villayón y Tineo (Fig. 1.1). La afección a estos municipios se debe tanto a la implantación propia de los aerogeneradores como a la ejecución de los accesos necesarios para la construcción y posterior mantenimiento de las instalaciones energéticas, así como el paso de las líneas de interconexión eléctrica.

El P.E. Buseco se proyectó con una potencia instalada de 50 MW mediante el uso de 10 aerogeneradores de 5 MW cada uno, con 84 metros de altura de buje, modelo SG 5.0-132 y fabricados por Siemens Gamesa. El recurso eólico anual de este parque se estima en 125 GWh/año, lo que supone 2.518 horas equivalentes. El emplazamiento se encuentra a una altitud que oscila entre los 810 y los 930 metros de altura sobre el nivel del mar (Fig. 1.2), siendo las parcelas de implantación tanto de propiedad pública como privada.

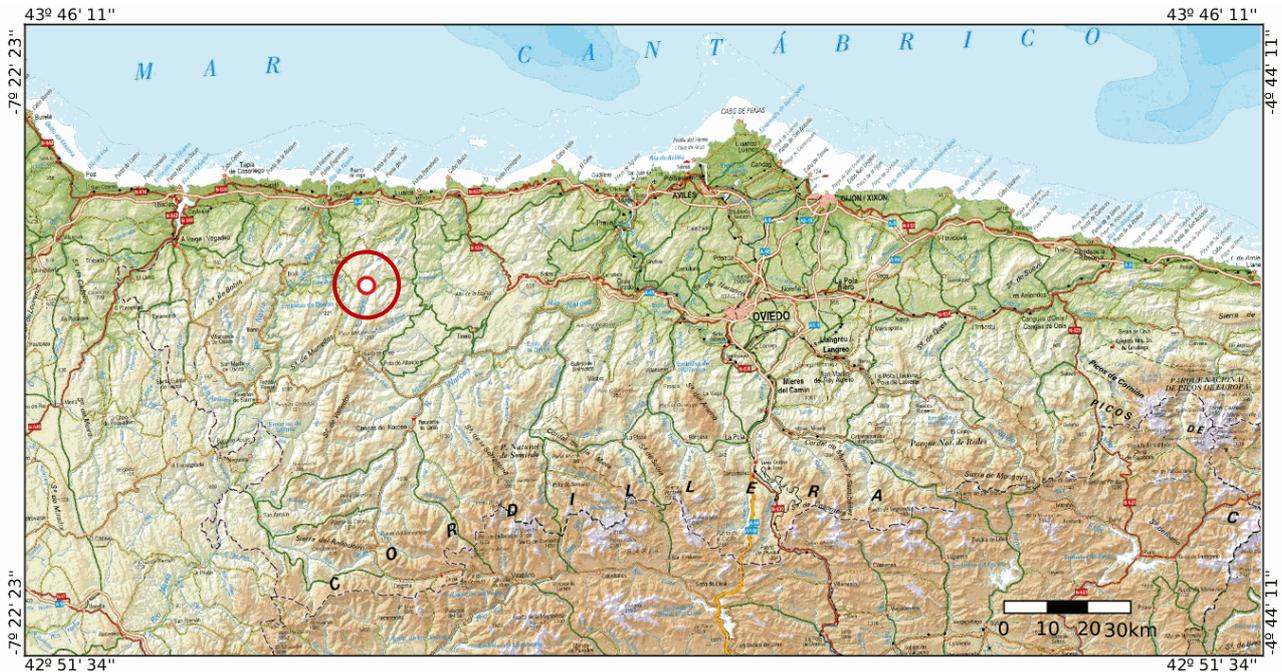


Figura 1.1. Ubicación geográfica del P.E. Buseco (Valdés, Villayón, Tineo). Fuente: topografía tomada del visor del Instituto Geográfico Nacional Iberpix, consultado enero 2023.

El acceso al P.E. Buseco se realiza desde la autovía A-8 y de la carretera autonómica AS-37, que alcanza el Alto de la Bobia donde se dispone de pistas existentes con dimensiones suficientes para el transporte de los aerogeneradores, dado que buena parte de ellas se construyeron para el acceso al vecino parque eólico del Segredal. Los nuevos viales interiores del parque se adaptaron a la topografía propia del emplazamiento, caracterizada por un relieve muy suave a cotas elevadas y con laderas de fuerte pendiente, minimizando los trabajos de movimiento de tierras. Los caminos existentes previamente se acondicionaron dándoles un acabado al igual que a los nuevos viales, excepto en el caso de las zonas con pendientes superiores al 10 %, a los que se les dio un acabado de hormigón para facilitar la circulación. Los viales de nueva construcción tienen una longitud total de 14 km y cuentan con los oportunos sistemas de drenaje, mediante cunetas y tubos pasantes para facilitar la escorrentía del agua de lluvia, evitando los estancamientos.

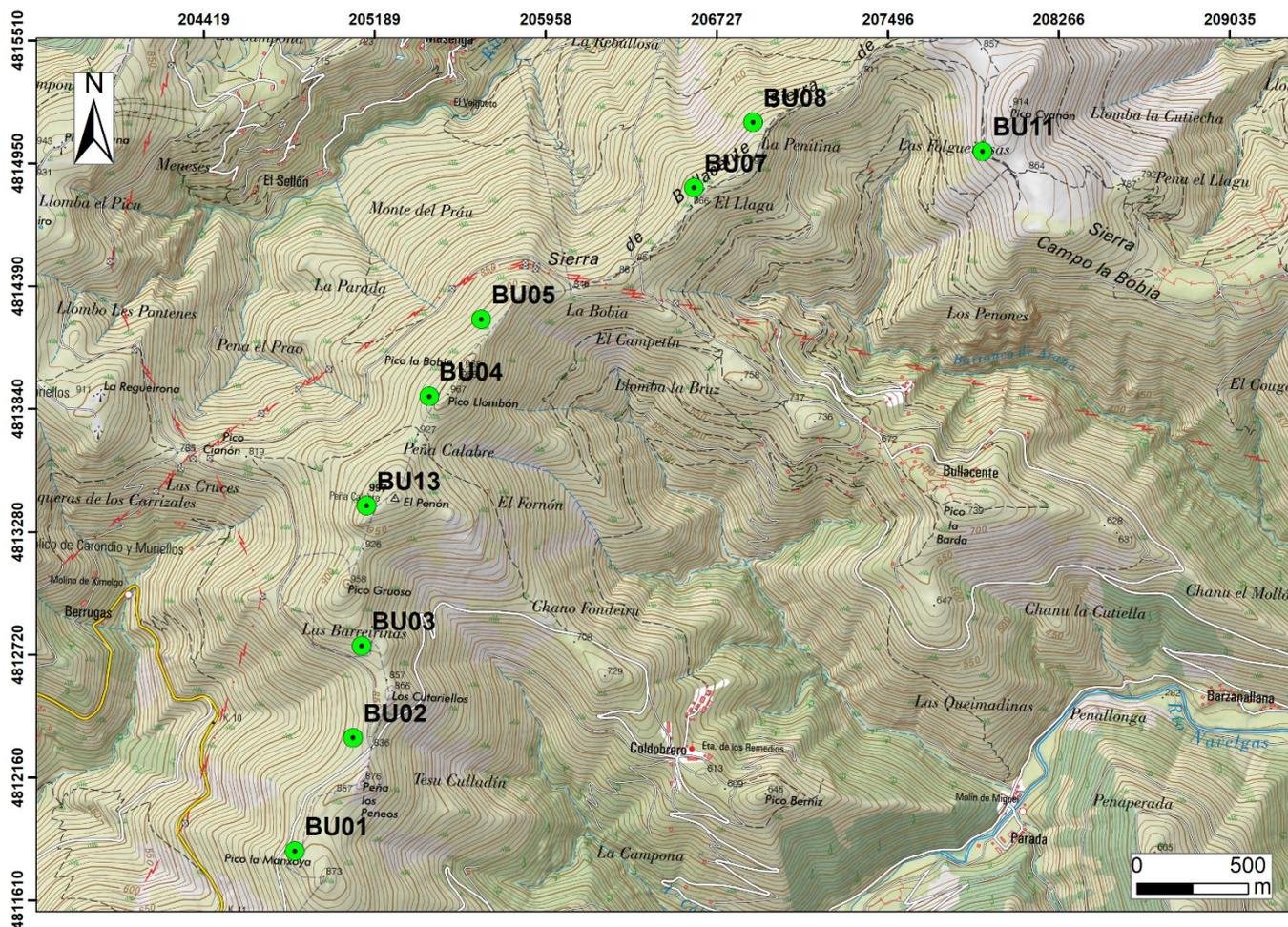


Figura 1.2. Emplazamiento de los 10 aerogeneradores del P.E. Buseco. Sistema de referencia topográfica: ETRS-89 29N.

Fuente: topografía tomada del visor del Instituto Geográfico Nacional IBERPIX, consultado enero 2023.

Cada aerogenerador lleva asociada una plataforma de montaje y maniobra de aproximadamente 3.000 m², formada por una zona para la estabilización de la grúa de montaje de las máquinas y con áreas de almacenamiento para la colocación del rotor, aspas y tubos que forman parte del aerogenerador y que se deben acopiar por separado para realizar el montaje in situ de la máquina. Estas áreas de maniobra deben tener una superficie llana con una pendiente en torno al 0,2 %, únicamente para la circulación de las aguas superficiales.

La construcción de los viales y las plataformas de montaje generan un gran volumen de tierras a mover, siendo el total previsto de estas construcciones de aproximadamente 234.000 m³ de desmontes, 209.000 de terraplén y unos 28.000 m³ para firmes. Todo el material de desmonte válido para rellenos se trató en la propia obra mediante molinos y cribas para su reutilización en rellenos y terraplenes.



La canalización eléctrica entre los aerogeneradores hasta la subestación eléctrica se proyectó de manera subterránea mediante canalizaciones enterradas donde se alojan tanto los cables de potencia como el cable de cobre de la red de puesta a tierra. El cable de red de tierra va directamente apoyado en el terreno y los cables de potencia van recubiertos con arena, excepto en las zonas de paso de viales y entrada a las cimentaciones de los aerogeneradores que se protegen mediante tubos hormigonados. Formando en su total un conjunto de circuitos de media tensión de aproximadamente 10,5 km. La evacuación de energía generada en el P.E. Buseco pasa por la subestación eléctrica denominada Subestación Buseco 132/30 kV, también de nueva construcción y situada en las inmediaciones de la obra. Consta de una posición de transformación que se encarga de elevar la potencia del propio parque eólico y otra posición de línea que se encarga de la salida de la línea de alta tensión que recorre aproximadamente 16 km para conectarse en la subestación El Palo 132/400 kV, ubicada en el alto del Puerto de El Palo en Allande.

En total la obra se ha presupuestado en torno a 51 millones de euros, estimándose un período de construcción de 40 semanas. En fase constructiva se han generado aproximadamente 280 empleos, comprendiendo los trabajos de obra civil, montaje electromecánico, montaje de aerogeneradores, construcción de la subestación y la línea de alta tensión, para finalizar con las pruebas y puesta en marcha a mediados de 2022. Es en la actualidad es el parque eólico con mayor potencia de Asturias, suficiente para suministrar energía a casi 54.000 hogares.

2. CONTEXTO GEOLÓGICO

Geológicamente, el P.E. Buseco se sitúa dentro del Dominio del Navia y Alto Sil de la Zona Asturoccidental-leonesa del Macizo Varisco (Lotze, 1945, Marcos, 1973). El sustrato donde se proyecta el parque eólico está formado por materiales que abarcan desde el Cámbrico Medio hasta el Ordovícico Superior, pertenecientes a la Serie de Los Cabos, a las Capas de Lago y a la Formación Agüeira (Fig. 2.1).

La Serie de Los Cabos, de edad Cámbrico Medio-Ordovícico Inferior, está constituida por cuarcitas blancas, areniscas y pizarras que se formaron en un medio marino somero. Las Capas de Lago, de edad Ordovícico Medio, están formadas por pizarras negras ricas en piritita y alternancias de pizarras y areniscas en su base, que también se habrían formado en un medio marino poco profundo. Por último, la Formación Agüeira, de edad Ordovícico Medio-Superior, constituida por areniscas de grano fino, limolitas y pizarras negras.

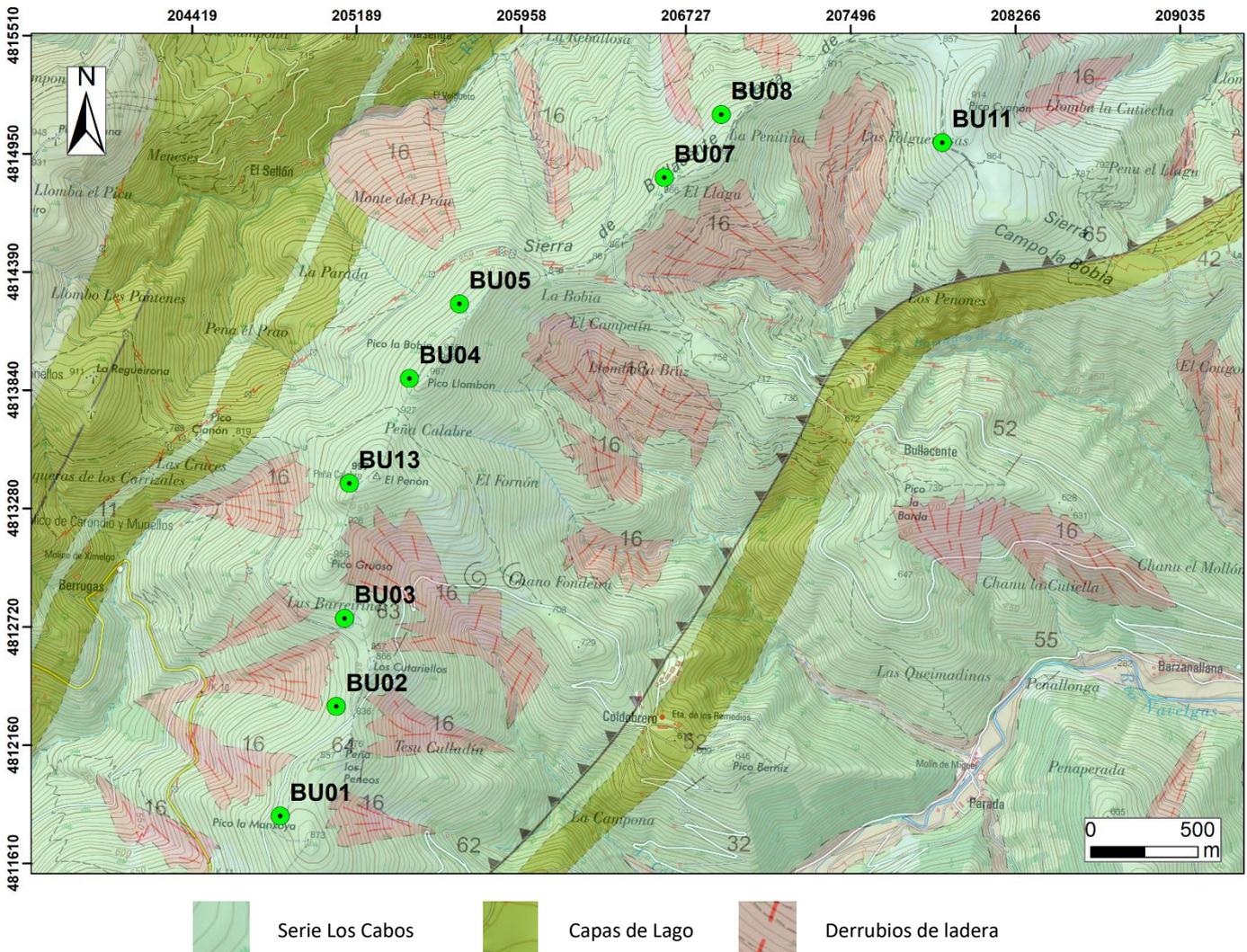


Figura 2.1. Mapa geológico de la zona de proyecto con la localización de los 10 aerogeneradores representados. Sistema de referencia topográfica: ETRS-89 29N. Fuente: topografía y geología tomada del visor del Instituto Geográfico Nacional Iberpix, consultado enero 2023.

La estructura de estas formaciones, que presentan una orientación NNE-SSO, fue adquirida principalmente durante las tres fases de deformación de la orogenia Varisca (Marcos, 1973) identificadas en esta zona, siendo retocada posteriormente durante la deformación alpina. Inicialmente se desarrollaron pliegues de escala cartográfica hasta estructuras a escala microscópica. En general, se trata de pliegues asimétricos, en ocasiones isoclinales y vergentes al Este, con una esquistosidad que presenta ángulos de inclinación entre 60° y 90° . En la segunda fase de deformación se originaron cabalgamientos que cortan a las estructuras formadas en la fase inicial y que adoptan un trazado NNE-SSO, más o menos paralelo a las estructuras de la primera fase. En torno a la superficie de cabalgamiento se asocian una serie de estructuras



menores, pliegues y esquistosidades de crenulación. La tercera fase de deformación da lugar a un replegamiento general, formando grandes estructuras de marcada asimetría, dando lugar a la alternancia de zonas donde la esquistosidad se encuentra verticalizada y zonas donde se encuentra horizontalizada o basculada hacia el Este. Simultáneamente a esta deformación se produjo un metamorfismo regional de bajo grado. Sobre estos materiales aparecen formaciones superficiales, principalmente constituidas por derrubios de ladera, con escasa matriz y de distribución y espesor muy variable.

Desde un punto de vista hidrogeológico, las cuarcitas, areniscas y pizarras son prácticamente impermeables a escala de roca matriz, con lo cual la permeabilidad se restringe a la red de fracturación que las afecta y a su grado de alteración. Respecto a las formaciones superficiales, estos se comportan como acuíferos libres cuyas características están ligadas a la naturaleza de los propios depósitos.

3. CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DEL TERRENO

La caracterización geotécnica del terreno de apoyo de los aerogeneradores se llevó a cabo a partir de una campaña de prospección que conllevó la realización de estaciones geomecánicas en los afloramientos más próximos a la ubicación de cada emplazamiento proyectado y en la realización de sondeos a rotación con extracción de testigo de 15 m de profundidad en los mismos. Estos sondeos fueron equipados posteriormente con tubería piezométrica para la medida del nivel freático. Asimismo, se llevaron a cabo estudios geofísicos de resistividad del terreno y estudios combinados de tomografía sísmica – MASW. En el trazado proyectado de los viales del parque se llevaron a cabo, asimismo, calicatas mediante retroexcavadora mixta con profundidades máximas de 1,3 m. En la figura 3.1 se muestran las ubicaciones de los estudios de prospección y ensayos realizados *in situ*.

A partir de muestras tomadas en sondeos y calicatas se realizaron en el laboratorio ensayos de identificación de los suelos (granulometría, límites de Atterberg, densidad seca, humedad y peso específico), ensayos químicos para determinar la agresividad del terreno (contenido en sulfatos, acidez Bauman Gully, contenido en sales solubles, contenido en materia orgánica), ensayos de resistencia y deformación sobre las rocas (resistencia a compresión uniaxial y ensayo de carga puntual) y ensayos de compactación (Proctor normal y CBR).

A partir de toda esta información se llevó a cabo la identificación y caracterización de dos unidades geotécnicas:



- Unidad 1 (NG1). Nivel superior de alteración del sustrato rocoso de espesor variable (entre 2 y 7 m, aunque su espesor medio es de 2 m). Se trata de suelos limo-arenosos, con gravas, cantos y bloques, generalmente de compacidad densa, que en afloramiento muestran tonos claros blanquecinos y beige.
- Unidad 2 (NG2). Sustrato rocoso conformado por cuarcitas e intercalaciones de pizarras, que muestra una intensa fracturación, incluso brechificada en algunos tramos. El grado de meteorización oscila en torno a valores II-III. En general, presenta un tono claro en el caso de las cuarcitas que se torna más gris en pizarras y anaranjado por oxidación en algunas zonas.

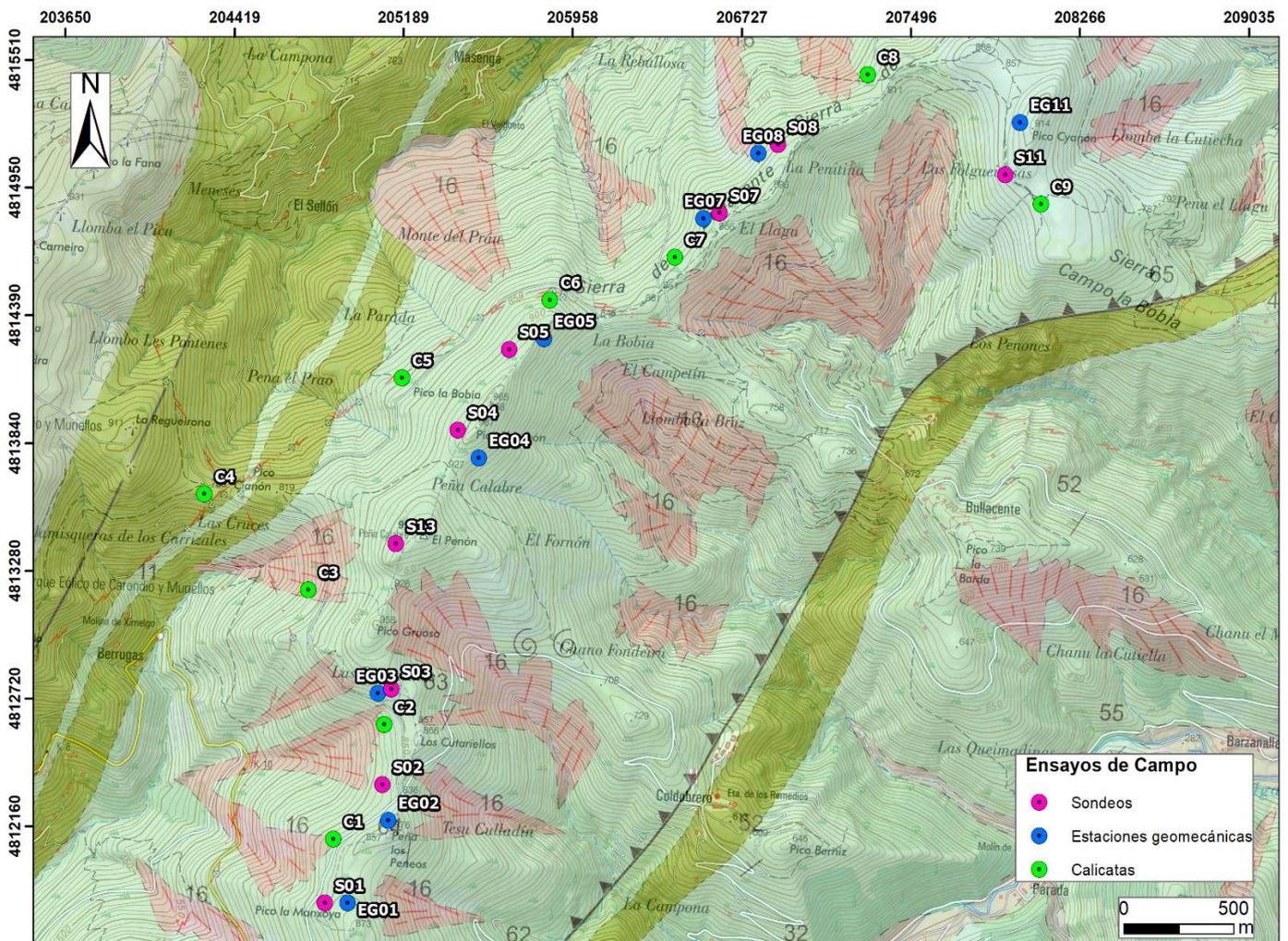


Figura 3.1. Mapa geológico de la zona de proyecto con la localización de los ensayos geotécnicos de campo. Sistema de referencia topográfica: ETRS-89 29N. Fuente: topografía y geología tomada del visor del Instituto Geográfico Nacional Iberpix, consultado enero 2023.



Tabla 3.1. Parámetros geotécnicos y geomecánicos de los niveles geotécnicos 1 y 2.

NG1						
Densidad aparente (kN/m ³)	Cohesión efectiva (kPa)	Angulo de rozamiento (°)	Cohesión no drenada (kPa)	N _{SPT}	Coficiente de Poisson	Módulo de deformación (MPa)
21	20	35	20	>50 – Rechazo	0.3	56,2

NG2										
RQD	RMR	RCU	N _{SPT}	Densidad aparente (kN/m ³)	Cohesión efectiva (kPa)	Angulo de rozamiento (°)	Coficiente de Poisson	Módulo de deformación (MPa)	Módulo elástico (GPa)	Presión admisible (MPa)
10	50	6	R	25	300	20	0.30	5.700	1	2,15

4. METODOLOGÍA DE CÁLCULO DE CIMENTACIONES

En este tipo de proyectos, el promotor del proyecto establece durante el proceso de licitación unos criterios generales y particulares de mínimo cumplimiento proporcionando la información para que el Contratista valore la elaboración del proyecto en EPC (*Engineering, Procurement and Construction*). Por lo tanto, es objeto del contratista desarrollar una optimización técnico-económica, diseñando el BOQ (*Bill Of Quantities*) del parque eólico y definiendo la tipología de construcción, entre ellos la cimentación de los aerogeneradores.

En este contexto, este TFM aborda el estudio previo de dos alternativas de cimentación en función de las condiciones geotécnicas de implantación de los aerogeneradores. Así, se parte de dos tipologías preestablecidas de cimentación, directa y anclada, y en función de los cálculos, los criterios de seguridad y la valoración económica se definirá la cimentación más adecuada para las características de este proyecto.

Marco legal

Como base para este estudio es necesario considerar las consideraciones contempladas en la siguiente normativa, dado que no existe una específica para el diseño de cimentaciones de aerogeneradores.



- Documento Básico SE-C: Seguridad estructural en Cimientos del Código Técnico de la Edificación.
- Eurocódigo 7.
- Guía para el diseño y ejecución de anclajes al terreno.
- EHE-08: Instrucción de Hormigón Estructural.
- Norma de Construcción Sismorresistente (NCSE-02).

Mediante el análisis de las citadas hipótesis de diseño se determinará la seguridad estructural, la capacidad portante y la aptitud de servicio de las cimentaciones. Según la EHE-08 los requisitos que deben cumplir las estructuras de hormigón deberán ser idóneas para su uso durante toda su vida útil para la que se construye, con el fin de garantizar la seguridad de las personas, los animales y los bienes, el bienestar de la sociedad y la protección al medio ambiente, por lo que el diseño deberá satisfacer los siguientes requisitos:

- Seguridad y funcionalidad estructural, reduciendo a límites aceptables el comportamiento mecánico frente a las acciones a las que pueda estar sometidas durante la construcción y su vida útil prevista.
- Seguridad en caso de incendio, reduciendo a límites aceptables el comportamiento de la estructura en caso de incendio, sin poner en riesgo a los seres vivos.
- Higiene, salud y protección del medio ambiente, reduciendo a límites aceptables los riesgos derivados de la ejecución de las obras.

Definición de acciones

En este TFM se va a abordar una comprobación estructural, partiendo de una situación de proyecto en la que se consideran cimentaciones ligadas a situaciones persistentes, correspondientes a las condiciones de uso normal de la estructura proyectada y, partiendo de dos casos de estudio, se realizarán diferentes cálculos en función del diseño de la cimentación:

- Cimentación directa: para cada aerogenerador se diseña una cimentación de tipo aislada superficial y con la carga centrada, directamente ejecutada sobre el terreno (Fig. 4.1).

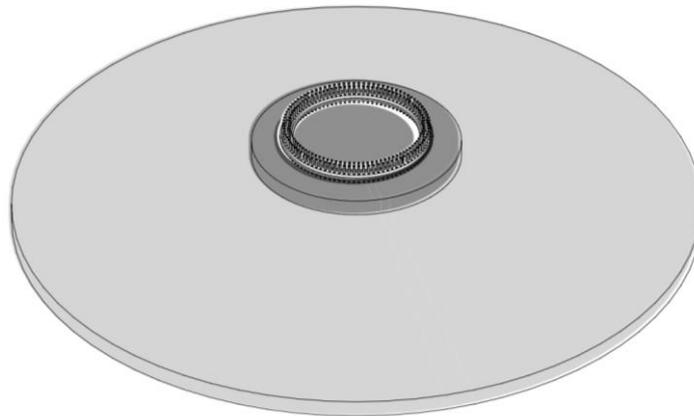


Figura 4.1. Esquema de cimentación directa de un aerogenerador.

- Cimentación anclada o profunda: para cada aerogenerador se diseña una cimentación de tipo aislada semi superficial, con la carga centrada, la cual se repartirá mediante anclajes en el sustrato rocoso a una profundidad en torno a 12 metros de profundidad (Fig. 4.2).

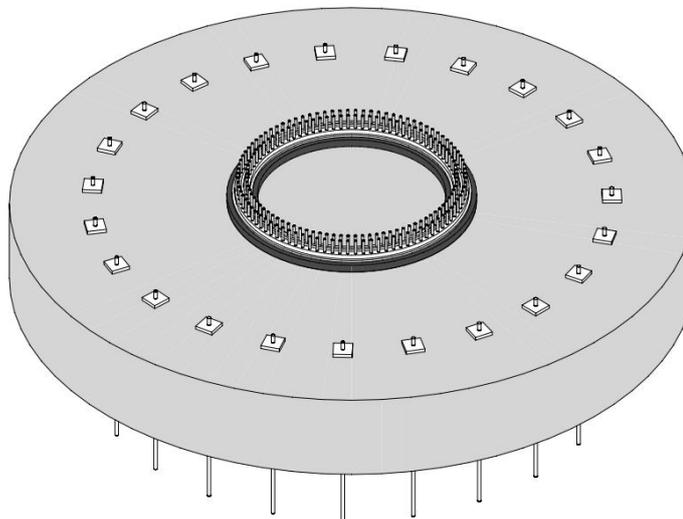


Figura 4.2. Esquema de cimentación anclada de un aerogenerador.

Se analizarán estos dos tipos de cimentaciones con el fin de comprobar la viabilidad de ambos, de manera que el contratista pueda escoger entre un tipo u otro para el proceso constructivo. La decisión de optar por un tipo u otro de cimentación de aerogenerador ha de estar determinada por una optimización en la ejecución, de manera que se ajusten en todo lo posible los costes de construcción, además de conseguir



una optimización en los aspectos técnicos, sociales y medioambientales. La viabilidad de ambos procedimientos constructivos es un factor fundamental, dado que los diferentes condicionantes pueden a su vez afectar a la viabilidad del proyecto y a los costes constructivos asociados, definidos por varios factores, entre los cuales se pueden citar los siguientes:

- El volumen de excavación y el tipo de terreno a excavar determinan los tiempos de excavación, el tipo y número de maquinaria a utilizar y el desgaste de los útiles de perforación.
- El volumen de hormigón y acero de la cimentación, definido por el transporte y manejo de ambos. Teniendo en cuenta el tránsito de cubas de hormigón y camiones pesados en el entorno de la obra, en zonas de orografía accidentada. Además, el manejo de mayor o menor volumen de material determina la duración de los trabajos.
- En caso de épocas extremas de temperaturas frías o cálidas, se debe tener en cuenta la afección de trabajar en condiciones límite y, también por el comportamiento de los materiales en tales condiciones.

En ambos casos las acciones consideradas para el predimensionado de las cimentaciones son las siguientes:

- Acciones permanentes: peso propio del aerogenerador, peso propio de la cimentación y peso del relleno de tierras sobre la cimentación.
- Acciones permanentes no constantes: empujes del terreno.
- Acciones variables: cargas debidas a la acción del viento

Detallándose a continuación los métodos de análisis para cada tipo de cimentación.

a. Cimentación directa

Para asegurar la fiabilidad requerida en el caso de la cimentación directa se realizarán los cálculos de verificación aplicando el método directo (Fig. 4.3), sistema de cálculo que trata de verificar de forma independiente cada estado límite de acuerdo con lo establecido en el Eurocódigo 7. Se partirá de una hipótesis de dimensionado, de los valores mínimos de estabilidad aportados por los datos del estudio geotécnico y, las cargas a aplicar definidas por el fabricante de los aerogeneradores.



Figura 4.3. Secuencia de comprobaciones para el dimensionamiento de cimentaciones superficiales por el método directo.

Los estados límite se definen como aquellas situaciones para las que, si se superan, la estructura no cumple algunas de las funciones para las que ha sido proyectada. El procedimiento de cálculo, para un cierto estado límite consiste en comprobar por un lado el efecto de las acciones aplicadas a la estructura o parte de ella y por otro lado la respuesta de la estructura para la situación límite en estudio. Garantizando de esta manera que se cumple el estado límite si se verifica que la respuesta estructural no es inferior a las acciones aplicadas, con un índice de fiabilidad suficiente.

Para el caso de cimentaciones superficiales se deberán verificar los siguientes estados límite:

- Verificaciones del *Estado Límite Último (ELU) de estabilidad global*. En este caso se tiene en cuenta la interacción terreno-estructura, valorando la posibilidad de fallo de manera que los esfuerzos generados por las sollicitaciones superen la capacidad resistente del terreno, produciendo una superficie de rotura (Fig. 4.4).

El ELU de estabilidad global queda comprobado cuando se verifica lo siguiente:

$$E_d \leq R_d$$

Siendo E_d el valor de cálculo de los efectos de las acciones que dan lugar a la inestabilidad y R_d el valor de cálculo de la resistencia correspondiente. Teniendo en cuenta las acciones propias del proyecto.

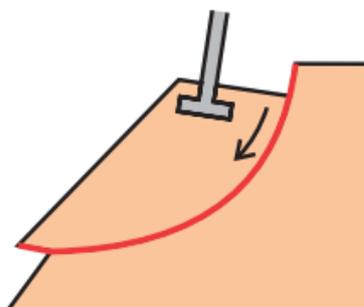


Figura 4.4. Ejemplo de fallo por pérdida de estabilidad global.

Fuente: Eurocódigo 7: Cimentaciones superficiales.

- Verificación del *ELU de resistencia al hundimiento*. En este caso se debe verificar el cimiento frente al modo de fallo de hundimiento, lo que implica la rotura del terreno sin que se produzca la rotura estructural del propio cimiento (Fig. 4.5).

El ELU de hundimiento queda comprobado cuando se verifica lo siguiente:

$$V_d \leq R_d$$

Siendo V_d el valor de cálculo de la fuerza vertical transmitida al terreno y R_d el valor de cálculo de la resistencia al hundimiento frente a cargas normales al mismo. En este trabajo, en base a los datos geotécnicos, se realizará un análisis de cimentación en condición drenada, por lo que no existe subpresión hidrostática, por tanto, la carga vertical se determinará en términos de presiones efectivas teniendo en cuenta las acciones propias del proyecto.

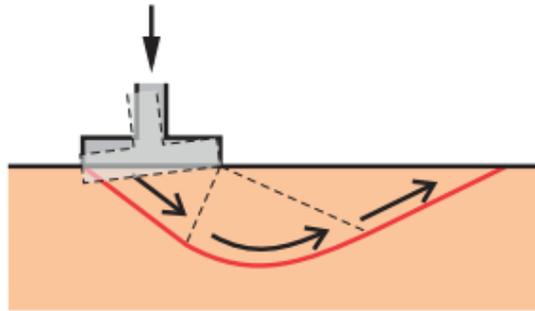


Figura 4.5. Ejemplo de fallo por hundimiento.
Fuente: Eurocódigo 7: Cimentaciones superficiales.

- Verificación del *ELU de resistencia al deslizamiento*. Este tipo de verificación se debe hacer cuando la cimentación esté sometida a cargas cuya resultante no sea normal al plano de cimentación, por lo que se debe verificar el fallo por deslizamiento en dicho plano (Fig. 4.6).

El ELU de deslizamiento queda comprobado cuando se verifica lo siguiente:

$$H_d \leq R_d + R_{p,d}$$

Siendo H_d el valor de cálculo de la fuerza horizontal aplicada sobre la cimentación, incluyendo los empujes activos que puedan actuar sobre la misma, R_d el valor de cálculo de la resistencia frente al deslizamiento en el contacto entre el cemento y el terreno y $R_{p,d}$ el valor de cálculo del empuje pasivo movilizado en el plano vertical que pasa al borde de la cimentación. Teniendo en cuenta las acciones propias del proyecto. Para el caso de cimentaciones en condiciones drenadas no se tendrá en cuenta la cohesión del terreno.

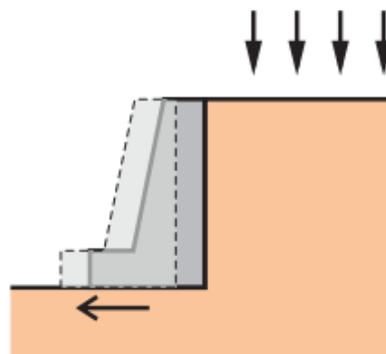


Figura 4.6. Ejemplo de fallo estructural por deslizamiento.
Fuente: Eurocódigo 7: Cimentaciones superficiales.

- Verificaciones de *asientos mediante el Estado Límite de Servicio (ELS)*, correspondiente a los criterios de tolerancia aplicables al uso normal (Fig. 4.7). En caso de que los ELS sean excedidos, puede dar lugar a una pérdida en la funcionalidad para la cual fue diseñada la cimentación. Para evitar alcanzar el ELS, el valor de cálculo de las acciones debe ser menor que el valor límite aceptable para ese efecto.

El ELS queda comprobado cuando se verifica lo siguiente:

$$E_d \leq C_d$$

Siendo E_d el valor de cálculo del efecto de las acciones de proyecto y C_d el valor límite para el cual se estima que la estructura que soporta la cimentación no alcance un fallo estructural.

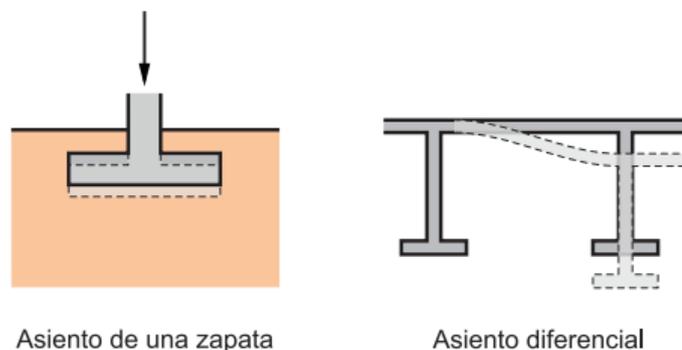


Figura 4.7. Ejemplo de asentamientos por exceso de límite de servicio.

Fuente: Eurocódigo 7: Bases del proyecto geotécnico.

- Verificación *estructural del elemento de cimentación ELU y ELS*. En esta verificación se tendrá en cuenta el concepto de rigidez relativa, la cual tiene relación entre la deformabilidad del cimiento y la del terreno de apoyo. Esto afecta en la distribución de tensiones en el plano de cimentación y consecuentemente a la distribución de los asentamientos.

Para el cálculo de las verificaciones de los estados límites, desarrolladas en el capítulo de resultados se utilizarán modelos de cálculo analíticos.



b. Cimentación anclada

Para asegurar la fiabilidad requerida en el caso de la cimentación anclada se realizarán los cálculos recurriendo a un modelo de elementos finitos, partiendo de una geometría, de unos materiales predefinidos, de los valores mínimos de estabilidad aportados por los datos del estudio geotécnico y del tipo de aerogenerador y sus cargas definidas por el fabricante.

El método de elementos finitos trata de ensayar las estructuras como elementos de naturaleza continua. Un medio continuo tiene infinitas formas de deformarse, independientes unas de otras, ya que cada punto puede desplazarse manteniendo fijos cualquier número finito de puntos restantes, resultando una función vectorial con tres componentes escalares, que se caracterizan como una respuesta espacial en 3D (Fig. 4.8).

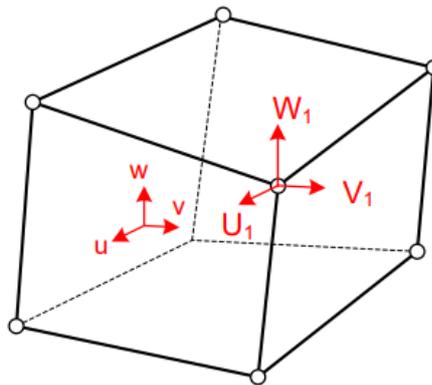


Figura 4.8. Ejemplo de un elemento finito de 8 nudos y descomposición vectorial de uno de ellos.

Fuente: Celigüeta, J.T. (2011) Tecnum.

Para resolver esta función vectorial el método de elementos finitos se basa en lo siguiente, el elemento continuo se divide mediante superficies imaginarias en una serie de regiones contiguas de geometría sencilla y normalizada, llamadas elementos finitos, los cuales se unen entre sí en número finitos de puntos, llamados nudos. Los desplazamientos de estos nudos se consideran independientes y son los que determinan la deformación de la estructura. Por lo tanto, estos desplazamientos son las incógnitas del cálculo.

En cada nudo existe un sistema de fuerzas que equilibran las tensiones existentes en el entorno del elemento y las fuerzas exteriores sobre él actuantes. Este conjunto de fuerzas aporta un número finito de valores, los cuales configuran los cálculos del elemento.



Este cálculo a partir de elementos finitos para el caso de la cimentación anclada en roca, se desarrolla a partir del software ANSYS, basándose en cuatro etapas:

- Pre-procesamiento: se introducen los datos de partida del problema, definiendo una malla modelo. Estos datos son la geometría definida, las propiedades de los materiales, el tipo de análisis, el mallado, las cargas y las condiciones de contorno.
- Procesamiento: sobre esta malla se realiza una combinación de cargas aplicadas, por un lado, las cargas gravitacionales del peso propio de la cimentación y la torre del aerogenerador, las cargas del viento en la base de la torre y por otro lado las cargas de tesado de los anclajes. Estas cargas de tesado corresponden a la carga al inicio de la vida útil de la cimentación tomando dos valores de pretensado, el máximo y el mínimo.
- Solución: se ejecuta el conjunto de parámetros establecidos y de manera automática se generan los resultados.
- Post-procesamiento: se muestran de manera gráfica los resultados obtenidos.

La verificación de la cimentación se obtiene con el análisis del resultado de los siguientes cálculos:

- Rigidez (ELS): se establece la rigidez mínima de la cimentación, se verifica la rigidez rotacional dinámica de la cimentación por medio del modelo numérico, obteniendo el grado de utilización (DOU). Para este cálculo se tendrá en cuenta el desplazamiento vertical máximo de la brida de la torre.
- Despegue (ELS y ELU): se comprueba el contacto losa-roca para definir el despegue en los casos de cargas quasi-permanentes y para el caso del estado límite último.
- Capacidad resistente de la roca (ELU): se comprueba en el modelo numérico si la presión elástica local máxima sobre el suelo es inferior a la capacidad portante esperada de la roca. Para el caso de cargas extremas normales y anormales.
- Resistencia a tracción de los anclajes en roca (ELU): mediante la combinación de cargas y comprobando los esfuerzos de compresión se determinará la resistencia característica a tracción de los anclajes definidos.



- Resistencia de adherencia del mortero (ELU): en función del diámetro del taladro, la longitud del anclaje y la adherencia resistente de diseño se definirá si son suficientes para garantizar que los esfuerzos creados entre la roca y el mortero sean mayores que la carga última del anclaje.

La verificación de estos resultados definirá la fiabilidad de la ejecución de la cimentación tipo anclada.

5. RESULTADOS

A continuación, se exponen los resultados de los cálculos correspondientes a las dos alternativas de cimentación planteadas.

Cimentación directa

En primer lugar, se definen los datos de predimensionado y los de partida para el proceso de cálculo. En las tablas 5.1, 5.2, 5.3 y 5.4 se detallan los datos que definen la geometría y las mediciones de la cimentación, los datos de hipótesis de dimensionado, los datos de partida a partir del estudio geotécnico y los datos aportados por el fabricante del aerogenerador, los cuales serán utilizados para desarrollar los cálculos. Además, en la tabla 5.5 se detallan las cargas no mayoradas y los coeficientes de seguridad a aplicar según estudios previos, datos también aportados por el fabricante.



Tabla 5.1. Geometría y mediciones de predimensionado de la cimentación directa.

Geometría	Mediciones
Cimentación circular de diámetro = 19,7 m Canto variable desde 2,75 m en el centro hasta 0,5 m en el borde Diámetro de sección de anclaje del aerogenerador = 6 m Empotramiento mínimo en el terreno = 2,75 m Superficie cimentación = 304,81 m ² Volumen cimentación = 424,89 m ³	Hormigón HA-35 = 410 m ³ Hormigón HA-40 = 14 m ³ Acero B500S = 57.000 kg Excavación = 980 m ³ Relleno = 603 m ³

Tabla 5.2. Datos de hipótesis de partida para cimentación directa.

Hipótesis de dimensionado	
Densidad del hormigón armado = 2.50 t/m ³	Hormigón del pedestal C40
Densidad del material de relleno = 1.80 t/m ³	F _{ck} = 40 MPa
Acero B500S:	F _{cd} = 26,7 MPa
F _{yk} = 500 MPa	γ _c = 1,50
γ _s = 1,15	α _{cc} = 1,00
γ _{s,fat} = 1,15	Hormigón de la losa C35
f _{yd} = 435 MPa	F _{ck} = 35 MPa
	F _{cd} = 23.3 MPa

Tabla 5.3. Datos de partida para cimentación directa, aportados a partir del estudio geotécnico.

Base de la cimentación	Valores mínimos del terreno	Capacidad portante
Ángulo de fricción losa/suelo = 20° (valor conservador) Presión admisible de carga (SLS) = 0,300 MPa Nivel de agua subterránea: no aplica (N.A.)	K _{v,dyn} = 31 MPa/m K _{v,stat} = 10 MPa/m E _{dyn} = 169 MN/m ² G _{dyn} = 65 MN/m ² V = 0,30	σ _{Eff,adm} = 0,300 MPa σ _{Eff,max} = 0,233 MPa

Tabla 5.4. Datos de partida para cimentación directa, aportados por el fabricante del aerogenerador.

Cargas en la base de la torre
K _{φ,dyn} = 66.000 MN.m/rad Peso de la cimentación = 10.374,73 kN Peso del relleno = 6.718,74 kN



Tabla 5.5. Cargas no mayoradas en la base de la torre y coeficientes de seguridad.

Caso de Carga	Cargas no mayoradas				Coeficiente de seguridad			
	N (kN)	H (kN)	M (kNm)	Mz (kNm)	Viento	Torre+HA	Agua	Relleno
ELU-C	4.248	1.532	118.449	2.964	1,1	0,9	1	0,9
ELS-QP	4.259	610	49.629	3.087	1	1	1	1
ELS-C	3.899	1.193	83.341	2.656	1	1	1	1

A estos datos se le deben aplicar las cargas del peso de la cimentación, el peso del relleno superior, sumándolos y se mayoran multiplicando por los coeficientes de seguridad, obteniendo los resultados detallados en la tabla 5.6. Mediante ellos se puede obtener la excentricidad para cada estado límite (Ecc), aplicando la fórmula $Ecc = (M + Mz) / (N + H)$ y reflejando su valor en la misma tabla.

Tabla 5.6. Cargas mayoradas y cálculo de la excentricidad para cada estado límite.

Caso de Carga	Cargas mayoradas				
	N (kN)	H (kN)	M (kNm)	Mz (kNm)	Ecc (m)
ELU-C	21.341	1.532	122.955	2.964	5,50
ELS-QP	21.352	610	51.422	3.087	2,41
ELS-C	20.993	1.193	86.850	2.656	4,03

A partir de los datos de las excentricidades para cada estado límite se verifica su cumplimiento en base a la excentricidad mínima permisiva (E), según los datos recogidos en la tabla 5.7, obteniendo una verificación positiva para cada estado límite.

Tabla 5.7. Verificación de excentricidades para cada estado límite.

Caso de Carga	Verificación de excentricidades				
	Ecc (m)	E (m)	ELU-C	ELS-QP	ELS-C
ELU-C	5,50	< 5,80	Ok	-	-
ELS-QP	2,41	< 2,46	-	Ok	-
ELS-C	4,03	< 5,80	-	-	Ok



A partir de los datos de dimensionado de la cimentación, la capacidad portante del terreno aportada por el estudio geotécnico ($\sigma_{\text{Eff,adm}} = 0,300$ MPa) y los datos de la excentricidad, se verificará la capacidad portante para cada estado límite, según los cálculos detallados en la tabla 5.8.

Tabla 5.8. Verificación de la capacidad portante para cada estado límite.

Caso de Carga	A' (m ²)	B' (m)	L' (m)	H _d (kN)	V _d (kN)	E (m)	σ_{Eff} (MPa) Tensión efectiva	Check $\sigma_{\text{Eff}} < \sigma_{\text{Eff,adm}}$	% despegue
ELU-C	91,52	6,84	13,37	1.863	21.341	5,50	0,233	Ok	49,3
ELS-QP	210,87	12,82	16,45	999	21.352	2,41	0,101	Ok	0
ELS-C	146,73	9,68	15,15	1.493	20.993	4,03	0,143	Ok	22,1

Tomando como valor admisible aquellos porcentajes de despegue menores del 50 por ciento y con los datos detallados en las tablas 5.7 y 5.8 se comprueba que la cimentación directa cumple la verificación de la excentricidad y de la capacidad portante para cada estado límite.

Para realizar la verificación al deslizamiento se debe cumplir que $R_{h,d} / H_d > \gamma_{R,d}$, siendo $R_{h,d} = V_d \tan \delta$. Aplicando dicha fórmula se obtienen los datos detallados en la tabla 5.9, verificando que se cumple el criterio establecido.

Tabla 5.9. Verificación del deslizamiento para cada estado límite.

Caso de Carga	$\gamma_{R,d}$	R _{h,d} (kN)	H _d (kN)	R _{h,d} / H _d	Verificación
ELU-C	1,1	7.767	1.863	4,17	Ok
ELS-QP	1,5	7.771	999	7,78	Ok
ELS-C	1,3	7.640	1.493	5,12	Ok

Para comprobar la verificación al vuelco se debe cumplir que $M_{st,d} / M_{des,d} > \gamma_{R,d}$, siendo $M_{st,d} = V_d D/2$. Aplicando dicha fórmula se obtienen los datos detallados en la tabla 5.10, verificando que se cumple el criterio establecido.

Tabla 5.10. Verificación del vuelco para cada estado límite.

Caso de Carga	$\gamma_{R,d}$	M _{des,d} (kNm)	M _{st,d} (kNm)	M _{st,d} / M _{des,d}	Verificación
ELU-C	1,5	122.955	210.215	1,71	Ok
ELS-QP	2,0	51.422	210.322	4,09	Ok
ELS-C	1,8	86.850	206.781	2,38	Ok



Para comprobar la verificación de rigidez dinámica de la cimentación, a partir de los datos aportados por el fabricante de los aerogeneradores, se debe cumplir que $K_{\phi, dyn} > 66 \text{ MN.m/rad}$.

Aplicando la fórmula $K_{\phi, dyn} = G_{dyn} (D_{ext}^4 - D_{int}^4) / 3(1 - \nu) D_{ext}$ se comprueba si el resultado cumple el criterio establecido. Siendo D_{ext} el diámetro exterior de la cimentación (19,70m), D_{int} el diámetro interior de la cimentación (0m), G_{dyn} y ν los datos de partida aportados por el estudio geotécnico.

Introduciendo los datos en la fórmula se obtiene que $K_{\phi, dyn} \text{ min} = 236.082 \text{ MNm/rad}$, valor mayor que el dato de partida aportado por el fabricante de 660.000 MNm/rad. Por lo tanto, la verificación obtenida es óptima.

Con todos estos cálculos se determina que el prediseño de la cimentación directa sobre el sustrato rocoso cumple todas las verificaciones para los estados límites definidos mediante el método directo, siendo óptimo su desarrollo constructivo.

Cimentación anclada

En primer lugar, se definen los datos de predimensionado y los de partida para el proceso de cálculo. En las tablas 5.11, 5.12, 5.13 y 5.14 se detallan los datos que definen la geometría y las mediciones de la cimentación, los datos de hipótesis de dimensionado, los datos de partida aportados por el estudio geotécnico y las características de los materiales, los cuales serán utilizados para desarrollar los cálculos.

La geometría considerada para ejecutar el modelo numérico de elementos finitos se compone de los siguientes elementos estructurales: del tramo inferior de la torre y la brida, la placa de reparto, el mortero, la brida inferior, los pernos de anclaje de la torre, la losa de hormigón de la cimentación, los anclajes en roca y la roca que está en contacto con la cimentación.



Tabla 5.11. Geometría y mediciones de predimensionado de cimentación anclada.

Geometría	Mediciones
Cimentación circular de diámetro = 12,5 m Canto constante de 1,75 m Diámetro de sección de anclaje del aerogenerador = 5,5 m Empotramiento mínimo en el terreno = 1,75 m Superficie cimentación = 122,72 m ² Volumen cimentación = 214,76 m ³ 23 anclajes en roca de diámetro = 63,5 mm y longitud = 11,9 m	Hormigón HA-40 = 216 m ³ Acero B500S = 33.000 kg Excavación = 276 m ³ Relleno = 64 m ³ Anclajes de diámetro = 63,5 mm y longitud = 11,9 m

Tabla 5.12. Datos del terreno, según informe geotécnico.

Datos del terreno
Tensión admisible (valor característico) = 680 kPa Módulo de elasticidad = 1,0 GPa Adherencia roca-mortero = 1,2 MPa Nivel de agua subterránea: no aplica (N.A.)

Tabla 5.13. Datos de hipótesis de partida para cimentación anclada.

Hipótesis de dimensionado	
Densidad del hormigón armado = 2,50 t/m ³ Densidad del material de relleno = 1,80 t/m ³ Hormigón del pedestal C40 $F_{ck} = 40$ MPa Acero B500S $F_{yk} = 500$ MPa	Anclaje en roca 23 ud x d 63,5 mm S670/800 $F_{yk} = 670$ MPa $F_{pk} = 800$ MPa Diámetro de reparto = 9,5 m Fuerza de tesado después de pérdidas instantáneas = 1.650 kN/anclaje Longitud del bulbo adherente = 7 m Longitud total = 11,9 m Diámetro mínimo de perforación = 125 mm Área de la sección transversal de los pernos de anclaje, $A_p = 3.167$ mm ²

Todos los materiales se consideran lineales y elásticos, según las características detalladas en la tabla 5.14.

Tabla 5.14. Características de los materiales de cimentación anclada.

Materiales	Módulo de elasticidad (GPa)	Coefficiente de Poisson	Densidad (kN/m ³)
Acero (torre, bridas)	210	0,3	78,5
Hormigón de la losa $F_{ck} = 40$ MPa	35	0,2	25
Anclajes (torre y roca)	205	0,3	78,5
Roca	1	0,33	22



La malla adoptada en el modelo de elementos finitos se muestra en las figuras 5.1, 5.2 y 5.3.

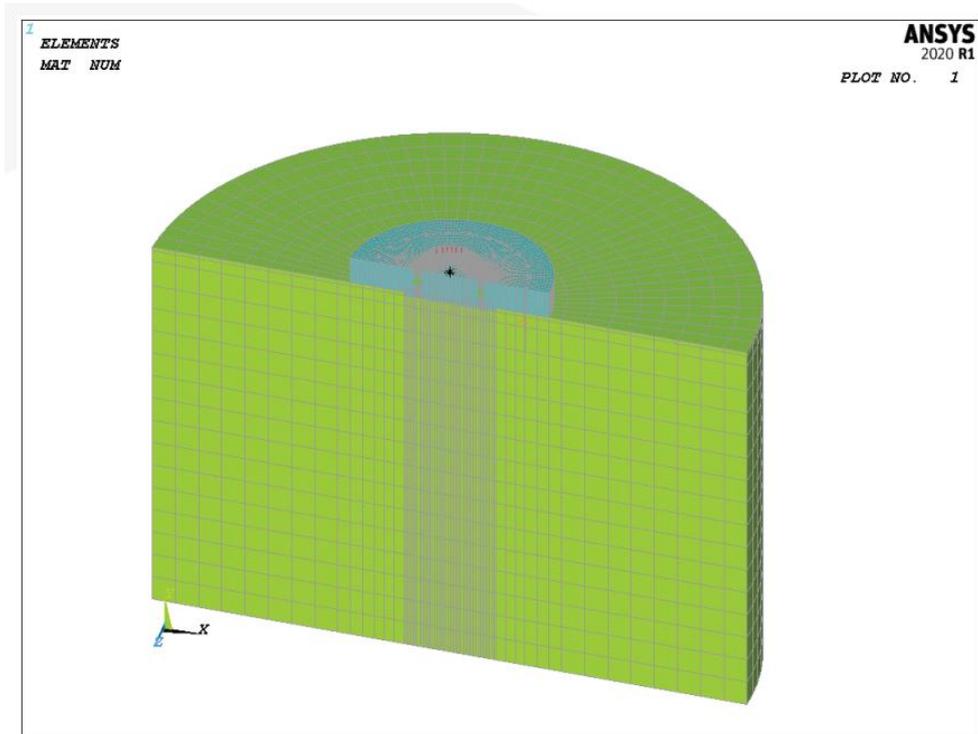


Figura 5.1. Modelo 3D de la malla del modelo de elementos finitos.

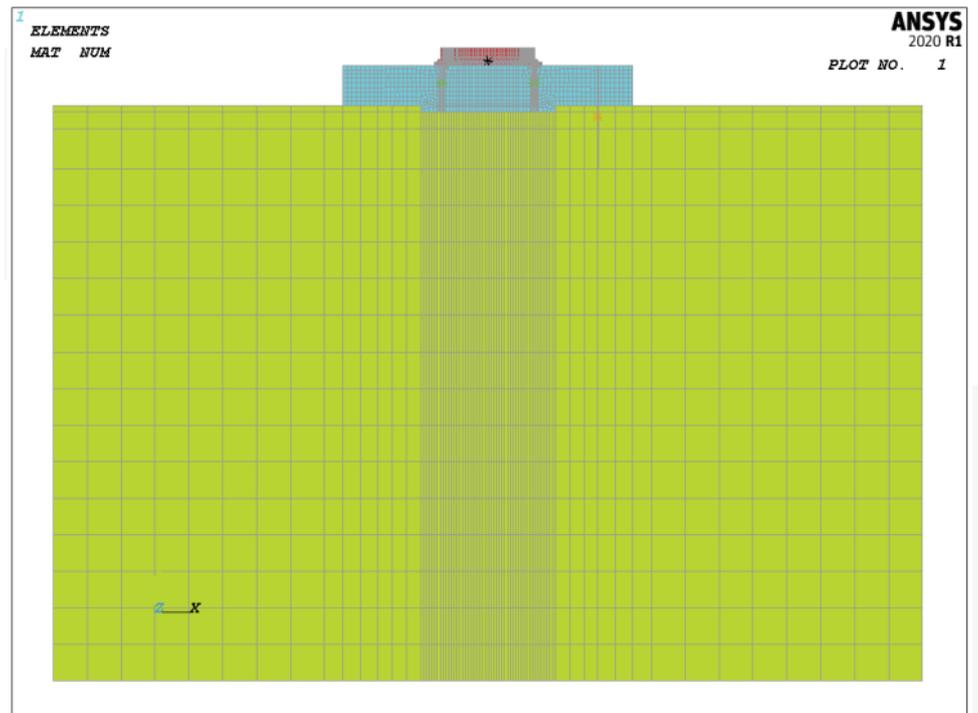


Figura 5.2. Sección de la malla del modelo de elementos finitos

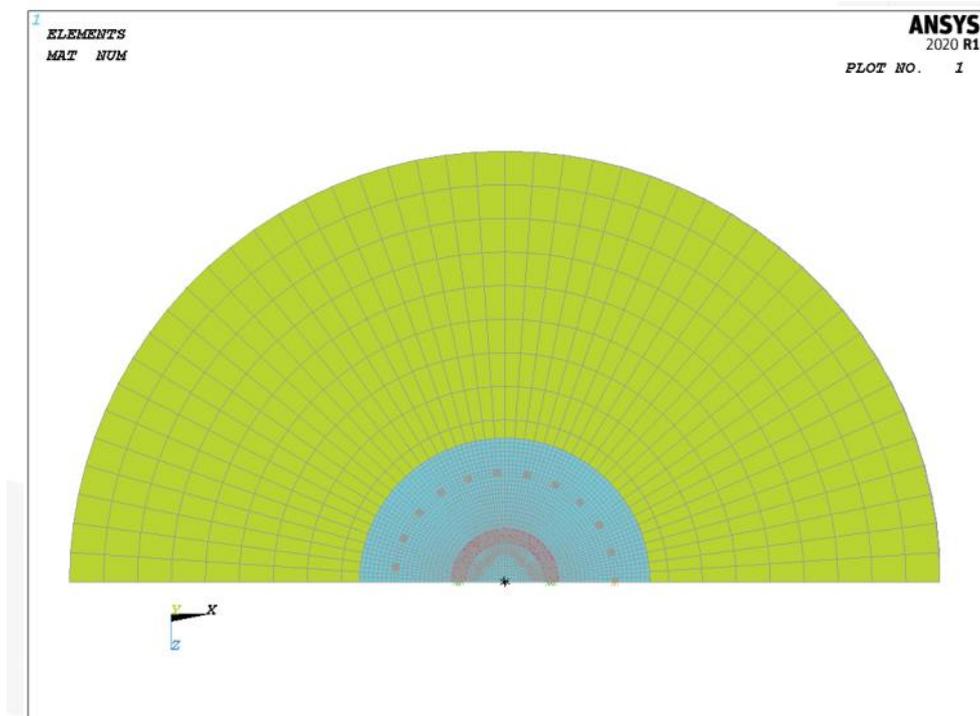


Figura 5.3. Planta de la malla del modelo de elementos finitos

En la tabla 5.15 se muestran las cargas de tesado mínimas para cada unidad de anclaje, correspondientes al inicio de la vida útil y aplicando unas pérdidas totales del 15 %.

Tabla 5.15. Cargas de tesado por cada anclaje.

Anclajes en roca	Fuerza de tesado (kN)
Pernos de la torre	365
Anclaje en roca	1.650

Para estudiar los casos de carga se realizan dos modelos, uno con el valor de pretensado máximo ($P_{\text{máx}}$) y otro el valor de pretensado mínimo ($P_{\text{mín}}$).

Para la combinación de cargas se tienen en cuenta dos casos de cargas, las cargas gravitacionales, el peso propio y la F_z de la torre y las fuerzas de tesado y, por otro lado, las cargas de viento en la base de la torre, la F_{res} , y los momentos M_z y M_{res} . En la tabla 5.16 se detallan los casos de cargas en la base de la torre.



Tabla 5.16. Cargas características en la base de la torre.

Casos de Carga	PLF	F _z (kN)	F _{res} (kN)	M _z (kNm)	M _{res} (kNm)
Extrema	1,35	3.899	1.156	2.656	83.371
Extrema anormal	1,10	4.248	1.532	2.964	118.449
Casi permanente	1,00	4.259	610	3.087	49.629
Fatiga Mi-50%	1,00	4.256	123	-3.282	12.324
Fatiga Mi+50%	1,00	4.424	581	3.441	44.170

Resultando la combinación de cargas detalladas en la tabla 5.17 con sus correspondientes coeficientes parciales de seguridad.

Tabla 5.17. Cargas características en la base de la torre y los coeficientes de seguridad.

Combinación	γ _G	γ _{wind}	F _z (kN)	F _{res} (kN)	M _z (kNm)	M _{res} (kNm)
ELS-QP	1,00	1,00	4.259	610	3.087	49.629
ELS-CARACT	1,00	1,00	3.899	1.193	2.656	83.341
ELU-N-CARACT	1,00	1,00	3.899	1.193	2.656	83.341
ELU-N1	0,90	1,35	3.509	1.611	3.585	112.511
ELU-N2	1,35	1,35	5.264	1.611	3.585	112.511
ELU-A-CARACT	1,00	1,00	4.248	1.532	2.964	118.449
ELU-A1	0,90	1,10	3.823	1.686	3.260	130.294
ELU-A2	1,10	1,10	4.673	1.686	3.260	130.294
FAT-media	1,00	1,00	4.340	352	79,94	28.247
FAT-rango	1,00	1,00	168	458	6.723	31.845
FAT-mín	1,00	1,00	4.256	123	-3.282	12.324
FAT-máx	1,00	1,00	4.424	581	3.441	44.170

Para la verificación de la rigidez (ELS) se comprueba, a partir del modelo numérico, la rotación de la brida midiendo su desplazamiento vertical, tanto en los casos de pretensado máximo como mínimo, comprobando si el grado de utilización (DOU) se cumple.

Partiendo de la rigidez mínima de la cimentación que viene definida por el fabricante, $K_{\phi, \text{dyn}} \text{ min} = 60$ GNm/rad y mediante el modelo numérico $K_{\phi, \text{dyn}} = M / \vartheta$, se verifica la rigidez rotacional dinámica de la cimentación.

A partir de estos datos se obtiene el grado de utilización, $\text{DOU} = K_{\phi, \text{dyn}} \text{ min} / K_{\phi, \text{dyn}}$. Representados en la tabla 5.18.



Tabla 5.18. Grado de utilización en función del desplazamiento vertical mínimo y máximo.

Combinación	M _{res} (m·kN)	U _{min} (mm)	U _{máx} (mm)	Θ (mrad)	K _{φ,dyn} (GNm/rad)	DOU
ELS-QP-P _{máx}	49.629	-6,22	-4,85	0,34	144,87	0,41
ELS-QP-P _{mín}	49.629	-6,15	-4,78	0,34	144,82	0,41

Según los cálculos se obtiene un valor del grado de utilización (DOU) admisible, verificando el cumplimiento de rigidez en el caso de la aplicación de cargas.

En las figuras 5.4 y 5.5 se representa el modelo de elementos finitos con el desplazamiento vertical de la brida de la torre, representado en metros, una vez aplicada la combinación de cargas al modelo para el caso de pretensado máximo y mínimo.

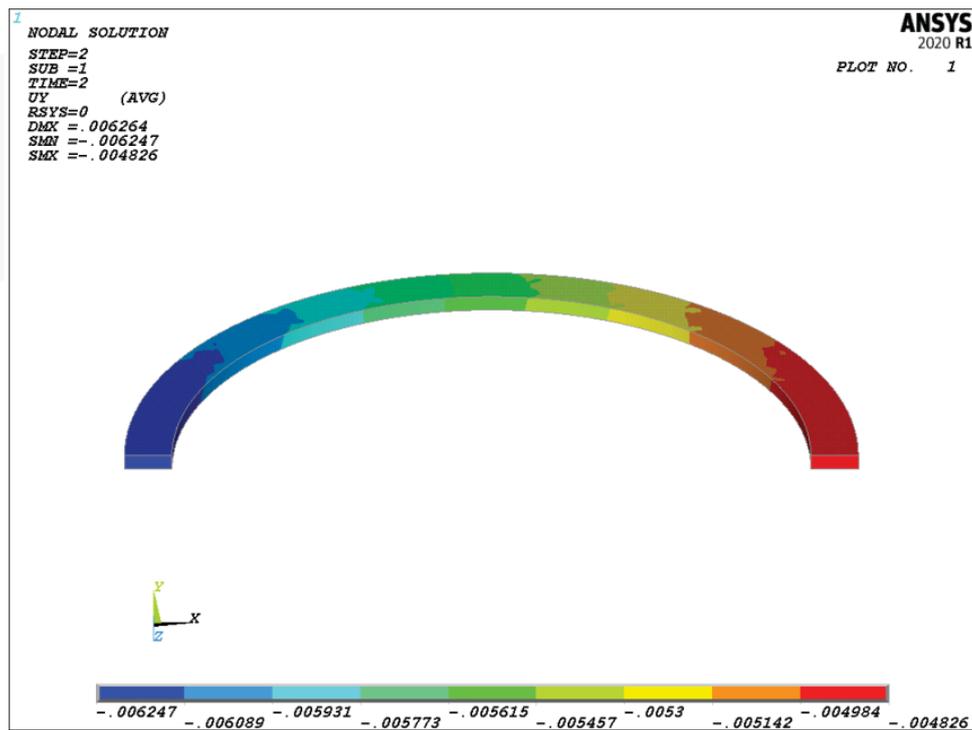


Figura 5.4. Desplazamiento vertical de la brida en metros, mediante la combinación de cargas de pretensado mínimo

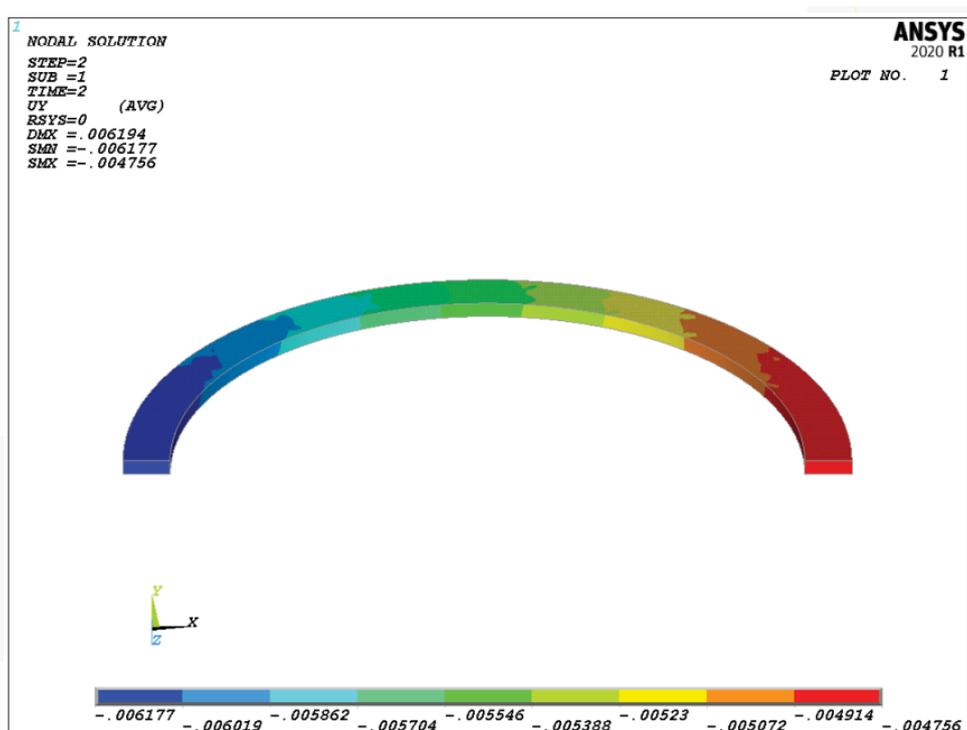


Figura 5.5. Desplazamiento vertical de la brida en metros, mediante la combinación de cargas de pretensado máximo

La verificación del despegue (ELS y ELU) se comprueba, por un lado, aplicando las cargas cuasi-permanentes (ELS-QP) para los casos de tensado máximo y mínimo y revisando el contacto entre la losa y la roca mediante las salidas gráficas del modelo, representadas en las figuras 5.6 y 5.7. Observando que casi todo el perímetro está en contacto con la roca, representado dicho contacto en color rojo, por lo tanto, no hay despegue.

Por otro lado, se comprueba aplicando las cargas en estado último (ELU) para los casos de tensado máximo y mínimo y se comprueba el contacto entre la losa y la roca mediante las salidas gráficas del modelo, representadas en las figuras 5.8 y 5.9. Observando como el área de despegue del área inferior de la losa no sobrepasa el 50 por ciento de la superficie, representando en color rojo el contacto y en color amarillo el despegue.

Por lo tanto, queda comprobado que la verificación al despegue al aplicar las cargas se cumple.

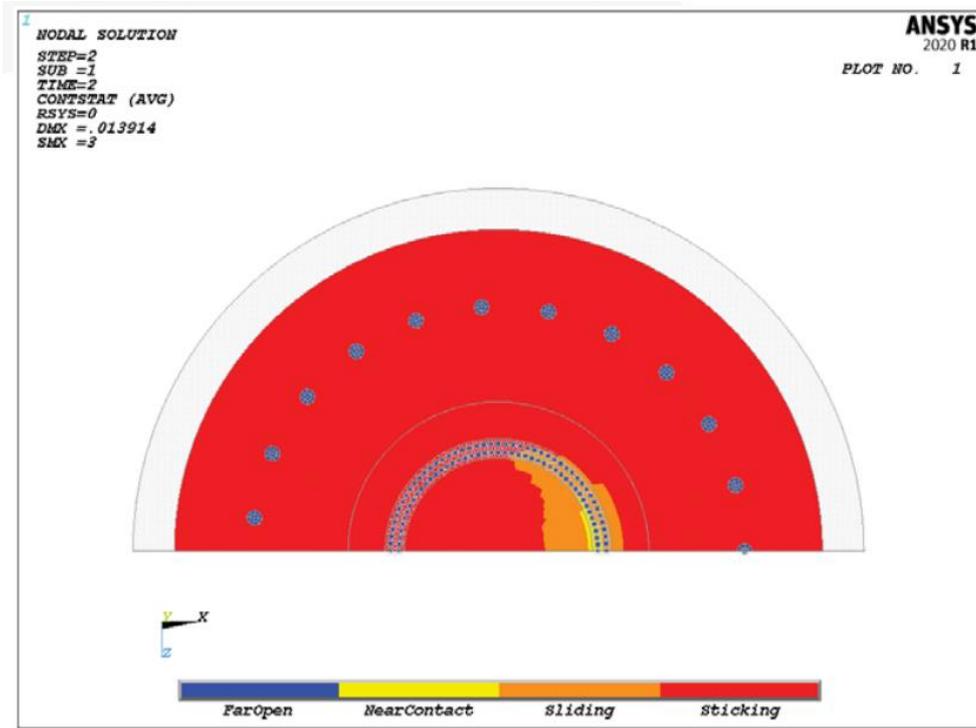


Figura 5.6. Vista en planta de la superficie de contacto losa-roca mediante la combinación de cargas ELS-QP de pretensado máximo, el color rojo representa el contacto.

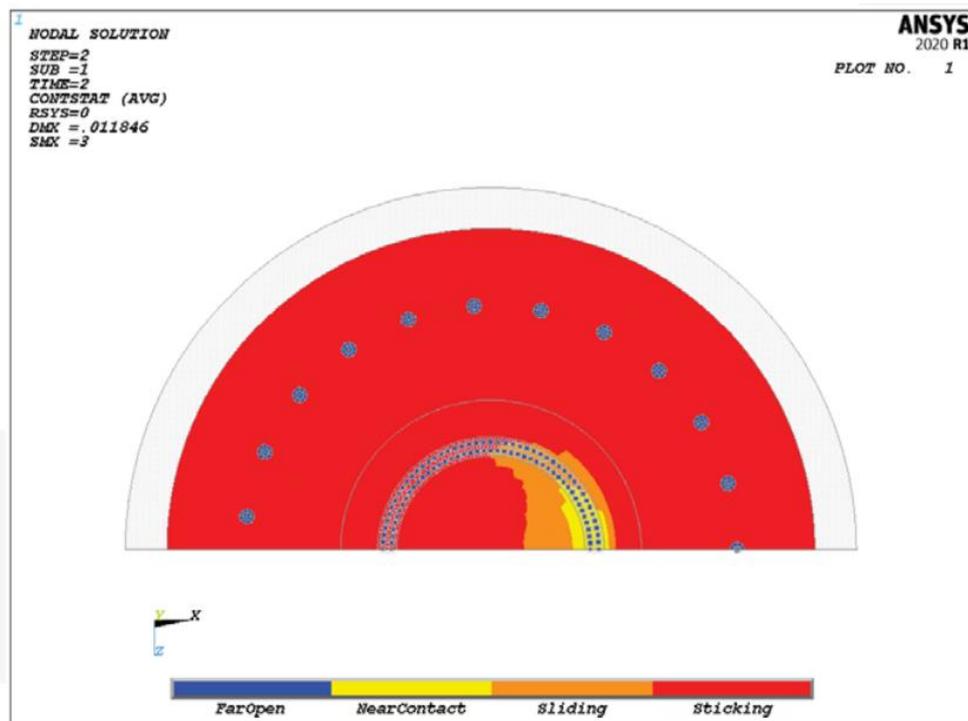


Figura 5.7. Vista en planta de la superficie de contacto losa-roca mediante la combinación de cargas de ELS-QP de pretensado mínimo, el color rojo representa el contacto.

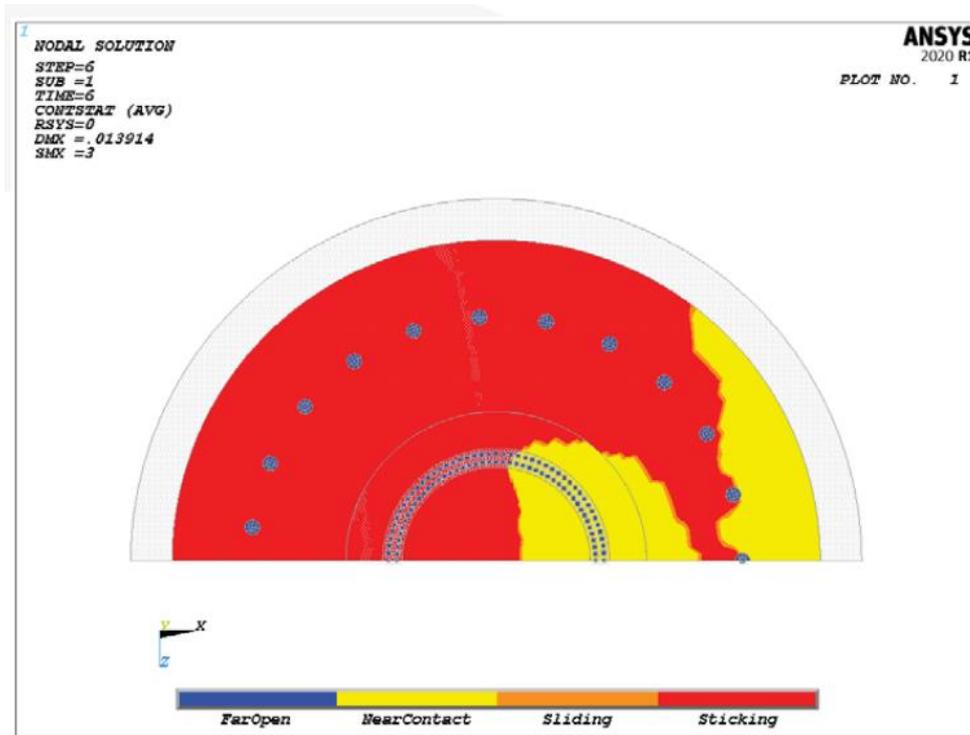


Figura 5.8. Vista en planta de la superficie de contacto losa-roca mediante la combinación de cargas ELU de pretensado máximo, el color rojo representa el contacto y el amarillo el despegue.

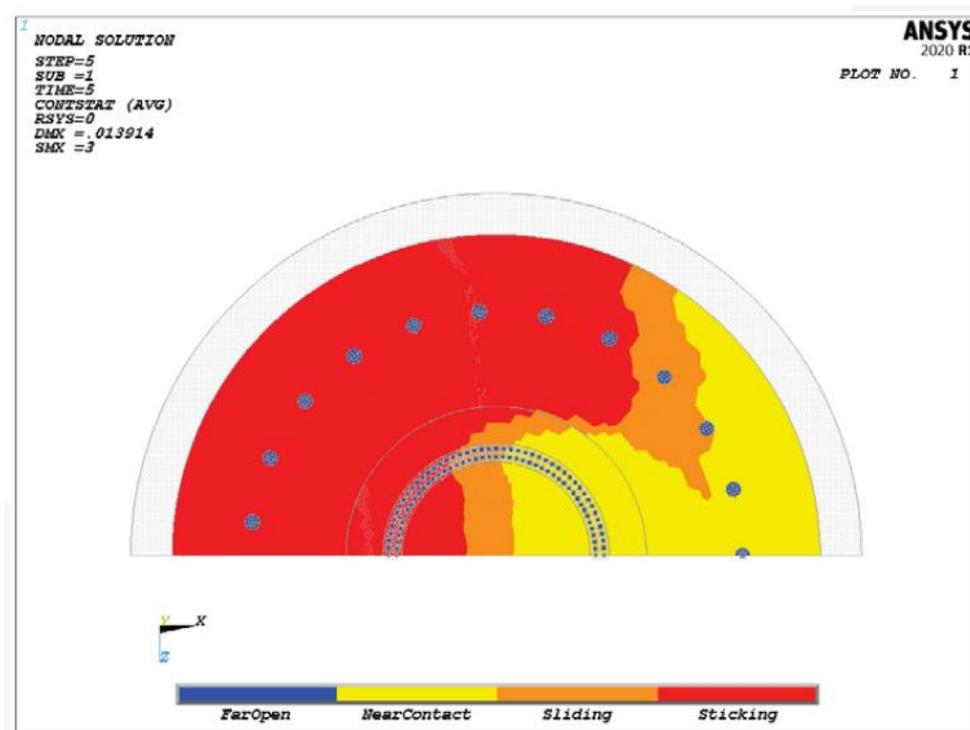


Figura 5.9. Vista en planta de la superficie de contacto losa-roca mediante la combinación de cargas ELU de pretensado mínimo, el color rojo representa el contacto y el amarillo el despegue.



Para la verificación de la capacidad resistente de la roca (ELU) se comprueba mediante las salidas gráficas del modelo y mediante el cálculo numérico aplicando la combinación de cargas normales y anormales en los casos de tensado máximo y mínimo, revisando que los esfuerzos de compresión verticales en la superficie de apoyo de la cimentación sean menores que la capacidad portante del terreno.

Para las cargas externas normales (ELU-N), se establece el límite máximo de las presiones elásticas según la fórmula $\sigma_{lim} = 1,30 \cdot \sigma_{adm}$. Y para las cargas externas anormales (ELU-A), se establece el límite máximo de las presiones elásticas según la fórmula $\sigma_{lim} = 1,33 \cdot 1,30 \cdot \sigma_{adm}$.

De manera que los resultados del modelo numérico, representados en la tabla 5.19, indican una verificación positiva de la capacidad resistente de la roca, puesto que la presión elástica local máxima aplicada sobre el suelo es inferior a la capacidad portante esperada de la roca. Representando las salidas gráficas del modelo en las figuras 5.10, 5.11, 5.12 y 5.13.

Tabla 5.19. Verificación de la capacidad resistente de la roca.

Combinación de cargas	$\sigma_{roca,adm}$ (kPa)	σ_{lim} (kPa)	Verificación
ELU-N-P _{máx}	775,66	884,00	SÍ
ELU-N-P _{min}	715,02	884,00	SÍ
ELU-A-P _{máx}	911,60	1175,72	SÍ
ELU-A-P _{min}	867,60	1175,72	SÍ

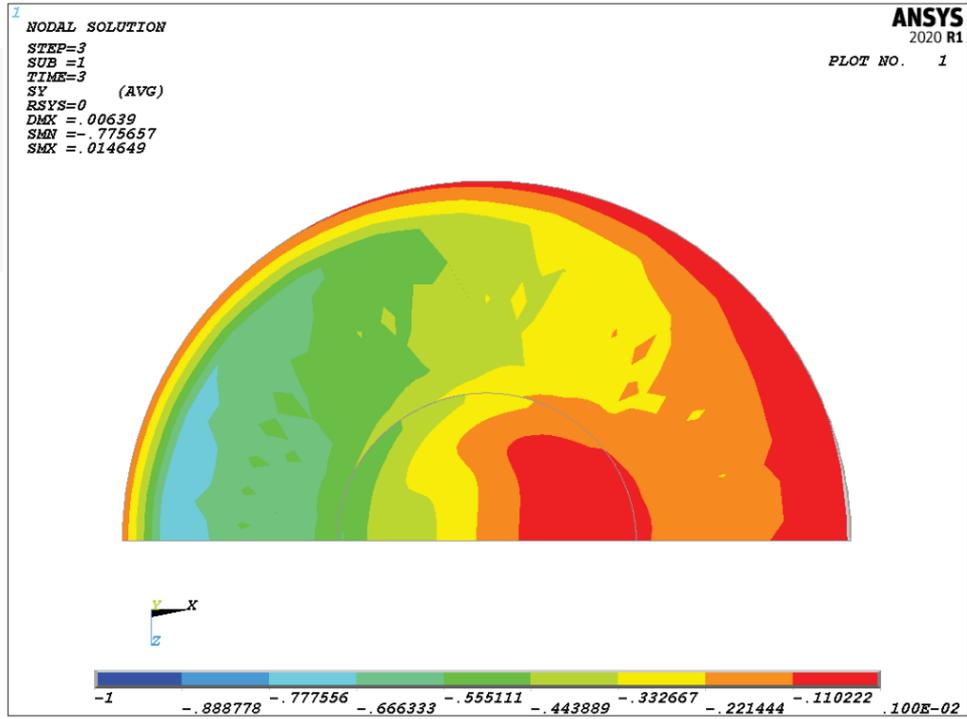


Figura 5.10. Vista en planta de la roca con los esfuerzos de compresión verticales en MPa, con la combinación de cargas ELU-N de pretensado máximo

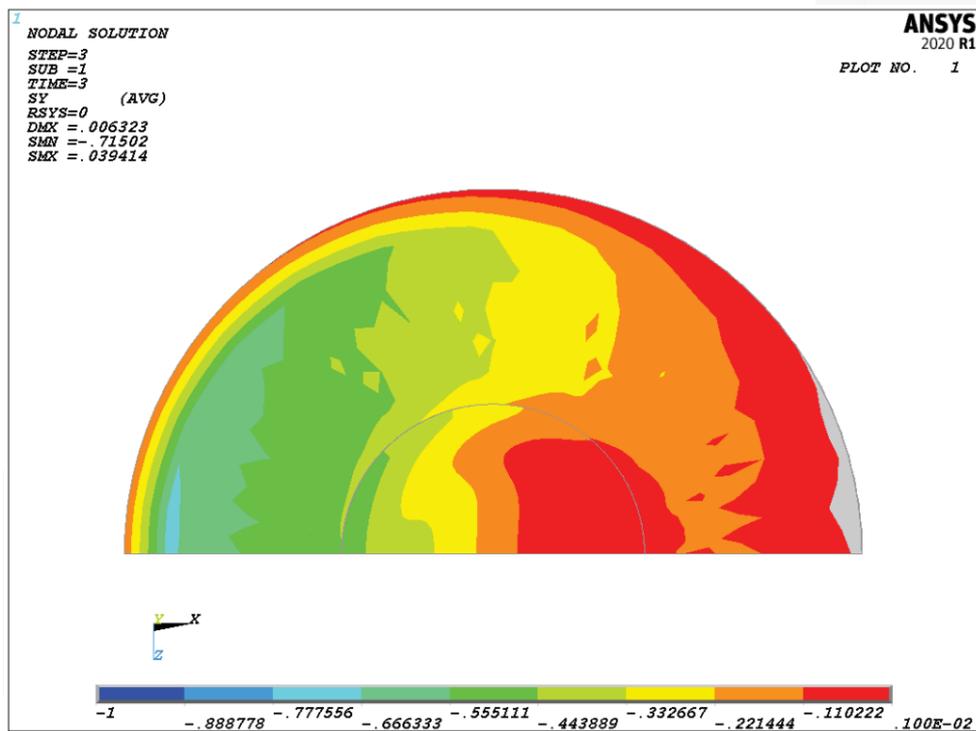


Figura 5.11. Vista en planta de la roca con los esfuerzos de compresión verticales en MPa, con la combinación de cargas ELU-N de pretensado mínimo

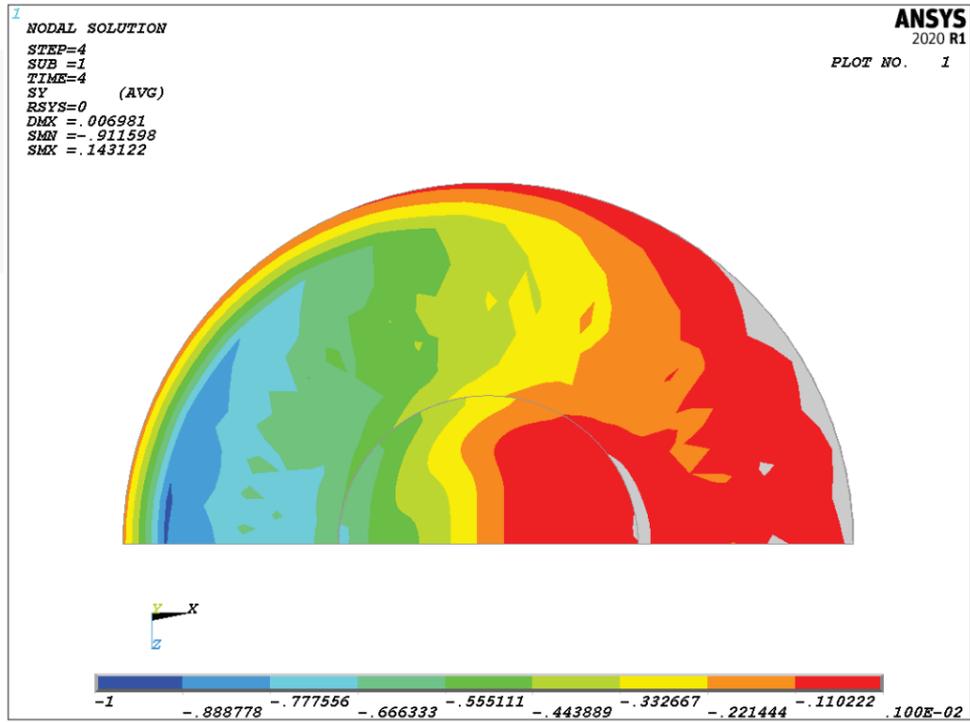


Figura 5.12. Vista en planta de la roca con los esfuerzos de compresión verticales en MPa, con la combinación de cargas ELU-A de pretensado máximo

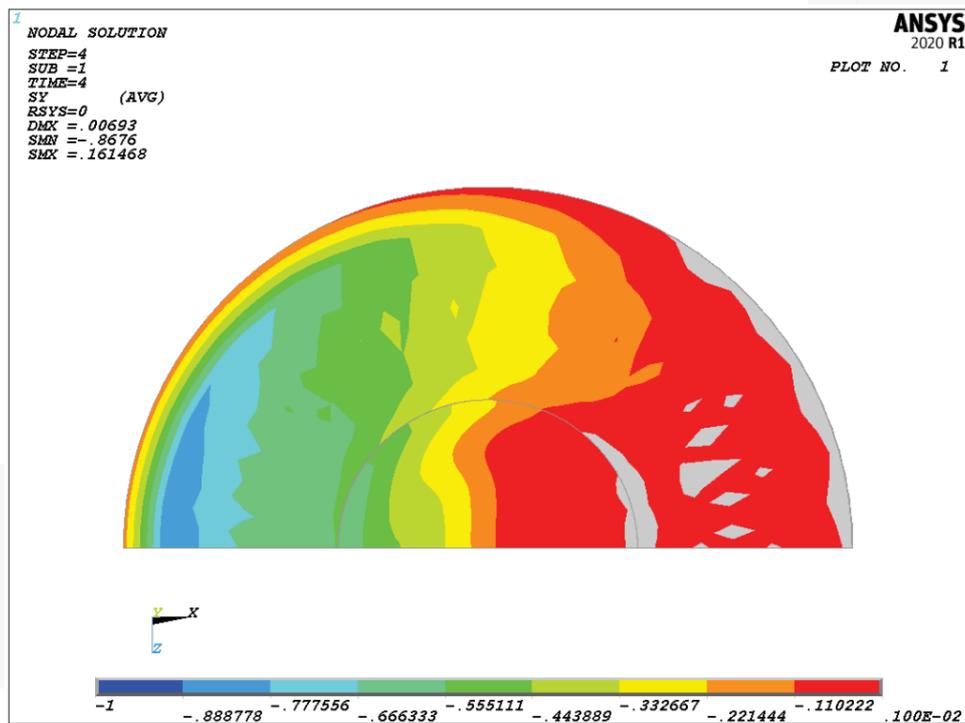


Figura 5.13. Vista en planta de la roca con los esfuerzos de compresión verticales en MPa, con la combinación de cargas ELU-A de pretensado mínimo.



La verificación de la resistencia a tracción de los anclajes en roca (ELU) se comprueba teniendo en cuenta las características de los anclajes en roca y a partir de los esfuerzos a compresión se determinará, mediante la combinación de cargas en los casos de tesado máximo y mínimo, la resistencia a tracción (P_{RD}). Cuyo valor viene definido por la fórmula $P_{RD} = \min (F_{yk} \cdot A_p/1,15, F_{pk} \cdot A_p/1,3) = 1.845 \text{ kN}$, comparando los datos se calcula el grado de utilización para cada estado de tensión, máximo y mínimo, valores representados en la tabla 5.20, resultando valores aceptables.

Tabla 5.20. Verificación del grado de utilización en función de la resistencia a tracción de los anclajes en roca.

Combinación de cargas	P_{max} (kN)	P_{RD} (kN)	DOU
ELU-A- $P_{m\acute{a}x}$	1.739	1.845	0,94
ELU-A- $P_{m\acute{i}n}$	1.549	1.845	0,84

En las figuras 5.14 y 5.15 se representan las salidas gráficas de los modelos de los esfuerzos de compresión de los anclajes en roca mediante la combinación de cargas en los casos de tensado máximo y mínimo.

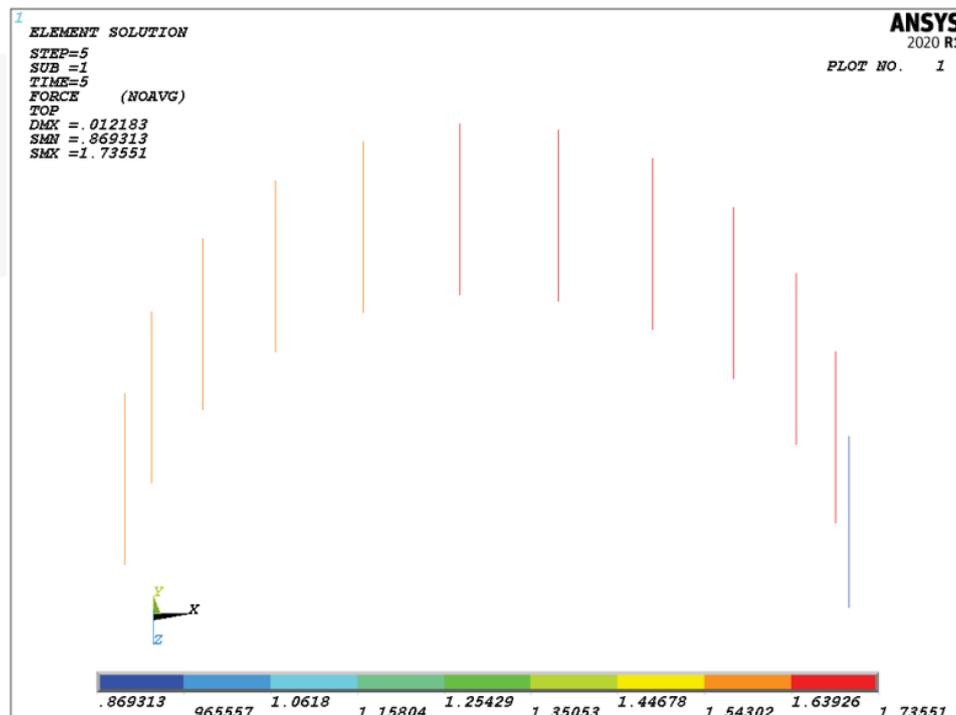


Figura 5.14. Vista de los anclajes en roca con los esfuerzos de compresión en MN, con la combinación de cargas ELU-A de pretensado máximo.

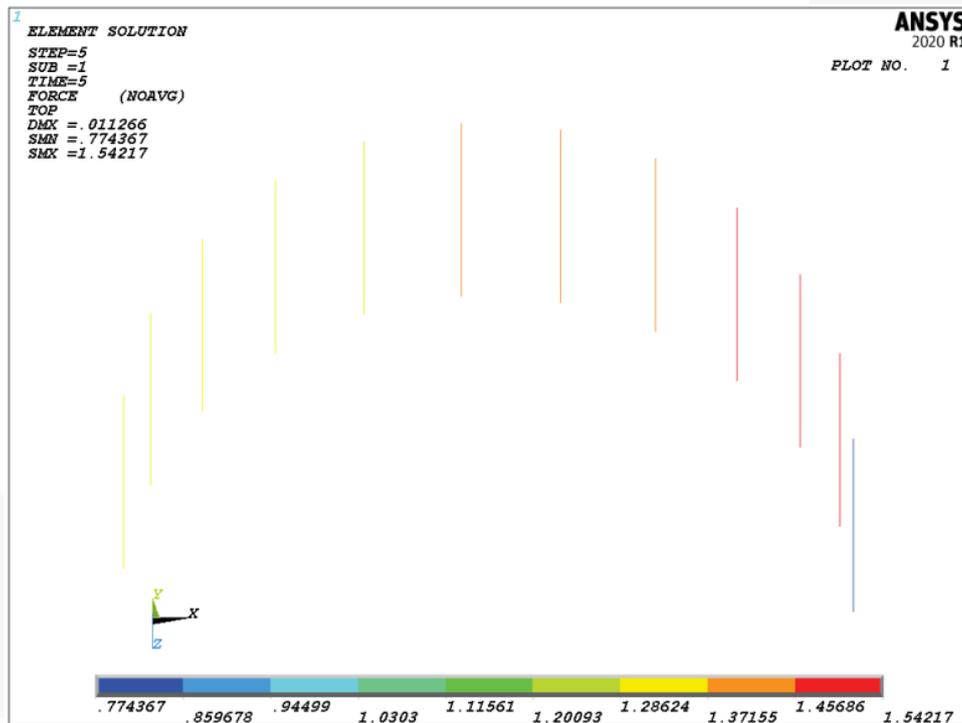


Figura 5.15. Vista de los anclajes en roca con los esfuerzos de compresión en MN, con la combinación de cargas ELU-A de pretensado mínimo.

Para comprobar la verificación de la resistencia de adherencia del mortero (ELU) se debe comprobar que la longitud de adherencia del anclaje en roca sea suficiente como para garantizar los esfuerzos creados entre la roca y el mortero, de manera que dicha longitud sea mayor que la definida mediante la carga última del anclaje (P_U). La longitud de adherencia mínima se comprueba mediante la fórmula $L_{adh,min} = P_U / f_{bd} \pi d_{bh}$, donde f_{bd} es la adherencia resistente de diseño y d_{bh} es el diámetro del taladro para la adherencia. Obteniendo los valores representados en la tabla 5.21.

Tabla 5.21. Cálculo de la longitud mínima de anclaje de adherencia del mortero.

P_U (kN)	f_{bd} (MPa)	d_{bh} (mm)	$L_{adh,min}$ (m)
2.533	1,20	125	5,38

Se obtiene un valor de $L_{adh,min}$ menor que los 7 metros de longitud establecidos en un inicio, lo cual verifica los datos de prediseño.

Con todos estos cálculos se determina que el prediseño de la cimentación anclada al sustrato rocoso cumple todas las verificaciones para los estados limites definidos mediante el método de elementos finitos, siendo óptimo su desarrollo constructivo.



6. CONCLUSIONES

En este TFM se ha planteado como objetivo analizar y verificar los dos tipos de cimentación sobre el sustrato rocoso, directa y anclada, propuestas en las fases de predimensionado y licitación del proyecto del Parque Eólico de Buseco.

Las metodologías de cálculo para la verificación de los estados límites de diseño fueron, para el caso de la cimentación directa el método directo analítico y para el caso de la cimentación anclada se recurrió a un análisis mediante modelos de elementos finitos. Ambas metodologías parten de unos datos y unas hipótesis de diseño y, aplicando cada método, se comprueba uno por uno cada estado límite en función de las cargas establecidas.

A partir de los resultados obtenidos se ha verificado, por un lado, el cumplimiento de los estados límites últimos. Para el caso de la cimentación directa se verifica el cumplimiento de estabilidad global, el hundimiento y el deslizamiento. Y, para el caso de la cimentación anclada se verifica el cumplimiento de despegue, la capacidad resistente de la roca y la resistencia a tracción y de adherencia del mortero de los anclajes en roca. Obteniendo en todos los casos una verificación positiva.

Por otro lado, se han verificado los estados límites de servicio. Para el caso de la cimentación directa se ha verificado el cumplimiento de asentamientos y la rigidez estructural. Y, para el caso de la cimentación anclada se ha verificado el cumplimiento de la rigidez y el despegue. Obteniendo en ambos casos una verificación positiva.

El resultado de las verificaciones llevadas a cabo es que ambos diseños son válidos para su aplicación constructiva. De esta manera es posible ofrecer al contratista dos alternativas fiables a la hora de desarrollar su valoración para el proceso de licitación del proyecto. Esta estrategia ofrece alternativas a la hora de proyectar finalmente la construcción, de manera que los contratistas puedan usar su capacidad de análisis en base a la experiencia, utilizando estos datos de análisis previos o partiendo de ellos para diseñar alguna otra alternativa que se estime más idónea.



AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer sobre todo la ardua colaboración de mi tutor Carlos López, que sin su ayuda no hubiera sido capaz de realizar este TFM en un tiempo tan ajustado y así poder cumplir una de mis nuevas metas profesionales.

En este Máster he tenido profesores que me han aportado grandes conocimientos de las ciencias geológicas, pero también me han ayudado a volver a retomar un contacto olvidado, como es el papel de un docente, algo muy diferente a lo que venía tratando en mi paso profesional. Sintiendo una motivación por aprender de una materia que ellos dominan y en algunos casos nueva para mí. Muchas gracias a todos ellos.

No me puedo olvidar de mis compañeros y compañeras, volver a tomar contacto con personas mucho más jóvenes que yo me han hecho ver que esta generación “no está perdida”, sino que, me han sorprendido muy gratamente muchas conversaciones de café y como no, de cañas, que me han aportado visiones que hasta el momento no tenía. Sobre todo, agradecer a mis compañeros de pupitre, Dani y María que sin duda son con los que más he trabajado codo con codo y me han ayudado en muchos aspectos que yo no me desenvolvía.

Como no, también agradecer al coordinador del máster Luis Pedro Fernández y a la secretaria del centro, que tantas gestiones y vueltas han tenido que dar conmigo y que, seguro alguna más quedará por dar.

A la familia no le doy las gracias, porque apenas me vieron el pelo, así que poco les di que hacer. Pero bueno, una pequeña mención, porque todas las transiciones son duras para todos.

Muchas gracias a todos y todas por vuestro apoyo y por el gran trabajo que hacéis.



7. REFERENCIAS

- Celigüeta, J.T. (2011). *Método de los elementos finitos para análisis estructural*. Tecnum, Escuela superior de Ingenieros. Campus tecnológico de la Universidad de Navarra.
- C.N.I.G. (2023). Centro de Descargas del CNIG. <http://centrodedescargas.cnig.es/>
- CODEXSA (020). *Estudio geotécnico para Parque Eólico "Buseco", Asturias. Ref. GT.2019/146*. Departamento de Geotecnia. Codexsa Ingeniería y Control.
- CTE Wind (abril, 2020). *Diseño preliminar de cimentación superficial sin subpresión de agua para Parque eólico Buseco*. Ingeniería Civil y Estructural. CTE Wind Ibérica.
- CTE Wind (abril, 2020). *Diseño preliminar de cimentación anclada en roca para Parque eólico Buseco. Doc. 4951.2, versión 0*. Ingeniería Civil y Estructural. CTE Wind Ibérica.
- FAEN (2021). *Estrategia de transición energética justa de Asturias. Fundación Asturiana de la Energía*. Dirección General de Energía, Minería y Reactivación. Consejería de Industria, Empleo y Promoción Económica. Gobierno del Principado de Asturias.
- I.G.N. (f.c. enero 2023). *Instituto Geográfico Nacional*. Ministerio de Transporte, Movilidad y Agencia Urbana. Gobierno de España. Web Site Oficial España. <https://www.ign.es/>
- I.G.M.E. (f.c. enero 2023). *Instituto Geológico y Minero de España*. Ministerio de Transporte, Movilidad y Agencia Urbana. Gobierno de España. Web Site Oficial España. <https://www.igme.es/>
- Lotze, F. (1945). *Zur Gliederung der Varisziden der Iberischen Meseta*. Geotekt. Forschg., 6, 78-92.
- Marcos, A. (1973). *Las series del Paleozoico Inferior y la estructura herciniana del Occidente de Asturias (NW. de España)*. Trabajos de Geología, (6), 3-113. Facultad de Ciencias. Universidad de Oviedo.
- Ministerio de Fomento (2019). *Documento Básico SE Seguridad Estructural*. Dirección General de Arquitectura, Vivienda y Suelo. Gobierno de España.
- Ministerio de Fomento (2010). *EHE-08. Instrucción de Hormigón Estructural*. Secretaría General Técnica. Gobierno de España.
- Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana (2001). *Guía para el diseño y la ejecución de anclajes al terreno en obras de carretera*. Dirección General de Carreteras. Gobierno de España.
- Ministerio de Fomento (2019). *Guía para el proyecto de cimentaciones en obra de carreteras con Eurocódigo 7: Cimentaciones superficiales*. Dirección General de Carreteras. Gobierno de España.
- Ministerio de Fomento (2019). *Guía para el proyecto de cimentaciones en obra de carreteras con Eurocódigo 7: Bases del proyecto geotécnico*. Dirección General de Carreteras. Gobierno de España.



Ministerio de Fomento (2009). *Norma de Construcción Sismorresistente: Parte general y edificación (NCSE-02)*. Dirección General del Instituto Geográfico Nacional. Gobierno de España.

Sequera, D.A., Solano, L.F. (2013). *Algoritmo para la calibración de modelos estructurales en elementos finitos de puentes usando ANSYS*. Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Pontificia Universidad Javeriana de Bogotá.

Sólida Energías Renovables (2020). *Memoria de Anexo de modificación al Proyecto de Ejecución del Parque Eólico Buseco*. Ref. SOEO181604CGME0001-03.