



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ETS INGENIERÍA DE CAMINOS,  
CANALES Y PUERTOS

# TRABAJO DE FIN DE GRADO

---

Diseño de la cimentación de un aerogenerador en el término municipal de  
Arcos de las Salinas (Teruel).

---

*Presentado por*

Caballero Vallejos, Ana Gabriela

---

*Para la obtención del*

Grado en Ingeniería Civil

*Curso: 2020/2021*

*Fecha: 06/09/2021*

*Tutor: María Elvira Garrido de la Torre*

*Cotutor: Juan Navarro Gregori*





# CONTENIDO

PLANO N.º 1: SITUACIÓN Y EMPLAZAMIENTO

PLANO N.º 2: GEOMETRÍA DE LA CIMENTACIÓN

PLANO N.º 3: ARMADO DE LA CIMENTACIÓN



# MEMORIA Y ANEJOS

AUTOR: Ana Gabriela Caballero Vallejos

TUTOR: María Elvira Garrido de la Torre

COTUTOR: Juan Navarro Gregori

Grado En Ingeniería Civil

Escuela Técnica Superior De Ingeniería De Caminos, Canales Y Puertos

Universitat Politècnica De València



## CONTENIDO

### MEMORIA

1. Antecedentes .....	4
2. Objeto.....	4
3. Normativa empleada.....	4
4.1. Criterio energético.....	5
4.2. Criterio ambiental.....	5
4.3. Viabilidad constructiva.....	7
5. Datos iniciales.....	7
5.1. Recurso eólico.....	8
5.2. Tipo aerogenerador .....	8
5.3. Cargas aplicadas.....	9
6. Estudio geotécnico .....	10
7. Definición de las alternativas .....	10
7.1. Alternativa 1: Cimentación totalmente compensada .....	11
7.2. Alternativa 2: Cimentación directa .....	11
7.3. Alternativa 3: Cimentación indirecta.....	11
8. Diseño geotécnico .....	11
8.1. Bases de cálculo .....	11
8.1.1. Normativa .....	11
8.1.2. Características del terreno y materiales.....	12
8.1.3. Acciones consideradas.....	12
8.1.4. Combinación de acciones .....	12
8.2. Procedimiento de dimensionado.....	12
9. Análisis y elección de la alternativa a ejecutar .....	13
9.1. Análisis de los criterios.....	13
9.2. Elección de la alternativa .....	13
10. Cálculo estructural.....	14
10.1. Bases de cálculo .....	14
10.1.1. Normativa .....	14

10.1.2. Características de los materiales .....	14
10.1.3. Acciones consideradas.....	15
10.1.4. Combinación de acciones .....	15
10.2. Procedimiento de dimensionado .....	15
10.2.1. Armado de pilotes .....	15
10.2.2. Armado del encepado .....	16
11. Valoración económica .....	17
12. Conclusiones.....	17

### ANEJO N.º 0: OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE

### ANEJO N.º 1: CÁLCULOS PREVIOS

### ANEJO N.º 2: ESTUDIO GEOTÉCNICO

### ANEJO N.º 3: COMPROBACIONES GEOTÉCNICAS

### ANEJO N.º 4: ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS

### ANEJO N.º 5: CÁLCULOS ESTRUCTURALES

### ANEJO N.º 6: VALORACIÓN ECONÓMICA

### ANEJO N.º 7: PLANOS



## 1. Antecedentes

En este apartado se pretende establecer los antecedentes académicos que justifican la elaboración del presente Trabajo de Fin de Grado

Conforme el Real Decreto 1393/2007, del 29 de octubre, el cual rige la ordenación de las enseñanzas universitarias oficiales, y posteriormente modificado por el RD 861/2010 establece "... todos los títulos oficiales concluirán con la elaboración y defensa de un trabajo de Fin de Grado (TFG) o Trabajo Fin de Máster (TFM), ...".

La Normativa de Trabajo de Fin de Grado y Fin de Máster de la *Universitat Politècnica de València* (UPV), establece según el Artículo 3 que "los TFG deberán estar orientados a la aplicación y evaluación de competencias asociadas al título" y que "consistirán en la realización de un trabajo o proyecto original en el que queden de manifiesto conocimientos, habilidades y competencias adquiridas por el estudiante a lo largo de sus estudios y, expresamente, las competencias asociadas a la materia TFG, tal y como se indique en la memoria de verificación".

Expuesto lo anterior, se realiza el presente Trabajo de Fin de Grado para el Grado de Ingeniería Civil de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Civil de Caminos, Canales y Puertos (ETSICCP), en la *Universitat Politècnica de València* (UPV).

El presente Trabajo de Fin de Grado, ha sido elaborado con una modalidad individual, en el Grado de Ingeniería Civil, con el fin de finalizar los presentes estudios y obtener el título oficial. el trabajo se titula "Diseño de la cimentación de un aerogenerador en el término municipal de Arcos de las Salinas (Teruel)".

El tutor académico asignado es María Elvira Garrido de la Torre, y el cotutor Juan Navarro Gregori, miembros del Departamento de Ingeniería del Terreno y Departamento de Ingeniería de la construcción y de Proyectos de Ingeniería Civil, respectivamente.

## 2. Objeto

Este trabajo académico viene motivado por favorecer desde el punto de vista ingenieril el continuo desarrollo de las energías renovables, en particular la eólica. Actualmente la utilización de combustibles fósiles para obtener energía se ve cada vez más limitada, principalmente por la disminución de estos recursos, por el cambio climático y por el aumento de los precios del petróleo. Es por ello por lo que se apuesta cada vez más por las energías renovables en un proceso de descarbonización de la energía eléctrica.

El objeto del presente Trabajo de Fin de Grado es el diseño de la cimentación de un aerogenerador ubicado en Arcos de las Salinas, Teruel. Para ello, se centra en los aspectos relativos al diseño estructural y geotécnico de la cimentación.

La solución adoptada se ha de caracterizar por ser una propuesta constructiva en la que prevalezca la sostenibilidad desde el punto de una perspectiva centrada en los factores sociales, ambientales y costes económicos.

## 3. Normativa empleada

La normativa empleada a lo largo del siguiente Trabajo de Fin de Grado, son los expuestos a continuación:

- Norma UNE-EN IEC 61400-1 Sistemas de generación de energía eólica. Parte 1: Requisitos de diseño.
- Guía de cimentaciones en obras de carretera (Ministerio de Fomento, 2009)
- UNE-EN 1992-1-1 Eurocódigo 2: Proyecto de estructuras de hormigón. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación.
- Instrucción de Hormigón Estructural. EHE-08.

## 4. Localización

El emplazamiento del aerogenerador, Arcos de las Salinas (Teruel), se ha determinado teniendo en cuenta tres variables, siendo estas, la ambiental, la rentabilidad energética y la viabilidad constructiva. A continuación, se desarrolla cada uno de los criterios.

### 4.1. Criterio energético

Es el criterio más importante ya que la determinación de la ubicación del aerogenerador depende principalmente del rendimiento energético que puede proporcionar. Este se relaciona de forma directa con la velocidad del viento a la altura del buje del aerogenerador.

Se estima que, en vientos moderados, la velocidad mínima necesaria para que empiecen a girar las palas es de 4 m/s. Partiendo de este dato se presentarán como lugares de interés aquellos que superen esta velocidad. Se consulta el Atlas Eólico de España, proporcionado por el Instituto para la Diversificación y ahorro de la Energía, IDEA, a través de la plataforma del Ministerio de Industria, Energía y Turismo, con tal de conocer el valor de las velocidades medias a lo largo de la comunidad de Aragón. Sin embargo, el recurso no se encuentra disponible en el presente año, 2021, es por ello por lo que se recurre a la plataforma *Global Wind Atlas*. Esta página web se caracteriza por ser una web desarrollada para identificar las posibles áreas de viento con valores de velocidad elevados para generar energía eólica, a lo largo de todo el mundo.

En la **Figura 3.1** se muestra un mapa con el valor que adopta la velocidad en cada zona, para una altura de 100 metros, se considera este valor, ya que la altura del buje de las torres suele tomar esos valores. Concretizando en el emplazamiento, este consta con una velocidad de 7.9 m/s.

Por otra parte, no se observan obstáculos ni construcciones que dificulten o varíen la dirección del viento. Esto se debe a que el Collado Román se ubica a 1300 m.s.n.m.

Por tanto, se establece Arcos de las Salinas idóneo para albergar el aerogenerador, ya que, se supera la velocidad mínima de viento y no presentan obstáculos que lo alteren o reduzcan.

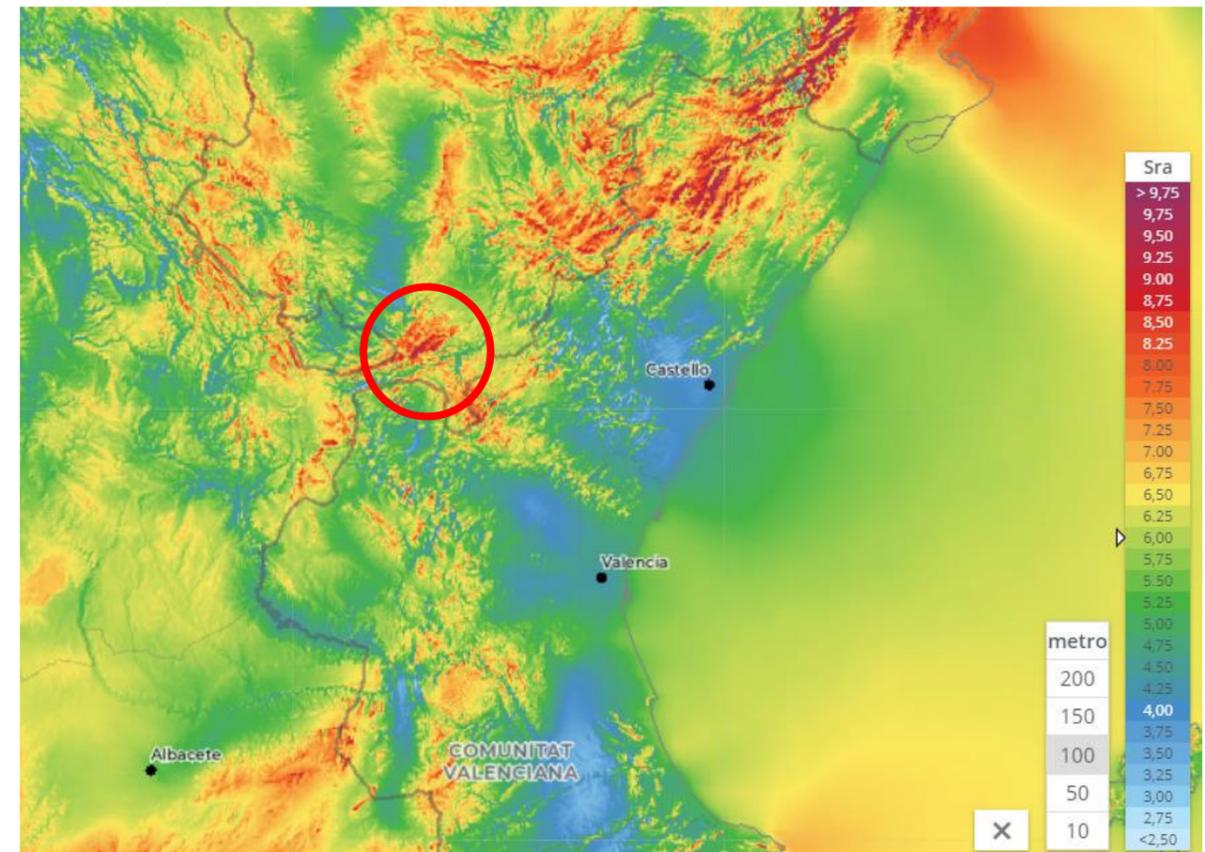


Figura 3.1. Velocidad media del viento a una altura de 100 metros. Fuente: Recurso web *Global Wind Atlas*

### 4.2. Criterio ambiental

Es un aspecto importante a tener en cuenta, ya que la ejecución del aerogenerador produce un impacto en el emplazamiento, tanto visual, como sonoro y sobre la fauna.

Es por ello, que se establecen espacios protegidos, los cuales vienen regulados por la Red Natura 2000 y por los Espacios Naturales Protegidos.

Los Espacios Naturales Protegidos, son áreas terrestres o marinas con valores naturales sobresalientes, dedicadas a la conservación de la naturaleza y, por tanto, son de interés por su protección. En la **Figura 3.2**, se muestra que el emplazamiento que alberga el aerogenerador no se encuentra dentro de ninguna zona protegida.

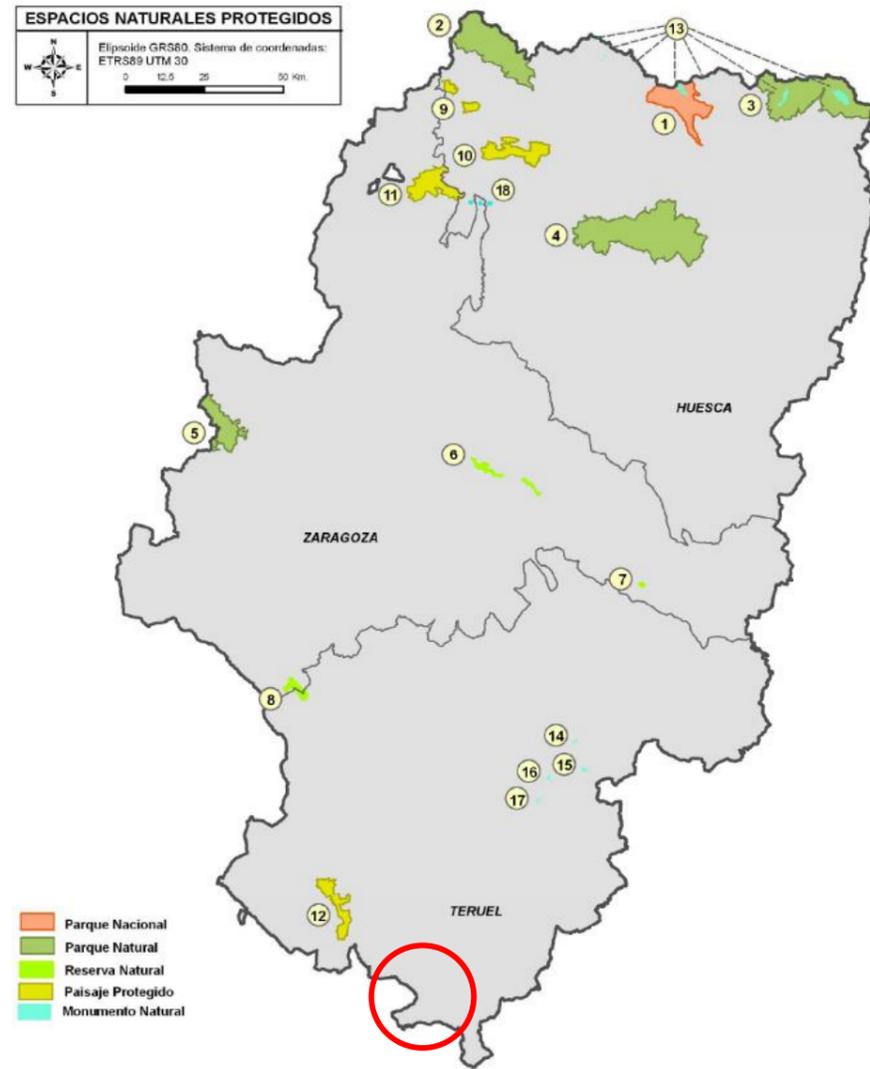


Figura 3.2. Espacios Naturales Protegidos de Aragón. Fuente: Departamento de Agricultura, Ganadería y Medio Ambiente del Gobierno de Aragón

La Red Natura 2000, es la red europea de espacios protegidos destinada a garantizar la biodiversidad natural de Europa. Los espacios que forman esta red son las Zonas de Especial Protección para las Aves (ZEPA) y las Zonas Especiales de Conservación (ZEC).

La comunidad de Aragón consta con 48 áreas de ZEPA, la cual se centra en la presencia de aves raras, amenazadas o de mayor interés para el conjunto comunitario, de nuevo se observa que la obra no interfiere en estas áreas.

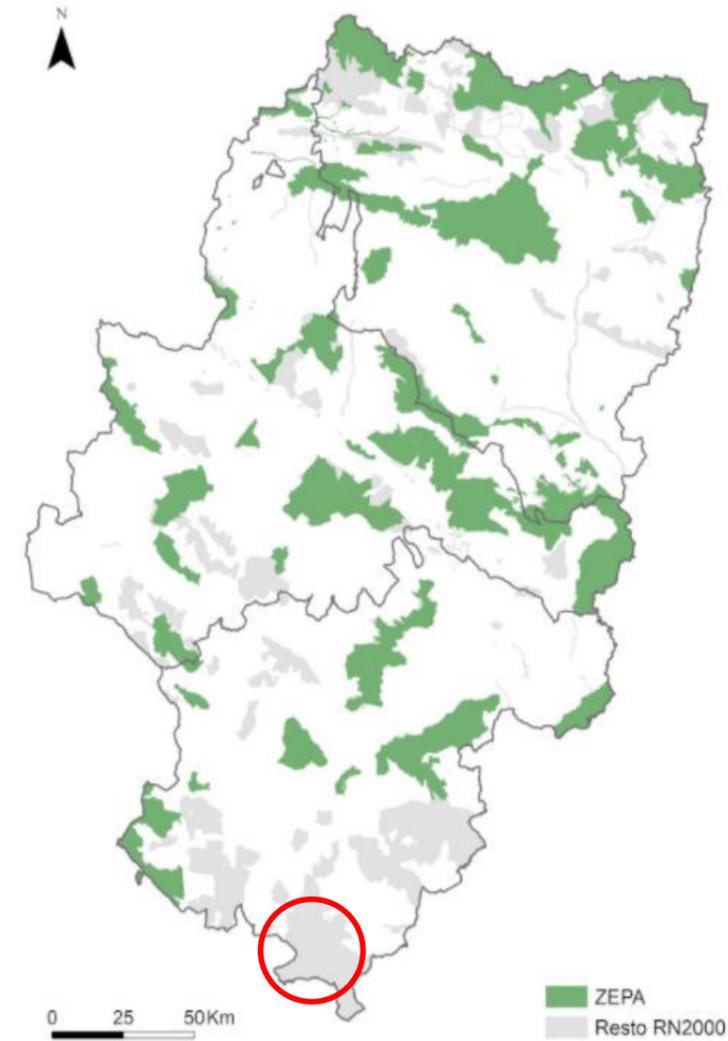


Figura 3.3. Zonas de Especial Protección para las Aves, ZEPA, de Aragón. Fuente: Gobierno de Aragón

Los ZEC, representan los hábitats naturales, fauna y flora silvestres de interés de Europa. Solo Aragón se encuentran 156 áreas; algunas de ellas coinciden con los ZEPA.

En la **Figura 3.4**, se observa que el proyecto si se desarrolla sobre un ZEC. No obstante, esto no implica la imposibilidad de realizar nuevas actividades ni instalaciones, sino que se debe someter el proyecto a una evaluación de las repercusiones que comportara en el lugar, aplicando el Art. 6.3 de la Directiva de Hábitats. Tras las conclusiones de la evaluación, las autoridades solo se declararán de acuerdo con dicho plan o proyecto tras asegurarse de que no causará perjuicios a la integridad del lugar en cuestión, además de establecer tanto medidas preventivas y correctoras como compensatorias, con tal de minorar y evitar el impacto en el medio ambiente.

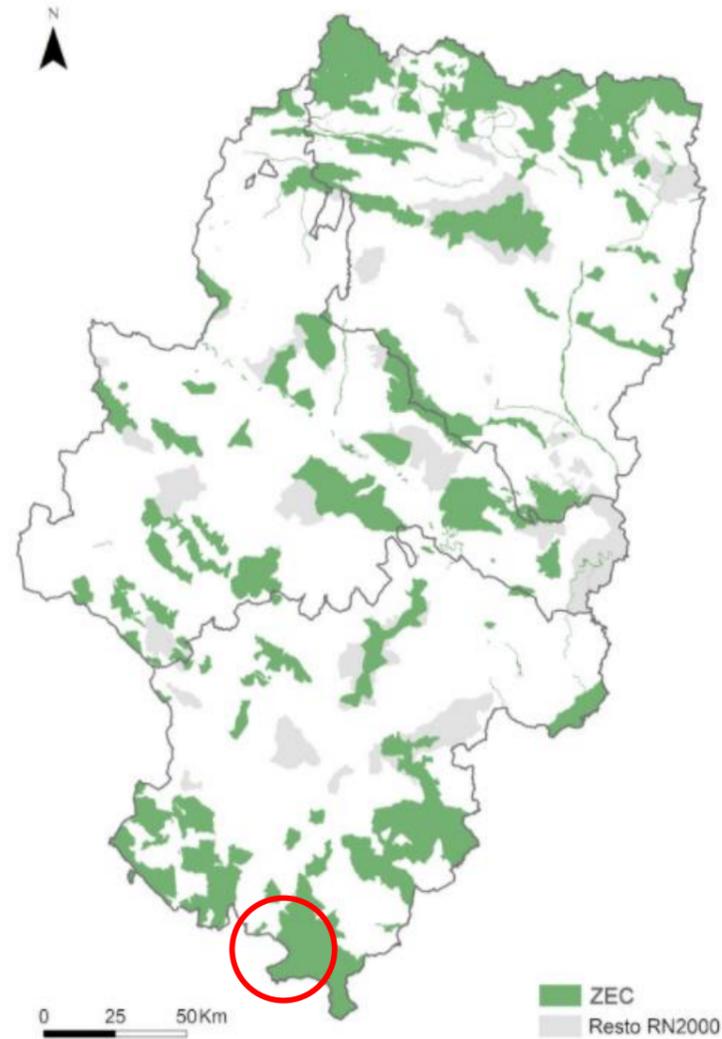


Figura 3.4. Zona de Especial Conservación, ZEC, de Aragón. Fuente: Gobierno de Aragón

Debido a que el estudio de las repercusiones se escapa del alcance de este Trabajo de Fin de Grado, se ha considerado que la construcción de los aerogeneradores supondría un bien que afectaría de manera positiva a los núcleos de población cercanos, ya que suministraría energía eléctrica limpia, desvinculándose de la producción de esta mediante combustibles fósiles; siendo de interés común. Tomando en cuenta todo lo anterior, a pesar de que la ubicación elegida se encuentra en una zona de conservación, tras someter el proyecto a las debidas medidas, se podría permitir su ejecución. Es conocido que el Gobierno de Aragón ha permitido antes este tipo de construcciones primando el bien social común.

### 4.3. Viabilidad constructiva

Este criterio se centra en el estudio de las características del emplazamiento. Esto es: si existen parques eólicos cercanos o núcleos de población, vías de acceso, posibles construcciones cercanas, etc.

La población más cercana al aerogenerador se encuentra a 2.5 kilómetros, siendo Arcos de las Salinas. Es por ello por lo que el posible ruido que producen las palas al girar, no le afecta. Además, el emplazamiento se caracteriza por ser una zona rural despoblada y con escasa vegetación por la mala calidad del terreno.

No hay parques eólicos próximos a la zona de actuación que pueden limitar su ejecución. Los parques más próximos son dos: el de la Sierra Costera II, ubicado a 75 kilómetros, en Mezquita de Jarque, y el Alto Casillas I, en Castellón de la Plana, a 36 kilómetros.

Por último, se llega a la zona de actuación mediante la carretera A-1514, la cual discurre por Teruel, hasta llegar a Arcos de las Salinas. Allí, mediante vías secundarias permite llegar a la zona de actuación.

Dado el bajo impacto sobre la población, el fácil acceso al emplazamiento, al no existir parques cercanos y constituir un área lo suficientemente amplia para la instalación de un parque con varios aerogeneradores, se considera que esta ubicación presenta unas características favorables para albergar el aerogenerador.

## 5. Datos iniciales

Una vez determinado el emplazamiento, para definir la cimentación se ha de partir de unos datos iniciales, los cuales son las cargas que se transmiten a la cimentación y la capacidad portante del terreno. Una vez recopilada esta información, se realiza el estudio de las tensiones transmitidas al terreno y la estabilidad del cimiento y aerogenerador en su conjunto.

Las cargas transmitidas se definen tras parametrizar el recurso eólico y la elección del modelo de aerogenerador. Se selecciona el modelo idóneo atendiendo al rango de velocidades del viento en el emplazamiento y se determina el peso que transmite el aerogenerador y la acción del viento sobre las partes principales del mismo.

El estudio del terreno se desarrolla en el **Apartado 6** de la presente memoria.

## 5.1. Recurso eólico

El viento es un recurso que se caracteriza por su variabilidad temporal y espacial. El viento de una zona se define con la recopilación de datos de frecuencia, dirección y velocidad durante largos períodos de tiempo.

En el sector eólico, los condicionantes del viento se han de conocer a una altura mínima de 50 metros, ya que a alturas menores interviene una fuerza de rozamiento que disminuye la velocidad de este, llegando a impedir el giro de las palas.

El análisis eólico se ha realizado empleando al recurso web *Global Wind Atlas*. La misma plataforma, también proporciona datos referentes a la frecuencia, velocidad y dirección del viento en Arcos de las Salinas. Estas se representan mediante rosas de los vientos.

La velocidad predominante a una altura de 100 metros es de 7.9 m/s, tal como se ha dicho anteriormente.

La dirección principal del viento es la Norte y la Oeste Noroeste, con más de un 12% del viento proveniente de estas direcciones. Y, por otro lado, la velocidad del viento predominante es la del Norte.

En conclusión, el aerogenerador ha de ser orientado hacia el Norte, al ser la dirección con mayor frecuencia de viento y mayor velocidad.

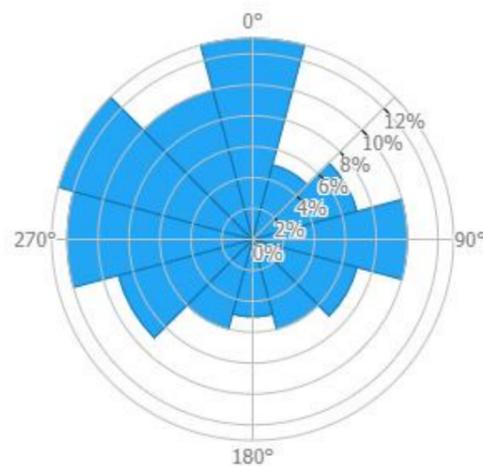


Figura 5.2. Rosa de los vientos de la dirección de viento predominante. Fuente: recurso web *Global Wind Atlas*

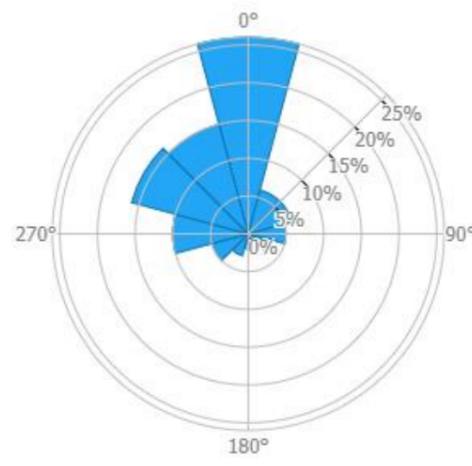


Figura 5.1. Rosa de los vientos de velocidad predominante. Fuente: recurso web *Global Wind Atlas*

## 5.2. Tipo aerogenerador

El tipo de aerogenerador a emplear viene condicionado por la capacidad de que tiene para aprovechar el recurso eólico y obtener los máximos rendimientos.

La clase de aerogenerador determina la elección del modelo a emplear. El propósito de clasificar los aerogeneradores es cubrir la mayoría de las aplicaciones, representando unos valores característicos de muchos emplazamientos diferentes, pero sin proporcionar características específicas de un lugar en concreto.

La clase se define en función de la velocidad del viento y las turbulencias. La **Tabla1 – Parámetros básicos para clases de aerogeneradores de la UNE-EN IEC 61400-1**, permite realizar la clasificación.

Clase de aerogenerador		I	II	III	S
$V_{ave}$	(m/s)	10	8,5	7,5	Valores especificados por el diseñador
$V_{ref}$	(m/s)	50	42,5	37,5	
	Tropical (m/s) $V_{ref,T}$	57	57	57	

Tabla 5.1. Extracto de la Tabla 1 - Parámetros básicos para clases de aerogeneradores. Fuente: UNE-EN IEC 61400-1.

La velocidad media anual en el emplazamiento es de 7.9 m/s para una altura de buje de 100 metros, por tanto, según la Tabla 1 de la Normativa, la clase de aerogenerador a emplear puede ser tanto la II como la III. No obstante, cuanto mayor es la clase, menor son los requerimientos técnicos, por tanto, para estar del lado de la seguridad, la clase del aerogenerador seleccionada es la de tipo II.

Para seleccionar el modelo de aerogenerador, en este Trabajo de Fin de Grado se ha optado por la marca Siemens Gamesa Renewable Energy, al contar con una amplia experiencia en el sector.

Dentro del catálogo de Siemens Gamesa, se distinguen dos clases de aerogeneradores, los *off shore* y los *on shore*. Se elige la línea Siemens Gamesa Renewable Energy 2.X, al tratarse de aerogeneradores *on shore* con una potencia de 2 MW. Dentro de la línea 2.X, se opta por el modelo SG 2.1-114, por ser idóneo para aerogeneradores de clase II, III y S. Además, es un modelo que destaca por su versatilidad y capacidad de proporcionar el máximo rendimiento en toda clase de emplazamientos y tipos de vientos.

Se ha de remarcar que, aunque el modelo elegido sea el SG 2.1-114, los datos correspondientes a la masa de los diferentes elementos del aerogenerador se han tomado del G.90, el cual es un modelo anterior. Esto se debe a que no se ha podido obtener la ficha técnica del SG 2.1-114, y el G.90 es un aerogenerador de características muy similares al seleccionado.

En la siguiente tabla, se expone los parámetros y características principales del aerogenerador.

Parámetro	Dato	Unidad
Nombre comercial	SG 2.1-114	[-]
Diámetro del rotor	114	m
Área de barrido	10 207	m <sup>2</sup>
Número de palas	3	[-]
Longitud de las palas	56	m
Altura de la torre	106	m
Potencia nominal	2.1	MW
Tensión	690	V
Frecuencia	50 / 60	Hz

Tabla 5.2. Parámetros y características principales del aerogenerador SG 2.1-114. Fuente: Recurso web Siemens Gamesa Renewable Energy (<https://www.siemensgamesa.com/es-es/products-and-services/onshore/aerogenerador-sg-2-1-114>)

### 5.3. Cargas aplicadas

En el siguiente apartado se determina las cargas que se transmiten a la cimentación, para poder diseñarlo. Para ello se ha de definir las situaciones de carga y casos de carga.

En el presente Trabajo de Fin de Grado, atendiendo a su alcance y las limitaciones, solo se consideran las cargas gravitacionales y las aerodinámicas, para el dimensionamiento del aerogenerador. En la **Figura 5.3** se muestra el croquis de las acciones consideradas.

En el **APÉNDICE C** se recoge los cálculos realizados para determinar las cargas.

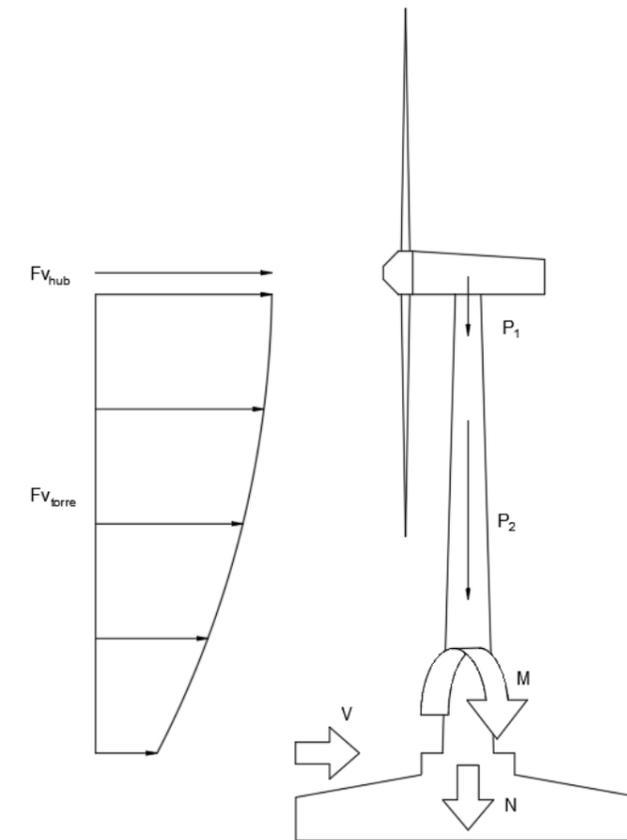


Figura 5.3. Croquis de las acciones sobre los elementos del aerogenerador. Fuente: Elaboración propia en software AutoCAD.

Las acciones consideradas son:

- Acciones gravitacionales y de inercia

En estas acciones se considera solo las cargas resultantes de la gravedad, es decir, las cargas fijas, como el peso propio de los elementos principales del aerogenerador (la góndola, el rotor, las palas y la torre). La masa de cada elemento se ha obtenido de la ficha técnica del modelo G.90 [**APÉNDICE B**], por el motivo expuesto anteriormente.

La altura máxima para el G.90, es de 100 metros. No obstante, en el SG 2.1-114, la altura de la torre es de 106 metros. Por lo tanto, a causa de la disparidad en la altura de las torres, se ha incrementado un 6% el peso de la torre del modelo G.90 y así obtener la masa aproximada del modelo seleccionado.

De este modo se obtienen las cargas que se muestran en la **Tabla 5.3**.

Peso de la torre ( $P_1$ )	Peso góndola + rotor ( $P_2$ )
2 974.00 kN	1 024.20 kN

Tabla 5.3. Peso de los elementos del aerogenerador. Fuente: Elaboración propia en software Excel.

- Acciones aerodinámicas

Corresponden a las cargas debidas a la incidencia del viento sobre el aerogenerador. En este caso, solo se considera la acción del viento sobre las partes que poseen una dimensión suficientemente grande como para ejercer una fuerza desestabilizadora sobre el aerogenerador.

En primer lugar, se considera la acción del viento sobre el conjunto del rotor y palas, y la acción del viento sobre el tronco de la torre. El valor de las acciones sobre el aerogenerador se recoge en la siguiente tabla.

Acción del viento sobre el rotor ( $F_{v_{hub}}$ )	Acción del viento sobre la torre ( $F_{v_{torre}}$ )
2 267.49 kN	87.85 kN

Tabla 5.4. Acción del viento sobre cada elemento del aerogenerador. Fuente: Elaboración propia en software Excel.

Una vez se obtiene el valor de las cargas que afectan al aerogenerador, se determina aquellas que se transmiten a la cimentación, los valores característicos, el axil (N), el cortante (V) y el momento (M).

Axil (N)	Cortante (V)	Momento (M)
3 998.20 kN	2 355.34 kN	247 458.54 kN·m

Tabla 5.5. Acciones transmitidas a la cimentación. Fuente: Elaboración propia en software Excel.

## 6. Estudio geotécnico

En el documento **ANEJO N.º 2: ESTUDIO GEOTÉCNICO** se encuentra de forma más extensa y detallada la caracterización del terreno.

Se observa que, para la estructura de estudio, ubicada en Arcos de las Salinas (Teruel), su proyección se plantea en la parte inferior del Macizo de Javalambre, sobre el Collado Román, el cual se caracteriza por estar constituido por dolomías y calizas.

La geomorfología del emplazamiento presenta rocas con un fuerte tableado. Las fracturas se extienden a lo largo de toda la formación rocosa, en ambos sentidos. Es por ello por lo que, aunque el

terreno se encuentre compuesto por rocas, debido a la elevada fracturación, este se considera como si se tratara de gravas gruesas.



Figura 6.1. Dolomías y calizas tableada. Fuente: <http://personales.upv.es/lalonso/traduccion.html>

Por otra parte, el emplazamiento no se encuentra afectado ni por efectos sísmicos ni por la presencia de agua. Sin embargo, los problemas que presenta son de accesibilidad y, por tanto, las soluciones que se plantean se centran en dos líneas principales. Por un lado, la construcción de un nuevo acceso con tal de evitar los obstáculos existentes y, por otro lado, la introducción de una nueva vía que permita llegar hasta el emplazamiento.

Tras considerar las características del terreno, en el siguiente apartado se plantean las alternativas para la ejecución de la cimentación.

## 7. Definición de las alternativas

Atendiendo a los datos obtenidos del estudio geotécnico, para la realización de la cimentación del aerogenerador modelo SG 2.1-114 de Siemens Gamesa Renewable Energy, se ha planteado tres alternativas.

La definición de la cimentación viene condicionada por las características del emplazamiento, las cargas transmitidas y la casuística de la estructura principal. Dicho lo anterior, con tal de definir

correctamente la cimentación, se ha de considerar ciertos condicionantes además de cumplir con las exigencias impuestas por la normativa.

Los condicionantes planteados son:

- Técnicos y constructivos: son los referentes a la viabilidad de ejecución y la complejidad técnica del proceso constructivo.
- Funcionales: la solución ha de satisfacer los requisitos del proyecto
- Económicos: se valora la viabilidad económica frente el coste.

Por ello, la definición de la cimentación del aerogenerador ha partido de una serie de datos iniciales. Los datos a los que se hace referencia son las características del emplazamiento, es decir el tipo de terreno, calizas y dolomías altamente fracturadas, y el valor de las cargas transmitidas.

Una vez se ha expuesto lo anterior, se enumera las diferentes alternativas planteadas para la realización de la cimentación.

### 7.1. Alternativa 1: Cimentación totalmente compensada

La primera alternativa planteada se trata de una cimentación totalmente compensada. Esta tipología de cimentación se presenta cuando la presión transmitida neta es nula, es decir, coincide la presión total transmitida con la total inicial a cota de cimentación. Por tanto, no se produce un incremento en las cargas aplicadas al terreno, ya que el peso del terreno excavado coincide con el peso de la estructura junto con sus cargas.

Para ello se propone una zapata, las dimensiones de esta se definen más adelante, al realizar el predimensionamiento. No obstante, se ha de partir de que esta ha de tener un diámetro superior a la base de la torre del aerogenerador, 4.032 metros, siendo el mínimo de 6 metros, para evitar el vuelco de la misma. Además, se ha de considerar 0.5 metros adicionales de rellenos, que oculten la cimentación.

### 7.2. Alternativa 2: Cimentación directa

La segunda propuesta planteada es una cimentación directa, de tipo zapata circular. El diámetro de la cimentación, al igual que en el caso anterior, debe ser superior a la base de la torre del aerogenerador y contar con un relleno de tierras de 0.5 metros, para reducir el impacto visual de la zona. Las dimensiones de esta se abordan en el siguiente apartado.

Se define como cimentación directa, aquella que transmite las cargas directamente al terreno. Además, la profundidad de la cimentación ha de tener un valor inferior al lado menor en planta.

Se propone esta opción debido a que es ampliamente utilizada en el sector y, por otro lado, porque es una solución común para la ejecución de aerogeneradores.

### 7.3. Alternativa 3: Cimentación indirecta

Para la cimentación indirecta, se ha planteado la realización de pilotes perforados y hormigonados *in situ*. El encepado que contenga los pilotes ha de constar con un canto mínimo de 1 metro, para transmitir correctamente los esfuerzos a estos. Por otro lado, el diámetro de los pilotes junto con la longitud son variables a definir en el proceso de comprobación de los estados límite últimos. Al igual que en las otras alternativas, el encepado se cubre con 0.5 metros de relleno.

Otra consideración que hay que tener en cuenta es la disposición de los pilotes. Los ejes de estos deben distar una longitud igual o superior al doble del diámetro del pilote, tanto en la dirección *x* como *y*.

Se opta por la ejecución *in situ* de los pilotes y no por los prefabricados, ya que, no son fáciles de ejecutar en un terreno rocoso como el del emplazamiento designado (sería necesario un encamisado de la perforación dada la alta fracturación del macizo), durante el transporte y/o instalación pueden o fracturarse.

## 8. Diseño geotécnico

Antes de seleccionar la alternativa más sostenible, según la evaluación de impactos desde un punto de vista social, ambiental y económico, es necesario definir unas cantidades aproximadas de material necesario para la ejecución de cada una de ellas.

Tras exponer lo anterior, para poder cuantificar el material necesario, se realiza el predimensionamiento de cada una de las propuestas planteadas, considerando las acciones a las que se encuentran sometidas y las condiciones de seguridad geotécnicas. En el **ANEJO N.º 3: CÁLCULOS GEOTÉCNICOS** se puede consultar la metodología seguida.

### 8.1. Bases de cálculo

#### 8.1.1. Normativa

Para la realización de los cálculos, se ha seguido la siguiente normativa de ámbito nacional.

- Guía de cimentaciones en obras de carretera (Ministerio de Fomento, 2009)

### 8.1.2. Características del terreno y materiales

A continuación, se definen las características, tanto del terreno como del material considerado, para predimensionar las distintas soluciones. Estas consideraciones se desarrollan en el en el **ANEJO N.º 3: CÁLCULO GEOTÉCNICO** y en el **APÉNDICE E**.

<b>Hormigón armado</b>	Peso específico	25 kN/m <sup>3</sup>
	Peso específico medio aparente	23 kN/m <sup>3</sup>
<b>Terreno</b>	Cohesión del suelo (c)	0 kPa
	Angulo de rozamiento ( $\Phi'$ )	48 °

Tabla 8.1. Características de los materiales. Fuente: Elaboración propia.

### 8.1.3. Acciones consideradas

En el presente apartado, se enumera las acciones consideradas para predimensionar las distintas alternativas.

- Acciones permanentes
  - Peso propio
  - Cargas muertas
- Acciones permanentes no constantes
  - Empujes del terreno
- Acciones variables
  - Cargas aerodinámicas

### 8.1.4. Combinación de acciones

En el cálculo geotécnico se aplica la combinación característica tanto para el Estado Límite Último (ELU) como para el de Servicio (ELS). Por otra parte, el proyecto geotécnico sigue el método de coeficientes de seguridad único, es decir engloban en un único valor la consideración de las acciones y la resistencia.

El valor del coeficiente de seguridad varía según el modo de fallo a estudiar, el estado y la tipología de cimentación. Dicho lo anterior, mediante el empleo de la **Guía de cimentaciones para obras de carretera** se realiza el dimensionamiento de la cimentación.

## 8.2. Procedimiento de dimensionado

El dimensionamiento de las alternativas se basa en la comprobación de los modos de fallo, atendiendo a la tipología de cada solución. Es por ello, para la Alternativa 2: Cimentación directa, se plantea comprobar la seguridad frente a hundimiento, deslizamiento y vuelco para el Estado Límite Último y frente a deformaciones excesivas para Estados Límite de Servicio. Por otro lado, la Alternativa 3: Cimentación indirecta, se comprueba la seguridad frente a hundimiento, deslizamiento y vuelco para Estados Límite Últimos.

Las comprobaciones necesarias se han realizado por medio de hojas de Excel programadas por la propia autora, siendo las dimensiones obtenidas las siguientes:

- Alternativa 1. Cimentación compensada: se considera inviable su ejecución y se descarta como posible solución, por no poder cumplir el fundamento básico que define esta tipología de cimentación, la cual se basa en que la presión transmitida al terreno ha de ser nula. Y porque la distribución no homogénea de los esfuerzos sobre el contacto estructura-terreno desaconseja su utilización.
- Alternativa 2. Cimentación directa: se plantea una zapata aislada circular, la cual consta con un canto de 4 metros y un diámetro de 30 metros. La base de la cimentación se ubica a 4.5 metros respecto la superficie del terreno, de manera que consta con una potencia de 0.5 metros de relleno.
- Alternativa 3. Cimentación indirecta: se opta por un grupo de pilotes perforados y hormigonados *in situ*. Los pilotes se caracterizan por tener 1 metro de diámetro y 15 metros de longitud, distan entre ellos 3.5 metros medidos desde el eje de cada pilote. El encepado, desde una vista en planta presenta una forma cuadrada, en la que cada lado mide 20 metros, el canto es de 2 metros. Al igual que para la Alternativa 2, se dispone también un relleno de 0.5 metros.

Tras definir las alternativas se procede al estudio de estas con tal de seleccionar la más idónea.

## 9. Análisis y elección de la alternativa a ejecutar

En el siguiente apartado se discute la idoneidad de las alternativas ya planteadas para la ejecución del aerogenerador. La descripción y la metodología seguida, se encuentra detallado en el **ANEJO N.º 4: ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS**.

El procedimiento seleccionado para llevar a cabo el estudio de la mejor solución ha sido evaluar los impactos que provoca la ejecución de cada alternativa en los tres pilares fundamentales de la sostenibilidad, además se ha considerado necesario añadir un nuevo indicador, el de proceso constructivo. Tras definir los criterios a estudiar, mediante el método de análisis multicriterio se obtiene la valoración de cada uno de ellos, de manera que se le atribuye unos pesos con los cuales se puede obtener una puntuación con la que así seleccionar la mejor alternativa.

### 9.1. Análisis de los criterios

Tal como se ha nombrado anteriormente, para evaluar las alternativas, se han definido una serie de criterios basándose en los tres pilares de la sostenibilidad, los cuales son, sostenibilidad económica, social y ambiental. Por otra parte, se ha añadido un nuevo criterio el de proceso constructivo debido a su importancia. Los criterios en algunos casos engloban a subcriterios con tal de facilitar la evaluación de estos. Por tanto, estos quedan definidos de la siguiente forma:

- **Criterio económico:** se evalúa el coste que requiere la ejecución de cada una de las soluciones.
- **Criterio social:** se basa en el grado que la ejecución de la estructura afecta negativamente a la población, en este caso a las comunidades locales. En este caso, se ha considerado dos subcriterios con tal de evaluar el criterio principal. El primer subcriterio es el de interrupción del tráfico habitual, por el continuo paso de vehículos pesados y maquinaria de grandes dimensiones. El segundo en la percepción de seguridad de la población por la ejecución de la estructura, aunque esta esté asegurada en todo momento.
- **Criterio ambiental:** cuantifica la afección que se produce en el emplazamiento por la ejecución de las alternativas. En este caso, como el emplazamiento es el mismo el impacto visual, especies afectadas, afección del medio, etc., es el mismo; es por ello que se opta por contabilizar este criterio basándose en el volumen de movimiento de tierras a realizar.
- **Criterio proceso constructivo:** se basa en la evaluación del proceso de ejecución de la estructura. En este caso se considera la facilidad de ejecución, es decir se evalúa el grado de dificultad que pueden presentar ciertos procesos frente otros.

### 9.2. Elección de la alternativa

Tras definir las alternativas planteadas, se procede a con la selección de la mejor alternativa desde el punto de vista de los criterios definidos anteriormente. Para ello se ha empleado un método multi-atributo, en este caso el del Proceso Analítico Jerárquico (AHP). Para llevar a cabo su aplicación, se evalúa tanto los criterios como subcriterios (**Figura 9.1**) mediante la comparación por pares de estos.

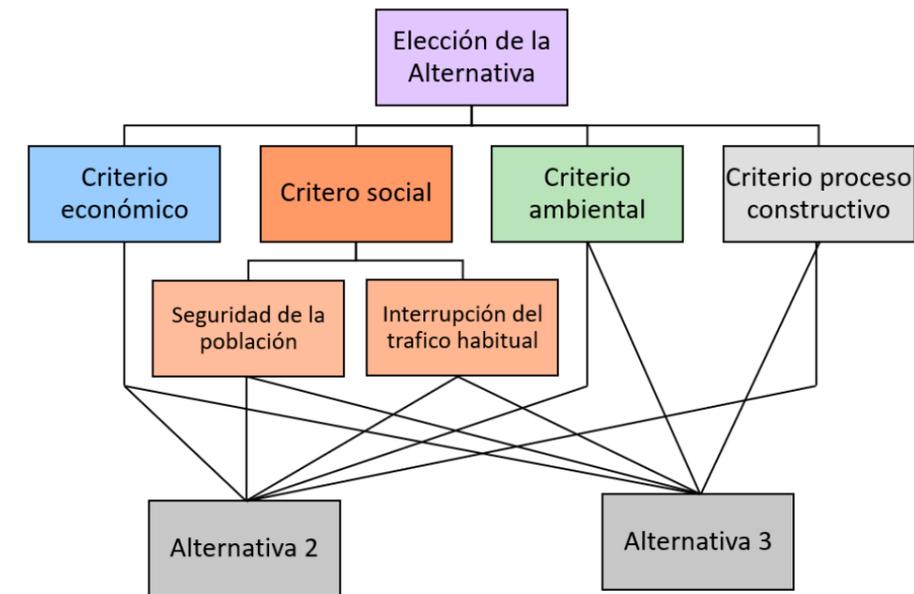


Figura 9.1. Estructura jerárquica de la AHP. Fuente: Elaboración propia

El siguiente paso, es obtener el vector de pesos tanto de los subcriterios como de los criterios, tras haber realizado la comparación por pares de estos. Por tanto, los pesos de estos quedan definidos en la siguiente tabla (**Figura 9.2**)

Código	Descripción	Peso
C1.1	Coste económico	0.460
C2.1	Interrupción del tráfico habitual	0.106
C2.2.	Sensación de seguridad	0.035
C3.1	Volumen de movimiento de tierras	0.140
C4.1	Facilidad del constructiva	0.260

Figura 9.2. Vector de pesos de cada subcriterio. Fuente: Elaboración propia en software Excel

En la siguiente tabla se enumera los valores resultantes tras haber realizado el análisis de los criterios considerados, teniendo en cuenta las esferas de la sostenibilidad y el criterio cualitativo de proceso constructivo, añadido por el autor. Es por ello por lo que, en la **Figura 9.3**, quedan definidos los criterios sin normalizar.

Código	Descripción	Alternativa 2	Alternativa 3
C1.1	Coste económico (€)	615919.83	369401.60
C2.1	Interrupción del tráfico habitual	1.15	1.00
C2.2.	Sensación de seguridad	0.80	0.20
C3.1	Volumen de movimiento de tierras (m <sup>3</sup> )	3465.86	2913.46
C4.1	Facilidad del constructiva	0.80	0.20

Figura 9.3. Resumen de las puntuaciones de las alternativas para cada subcriterio. Fuente: Elaboración propia en software Excel.

A continuación, en la siguiente tabla () se muestra los valores tras la normalización de las puntuaciones expuestas en la **Figura 9.3**.

Código	Descripción	Alternativa 2	Alternativa 3
C1.1	Coste económico (€)	0.63	0.37
C2.1	Interrupción del tráfico habitual	0.53	0.47
C2.2.	Sensación de seguridad	0.80	0.20
C3.1	Volumen de movimiento de tierras (m <sup>3</sup> )	0.54	0.46
C4.1	Facilidad del constructiva	0.80	0.20

Figura 9.4. Resumen de las puntuaciones normalizadas de las alternativas para cada subcriterio. Fuente: Elaboración propia en software Excel.

El último paso, es obtener la puntuación de cada alternativa para cada criterio, tras aplicar el AHP, para ello se multiplica la traspuesta de la matriz formada en la **Figura 9.4** por el vector de pesos definido en la **Figura 9.2**, de manera que se obtiene las puntuaciones, las cuales quedan recogidas en la **Figura 9.5**.

	Alternativa 2	Alternativa 3
C1	0.63	0.37
C2	0.60	0.40
C3	0.54	0.46
C4	0.80	0.20

Figura 9.5. Puntuaciones de las alternativas por criterios. Fuente: Elaboración propia en software Excel.

Hay que señalar que, la solución deseada es la que presenta menor grado de impactos ambientales, sociales y económicos, además de constar con un procedimiento de ejecución fácil. Por tanto, la alternativa a seleccionar es la que presente menor puntuación.

De manera que tras observa la **Figura 9.5** se observa que la **Alternativa 3** es la que presenta menor puntuación en cada criterio principal. Por tanto, se deduce que es la que menos impactos genera su ejecución, y la que presenta un procedimiento de ejecución más común y fácil de realizar, por ende es la solución a adoptar.

De manera que el siguiente paso es realizar el cálculo estructural.

## 10. Cálculo estructural

Tras haber seleccionado la alternativa idónea, Alternativa 3. Cimentación indirecta, se procede a definir el diseño estructural de la cimentación del aerogenerador, tanto la armadura que contiene los pilotes como el del encepado.

### 10.1. Bases de cálculo

#### 10.1.1. Normativa

Los cálculos realizados para obtener las cuantías de armado se han realizado empleando la normativa nacional:

- UNE-EN 1992-1-1 Eurocódigo 2: Proyecto de estructuras de hormigón. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación.
- Instrucción de Hormigón Estructural. EHE-08.

#### 10.1.2. Características de los materiales

A continuación, se expone las características de los materiales empleados para el cálculo del armado. El acero empleado para el armado de los elementos de hormigón armado son barras corrugadas del tipo B 500 SD. Y el hormigón depende del elemento, en el caso del encepado se ha empleado HA-30/B/20/Ila y los pilotes con HA-30/F/12/Ila.

<b>Hormigón armado HA-30/B/20/IIa</b>	Peso específico ( $\gamma$ )	25 kN/m <sup>3</sup>
	Resistencia característica en compresión ( $f_{ck}$ )	30 N/mm <sup>2</sup>
<b>Hormigón armado HA-30/F/12/IIa</b>	Peso específico ( $\gamma$ )	25 kN/m <sup>3</sup>
	Resistencia característica en compresión ( $f_{ck}$ )	30 N/mm <sup>2</sup>
<b>Armadura pasiva B 500 SD</b>	Límite elástico característico ( $f_{yk}$ )	500 N/mm <sup>2</sup>
	Módulo de deformación longitudinal ( $E_s$ )	200 000 MPa
<b>Terreno</b>	Peso específico medio aparente	23 kN/m <sup>3</sup>
	Cohesión del suelo (c)	0 kPa
	Angulo de rozamiento ( $\Phi'$ )	48 °

Tabla 10.1. Características de los materiales. Fuente: Elaboración propia

### 10.1.3. Acciones consideradas

A continuación, se define las acciones consideradas para definir la cuantía de armadura de la estructura:

- Acciones permanentes
  - Peso propio
  - Cargas muertas
- Acciones permanentes no constantes
  - Empujes del terreno
- Acciones variables
  - Cargas aerodinámicas

### 10.1.4. Combinación de acciones

En el cálculo del armado se aplica la combinación característica para el Estado Límite Último (ELU) y la persistente y transitoria para el Estado Límite de Servicio (ELS).

En este caso se ha realizado la combinación de acciones en ELU solamente, y para ello se han empleado los coeficientes de seguridad correspondientes a ELU, los cuales se muestran en la siguiente tabla.

<b>ELU</b>		
<b>Situación persistente o transitoria</b>		
<b>Tipo de acción</b>	<b>Efecto favorable</b>	<b>Efecto desfavorable</b>
<b>Permanente gravitatoria</b>	$\gamma_G = 1.00$	$\gamma_G = 1.35$
<b>Resto de acciones permanentes</b>	$\gamma_Q = 1.00$	$\gamma_Q = 1.50$
<b>Variable</b>	$\gamma_Q = 0.00$	$\gamma_Q = 1.50$

Tabla 10.2. Coeficientes parciales de seguridad para las acciones en situación persistentes o transitorias para la evaluación de los ELU. Fuente: EHE-08.

## 10.2. Procedimiento de dimensionado

La alternativa seleccionada en el apartado anterior como la idónea es la Alternativa 3. Cimentación indirecta, la cual se caracteriza por ser una cimentación compuesta por un grupo de pilotes y un encepado. Es por ello que la determinación del armado de la cimentación se diferencia según el elemento a estudiar, por una parte, la armadura longitudinal y estribos de los pilotes, y por otro lado la armadura longitudinal principal y secundaria del encepado.

Hay que destacar que antes de realizar el dimensionamiento, se ha de realizar un reparto de las cargas. Dicho procedimiento se encuentra detallado de forma más extenso en el **ANEJO N.º 5: CÁLCULO ESTRUCTURAL** y los cálculos en el **APÉNDICE F**.

Tras exponer los anterior se procede al cálculo de la armadura atendiendo al elemento de la cimentación.

### 10.2.1. Armado de pilotes

En primer lugar, se ha de realizar un reparto de las cargas entre el grupo de pilotes, con tal de conocer los valores que han de resistir. Para ello se ha utilizado las expresiones definidas en el **Apartado 5.7** de la **Guía de cimentaciones en obras de carretera**, de manera que se obtiene el valor del axil, tanto mínimo como máximo, y el cortante de cada pilote. Y se obtiene que el pilote con el menor valor de axil, no se encuentra comprimido sino traccionado, con tal de corregir dicha situación y por estar del lado de seguridad, se ha aumentado el número de pilotes en una fila y columna, con tal de mantener la simetría de la cimentación y así disponer todos los pilotes comprimidos.

Tras esta modificación la cimentación queda definida por 25 metros de lado, un canto de 3 metros, 49 pilotes con un diámetro de 1 metro distribuidos en 7 filas y columnas, de manera que equidisten entre ellos desde su centro de gravedad 3.5 metros.

No obstante, antes de proceder con el cálculo de la armadura se ha de volver a realizar las comprobaciones de seguridad, es decir los expuestos en el **ANEJO N.º 3: CÁLCULOS GEOTÉCNICOS**.

De manera que tras el reparto de los esfuerzos con los nuevos parámetros se obtiene que las cargas en las cabezas de los pilotes.

<b>Axil máximo</b>	$N_7$	3 459.16 kN
<b>Axil mínimo</b>	$N_1$	119.92 kN
<b>Cortante</b>	V	72. 10 kN

Tabla 10.3. Cargas ejercidas en la cabeza del grupo de 49 pilotes. Fuente: Elaboración propia en software Excel.

Además, ha de considerarse también la acción del momento a lo largo del eje y, el cual viene inducido por la acción del cortante, V, en la cabeza del pilote; de manera que el momento resistido por la cabeza del pilote es 865.23 kN·m.

Una vez definidos los esfuerzos se procede al cálculo del armado, el cual se diferencia entre longitudinal y transversal.

- **Armadura longitudinal:** viene condicionado tanto por el axil como el momento. Debido a que el valor del axil varía dependiendo del pilote, se ha considerado los casos límite, es decir el que presenta el valor máximo ( $N_7$ ) y mínimo ( $N_1$ ). La obtención de las cuantías se realiza mediante el programa Calc Flex, siendo la cuantía por disponer 15Ø20.
- **Armadura transversal:** viene condicionada por el cortante, y se calcula mediante las expresiones definidas en el **Apartado 6.2** de la **UNE-EN 1992-1-1**. Tras comprobar que el elemento es capaz de resistir el cortante por sí solo, se concluye que el pilote no requiere de armadura. No obstante, por norma se debe disponer la cuantía mínima, de manera que la armadura queda definida en Ø12/15.

### 10.2.2. Armado del encepado

Al igual que para los pilotes, el primer paso antes de definir la armadura es conocer los esfuerzos que resiste el encepado. Con tal de definir el comportamiento de la estructura se plantea el método de bielas y tirantes, al ser un procedimiento idóneo para estudiar regiones de discontinuidad. El proceso de análisis se basa en la simplificación de la estructura en un sistema de barras, que intenta reproducir el comportamiento de la estructura. La idoneidad del método viene justificada no solo porque el encepado sea una región D, también por ser del tipo rígido.

Es necesario resaltar, que al emplear dicho procedimiento se ha realizado una simplificación, la cual viene motivada por la simetría del encepado y por encontrarse fuera del alcance establecido para un alumno de grado. Dicha simplificación se basa en considerar el encepado como un modelo 2D, en el que se suma las reacciones en cabeza de los pilotes de cada columna, de manera que el modelo queda definido como en la **Figura 10.1**

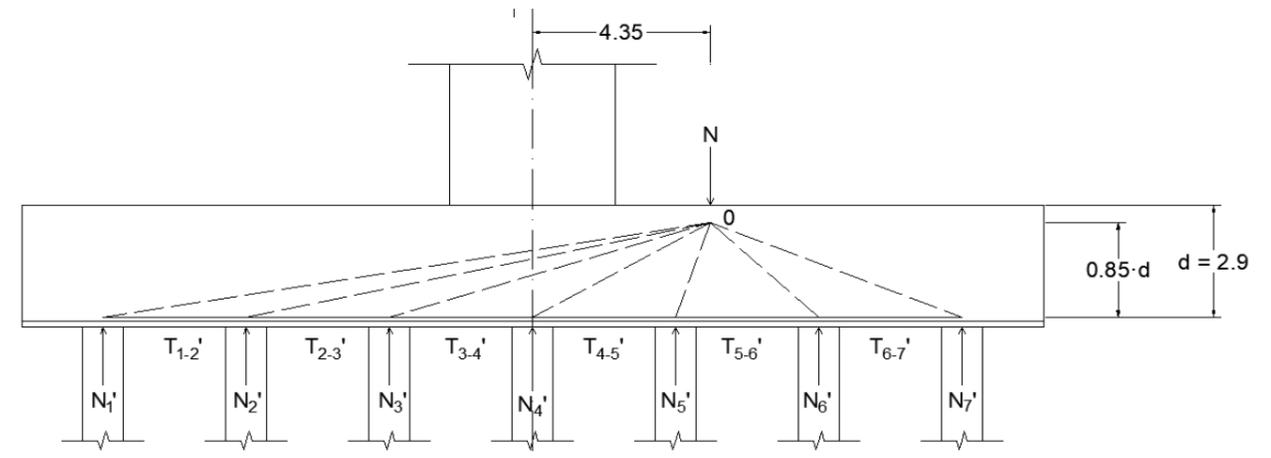


Figura 10.1. Representación del método de bielas y tirantes de caso de estudio. Fuente: Elaboración propia en software AutoCAD.

Siendo las reacciones resultantes las que se muestran en la **Tabla 10.4**.

$N_1' = 839.42$ kN	$V_1' = 504.72$ kN
$N_2' = 4\ 735.20$ kN	$V_2' = 504.72$ kN
$N_3' = 8\ 630.99$ kN	$V_3' = 504.72$ kN
$N_4' = 12\ 526.77$ kN	$V_4' = 504.72$ kN
$N_5' = 16\ 422.55$ kN	$V_5' = 504.72$ kN
$N_6' = 20\ 318.34$ kN	$V_6' = 504.72$ kN
$N_7' = 24\ 214.12$ kN	$V_7' = 504.72$ kN

Tabla 10.4. Reacciones resultantes tras el sumatorio de las reacciones de cada pilote por columna. Fuente: Elaboración propia en software Excel.

Una vez realizada el reparto de esfuerzos en la cabeza de los pilotes, se procede a obtener los esfuerzos que resiste el encepado, de manera que el siguiente paso es calcular las cuantías de armado. Al igual que en los pilotes, en primer lugar, se aborda la armadura longitudinal, para seguir a continuación con la vertical.

- **Armadura longitudinal:** esta se clasifica en dos tipos de armadura, en primer lugar, en la armadura inferior se tiene la principal, la cual se distribuye a lo largo de las bandas y la secundaria, que se ubica entre las bandas; y en segundo lugar la armadura superior.
  - **Armadura principal inferior:** esta se define mediante el tirante más traccionado, el cual es el  $T'_{5-6}$ , siendo 34Ø32, la armadura a disponer a lo largo de las bandas de 1.2 metros.
  - **Armadura secundaria inferior:** debe resistir como mínimo  $\frac{1}{4}$  de la capacidad mecánica de las bandas, de manera que se disponen 14Ø25.

- **Armadura superior:** se debe disponer un emparrillado ortogonal la cual en cada sentido debe resistir como mínimo un 10% de la resistencia de la banda. Por ende, la armadura del emparrillado queda definida como  $\emptyset 20/10$ .
- **Armadura vertical:** se dispone para resistir las tracciones debidas a la dispersión del campo de compresiones, se sitúa a modo de cercos, atando la armadura principal de las bandas. Se dispone en este caso de como armadura vertical  $\emptyset 12/15$ , esta se concentrará desde el pilote más cargado hasta la mitad del encepado, se dispondrá cercos dobles, con tal de resistir los esfuerzos.

Aunque en encepado sea simétrico, la armadura no lo es debido a los esfuerzos que ha de resistir, como solo se presenta acciones en sentido de dirección x, en esta dirección se dispondrá la armadura principal y secundaria, mientras que en el sentido y tanto en las bandas como entre bandas se dispondrá la armadura secundaria. En el caso de la armadura superior en ambas direcciones será la misma.

## 11. Valoración económica

En el presente apartado se recoge el coste final que supone la ejecución de la Alternativa 3. Cimentación indirecta. La exposición más en detalle de este apartado se encuentra en el **ANEJO N.º 6: VALORACIÓN ECONÓMICA**, en el cual se recoge las mediciones y precios unitarios.

En la **Figura 11.1**, se observa los precios de cada uno de los capítulos que forman parte de la fase de producción y ejecución de la cimentación para el aerogenerador.

Presupuesto de Ejecución Material de la Alternativa 3: Cimentación indirecta		
Código	Capítulo	Importe
01.	Actuaciones previas	4,982.40 €
02.	Movimiento de tierras	24,825.00 €
03.	Cimentación	526,007.41 €
<b>Presupuesto TOTAL de Ejecución Material</b>		<b>555,814.81 €</b>

Figura 11.1. Presupuesto de Ejecución Material de la Alternativa 3: Cimentación indirecta agrupado por capítulos. Fuente: Elaboración propia.

## 12. Conclusiones

Tras la exposición del presente trabajo, mediante la Memoria y Anejos, que conforman el Trabajo de Fin de Grado, con título “Diseño de la cimentación de un aerogenerador en el término municipal de Arcos de las Salinas (Teruel)”, se considera cumplido los objetivos establecidos.

Dichos objetivos son el diseño geotécnico y estructural de la cimentación de un aerogenerador, que tras la realización de un estudio se recomienda que se emplee una cimentación indirecta compuesta por 49 pilotes de 15 metros de longitud y con un diámetro de 1 metro, los pilotes se encuentran dispuestos sobre un encepado de 25 metros de lado y 3 metros de canto.



Fdo: Ana Gabriela Caballero Vallejos

Fecha: Septiembre 2021







# CONTENIDO

PLANO N.º 1: SITUACIÓN Y EMPLAZAMIENTO

PLANO N.º 2: GEOMETRÍA DE LA CIMENTACIÓN

PLANO N.º 3: ARMADO DE LA CIMENTACIÓN



# ANEJO N.º 0: OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE

AUTOR: Ana Gabriela Caballero Vallejos  
TUTOR: María Elvira Garrido de la Torre  
COTUTOR: Juan Navarro Gregori

Grado En Ingeniería Civil  
Escuela Técnica Superior De Ingeniería De Caminos, Canales Y Puertos  
Universitat Politècnica De València





## CONTENIDO

1. Antecedentes y objeto.....	4
2. Relación del TFG con los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2030.....	5

## 1. Antecedentes y objeto.

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) surgieron en 2015 cuando Naciones Unidas aprobó el documento “Transformando nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible” el cual propone 17 objetivos. Los cuales marcan el rumbo de las actividades para conseguir el bienestar de todas las personas y el cuidado del planeta. Los Objetivos de Desarrollo Sostenible o también llamados Objetivos Globales, se encuentran compuesto por 169 metas, que estas a su vez se encuentran integradas y relacionadas entre sí, ya que la acción en una de las áreas afectará los resultados de otras.

Los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible 2030 son:

- ODS 1. Fin de la pobreza.
- ODS 2. Hambre cero.
- ODS 3. Salud y bienestar
- ODS 4. Educación de calidad
- ODS 5. Igualdad de género.
- ODS 6. Agua limpia y saneamiento.
- ODS 7. Energía asequible y no contaminante.
- ODS 8. Trabajo decente y crecimiento económico.
- ODS 9. Industria, innovación e infraestructuras.
- ODS 10. Reducción de desigualdades
- ODS 11. Ciudades y comunidades sostenibles
- ODS 12. Producción y consumo responsables.
- ODS 13. Acción por el clima.
- ODS 14. Vida submarina.
- ODS 15. Vida de ecosistemas terrestres.
- ODS 16. Paz, justicia e instituciones sólidas.
- ODS 17. Alianzas para lograr objetivos.

Para entender el fin de los ODS, primero es necesario definir que es el desarrollo sostenible, la definición actual que se tiene, fue formulada por Gro Brundtland en 1987 en su obra titulada “*Our common future*”,

en ella define como desarrollo sostenible aquel que es capaz de satisfacer las necesidades de las generaciones actuales sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer sus propias necesidades.

Dicho esto, con tal de conseguir un desarrollo sostenible el modelo actual de producción y consumo basado en un sistema capitalista ha de cambiar. Para ello los nuevos modelos de desarrollo deben girar entorno de tres pilares fundamentales, los cuales son la sostenibilidad económica, ambiental y social. Con tal de conseguir dicho fin, se redactan los ODS los cuales giran en torno a estos tres ámbitos.

Se define como sostenibilidad económica, la capacidad de producir, distribuir y consumir bienes y servicios de forma responsables, respetando el uso de los recursos y medio ambiente. La ambiental, se centra en el uso responsable de los recursos sin comprometer las futuras necesidades. Y finalmente la social, gira en torno la satisfacción y bienestar de las personas.

Tal y como se ha dicho anteriormente, se puede ver la relación que existe entre los conceptos de sostenibilidad, ya que el cambio en uno de ellos repercute en los otros. Por ejemplo, si el medio ambiente se ve afectado por el cambio climático provocando sequías, esto repercute en la sociedad disminuyendo su bienestar, ya que el uso del agua se ve restringido o incluso imposibilitado. Por ende, los recursos que dependen de ella se ven afectados, ya sea cultivos, consumo humano, ganadería, etc.; y como consecuencia estos se ven obligados de encarecer los precios, afectando otra vez a la sociedad. De esta forma queda demostrada las relaciones que fluyen entre estos tres aspectos.

Cabe destacar que la Agenda 2030, continua el trabajo realizado por la Agenda 2021, la cual asentó las bases de los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM), estos estuvieron vigentes entre los años 2000 y 2015. Los ODM se encontraban compuestos por 8 objetivos los cuales de centraban en abordar las necesidades de los países más pobres del mundo. Aunque la principal diferencia que presenta los ODS respecto los ODM, son más amplios y cubren mayores retos y desafíos, los cuales pueden aplicarse a todos los países y no solo a los más pobres, además de los grupos vulnerables en cada país. Por otro lado, los ODS remarcan la interconexión que presentan las dimensiones sociales, económicas y ambientales, abogando por abordar los objetivos teniendo en cuenta la relación unos con otros, y no de forma independiente. Además, hacen un llamamiento a las instituciones, empresas, sociedad, sector académico, etc., a comprometerse con el cumplimiento de los ODS.

En el ámbito académico, las universidades han empezado a apoyar los ODS gracias a los esfuerzos realizados por organizaciones como a Red de Soluciones para el Desarrollo Sostenible (SDSN en inglés), Future Earth, la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO), los Principios de Gestión Responsables en Educación (PRIME) y otras asociaciones educativas.

Además, el compromiso que toman las universidades con las ODS crea una relación reciproca, en la que ambos obtienen aspectos positivos. Ya que las universidades proporcionan soluciones, conocimientos y nuevas ideas a los ODS, a la vez que forman a los actuales y futuros responsables de llevar a cabo los ODS, además sirven como modelo, para ver como adoptar, implementar y apoyar los ODS en la política de gestión. Gracias a estas aportaciones, los ODS piden a las universidades personas con un mayor grado de formación sobre los ODS, proporcionando de esta forma una definición global sobre el concepto de

universidad responsable, además generan nuevas fuentes de financiación a la vez que se fomenta la colaboración con nuevos socios.

Tal como se ha dicho anteriormente las universidades tienen un papel importante en la consecución de los ODS. Es por ello por lo que, las funciones principales que desempeña estas se pueden englobar en cuatro puntos, que son: aprendizaje, investigación, gobernanza institucional, gestión y administración de servicios, y finalmente liderazgo social. Estos suelen abordarse de forma separada, no obstante, se impulsa por la adopción de una visión global para afrontar los retos.

Centrándose en el aspecto de aprendizaje, el siguiente documento viene motivado por el análisis de los aspectos en los que contribuye el presente TFG en el logro de los ODS. Además de evaluar el grado de implicación. Dicho esto, en el siguiente apartado se explica en detalle la relación que existe.

## 2. Relación del TFG con los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2030.

Debido a la concienciación de la sociedad y de los altos cargos políticos, por apostar por un futuro basado en el desarrollo sostenible, el uso de energías renovables es tendencia y continúa aumentando a nivel mundial, en los últimos cinco años ha crecido tres veces más rápido que la obtenida a partir de combustibles fósiles y la nuclear.

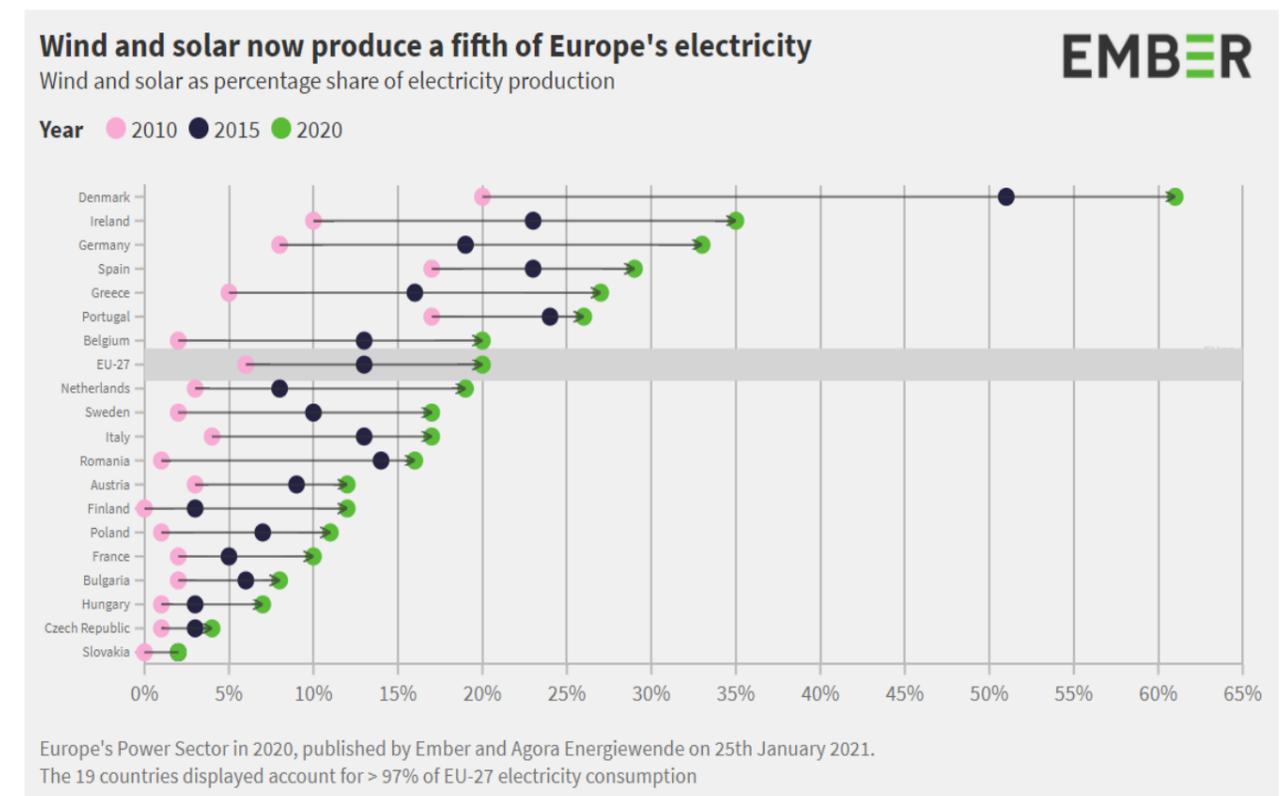
Este incremento en la utilización de energías renovables viene justificado por los avances tecnológicos, que han permitido la bajada de los costes de producción y mantenimiento y el perfeccionamiento de las instalaciones. Lo que lleva a que las energías renovables alcancen una paridad de costes y que se acerquen en la de rendimiento frente a las no renovables. Además, se ha demostrado que tanto la energía eólica como solar pueden ayudar a equilibrar la red de manera rentable.

Otro aspecto que ha marcado esta subida es el cambio climático, ya que constituye una emergencia mundial. Con tal de abordar esta problemática, los países se han comprometido a cumplir los objetivos marcados por el Acuerdo de París, aplicando soluciones coordinadas. El cual tiene por objeto la reducción sustancial de las emisiones de gases de efecto invernadero y limitar el aumento global de la temperatura en este siglo a 2 grados Celsius. Para conseguir la descarbonización de la economía mundial se apuesta por una transición energética que vaya desde la energía producida por combustibles fósiles hacia un sistema eléctrico basado en energías renovables. Además, los ODS han contribuido en mayor medida estos últimos años.

Durante la última década la Unión Europea ha experimentado un notable crecimiento en la generación de electricidad a partir de energías limpias. Siendo 2020 el primer año en que las energías renovables superan a los combustibles fósiles. El 38% de la electricidad de Europa fue producida por energía renovable en 2020, un 1% superior a la generada por combustibles fósiles.

Este hito histórico se debe a causa de la bajada del carbón, el cual, año tras año se ha visto reducido, además, este hecho se vio favorecido por la COVID-19, su impacto produjo una disminución en la demanda eléctrica, que originó que las compañías eléctricas apostarán por la energía eólica y solar, al ser más baratas. De manera que la energía eólica aumentó un 9% y la solar un 15%, generando juntos la quinta parte de la electricidad de Europa, en el pasado 2020. No obstante, debe casi triplicarse para alcanzar los objetivos del acuerdo ecológico de Europa para 2030, que consiste en una disminución del 55% de las emisiones.

En España, las energías renovables también han superado a las no renovables por primera vez, situándose como el cuarto país con mayor producción eléctrica proveniente de energía renovable superando a Portugal. Dinamarca con 62 %, se sitúa en primer lugar, siendo casi el doble que el siguiente país, Irlanda y en tercer lugar Alemania, tal y como se puede ver en la Figura 1.1.



Un gráfico de dispersión de Flourish

Figura 2.1. Evolución de la producción eléctrica europea mediante energía eólica y solar [EMBER]

Actualmente, la energía eólica ha aportado un 21,9% de la electricidad consumida el pasado año, y se sitúa como la primera fuente de energía renovable con un aporte del 49.7% del total, le sigue la hidráulica con un 27.7% y la solar, 13,8%.

En España existen en total 1.267 parques eólicos, con 21.431 aerogeneradores instalados. Así mismo consta con más de 220 centros de fabricación. De manera que la potencia eólica suministra 27.446 MW, de los cuales 1.720 fueron instalados en 2020.

Expuesto lo anterior y con tal de analizar el nivel de implicación y los objetivos abordados en el presente TFG “Diseño de la cimentación de un aerogenerador en el término municipal de Arcos de las Salinas (Teruel)” con las ODS se ha rellenado la siguiente tabla que se muestra a continuación, la cual ha sido facilitada por la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos.

Objetivos de Desarrollo Sostenibles	Alto	Medio	Bajo	No Procede
<b>ODS 1. Fin de la pobreza.</b>				<b>X</b>
<b>ODS 2. Hambre cero.</b>				<b>X</b>
<b>ODS 3. Salud y bienestar.</b>			<b>X</b>	
<b>ODS 4. Educación de calidad.</b>				<b>X</b>
<b>ODS 5. Igualdad de género.</b>				<b>X</b>
<b>ODS 6. Agua limpia y saneamiento.</b>				<b>X</b>
<b>ODS 7. Energía asequible y no contaminante.</b>	<b>X</b>			
<b>ODS 8. Trabajo decente y crecimiento económico.</b>				<b>X</b>
<b>ODS 9. Industria, innovación e infraestructuras.</b>		<b>X</b>		
<b>ODS 10. Reducción de las desigualdades.</b>				<b>X</b>
<b>ODS 11. Ciudades y comunidades sostenibles.</b>	<b>X</b>			
<b>ODS 12. Producción y consumo responsables.</b>	<b>X</b>			
<b>ODS 13. Acción por el clima.</b>	<b>X</b>			
<b>ODS 14. Vida submarina.</b>				<b>X</b>
<b>ODS 15. Vida de ecosistemas terrestres.</b>				<b>X</b>
<b>ODS 16. Paz, justicia e instituciones sólidas.</b>				<b>X</b>
<b>ODS 17. Alianzas para lograr objetivos.</b>				<b>X</b>

Tabla 2.1. Grado de implicación del presente TFG en los ODS. Fuente: Elaboración propia.

Tal como se señala en la Memoria, el presente Trabajo de Fin de Grado se centra en el diseño geotécnico y estructural de una cimentación para sostener un aerogenerador en el término de Arcos de las Salinas, el cual tiene una capacidad de potencia de 2.1 MW.

La instalación de dicho elemento contribuye en gran medida a conseguir un desarrollo sostenible, ya que la energía eólica al tratarse de una energía renovable, es decir limpia y no contaminante, no genera impactos negativos en el medio ambiente. Ya que la producción de la energía eléctrica no conlleva la emisión de gases de efecto invernadero a la atmosfera, frenando de esta forma el cambio climático. Por otro lado, la energía renovable se caracteriza por proceder de recursos inagotables, en este caso el viento. Por ende, al no hacer uso de recursos finitos a largo tiempo, se garantiza la capacidad de las futuras generaciones a satisfacer sus necesidades. Dicho lo anterior queda justificada la alta implicación en los ODS, en particular el 7. Energía asequible y no contaminante y el 13. Acción por el clima, al no emitir gases de efectos invernadero que contribuyen al cambio climático, el 12. Producción y consumo responsable, por el empleo de recursos inagotables para producir energía eléctrica, y finalmente el 11. Ciudades y comunidades sostenibles, al hacer uso de una energía limpia como la eólica, para suministrar electricidad a las poblaciones cercanas.

El logro de estos objetivos relacionados con la sostenibilidad ambiental tiene una repercusión en las esferas restantes, la económica y social. Ya que, al optar por estructuras resilientes y sostenibles que generan energía limpia, se logra promover su uso, lo cual deriva en la innovación de las estructuras y la tecnología para obtener energía limpia, cada vez con mayores rendimientos y con costes más bajos, al optimizar los procesos. El aumento del uso de energías renovables, como en este caso la eólica, implica en una disminución del uso de recursos finitos que emiten gases de efecto invernadero, tal como se ha dicho anteriormente, conlleva a una mejora de la calidad de vida de las personas, al disminuir los niveles de contaminación del aire, además de frenar el cambio climático, evitando así los problemas que este conlleva. De esta forma se deduce la implicación del presente trabajo en los ODS 3. Salud y bienestar y el 9. Industria, innovación e infraestructuras.

Para finalizar el presente anejo, se hace un llamamiento a la concienciación del poder de actuación que presenta cualquier persona y que todo acto suma a la hora de conseguir los Objetivos de Desarrollo Sostenible.



# ANEJO N.º 1: CÁLCULOS PREVIOS

AUTOR: Ana Gabriela Caballero Vallejos

TUTOR: María Elvira Garrido de la Torre

COTUTOR: Juan Navarro Gregori

Grado En Ingeniería Civil

Escuela Técnica Superior De Ingeniería De Caminos, Canales Y Puertos

Universitat Politècnica De València



## CONTENIDO

1. Antecedentes y objeto .....	4
2. Normativa.....	4
3. Datos de partida.....	4
4. Cargas aplicadas .....	5
4.1. Cálculo de cargas gravitacionales .....	5
4.1.1. Cálculos previos .....	5
4.1.2. Cargas gravitacionales .....	5
4.2. Cálculo de cargas aerodinámicas.....	6
4.2.1. Cálculos previos .....	6
4.2.2. Cargas aerodinámicas.....	7
5. Cálculo de los valores característicos.....	8
6. Conclusión .....	8
7. Referencias.....	9



## 1. Antecedentes y objeto

El elemento de estudio del presente Anejo es la ejecución de un aerogenerador en el término de Arcos de las Salinas (Teruel). Dicho proyecto comprende el diseño de la cimentación. Es por ello por lo que el objeto del Anejo es la realización de los cálculos previos para realizar el predimensionamiento de la cimentación del aerogenerador, a modo de obtener los volúmenes necesarios de materiales para realizar cada una de las alternativas, con el fin de compararlas y elegir la solución idónea, desde un punto de vista económico, ambiental y funcional, este último paso se aborda en el **ANEJO N.º 4: ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS**.

Con tal de determinar la cimentación, el primer paso a realizar es definir las acciones que transmite el aerogenerador a la cimentación. Debido a las limitaciones y alcance de este Trabajo de Fin de Grado, únicamente se han considerado las cargas gravitacionales y aerodinámicas, estas se pueden ver en la **Figura 1.1**.

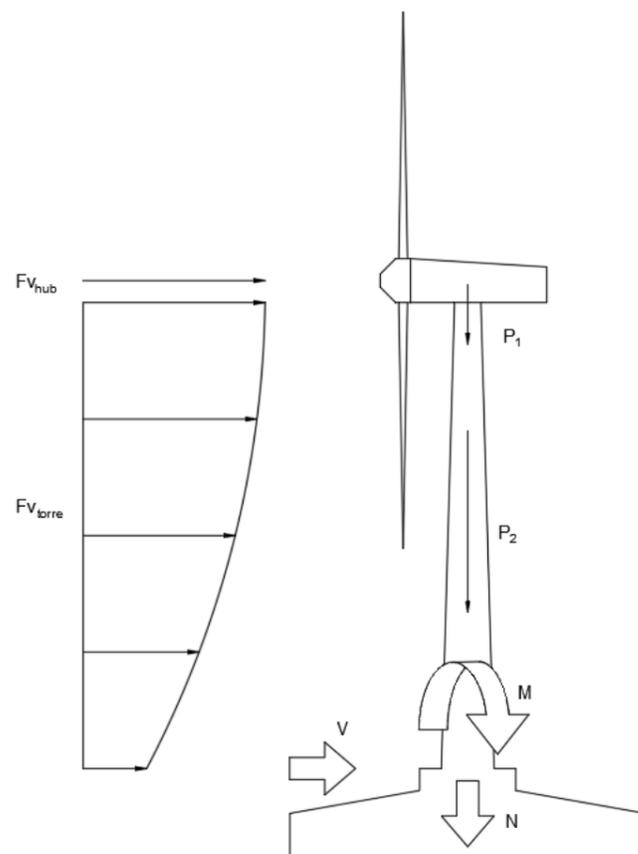


Figura 1.1. Croquis de las acciones sobre los elementos del aerogenerador. Fuente: Elaboración propia en software AutoCad

## 2. Normativa

Los presentes cálculos se han llevado a cabo mediante la aplicación de la siguiente normativa:

- DNV-RP-C205 *Environmental conditions and environmental loads*.
- UNE-EN IEC 61400-1 Sistemas de generación de energía eólica. Parte 1: Requisitos de diseño.
- UNE-EN IEC 61400-3 Aerogeneradores. Parte 3: Requisitos de diseño para aerogeneradores marinos.

## 3. Datos de partida

Para definir la cimentación a disponer, se ha de conocer las cargas a las que está sometida. Dicho esto, las cargas se encuentran definidas por la masa del aerogenerador y la acción del viento sobre este.

Es por ello por lo que se ha de definir el modelo de aerogenerador a emplear, en función del emplazamiento, el viento predominante y su velocidad, además del rendimiento. Siendo el SG 2.1-114 de Siemens Gamesa Renewable Energy, el modelo que mejor se adapta. Los datos referentes al aerogenerador se encuentran en el **APÉNDICE A**.

Por otro lado, gracias a la plataforma Global Wind Atlas, se conoce la velocidad media anual del viento a una altura de 100 metros, siendo esta de 7.9 m/s.

No obstante, la altura a la que se encuentra el buje del aerogenerador es de 107 metros, de manera que mediante la expresión del Apartado 6.3.2.2 de la UNE-IEC 61400-1, se determina el valor de la velocidad a la altura del buje.

$$V(z) = V_{hub} * \left( \frac{z}{z_{hub}} \right)^\alpha \quad (1)$$

En la **Ecuación (1)**,  $V(z)$  es la velocidad del viento a la altura  $z$ , en este caso corresponde a 7.9 m/s, para una altura,  $z$ , de 100 metros,  $z_{hub}$  es la altura a la altura del buje, 107 metros y  $\alpha$  es el coeficiente exponencial, que la norma establece como 0.2, siendo el valor de  $V_{hub}$ , velocidad del viento a la altura del buje, de 8.1 m/s.

## 4. Cargas aplicadas

En el presente apartado se define las cargas que deben considerarse para los cálculos de diseño. Las diferentes acciones que considerar son:

- Cargas de inercia y gravitacionales: son cargas estáticas y dinámicas resultantes de la vibración, rotación, gravedad y actividad sísmica.
- Cargas aerodinámicas: son cargas estáticas y dinámicas causadas por el flujo de aire y por la interacción del aire con las partes tanto estacionarias como móviles del aerogenerador.
- Cargas de actuación: son las cargas producidas por el funcionamiento y control del aerogenerador.
- Otras cargas: son las cargas de estela, impacto, por hielo, de la torre derivadas por ejemplo de las vibraciones inducidas por el vórtice, etc.

A causa de las limitaciones y alcance del siguiente Trabajo de Fin de Grado, solo se consideran las cargas gravitacionales y las aerodinámicas. Se considera como acciones gravitacionales las cargas fijas, es decir el peso propio del aerogenerador, y como aerodinámicas, las resultantes de la incidencia del viento sobre el aerogenerador.

### 4.1. Cálculo de cargas gravitacionales

#### 4.1.1. Cálculos previos

Para definir el peso propio del aerogenerador, se ha de disponer la masa de los elementos que componen la estructura.

Tal como se ha dicho anteriormente, en el **Apartado 5.2.** de la **MEMORIA**, no se dispone de la ficha técnica completa del aerogenerador SG 2.1-114, en concreto la masa de las partes principales del aerogenerador, es por ello por lo que se toma los valores de la ficha del G.90, con una altura de torre de 100 metros.

Tras comparar los dos modelos, la única diferencia existente entre ambos modelos es respecto a las dimensiones de las torres, siendo la del SG 2.1-114 6 metros superior que la del G.90, teniendo una altura total de 106 metros para el primer modelo. Por tanto, se incrementa un 6% la masa de la torre del G.90 con tal de obtener una masa aproximada del modelo a emplear. Y se considera la misma masa para la góndola y el rotor.

Es por ello por lo que, en el siguiente apartado, se desarrolla los cálculos necesarios para determinar la masa de cada una de las partes del aerogenerador.

En la **Tabla 4.1**, se recoge el valor final, tras el incremento de la masa, de las principales partes del aerogenerador. Estas son las que se debe emplear para realizar el cálculo de las acciones gravitacionales.

	Modelo G.90	Modelo SG 2.1-114
<b>Masa de la góndola [Tn]</b>	286	303.2
<b>Masa del rotor [Tn]</b>	65	65
<b>Masa de la torre [Tn]</b>	39.4	39.4

Tabla 4.1. Masa de cada uno de los elementos del aerogenerador para el modelo G.90 y SG 2.1-114. Fuente: Elaboración propia en software Excel

La ficha técnica del modelo SG 2.1-114 se puede consultar en el **APÉNDICE A** y la del modelo G.90 en el **APÉNDICE B**.

#### 4.1.2. Cargas gravitacionales

Se considera como cargas gravitacionales, el peso propio de los elementos principales del aerogenerador, es decir la góndola, el rotor, las palas y la torre.

Por tanto, tras definir el valor final de la masa, de cada una de las partes del aerogenerador; el siguiente paso es calcular el peso de los diferentes componentes, es decir la fuerza que ejercen sobre la cimentación.

Las fuerzas obtenidas se muestran en la **Tabla 4.2**:

	Símbolo	Valor [kN]
<b>Peso de la torre</b>	$P_1$	2 974
<b>Peso de la góndola</b>	$P_2$	1 024.2
<b>Peso del rotor</b>		

Tabla 4.2. Peso de los elementos del aerogenerador. Fuente: Elaboración propia en software Excel

## 4.2. Cálculo de cargas aerodinámicas

### 4.2.1. Cálculos previos

Las acciones aerodinámicas, son las resultantes de la incidencia del viento sobre el aerogenerador. Y se considera solo la acción de este sobre los elementos del aerogenerador que poseen una dimensión suficiente, como para que ejerza una fuerza que pueda comprometer la estabilidad y funcionamiento del aerogenerador. Dicho lo anterior se considera solo la incidencia del viento sobre el conjunto formado por el rotor y palas, y la torre.

Para determinar las cargas aerodinámicas, se emplea la **Ecuación (2)** y la **Ecuación (3)**, las cuales se encuentran definidas en el siguiente apartado.

$$F = \frac{1}{2} * \rho_{aire} * A * V_{e50}^2(z) * C_D \quad (2)$$

$$f(z) = \frac{1}{2} * \rho_{aire} * D_{cil} * V_{e50}^2(z) * C_e \quad (3)$$

Para poder aplicar ambas expresiones, es necesario conocer el valor de la velocidad del viento extrema con un periodo de recurrencia de 50 años,  $V_{e50}$  y la velocidad de referencia,  $V_{ref}$ , la cual viene definida en la Tabla 1 de la UNE-IEC 61400-1.

Por tanto, el primer paso es calcular la velocidad extrema del viento en cada una de las alturas necesarias para obtener la fuerza ejercida sobre cada elemento. En la **Figura 4.1**, se muestra un croquis de los puntos de interés de la torre con sus correspondientes alturas.

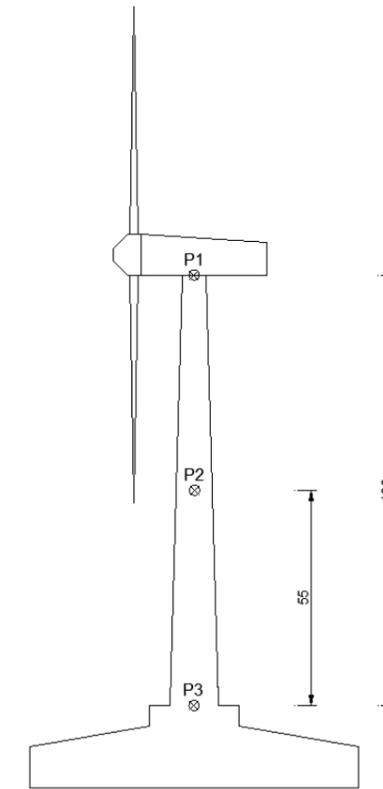


Figura 4.1. Puntos de interés. Fuente: Elaboración propia en software AutoCad

La velocidad del viento extrema con un periodo de recurrencia de 50 años,  $V_{e50}$ , en cada uno de los puntos de interés, se calcula mediante la **Ecuación (4)**, dispuesta en la Normativa, en el **Apartado 6.3.3.2** de la **UNE-IEC 61400-1**.

$$V_{e50}(z) = 1.4 * V_{ref} * \left( \frac{z}{z_{hub}} \right)^{0.11} \quad (4)$$

Siendo  $V_{ref}$ , la velocidad de referencia del viento a lo largo de un periodo de 10 minutos, para un aerogenerador de Clase II, 42.5 m/s,  $z_{hub}$  es 107 metros para el aerogenerador SG 2.1-114 y la altura,  $z$ , depende de los puntos de interés.

En el **APÉNDICE C**, se puede consultar una tabla, en la que se puede consultar los valores que adopta el viento para diferentes alturas, en un intervalo de 5 metros; además de los valores que adopta el perfil del viento normal.

La **Tabla 4.3**, recoge el valor de la velocidad del viento extrema con un periodo de recurrencia de 50 años,  $V_{e50}$ , en los puntos necesarios para poder calcular la fuerza del viento sobre el aerogenerador.

	Símbolo	Altura z [m]	Valor [m/s]
Velocidad del viento extrema a la altura del rotor	$V_{e50 \text{ hub}}$	107	59.50
Velocidad del viento extrema a la altura superior de la torre, P1	$V_{e50 \text{ torre1}}$	106	59.44
Velocidad del viento extrema a la altura intermedia de la torre, P2	$V_{e50 \text{ torre2}}$	55	55.30
Velocidad del viento extrema a la altura inferior de la torre, P3	$V_{e50 \text{ torre3}}$	0	0

Tabla 4.3. Resumen de las velocidades de viento extrema con un periodo de recurrencia de 50 años.

Fuente: Elaboración propia en software Excel

#### 4.2.2. Cargas aerodinámicas

Una vez se obtiene el valor de la velocidad del viento extrema en cada uno de los puntos de interés,  $V_{e50}$ , el siguiente paso es calcular la carga que produce este sobre los elementos del aerogenerador. Tal como se ha expuesto anteriormente, las cargas se calcularán únicamente sobre el rotor y la torre.

- Carga del viento sobre el rotor y las palas

De acuerdo con la norma **DNV-RP-C205 "Environmental conditions and environmental loads"**, el viento sobre el rotor se determina mediante la **Ecuación (2)**.

Siendo  $V_{e50}$ , 59.50 m/s al considerarse la velocidad extrema a la altura del rotor (107 m),  $A$  es el área de barrido de las palas, según la ficha técnica el valor es 10 207 m<sup>2</sup>,  $\rho_{\text{aire}}$  es la densidad del aire (1.255 Kg/m<sup>3</sup>),  $C_D$  es el coeficiente de arrastre, para el caso de las palas de un aerogenerador se considera una forma aerodinámica con un coeficiente de 0.1, por tanto  $F$ , el valor de la fuerza del viento es de 2 267.49 kN.

- Carga del viento sobre la torre

La fuerza que ejerce el viento sobre la torre se asemeja a la aplicada sobre un cilindro, por tanto, para determinar la acción se emplea la **Ecuación (3)**, la cual viene definida en la Norma, **UNE-IEC 61400-3**.

Donde en la **Ecuación (3)**  $f(z)$  es la fuerza del viento ejercida sobre un cilindro en función de la altura,  $\rho_{\text{aire}}$  es de 1.255 Kg/m<sup>3</sup>,  $D_{\text{cil}}$  es el diámetro del elemento, en este caso el de la torre, esta varía a lo largo de la altura, es por ello por lo que se realiza una simplificación y se considera dos tramos uno con un diámetro de 4.038 m y otro de 2.134 m,  $V_{e50}(z)$  es la velocidad extrema en

función de la altura y  $C_e$  es el coeficiente de forma, el cual depende de la forma del elemento, al considerar la torre como un cilindro su sección es un círculo, y el Número de Reynolds.

Dicho lo anterior, el coeficiente de forma se determina mediante la **Tabla 4.4**.

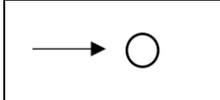
	Structures	Shape coefficient	
		$R_e \leq 4.2 \cdot 10^5$	0.50
	Sphere	$4.2 \cdot 10^5 < R_e < 10^6$	0.15
		$R_e \geq 10^6$	0.20

Tabla 4.4. Coeficiente de forma en función de la forma y el Número de Reynold

El Número de Reynolds,  $R_e$ , se define en la **Ecuación (5)**:

$$R_e = \frac{v(z) * D * \rho}{\mu} \quad (5)$$

Esta se define mediante la velocidad del viento a la altura  $z$ ,  $v(z)$ ,  $D$  es el diámetro del elemento,  $\rho$  es la densidad del aire (1.255 Kg/m<sup>3</sup>) y  $\mu$  es la viscosidad dinámica, en el caso del aire se considera un valor de 0.0000174 Kg/m·s.

La **Ecuación (3)**, se aplica a una estructura que tenga una forma cilíndrica, no obstante, la torre del aerogenerador no es un cilindro, sino el cuerpo inferior de un tronco cónico, donde la base consta con un diámetro de 4.038 metros y la parte superior con uno de 2.314 metros. Es por ello por lo que se realiza una simplificación y se considera la torre como un cilindro. No obstante, al considerar que toda la torre tiene un diámetro de 4.038 metros, se obtiene unos valores de carga sobredimensionados, ya que la fuerza depende directamente del diámetro, dando lugar también a un sobredimensionamiento de la cimentación. Por otra parte, si se realiza la simplificación que toda la torre tiene un diámetro de 2.314 metros, ocurre lo contrario, se tiene unas cargas infradimensionadas, de manera que no se aproxima a la realidad, de manera que la cimentación diseñada para esas cargas no resistiría las cargas reales. Esto puede comprometer la estabilidad de la estructura.

Dicho lo anterior, se considera a efectos de cálculo dos tramos de torre con diámetro constante, siendo el tramo superior de 2.314 metros y el inferior de 4.038 metros.

Por otra parte, la fuerza del viento ejercida sobre la torre,  $f(z)$ , también depende directamente de la velocidad del viento extrema,  $V_{e50}$ , la cual no es constante a lo largo de toda la torre. Esto ocurre porque el viento no es constante a lo largo de la altura, sino que tiene un comportamiento exponencial, es decir aumenta según aumenta la altura. Es por ello por lo que en el **Apartado 3.2.1. Cálculos previos** se calcula la velocidad extrema en los diferentes puntos de interés, los cuales coinciden con la parte superior, la intermedia y la base de la torre.

A continuación, en la **Tabla 4.5** se recogen los valores que se ha considerado para cada uno de los puntos de interés y la carga sobre la torre,  $f(z)$ .

	$f(z)$ [kN/m]	$D_{cil}$ [m]	$V_{e50}(z)$ [m/s]	$C_e$	$R_e$
<b>P1</b>	0,946	4.038	59.44	0.2	9 148 655.79
<b>P2</b>	0,819	4.038	55.30	0.2	9 148 655.79
<b>P2</b>	1,550	2.134	55.30	0.2	17 311 280.26
<b>P3</b>	0	2.134	0	0.2	17 311 280.26

Tabla 4.5. Fuerza ejercida por el viento sobre la torre en cada uno de los puntos de interés. Fuente: Elaboración propia en software Excel

Tras obtener el valor de la carga del viento sobre la torre, es decir la distribuida a lo largo de cada uno de los puntos de interés, el siguiente paso es calcular la puntual sobre la torre. Tal y como se puede ver en la tabla anterior, la carga distribuida del tramo superior de la torre es trapezoidal y la inferior triangular. De manera que la carga resultante sobre la torre tiene un valor de 87.85 KN, en la **Tabla 4.6** se tiene el valor de la carga puntual en los dos tramos de la torre considerados.

$F_{v_{torre1}}$ [kN]	$F_{v_{torre2}}$ [kN]
46.78	41.07

Tabla 4.6. Cálculo de la carga puntual ejercida por el viento sobre la torre. Fuente: Elaboración propia en software Excel

En resumen, en la siguiente tabla se recoge el valor de cada una de las cargas aerodinámicas.

$F_{v_{hub}}$ [kN]	$F_{v_{torre}}$ [kN]
2 267.49	87.85

Tabla 4.7. Resumen de las cargas aerodinámicas. Fuente: Elaboración propia

## 5. Cálculo de los valores característicos

Tras haber definido el valor de las cargas originadas tanto las cargas aerodinámicas originadas por la incidencia del viento sobre el aerogenerador, como las cargas gravitacionales, se puede determinar el valor de las cargas totales que se transmitirán a la cimentación.

De manera que, para determinar los valores característicos, es decir, las cargas transmitidas a la cimentación se ha de considerar el peso propio del aerogenerador y la carga del viento sobre el rotor y la torre.

Axil (N)	Cortante (V)	Momento (M)
3 998.20 kN	2 355.34 kN	247 458.54 kN·m

Tabla 5.1. Cargas transmitidas a la cimentación. Fuente: Elaboración propia en software Excel

## 6. Conclusión

Cabe recordar que el objeto del presente Anejo es el cálculo de las acciones que se transmiten a la cimentación con la finalidad de poder realizar el predimensionamiento de la cimentación en el **ANEJO N.º 3: COMPROBACIONES GEOTÉCNICAS**, para poder cuantificar los materiales necesarios para llevar a cabo su ejecución y así poder comparar las diferentes alternativas y elegir la idónea.

## 7. Referencias

*Aerogeneradores onshore I Siemens Gamesa*. (n.d.). Retrieved September 5, 2021, from <https://www.siemensgamesa.com/es-es/products-and-services/onshore>

*Global Wind Atlas*. (n.d.). Retrieved September 5, 2021, from <https://globalwindatlas.info/>

Norske Veritas, D. (2010). *RECOMMENDED PRACTICE ENVIRONMENTAL CONDITIONS AND ENVIRONMENTAL LOADS*. <http://www.dnv.com>

*UNE-EN IEC 61400-1:2020 Sistemas de generación de energía eóli...* (n.d.). Retrieved September 5, 2021, from <https://tienda.aenor.com/norma-une-en-iec-61400-1-2020-n0063447>

*UNE-EN IEC 61400-3-1:2021 Sistemas de generación de energía eó...* (n.d.). Retrieved September 5, 2021, from <https://tienda.aenor.com/norma-une-en-iec-61400-3-1-2021-n0065889>



# ANEJO N.º 2: ESTUDIO GEOTÉCNICO

AUTOR: Ana Gabriela Caballero Vallejos  
TUTOR: María Elvira Garrido de la Torre  
COTUTOR: Juan Navarro Gregori

Grado en Ingeniería Civil  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería De Caminos, Canales y Puertos  
Universitat Politècnica de València



## CONTENIDO

1. Introducción .....	4
2. Antecedentes .....	4
3. Objeto .....	4
4. Caracterización del terreno .....	5
4.1. Geología .....	5
4.2. Geomorfología .....	5
4.3. Sismicidad .....	6
4.4. Hidrogeología .....	6
4.5. Accesibilidad .....	6
5. Parametrización del terreno .....	8
6. Conclusiones .....	9



## 1. Introducción

El siguiente documento constituye el anejo de estudio geotécnico del Trabajo de fin de Grado, titulado “Diseño de la cimentación de un aerogenerador en el término municipal de Arcos de las Salinas (Teruel)”.

El presente anejo se ha realizado tomando de referencia datos de otro emplazamiento con características muy similares, al no disponer de ningún estudio geotécnico real cercano al emplazamiento.

## 2. Antecedentes

La utilización de energías renovables ha aumentado notablemente en los últimos cinco años, a causa del abaratamiento de la producción y mantenimiento de las instalaciones. Este hecho también se ve respaldado por el cambio climático, y consecuentemente con la necesidad de reducir los gases de efecto invernadero y limitar el aumento de la temperatura del planeta. Para alcanzar los objetivos enunciados se ha apostado por la transición energética, obteniendo la energía eléctrica mediante energías renovables, siendo los parques eólicos y las placas solares las más utilizadas.

En la Comunidad de Aragón ha aumentado considerablemente la instalación de parques eólicos, registrando en los dos últimos años un incremento de más de 1 GW. De manera que, para seguir con el proceso de descarbonización de la energía, se apuesta por la instalación de un aerogenerador, el modelo SG 2.1-114 de Gamesa, el cual consta con una potencia de 2.1 MW.

El emplazamiento que va a albergar el aerogenerador es el término municipal de Arcos de las Salinas, en la provincia de Teruel. Este se ubica a 2.5 kilómetros de la población, en lo alto del Collado Román. Al situarse en lo alto del collado la obra no presenta ninguna afección a posibles elementos cercanos.

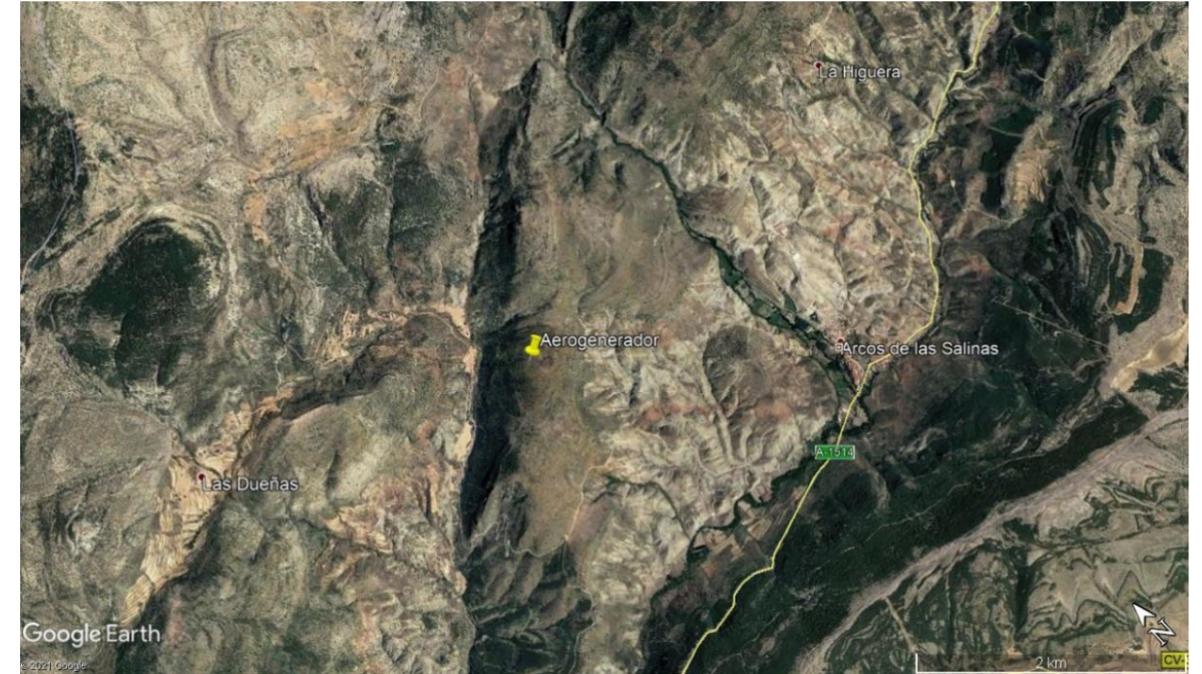


Figura 2.1. Emplazamiento. Fuente: Elaboración propia en Google Earth

## 3. Objeto

El objeto principal del anejo es determinar las propiedades geotécnicas de las formaciones o materiales que se ven afectados por la realización del proyecto, con tal de realizar un análisis y definir los aspectos a considerar para definir el tipo de cimentación a ejecutar y su posterior dimensionamiento.

Tras la redacción del anejo, se esclarece:

- La estratigrafía superficial del emplazamiento.
- Las características geomecánicas del terreno.
- Las características hidrogeológicas.
- La respuesta del terreno frente a las acciones provenientes del aerogenerador.

## 4. Caracterización del terreno

### 4.1. Geología

En la comunidad de Aragón, desde el punto de vista geológico, afloran formaciones geológicas de toda la serie estratigráfica, comprendiendo materiales del Precámbrico, Paleozoico, Mesozoico y Cenozoico.

En la hoja n.º 613 "Camarena de la Sierra" escala 1:50.000, proporcionada por el Instituto Geológico y Minero de España, IGME, la presente columna estratigráfica abarca desde el Triásico al Cuaternario.

Concretando en el área de estudio, los materiales pertenecen al Mesozoico. Como se puede observar en la **Figura 4.1**, el aerogenerador se encuentra ubicado entre los municipios de Arcos de las Salinas, las Dueñas y la Higuera, los cuales se caracterizan por tener una geología variada y materiales de diferentes periodos.

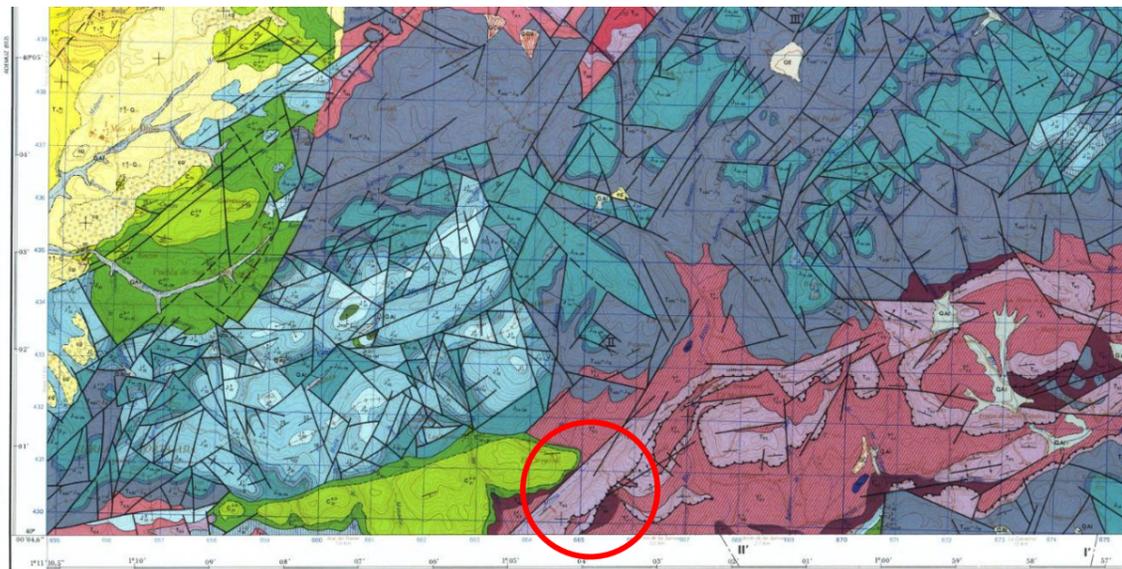


Figura 4.1. Emplazamiento del aerogenerador representado en el extracto de la Hoja n.º 613 "Camarena de la Sierra" escala 1:50.000. Fuente: Instituto Geológico y Minero de España, IGME

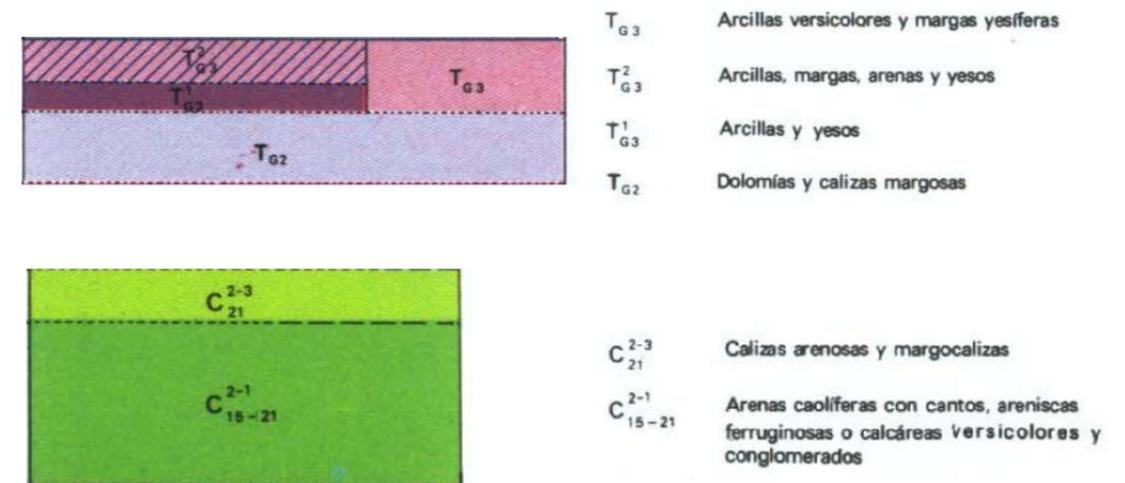


Figura 4.2. Extracto de la leyenda de la hoja n.º 613 "Camarena de la Sierra" escala 1:50.000 Fuente: Instituto Geológico y Minería de España, IGME

En el término municipal de Las Dueñas, aflora materiales del Cretácico. Se caracteriza por el predominio de calizas arenosas y margocalizas, en menor proporción afloran las arenas caolíferas con cantos, areniscas ferruginosas o calcáreas versicolores y conglomerados.

En los otros términos, los materiales pertenecen al Triásico. El afloramiento más extenso se compone por arcillas, margas, arenas y yesos, le sigue las dolomías y calizas y en último lugar arcillas y yesos, con afloramientos puntuales. Las arcillas, margas, arenas y yesos como las arcillas y yesos pertenecen al Keuper, siendo las dolomías y calizas características del Muschelkalk.

El emplazamiento de la actuación se sitúa en un terreno compuesto por dolomías y calizas.

En el **APÉNDICE D** se presenta la hoja n.º 613 "Camarena de la Sierra" escala 1:50.000 en su totalidad, facilitando así su lectura.

### 4.2. Geomorfología

La comarca del Gúdar-Javalambre se halla entre el sistema Ibérico y la Depresión de la Mora. A lo largo de la comarca discurre el río Villahermosa dividiendo la región en dos mitades. El aerogenerador se encuentra en la parte inferior, sobre el Macizo de Javalambre, el cual forma parte de la Cordillera Ibérica. La zona de actuación se ubica en lo alto del Collado Román, a una altitud de 1250 metros.

El macizo montañoso de vigorosa morfología presenta afloramientos de dolomías y calizas margosas. Ambas rocas presentan un fuerte tableado, en el que la presencia de fracturas es importante. La

separación entre las fracturas a lo largo del macizo es de aproximadamente 10 centímetros. También se observa la presencia de fallas y pliegues en el terreno.

La vegetación predominante de la zona son bosques y espacios de vegetación arbustiva y/o herbácea.

### 4.3. Sismicidad

Los criterios a seguir dentro del territorio español, para la consideración de acciones sísmicas en la elaboración de proyectos, se recogen en la **Norma de Construcción Sismorresistente NCSE-02**. La normativa tiene en cuenta la clasificación de la construcción y la peligrosidad sísmica del emplazamiento.

Atendiendo al uso al que se encuentra destinado la obra y los posibles daños que puede provocar, la construcción se clasifica como de importancia moderada.

La Norma delimita la peligrosidad sísmica de cada lugar de España según la aceleración sísmica básica. En la **Figura 4.3**, se presenta el Mapa de Peligrosidad Sísmica de la NCSE-02.



Figura 4.3. Mapa de Peligrosidad Sísmica. Fuente: Norma de Construcción Sismorresistente, NCSE-02

El emplazamiento que alberga la instalación del aerogenerador se ubica en una zona que consta con una aceleración sísmica inferior a  $0,04g$ , siendo  $g$  la aceleración de la gravedad. Dicho lo anterior la afección sísmica a considerar es baja.

Se concluye que el elemento se encuentra exento de aplicar la Norma, porque la construcción se clasifica con una importancia moderada. Además, al presentar una peligrosidad sísmica baja, no hay efectos ni influencia por parte de la sismicidad sobre el elemento.

### 4.4. Hidrogeología

En la Sierra de Javalambre, tiene su origen cuatro ríos, siendo el más próximo al aerogenerador el río de Arcos de las Salinas, este nace en Arcos de las Salinas y desemboca en el río Turia.

El río discurre paralelamente a la población de Arcos de las Salinas, este dista del aerogenerador aproximadamente 2 kilómetros y a una altitud menor, por ello, este no puede producir ninguna afección en el emplazamiento.

Atendiendo al agua procedente de precipitaciones, la zona de actuación se encuentra en lo alto del collado y está compuesta por dolomías y calizas margosas con un alto nivel de fracturación. Por ende, el agua precipitada puede infiltrarse en el terreno, pero no estancarse ni formar acumulaciones de agua que pudiera presentar problemas a efectos de ejecución o explotación de la obra. Hay que añadir que el macizo al encontrarse fuertemente fracturado se comporta como un terreno formado por gravas gruesas con una alta permeabilidad, es por ello por lo que las posibles filtraciones saldrán al exterior a lo largo de las laderas del collado.

Concluyendo por tanto que el emplazamiento no presenta afecciones por la presencia de agua y tampoco flujos a lo largo de él.

### 4.5. Accesibilidad

La actuación se ha de desarrollar en lo alto del Collado Román, consecuentemente se ha de analizar las vías de acceso hasta el emplazamiento, con tal de determinar las posibles actuaciones a realizar.

A través de la carretera regional de la red de carreteras de la Comunidad de Aragón A-1514, se llega a la población de Arcos de las Salinas. Esta no presenta curvas cerradas o tramos que imposibiliten el transporte de las piezas al emplazamiento, cabe destacar que todos los componentes del aerogenerador son transportados por piezas que después serán ensambladas y unidas. Únicamente se presenta un tramo que pueda presentar dificultades de movilidad, **Figura 4.4**, no obstante, el posible problema se ha salvado con la ampliación de la calzada, tal como se observa en la **Figura 4.5**.



Figura 4.4. Tramo con posibles dificultades de maniobrabilidad. Fuente: Elaboración propia en Google Earth



Figura 4.5. Detalle de la ampliación de la calzada de la carretera A-1514. Fuente: Elaboración propia en Google Earth

Se abandona la carretera antes de llegar a la población de Arcos de las Salinas, para incorporarse a una vía secundaria. Se debe ejecutar un nuevo acceso que permita una mejor maniobrabilidad a los vehículos de grandes dimensiones que transportan las piezas del aerogenerador y las pertinentes máquinas para ejecutar la cimentación. La ejecución del nuevo acceso viene justificada por la estrechez del acceso, además de presentar a ambos lados del camino propiedades privadas y una zona de esparcimiento lúdico.



Figura 4.6. Acceso al camino secundario. Fuente: Elaboración propia en Google Earth

Dicho camino no llega hasta el emplazamiento, por tanto, se ha de ejecutar un nuevo camino, que permita la accesibilidad. En la **Figura 4.7** se muestra la altura a la cual ha de partir la nueva vía desde el camino existente.



Figura 4.7. Ubicación desde donde ha de partir el nuevo camino. Fuente: Google Earth

Por tanto, se ha de realizar dos acciones para habilitar la accesibilidad hasta el emplazamiento, la ejecución de un nuevo acceso a la vía secundaria, evitando los obstáculos existentes, y la realización de una nueva vía que permita acceder al emplazamiento.

## 5. Parametrización del terreno

Después de una inspección visual de los materiales que afloran en el entorno de la obra y puesto que los datos referentes a la caracterización de los estratos presentes en el emplazamiento, al no constar con ningún estudio geotécnico ad hoc, se determina que los valores para parametrizar las propiedades de las dolomías y calizas margosas se asemejan por edad geológica y cercanía a una roca cuyas características son: densidad aparente de  $2.641 \text{ Kg/m}^3$ , resistencia a la compresión de  $122 \text{ MPa}$ , módulo de elasticidad de  $72.1 \text{ GPa}$  y coeficiente de Poisson de  $0.28$ .

En caso de ejecutarse esta obra, se recomienda la realización de un futuro estudio geotécnico en el que se realicen tres sondes de 30 metros de profundidad, con tal de poder dar unos valores más exactos.

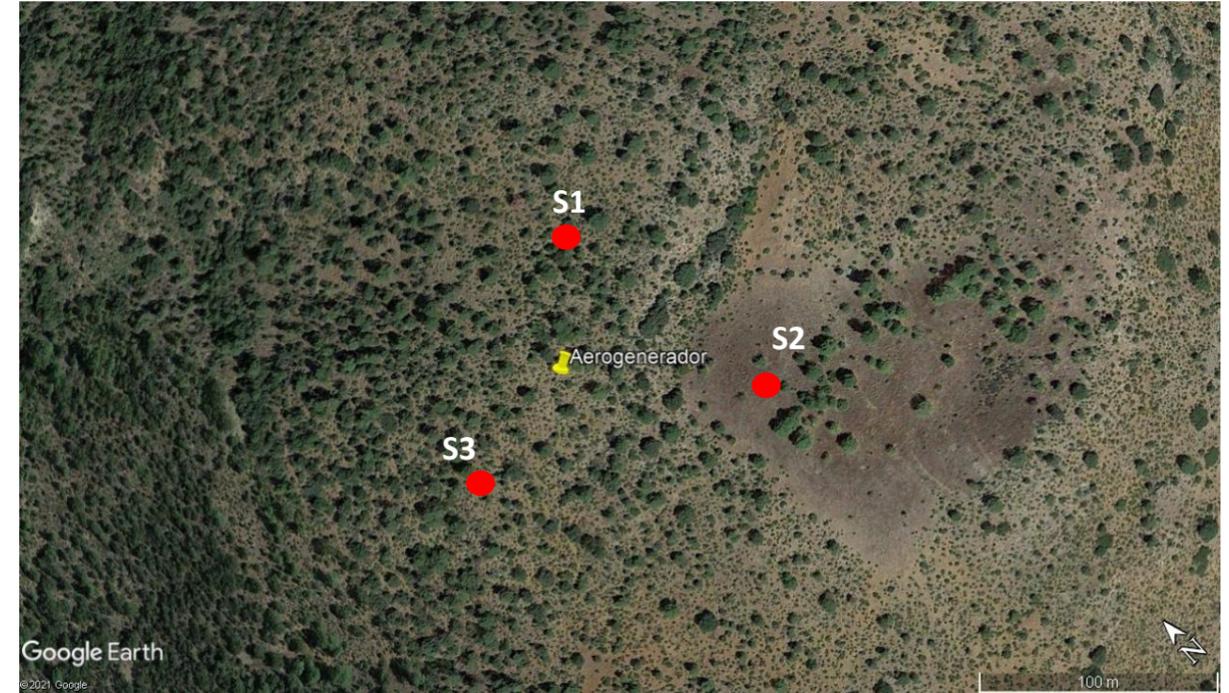


Figura 5.1. Localización de los sondeos. Fuente: Elaboración propia mediante el software Google Earth

De acuerdo con lo anterior expuesto, existe una primera posibilidad de ejecución de cimentación directa mediante una zapata aislada, por estar el terreno sobre el cual va a realizarse la cimentación en roca, no obstante, se ha de realizar las pertinentes comprobaciones y prestar atención al elevado nivel de fracturación de la roca. También se considera la realización de una cimentación mediante la utilización de pilotes, siendo los más convenientes las perforadas *in situ*. También ha de considerarse la aplicación de una cimentación compensada, sin embargo, esta opción puede presentar problemas por las altas cargas que se transmiten a la cimentación.

Dicho lo anterior, se prevé la ejecución de la cimentación, mediante tres posibles alternativas, cimentación compensada, directa mediante zapata circular aislada y pilotes perforados *in situ*.

Por otra parte, para estar del lado de la seguridad, se estudia el terreno como si se tratará de una grava gruesa a causa de su elevado nivel de fracturación. Por tanto, sus características se han de reducir, el módulo de elasticidad se reduce un 40%, en menor proporción la densidad, de manera que las características quedan finalmente con un módulo de elasticidad de  $43.3 \text{ GPa}$  y una densidad de  $2.3 \text{ Kg/m}^3$ .

## 6. Conclusiones

Para dar por finalizado el presente anejo, de la información recabada se deduce la posibilidad de cimentar el aerogenerador mediante las tres alternativas mencionadas que requieren de un estudio posterior con tal de evaluar la viabilidad de realización al igual de su propio dimensionamiento. Esto se puede consultar en el **ANEJO N.º 3: COMPROBACIONES GEOTÉCNICAS**.

Para la realización de las comprobaciones, se han de considerar las características reducidas del terreno, definidas en el apartado anterior.



# ANEJO N.º 3: COMPROBACIONES GEOTÉCNICAS

AUTOR: Ana Gabriela Caballero Vallejos

TUTOR: María Elvira Garrido de la Torre

COTUTOR: Juan Navarro Gregori

Grado en Ingeniería Civil

Escuela Técnica Superior de Ingeniería De Caminos, Canales y Puertos

Universitat Politècnica de València



## CONTENIDO

1. Antecedentes y objeto .....	4
2. Datos de partida.....	4
3. Bases de cálculo .....	4
3.1. Normativa aplicada.....	4
3.2. Características del terreno .....	4
3.3. Acciones consideradas.....	4
3.3.1. Acciones permanentes .....	5
3.3.2. Acciones variables .....	6
3.4. Combinación de acciones .....	6
3.4.1. Coeficientes de seguridad .....	6
3.4.2. Combinación de acciones en ELU.....	6
3.4.3. Combinación de acciones en ELS .....	7
4. Procedimiento de dimensionado.....	7
4.1. Alternativa 1. Cimentación compensada .....	7
4.2. Alternativa 2. Cimentación directa.....	8
4.3. Alternativa 3. Cimentación indirecta.....	10
5. Conclusiones .....	13
6. Referencia .....	14



## 1. Antecedentes y objeto

En el presente Anejo, el objeto de estudio es el diseño de la cimentación de un aerogenerador, concretamente el modelo SG 2.1-114 de Siemens Gamesa Renewable Energy, en el término municipal de Arcos de las Salinas (Teruel).

Dicho lo anterior, el objetivo del Anejo es realizar el dimensionamiento de la cimentación, para las diferentes alternativas planteadas, obteniendo de esta forma las cantidades necesarias de materiales y el tiempo de ejecución para cada una, con el fin de compararlas y elegir la alternativa óptima, basándose en criterios económicos, ambientales y funcionales. La elección de la solución idónea se aborda en el **ANEJO N.º 4: ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS**.

## 2. Datos de partida

Como datos de partida se tiene las alternativas planteadas en la Memoria para realizar la cimentación del aerogenerador. Estas se obtienen tras llevar a cabo el **ANEJO N.º 2: COMPROBACIONES GEOTÉCNICAS** del emplazamiento que alberga el aerogenerador.

Las soluciones propuestas son las siguientes:

- Alternativa 1: Cimentación totalmente compensada. Se parte de que el diámetro de la cimentación ha de ser superior al de la base de la torre 4.032 metros.
- Alternativa 2: Cimentación directa. Se basa en una zapata circular aislada, al igual que la Alternativa 1, el diámetro de esta ha de ser superior al diámetro inferior de la torre.
- Alternativa 3: Cimentación indirecta. Se plantea la ejecución de pilotes perforados hormigonados *in situ*, los cuales constan con un diámetro entre 0.5 y 1 metro. El encepado que contiene a los pilotes ha de tener un canto de 1 metro como mínimo.

## 3. Bases de cálculo

### 3.1. Normativa aplicada

Los presentes cálculos se han realizado empleando la siguiente normativa nacional:

- Guía de cimentaciones para obras de carretera (Ministerio de Fomento, 2009)

### 3.2. Características del terreno

Tras exponer la normativa aplicada, se procede a caracterizar los materiales empleados para diseñar las diferentes alternativas, al igual que el terreno del emplazamiento.

Estos se muestran en la siguiente tabla.

<b>Hormigón armado</b>	Peso específico	25 kN/m <sup>3</sup>
	Peso específico medio aparente	23 kN/m <sup>3</sup>
<b>Terreno</b>	Cohesión del suelo (c)	0 kPa
	Angulo de rozamiento ( $\Phi'$ )	48 °

Tabla 3.1. Características de los materiales. Fuente: Elaboración propia

### 3.3. Acciones consideradas

En el siguiente apartado, se enumera y define las acciones consideradas en el dimensionamiento de las alternativas. Algunas de las acciones ya han sido definidas anteriormente, **ANEJO N.º 1: CÁLCULOS PREVIOS**, no obstante, con tal de facilitar el seguimiento del presente documento se han vuelto a nombrar.

Dicho lo cual, a continuación, se enumera las acciones requeridas para el dimensionamiento del aerogenerador.

### 3.3.1. Acciones permanentes constantes

Son cargas que actúan en todo momento, de manera constante y ubicación fija, durante la situación de proyecto.

#### 3.3.1.1. Cargas gravitacionales

Son consideradas cargas gravitacionales, el peso propio. Dentro de estas acciones, se diferencia en tres tipos atendiendo al elemento que la origina.

- Peso propio del aerogenerador.

La acción del aerogenerador se calculó en el **ANEJO N.º 1: CÁLCULOS PREVIOS**, en la **Tabla 3.2**, se expone los valores obtenidos.

Peso de la torre	P <sub>1</sub>	2 974 kN
Peso de la góndola + rotor	P <sub>2</sub>	1024.20 kN
Peso total		3 998.20 kN

Tabla 3.2. Peso del aerogenerador. Fuente: Elaboración propia

- Peso propio de la cimentación.

Se ha obtenido a partir del peso específico del hormigón, en este caso de 25 kN/m<sup>3</sup>. Dicho lo anterior, por medio de la modelización geométrica de cada una de las alternativas, se incorpora la definición de las cargas debido al peso.

- Peso propio del relleno de tierras.

Se prevé un relleno de 0.5 metros tras la ejecución de la cimentación de manera que esta quede enterrada, protegiéndola de las acciones meteorológicas, además de reducir el impacto visual.

Para el relleno de tierra se reutiliza la anteriormente excavada, siendo por tanto su peso específico de 23 kN/m<sup>3</sup>. Dicho lo cual, atendiendo a la modelización de la cimentación de cada alternativa y la potencia de relleno de tierras, se pudo incluir la parametrización de la carga debido al peso propio del material de relleno.

### 3.3.2. Acciones permanentes no constantes

#### 3.3.2.1. Empujes del terreno

En el siguiente apartado se aborda las acciones debidas al terreno, es decir los empujes pasivos del terreno sobre la cimentación.

El terreno sobre el cual se ejecuta la cimentación tiene un peso específico de 23 kN/m<sup>3</sup>. Por tanto, para obtener la distribución de cargas sobre la cimentación teniendo en cuenta el volumen de tierra que actúa a lo largo de esta. El empuje se define mediante la expresión:

$$R = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot \sigma'_p \quad (1)$$

Donde  $\gamma$ , es el peso específico del terreno, 23 kN/m<sup>3</sup>, y  $\sigma_p$ , es el empuje pasivo unitario. Este a su vez se determina mediante la siguiente fórmula:

$$\sigma'_p = K_p \cdot \sigma'_v + 2 \cdot c' \cdot \sqrt{K_p} \quad (2)$$

Siendo  $c'$  la cohesión del terreno, como el terreno se encuentra formado por gravas gruesas, la cohesión es 0,  $\sigma'_v$  es la tensión efectiva vertical y  $K_p$  es el coeficiente de empuje pasivo. El valor de estos parámetros se obtiene de aplicar las **Ecuaciones (3) y (4)**.

$$\sigma'_v = \sigma_v - u = \gamma \cdot h - \gamma_w \cdot h \quad (3)$$

$$K_p = \frac{1 + \text{sen}(\Phi')}{1 - \text{sen}(\Phi')} \quad (4)$$

En la **Ecuación (3)**,  $h$  es la profundidad del punto de estudio y en la **Ecuación (4)**,  $\Phi'$  es el ángulo de rozamiento con un valor de 48°.

### 3.3.3. Acciones variables

Son las cargas que pueden o no actuar, además de constar con una intensidad o ubicación variable en el tiempo.

#### 3.3.3.1. Cargas aerodinámicas

Estas corresponden con la acción del viento sobre el aerogenerador, en concreto sobre la torre y el rotor junto con las palas. El procedimiento para obtener dichas cargas se expone en **EL ANEJO N.º 1: CÁLCULOS PREVIOS**. En la siguiente tabla se recoge los valores de estas.

Acción del viento sobre el rotor	$F_{V_{hub}}$	2 267.49 kN
Acción del viento sobre la torre	$F_{V_{torre}}$	87.85 kN
Acción del viento total		2 355.34 kN

Tabla 3.3. Cargas aerodinámicas. Fuente: Elaboración propia

### 3.4. Combinación de acciones

En el siguiente apartado se define las combinaciones de acciones llevadas a cabo para obtener las dimensiones de cada una de las alternativas planteadas, con el fin de obtener de forma aproximada las cantidades necesarias de materiales para ejecutar cada alternativa, y así seleccionar la más idónea.

Para el cálculo geotécnico, se utiliza las mismas combinaciones de acciones independientemente del estado, siendo este último o de servicio. La combinación característica ha sido considerada la más conveniente a estudiar. Siendo los valores representativos de la combinación característica los siguientes:

- Acciones permanentes: valor característico =  $G_k$
- Acción variable dominante: valor característico =  $Q_k$
- Otras acciones variables concomitantes: valor de combinación =  $\Psi_0 \cdot Q_k$

### 3.4.1. Coeficientes de seguridad

El proyecto geotécnico a diferencia del estructural no sigue el método de los coeficientes de seguridad parcial, sino que se basa en el concepto del coeficiente de seguridad único, englobando en un único número la consideración de las acciones y la resistencia.

Dicho lo anterior, se ha de calcular para cada situación de proyecto, el coeficiente de seguridad; cuando este supere el valor del coeficiente que se indica en cada modo de fallo, los cuales se encuentran definidos en la Guía de cimentaciones en obras de carretera, la seguridad es suficiente.

En los siguientes apartados se define las comprobaciones y coeficientes de seguridad a emplear dependiendo del estado y la tipología de la cimentación.

### 3.4.2. Combinación de acciones en ELU

Tal como se ha dicho anteriormente la combinación seleccionada para el ELU es la característica, la cual viene definida por la siguiente expresión:

$$\sum_{i \geq 1} \gamma_{G,i} \cdot G_{k,i} + \sum_{j \geq 1} \gamma_{G^*,j} \cdot G_{k,j}^* + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{l > 1} \gamma_{Q,1} \cdot \Psi_{0,l} \cdot Q_{k,l} \quad (5)$$

En la **Ecuación (5)**, cada elemento se refiere a:

- $G_{k,i}$  : Valor característico de las acciones permanentes.
- $G_{k,j}^*$  : Valor característico de las acciones permanentes de valor no constante.
- $Q_{k,1}$  : Valor característico de la acción variable determinante.
- $\Psi_{0,l} \cdot Q_{k,l}$  : Valor representativo de combinación de acciones variables concomitantes.

Los estados límite últimos referidos a tipologías geotécnicas son aquellos cuya ocurrencia está relacionada principalmente por las características del terreno. El fallo de la cimentación puede llevar a una situación de ruina de la estructura principal. De manera que los modos de fallo a comprobar varían atendiendo al tipo de cimentación, siendo:

Para cimentaciones directas o superficiales:

- Seguridad frente al hundimiento.
- Seguridad frente al deslizamiento.
- Seguridad frente al vuelco.

Para cimentaciones indirectas o profundas:

- Seguridad frente al hundimiento
- Seguridad frente al vuelco
- Seguridad frente al deslizamiento
- Seguridad frente al arranque

### 3.4.3. Combinación de acciones en ELS

Al igual que para el estado último, la combinación para estudiar el ELS es la característica, esta se define mediante la **Ecuación (5)**.

Los estados límite de servicio son aquellos cuya ocurrencia no tiene como consecuencia la ruina estructural del elemento, sino que limita la funcionalidad de este. En general se suelen producir por movimientos importantes de la cimentación, por tanto, se debe estudiar:

Para cimentaciones directas o superficiales:

- Seguridad frente asientos excesivos

Para cimentaciones indirectas o profundas:

- Seguridad frente a deformaciones excesivas.

## 4. Procedimiento de dimensionado

En el siguiente apartado se aborda el dimensionamiento de cada alternativa planteada, de manera que se cumpla las verificaciones de seguridad, tanto para estados límite últimos, como para los de servicio.

En el **APÉNDICE E**, se puede consultar los cálculos realizados.

### 4.1. Alternativa 1. Cimentación compensada

La siguiente alternativa se basa en que la presión neta transmitida al terreno,  $p_{vtn}$ , es nula, es decir que las cargas transmitidas al terreno coinciden con las cargas iniciales del terreno a cota de cimentación. De manera que no se produce ningún incremento en las cargas.

Se define este principio mediante la siguiente expresión:

$$p_{vtn} = p_{vt} - q_0 = 0 \quad (6)$$

En la **Ecuación (6)** se define como:

$p_{vt}$ : presión vertical total. Se obtiene mediante  $p_{vt} = N/A$ , donde A es el área de la base de la cimentación y N es el sumatorio de las cargas verticales debidas al peso propio del aerogenerador y la cimentación. El peso propio de la cimentación se define mediante la siguiente expresión,  $\gamma_h \cdot \pi \cdot B^2/4$ .

$q_0$ : carga del terreno en el plano de la cimentación, la cual se define por  $q_0 = D \cdot (\gamma - \gamma_w)$ .

Tras definir las variables, se observa que el peso propio del terreno es menor que el del hormigón, siendo 23 kN/m<sup>3</sup> el del terreno frente los 25 kN/m<sup>3</sup> del hormigón, por tanto, la carga que se transmite al plano de cimentación es superior a la carga inicial.

Por otro lado, aparte de considerar la acción del peso propio de la cimentación también se ha de tener en cuenta la del aerogenerador. De manera que la presión vertical total se ve mayorada, llegando a la situación en que se observa que  $p_{vt} \gg q_0$ , siendo imposible que la carga del terreno anule la presión vertical total, por tanto, no se cumple la condición expuesta en la **Ecuación (6)**, de  $p_{vtn} = 0$ .

Expuesto lo anterior, se considera la Alternativa 1 inviable, y se descarta como posible solución.

Una posible solución al problema planteado es realizar una cimentación parcialmente compensada, no obstante, se ha decido abordar esta posibilidad tras dimensionar y valorar las dos alternativas restantes.

## 4.2. Alternativa 2. Cimentación directa

En la Alternativa 2, se plantea realizar una cimentación directa, en concreto una zapata circular. Dadas las características del elemento a diseñar, se ha de realizar el dimensionamiento de manera que se cumpla las comprobaciones tanto en ELU como ELS.

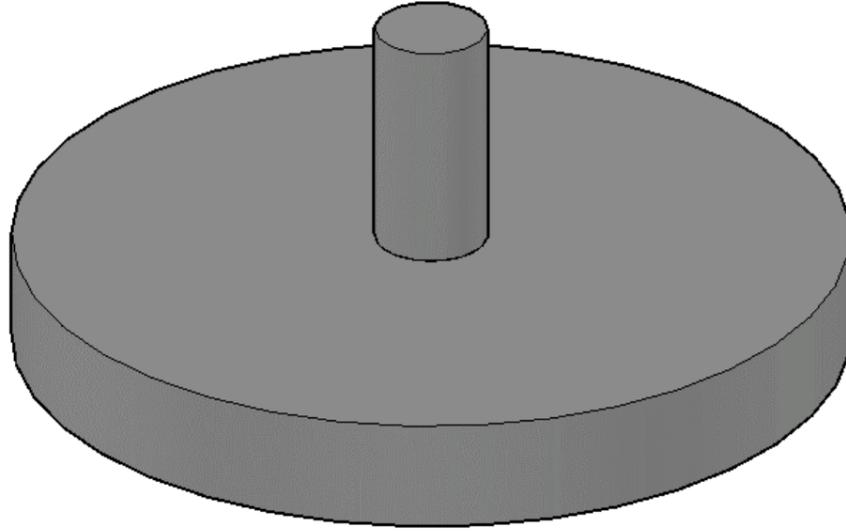


Figura 4.1. Croquis cimentación directa. Fuente: Elaboración propia en software AutoCAD.

Se parte de que la cimentación consta con una profundidad,  $D$ , de 4.5 metros, de manera que el canto,  $H$ , de la cimentación es de 4 metros y el relleno superior de tierras de 0.5 metros, siendo el diámetro de esta el término variable.

Para dimensionar la cimentación se opta por diferentes valores para el diámetro de la cimentación de manera que se cumpla la seguridad para los diferentes modos de fallo.

- Seguridad frente al hundimiento

La comprobación del siguiente modo de fallo se refiere a la rotura del terreno bajo la cimentación. De manera que el coeficiente de seguridad sea mayor o igual a 3. El cual se calcula mediante la siguiente expresión:

$$F_h = \frac{p_{vhn}}{p_{vn}} \quad (7)$$

Siendo  $p_{vhn}$  la presión de hundimiento neta y  $p_{vn}$  la presión vertical neta que actúa sobre el terreno.

Atendiendo a que el terreno se caracteriza como si se tratara de un terreno granular, tal y como se ha mencionado anteriormente, debido al elevado nivel de fracturación de la roca, el método recomendado para calcular la presión de hundimiento.

Por tanto, se procede a emplear la formulación analítica descrita en el **Apartado 4.5.5 de la Guía de cimentaciones para obras de carreteras**, basada en el criterio de rotura de Mohr-Coulomb.

La fórmula utilizada para determinar la carga de hundimiento es la de Brinch-Hansen (1973).

$$p_{vh} = q \cdot N_q \cdot d_q \cdot i_q \cdot s_q \cdot t_q \cdot r_q + c \cdot N_c \cdot d_c \cdot i_c \cdot s_c \cdot t_c \cdot r_c + \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot B^* \cdot N_\gamma \cdot d_\gamma \cdot i_\gamma \cdot s_\gamma \cdot t_\gamma \cdot r_\gamma \quad (8)$$

En la **Ecuación (9)** cada elemento corresponde a:

$q$ : sobrecarga que actúa en el nivel del plano de cimentación, la cual se define mediante la expresión  $q = \gamma_{ap} \cdot D = 23 \cdot 4.5 = 103.5 \frac{kN}{m^2}$

$c$ : cohesión, el cual es 0 al tratarse de unas gravas.

$\gamma$ : peso específico del terreno, 23 kN/m<sup>3</sup>.

$B^*$ : ancho equivalente de la cimentación, se define por  $B - 2 \cdot e$ , donde  $e$  es la excentricidad, la cual depende del momento,  $M = 247\,458.54 \text{ kN} \cdot \text{m}$  y del axil,  $N$ , el cual es el sumatorio del peso propio del aerogenerador junto con el peso propio de la cimentación y el relleno de tierras. De manera que queda definida la excentricidad por  $e = \frac{M}{N}$ .

$N_q, N_c, N_\gamma$ : factores de capacidad de carga, con un valor de 222.3, 199.3 y 491.6 respectivamente.

$$N_q = \frac{1 + \sin \Phi'}{1 - \sin \Phi'} \cdot e^{\pi \cdot \tan \Phi'}$$

$$N_c = \frac{N_q - 1}{\tan \Phi'}$$

$$N_\gamma = 2 \cdot (N_q - 1) \cdot \tan \Phi'$$

$s_q, s_c, s_\gamma$ : factores de la forma de la cimentación, 2.11, 2.11 y 0.7 respectivamente, se ha de tener en cuenta que  $B$  y  $L$  tienen el mismo valor, el del diámetro de la cimentación.

$$s_q = s_c = 1 + \frac{B^*}{L^*} \cdot \frac{N_q}{N_c}$$

$$s_\gamma = 1 - 0.3 \cdot \frac{B^*}{L^*}$$

$i_q, i_c, i_\gamma$ : factores de inclinación de la carga, siendo 1 el valor de los tres parámetros, a causa de que las cargas no se encuentran inclinadas.

$d_q, d_c, d_\gamma$ : factores de resistencia al corte del terreno sobre el plano de apoyo, siendo 1 el valor para los tres parámetros

$t_q, t_c, t_\gamma$ : factores de proximidad de la cimentación a un talud, 1 es el valor para los tres factores, al no tener taludes próximos a la cimentación.

$r_q, r_c, r_\gamma$ : factores de inclinación del plano de apoyo, es 1 a causa de que el plano de apoyo no se encuentra inclinado.

La presión vertical, se determina con la siguiente expresión:

$$p_v = \frac{N}{A^*} \quad (9)$$

Siendo  $A^*$  el área efectiva de la cimentación.

Con tal de obtener el valor neto de las cargas se resta la sobrecarga efectiva a nivel del plano de cimentación.

- Seguridad frente a deslizamiento

Se considera el siguiente modo de fallo ya que la cimentación soporta acciones horizontales importantes, se considera la cimentación segura si el coeficiente de seguridad es mayor o igual a 1.5. El coeficiente se define por la siguiente ecuación:

$$F_d = \frac{N \cdot \tan \Phi_c + A^* \cdot C_c + R}{V} \quad (10)$$

Donde:

$N$ : resultante vertical efectiva

$V$ : resultante fuerzas horizontales

$A^*$ : área eficaz de la base de la cimentación

$\tan \Phi_c$ : ángulo de rozamiento entre la cimentación y el terreno, para cimentaciones convencionales de hormigón ejecutadas *in situ*, se puede suponer que es igual a  $0.8 \cdot \tan \Phi'$ , siendo  $0.89^\circ$ .

$C_c$ : cohesión entre la cimentación y el terreno, para cimentaciones convencionales de hormigonadas ejecutadas *in situ*, se supone que es igual a la cohesión del terreno,  $c'$ , por tanto, es igual a 0.

$R$ : suma de las posibles resistencias adicionales en la misma dirección y sentido contrario a  $V$ , definido en el **Apartado 3.3.2.1**.

- Seguridad frente a vuelco

Se considera que el elemento es seguro frente al vuelco, cuando el coeficiente de seguridad es mayor o igual a 2 y se define mediante:

$$F_v = \frac{\sum M_{estabilizadores}}{\sum M_{volcadores}} \quad (11)$$

Se define como:

$M_{estabilizadores}$ : momentos estabilizadores, los producidos por la fuerza resultante vertical  $N$  y los producidos por el empuje pasivo  $R$ . Es decir, el conjunto de fuerzas debidas al peso propio de la cimentación y el aerogenerador y el empuje pasivo.

$M_{volcadores}$ : momentos volcadores, los producidos por los componentes horizontales de las acciones, excepto los empujes pasivos. Es decir, las cargas producidas por la incidencia del viento sobre el aerogenerador.

- Seguridad frente a deformaciones excesivas

Se emplea la teoría de la Elasticidad, de manera que se obtiene asientos en el semiespacio homogéneo e isótropo de Boussinesq. El asiento máximo permitido en zapatas aisladas es de 0.025 metros y en el caso de las losas de 0.050 metros.

El asiento bajo el centro de la cimentación se obtiene de la siguiente expresión:

$$s_i = I_s \cdot q_{tn} \cdot B^* \cdot (1 - \nu^2) \cdot \frac{1}{E} \quad (12)$$

Donde:

$I_s$ : coeficiente de influencia, para cimentaciones circulares es 1.

$q_{tn}$ : carga vertical neta.

$\nu$ : coeficiente de Poisson, 0.28.

$E$ : módulo de elasticidad, se considera el 60% del valor de la roca matriz al encontrarse altamente fracturada, siendo 43 260 kPa.

$B^*$ : diámetro eficaz.

Una vez definido el procedimiento de los diferentes modos de fallo, a continuación, se expone una tabla resumen, **Tabla 4.2**, que recoge los resultados obtenidos para diferentes diámetros de cimentación, manteniendo constante el canto de la cimentación, 4 metros.

No obstante, primero se ha recogido los esfuerzos para los diferentes diámetros para la cimentación, los cuales se muestran en la **Tabla 4.1**.

	B = L = 15 m	B = L = 20 m	B = L = 25 m	B = L = 30 m
<b>Pp zapata</b>	17 671.46	31 415.16 kN	49 087 kN	70 685.83 kN
<b>Pp relleno</b>	1 884.95 kN	3 465.56 kN	5 497.78 kN	7 981.6 kN
<b>R</b>	1 404.80 kN	1 404.80 kN	1 404.80 kN	1 404.80 kN
<b>Fz</b>	3 998 kN	3 998 kN	3 998 kN	3 998 kN
<b>Fx</b>	2 355.34 kN	2 355.34 kN	2 355.34 kN	2 355.34 kN
<b>M</b>	247 458.54 kN·m	247 458.54 kN·m	247 458.54 kN·m	247 458.54 kN·m

Tabla 4.1. Esfuerzos recibidos a cota de la cimentación directa. Fuente: Elaboración propia en software Excel

	B=L=15 m	B=L=20 m	B=L= 25 m	B=L= 30 m
<b>F<sub>h</sub></b>	3.41E+01	9.29E+01	6.76E+02	1.82E+03
<b>F<sub>d</sub></b>	9.48	15.26	22.7	31.78
<b>F<sub>v</sub></b>	0.72	1.58	2.97	5.02
<b>s<sub>i</sub></b>	-	0.13 m	0.06 m	0.04 m

Tabla 4.2. Valores de los coeficientes de seguridad para cada modo de fallo y diámetro de cimentación. Fuente: Elaboración propia en software de Excel

En primer lugar, se comprueba la seguridad para un diámetro de cimentación de 15 metros, se ve claramente que no cumple la seguridad frente a vuelco, al ser el coeficiente menor a 2. Por otro lado, tras calcular la excentricidad y el ancho eficaz, este resulta adoptar un valor negativo, porque el ancho de la zapata es menor que dos veces la excentricidad. Por otro lado, el valor negativo del ancho eficaz indica que toda la base se encuentra traccionada, es por ello, que se aumenta el diámetro de la zapata.

La segunda opción, es una zapata de 20 metros, al contrario que la de 15 metros, el ancho eficaz si es positivo. No obstante, sigue sin cumplirse la seguridad frente a vuelco y el asiento máximo, ya que el máximo está limitado a 0.05 metros.

Para un diámetro de 25 metros, sigue sin cumplirse la seguridad frente los diferentes modos de fallo. Es por ello por lo que se aumenta el diámetro a 30 metros. Debido al gran tamaño de la cimentación, al

calcular el asiento máximo, se considera la cimentación como una losa, a causa de su gran tamaño, de manera que el asiento máximo admisible es de 0.05 metros. Tras consultar la **Tabla 4.2**, se comprueba que los valores de los coeficientes de seguridad cumplen en cada caso los mínimos establecidos en la Guía de cimentaciones en obras de carretera.

### 4.3. Alternativa 3. Cimentación indirecta

En la Alternativa 3, se plantea una cimentación indirecta, en concreto un encepado de pilotes. Dadas las características del elemento a diseñar, al igual que para la Alternativa 2, el dimensionamiento de la cimentación ha de cumplir las comprobaciones a ELU y ELS.

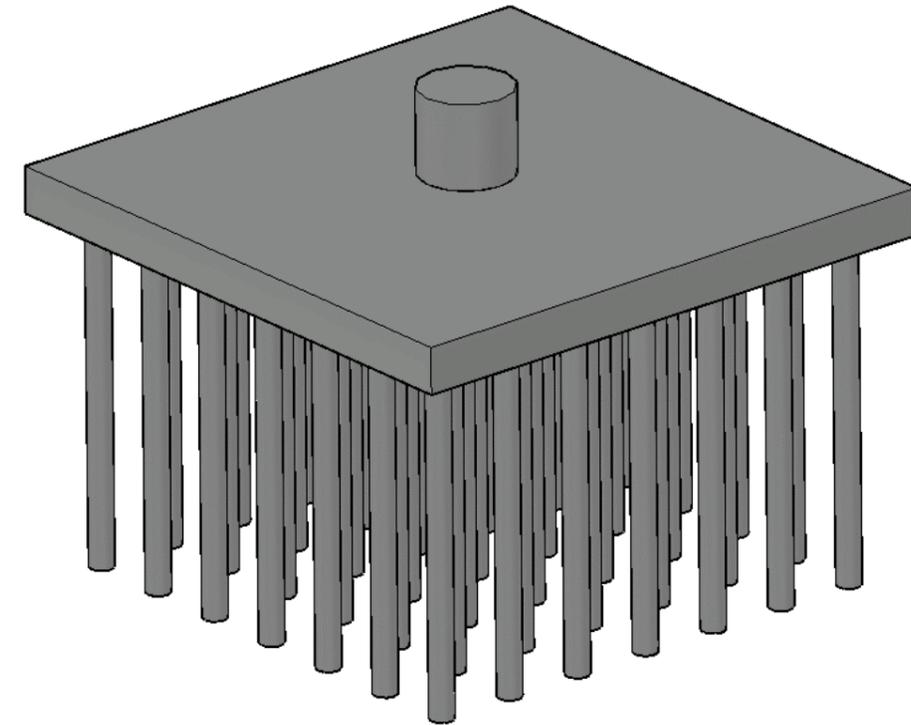


Figura 4.2. Croquis cimentación indirecta. Fuente: Elaboración propia en software AutoCAD.

Los datos iniciales con los que se parte son que el encepado con forma cuadrada, se encuentra a una profundidad de 2.5 metros, siendo el canto, H, del encepado 2 metros y 0.5 metros de material de relleno, que cubre la cimentación. Por otro lado, el diámetro de los pilotes,  $\varnothing$ , será variable hasta conseguir que se verifiquen los estados últimos anteriormente considerados, y con respecto a la

longitud se parte de un valor mínimo de 10 metros. Se considera una distancia inicial entre pilotes de 3.5 metros, medidos de eje a eje de pilote,  $s_x = s_y$ .

En consecuencia, para dimensionar la cimentación se presentarán diferentes valores para el diámetro y longitud de los pilotes de la cimentación de manera que se cumpla la seguridad para los diferentes modos de fallo. Además, el número de pilotes,  $N$ , a disponer es otra de las variables ha de considerar, el número de pilotes dispuesto por filas será el mismo que por columnas,  $n = m = N$ .

Dicho esto, se procede a explicar las comprobaciones de seguridad, al igual que para la Alternativa 2, se ha considerado el concepto del coeficiente de seguridad único.

- Seguridad frente a hundimiento

La carga de hundimiento de un grupo de pilotes se puede alcanzar por rotura general del terreno que se encuentra debajo del grupo de pilotes, o por rotura local del terreno que se encuentra alrededor de alguno de los pilotes. Se comprueba que el elemento no falla, cuando la carga que soporta un pilote es menor a la carga de hundimiento admisible,  $Q < Q_{adm}$ , siendo la carga admisible el cociente de dividir la carga de hundimiento de un pilote entre el coeficiente de seguridad único, en el caso de la seguridad frente a hundimiento es 3, de manera que  $Q_{adm} = \frac{Q_h}{3}$ .

La carga de hundimiento viene definida por la carga correspondiente a la punta y la del fuste, tal como se presenta la **Ecuación (13)**, obtenida del epígrafe 5.10. de la Guía de cimentaciones en obras de carretera.

$$Q_h = Q_p + Q_f \quad (13)$$

La carga de hundimiento por punta  $Q_p$ , se determina según las características del terreno en la zona de influencia de la punta. Y se obtiene mediante el producto del área de la punta  $A_p$ , por la presión unitaria de hundimiento  $q_p$ , es decir  $Q_p = q_p \cdot A_p$ . Mientras que la del fuste  $Q_f$ , se estima mediante el producto de la resistencia unitaria por fuste, a la profundidad  $z$ ,  $\tau_f$ , por el área del fuste  $A_f$ , quedando definido mediante la siguiente expresión,  $Q_f = \tau_f \cdot A_f$ .

La determinación de la carga unitaria de hundimiento por punta y fuste, se utiliza el método basado en los parámetros resistentes del modelo de Mohr-Coulomb, al conocer las características resistentes del terreno. Además, se ha considerado el terreno como una grava muy gruesa, al presentarse la roca con un elevado nivel de fracturación.

Dicho lo anterior se procede a definir la carga unitaria de hundimiento por punta, mediante la **Ecuación (14)**, y por fuste, mediante la **Ecuación (15)**.

$$q_p = N_q^* \cdot \sigma'_{vo} + N_c^* \cdot c \quad (14)$$

Siendo:

$N_q^*, N_c^*$ : Factores de capacidad de carga para cimentaciones profundas.

$$N_q^* = \frac{1 + \sin \Phi'}{1 - \sin \Phi'} \cdot e^{\pi \cdot \tan \Phi' \cdot f_D}$$

$$N_c^* = \frac{N_q - 1}{\tan \Phi'}$$

Siendo  $f_D$ , un factor que tiene en cuenta el efecto del diámetro del pilote en el coeficiente de capacidad de carga y se estima mediante  $f_D = 1 - \frac{1}{3} \cdot D \geq \frac{2}{3}$ .

$\sigma'_{vo}$ : Presión vertical efectiva al nivel de la punta del pilote.

$c$ : Cohesión, en este caso 0.

$$\tau_f = c + K_o \cdot \tan \delta \cdot \sigma'_v \quad (15)$$

Siendo:

$c$ : Cohesión, 0 al tratarse de gravas gruesas.

$K_o$ : Coeficiente de empuje en reposo,

$\delta$ : Angulo de fricción del contacto pilote-terreno.

No obstante, al no disponer de información suficiente acerca de los dos términos anteriores, se puede suponer según el **Epígrafe 5.10.2.5.2. de la Guía de cimentaciones para obras de carretera** que  $K_o \cdot \delta = 0.3$ .

$\sigma'_v$ : Presión vertical efectiva al nivel considerado.

- Seguridad frente a vuelco

Se considera que el elemento es seguro frente al vuelco, al igual para la Alternativa 2, cimentación directa, cuando el coeficiente de seguridad es mayor o igual a 2. El coeficiente de seguridad se define mediante la **Ecuación (11)**, la cual ya ha sido explicada en el **Apartado 4.2**.

- Seguridad frente a deslizamiento

La seguridad de la cimentación indirecta se comprueba de la misma forma que la directa, y es por ello por lo que se emplea el mismo procedimiento que el definido en el **Apartado 4.2**, y aplicando la **Ecuación (10)**, siendo el coeficiente de seguridad el mismo, quedando limitado por tanto 1.5.

Para aplicar la **Ecuación (10) y (11)**, se ha de considerar que el ancho de la cimentación es igual al ancho del conjunto de pilotes únicamente, no el ancho del encepado. Por otro lado, se debe considerar el peso propio del suelo que se encuentra en el “nuevo ancho”, es decir el terreno que se encuentra entre los pilotes. El peso del terreno ha de sumarse a las fuerzas verticales que se transmiten a cota de cimentación.

Otra consideración que ha de tenerse en cuenta es que, debido a la excentricidad, una parte de la cimentación deja de estar comprimida al igual que en la cimentación directa, es por ello, que se debe volver a comprobar la seguridad frente a los diferentes modos de fallo.

El efecto principal que considerar sobre la cimentación a causa de la excentricidad es la disminución del número de pilotes que se encuentran trabajando, es decir que los pilotes restantes, los comprimidos, asumen las cargas de los pilotes que dejan de trabajar. Aumentando la carga resistida por estos, llegando a comprometer en algunos casos la seguridad del elemento, al ser  $Q > Q_{adm}$ .

Por tanto, se vuelve a realizar la comprobación de seguridad frente a hundimiento con el número de pilotes que trabajan realmente. Por otro lado, tanto para la seguridad frente a deslizamiento y vuelco, se realizan con la ancho y área eficaz.

Tras definir los diferentes modos de fallo para la cimentación, la **Tabla 4.4**, recoge los valores de los coeficientes obtenidos para cada una de las opciones planteadas para la cimentación indirecta.

No obstante, primero se ha recogido los esfuerzos para los diferentes diámetros para la cimentación, los cuales se muestran en la **Tabla 4.3**.

	B = 20 m			
	Ø = 0.5 m N = 25		Ø = 1 m N = 36	
	L = 10 m	L = 15 m	L = 10 m	L = 15 m
<b>Pp encepado</b>	20 000 kN	20 000 kN	20 000 kN	20 000 kN
<b>Pp pilotes</b>	1 227.18 kN	1 840.78 kN	7 068.58 kN	10 602.88 kN
<b>Pp relleno</b>	4 452.73 kN	4 452.73 kN	4 452.73 kN	4 452.73 kN
<b>R</b>	12 194.47 kN	23 901.17 kN	12 194.47 kN	23 901.17 kN
<b>Pp terreno entre pilotes</b>	47 228.49 kN	70 842.74 kN	72 214.40 kN	108 321.60 kN
<b>Fz</b>	2 9678.08 kN	2 9678.08 kN	2 9678.08 kN	2 9678.08 kN
<b>Fx</b>	2 355.34 kN	2 355.34 kN	2 355.34 kN	2 355.34 kN
<b>M</b>	247 458.54 kN·m	247 458.54 kN·m	247 458.54 kN·m	247 458.54 kN·m

Tabla 4.3. Esfuerzos recibidos a cota de la cimentación indirecta. Fuente: Elaboración propia en software Excel.

	B = 20 m			
	Ø = 0.5 m N = 25		Ø = 1 m N = 36	
	L = 10 m	L = 15 m	L = 10 m	L = 15 m
<b>Q &lt; Q<sub>adm</sub> (kN)</b>	1 187.12 > 470.42	1 211.67 > 974.71	986.65 > 978.48	1 084.83 < 2 002.11
<b>F<sub>v</sub></b>	2.20	3.02	3.78	5.21
<b>F<sub>d</sub></b>	17.27	22.50	19.66	26.07

Tabla 4.4. Valores de los coeficientes de seguridad para cada modo de fallo y longitud, diámetro y número de pilotes. Fuente: Elaboración propia en software de Excel

Para la Alternativa 3, se ha planteado dos modelos de cimentación indirecta, para ambos coincide el ancho del encepado, 20 metros.

El primer modelo que se presenta es una cimentación indirecta formada por un grupo de pilotes de 25 pilotes, distribuidos de forma uniforme y con un diámetro de 0.5 metros, se limita la longitud de estos a 10 metros y 15 metros. Tras consultar los datos obtenidos en las comprobaciones para los diferentes modos de fallo se comprueba que solo se cumple la seguridad frente a deslizamiento y vuelco, pero no la seguridad frente a hundimiento, ya que la carga de hundimiento admisible para cada pilote es superada en ambos casos.

Tras los primeros resultados se opta por aumentar el número de pilotes y el diámetro de estos, de manera que se tiene el segundo modelo, el cual consta con 36 pilotes con un diámetro de 1 metro. Para este modelo se plantea al igual que para el modelo anterior, una longitud de pilote de 10 y 15 metros.

En la **Tabla 4.4** se comprueba que, para la primera opción, L=10 metros, sigue sin cumplirse la seguridad frente a hundimiento, es por ello por lo que se aumenta la longitud del pilote 5 metros más, con esta última modificación se consigue que el elemento cumpla la seguridad a todos los modos de fallo.

Una vez definido los parámetros de la cimentación indirecta, tal y como se expone anteriormente se vuelve a comprobar la seguridad frente a los diferentes modos de fallo, teniendo en cuenta el efecto grupo.

En primer lugar, se vuelve a comprobar la seguridad frente al hundimiento conjunto del grupo de pilotes, ha de tenerse en cuenta que el conjunto de pilotes se asimilará a un gran pilote, cuya sección transversal engloba todas las secciones transversales de los pilotes y el terreno existente entre ellos. El cálculo de la carga de hundimiento de este gran pilote virtual se realiza igual que el procedimiento descrito anteriormente.

Por tanto, tras calcular el ancho eficaz y verificar los pilotes que trabajan una vez reducido el ancho de la cimentación por la excentricidad, el ancho eficaz resultante es de 15.14 metros. De manera que se reduce tanto una fila como columna de pilotes, quedando por solo 25 pilotes comprimidos. La longitud y diámetro de pilotes no varían siendo 15 y 1 metro respectivamente. En la Tabla 4.5, se expone los resultados obtenidos.

	<b>B* = 15.85 m</b>
	<b>Ø = 1 m N* = 25</b>
<b>Q&lt;Qadm (kN)</b>	1 703.52 < 2 002.11 kN
<b>Fv</b>	3.34
<b>Fd</b>	26.07

Tabla 4.5. Valores de los coeficientes de seguridad para cada modelo de fallo con el ancho eficaz y el número de pilotes comprimidos. Fuente: Elaboración propia en software Excel.

## 5. Conclusiones

Para finalizar el presente Anejo, se da como alcanzado el objeto de este, que es el dimensionamiento de la cimentación del aerogenerador. Ya que, tras comprobar la seguridad de las diferentes alternativas para los diferentes modos de fallo para cada una de las alternativas planteadas, se procede a definir las dimensiones de las diferentes alternativas.

- Alternativa 1. Cimentación compensada: esta alternativa se ha descartado, a causa de la imposibilidad que presenta para ser ejecutada.
- Alternativa 2. Cimentación directa: se plantea una zapata aislada circular, la cual consta con 4 metros de canto, con 30 metros de diámetro y con un relleno de 0.5 metros. Por tanto, la cimentación se encuentra a una profundidad de 4.5 metros.
- Alternativa 3. Cimentación indirecta: se ha considerado un grupo de pilotes perforados y hormigonados *in situ*. Estos constan con un diámetro de 1 metro y longitud de 15 metros, y se distribuyen en 6 filas y 6 columnas. Estos distan entre ellos una distancia de 3.5 metros entre ejes, de manera que el encepado cuadrado queda definido con un ancho de 20 metros y un canto de 2 metros. Además, la cimentación será recubierta por 0.5 metros de material de relleno.

Una vez definidas las diferentes alternativas, el siguiente paso es la realización de un estudio posterior de la viabilidad de ejecución, con tal de analizar y comparar cuál de las alterativas es la más idónea. La elección de la alternativa óptima se puede consultar en el **ANEJO N.º 4: ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS**.

## 6. Referencia

- Dirección general de carreteras, M. de F. (1998). *Instrucciones de construcción serie normativas IAP Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera*.
- GOBIERNO DE ESPAÑA MINISTERIO DE FOMENTO. (2009). *Guía de cimentaciones en obras de carretera*.  
*Guía de cimentaciones para carreteras*. (n.d.). Retrieved June 9, 2021, from [https://www.mitma.es/recursos\\_mfom/0710401.pdf](https://www.mitma.es/recursos_mfom/0710401.pdf)
- Izquierdo Silvestre, F. A. (2001). *Cuestiones de geotecnia y cimientos*. Universidad Politécnica de Valencia.
- Rodríguez Ortíz, J. M. (1982). *Curso aplicado de cimentaciones* (C. Oteo Mazo & J. Serra Gesta, Eds.; 1ª, 5ª-7ª ed.) [Book]. Colegio Oficial de Arquitectos.
- Rodríguez Ortíz, J. M. (1981). *Cimentaciones* (J. M. Rodríguez Ortíz, Ed.; 2a. ed.) [Book]. Colegio Oficial de Arquitectos.
- Víctor Yepes Piqueras. (2019, November 27). *Empuje de tierras, ¿mejor Coulomb o Rankine? – El blog de Víctor Yepes*. <https://victoryepes.blogs.upv.es/2019/11/27/empuje-de-tierras-mejor-coulomb-o-rankine/>



# ANEJO N.º 4: ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS

AUTOR: Ana Gabriela Caballero Vallejos

TUTOR: María Elvira Garrido de la Torre

COTUTOR: Juan Navarro Gregori

Grado en Ingeniería Civil

Escuela Técnica Superior de Ingeniería De Caminos, Canales y Puertos

Universitat Politècnica de València



## CONTENIDO

1. Antecedentes y objeto .....	4
2. Datos de partida/ Descripción de alternativas .....	4
3. Metodología de estudio.....	5
4. Estudio de las alternativas .....	7
4.1. Objeto .....	7
4.2. Definición y jerarquización de criterios .....	7
4.3. Comparación por pares .....	8
4.3.1. Ponderación criterios principales.....	8
4.3.2. Ponderación de los subcriterios económicos.....	9
4.3.3. Ponderación de los subcriterios sociales. ....	9
4.3.4. Ponderación de los subcriterios ambientales. ....	10
4.3.5. Ponderación de los subcriterios proceso constructivo. ....	11
4.3.6. Peso de los subcriterios.....	11
4.4. Elección de la alternativa idónea.....	11
5. Conclusiones .....	13



## 1. Antecedentes y objeto

Este documento, forma parte del estudio del diseño de una cimentación para un aerogenerador, concretamente el modelo SG 2.1-114 de Siemens Gamesa Renewable Energy, en el término municipal de Arcos de las Salinas (Teruel).

El objeto del presente Anejo es explicar la metodología seleccionada para elegir la alternativa más idónea. Para ello en primer lugar tras la selección de la metodología, se establecen los criterios a partir los cuales se analizan y comparan las diferentes opciones planteadas. Y finalmente tras obtener los pesos de las alternativas se comparan y se obtiene la mejor.

En los siguientes apartados se aborda mejor cada uno de los pasos.

## 2. Datos de partida/ Descripción de alternativas

Para la ejecución de la cimentación, en un primer momento se plantearon tres alternativas. Las soluciones se caracterizan por ser cada una de ellas una tipología diferente de cimentación. No obstante, tras la realización del dimensionado de la estructura, bajo condicionantes exclusivamente geotécnicos, se concluye que las Alternativas 2 y 3 son las que pueden llevarse a cabo. La metodología seguida para realizar el dimensionado de la cimentación se aborda en el Anejo anterior, **ANEJO N.º 3 CÁLCULOS GEOTÉCNICOS**.

Tras exponer todo lo anterior, se procede a explicar las alternativas que pueden llevarse a cabo para la ejecución del aerogenerador.

Las alternativas que pueden ejecutarse son:

- **Alternativa 2. Cimentación directa:** el diseño de esta solución se ha realizado de manera que la totalidad de la estructura sea hormigón armado, empleando para el hormigón HA-25/B/20/IIa y en el caso del acero se ha optado por armadura pasiva B 500 SD. Dicho lo anterior, se procede a explicar detalladamente el diseño de la alternativa. La cimentación se caracteriza por ser una zapata circular aislada. Las dimensiones con las que consta, es con un diámetro de 30 metros y un canto de 4 metros. La zapata se debe disponer a una profundidad de 4.5 metros, ya que se debe de considerar los 0.5 metros de relleno. El relleno de materiales se coloca para cubrir la estructura, protegiéndola así de los agentes externos, además de reducir el impacto visual que puede producir la estructura de hormigón al quedar al descubierto.

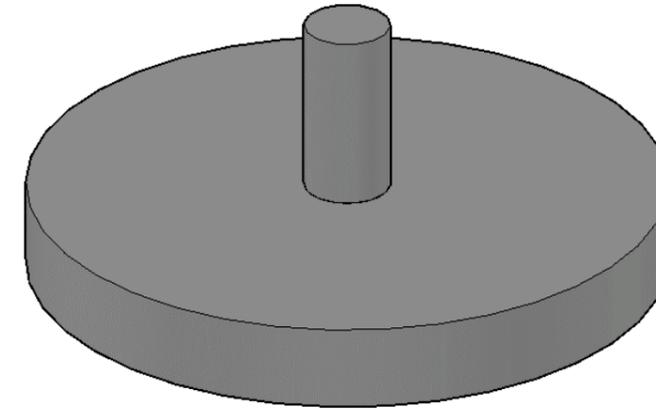


Figura 2.1. Alternativa 2: Cimentación directa. Fuente: Elaboración propia en software AutoCAD.

- **Alternativa 3. Cimentación indirecta:** el diseño presentado para esta opción, al igual que para alternativa anterior, es una estructura de hormigón armado. La tipología escogida para la cimentación indirecta es un grupo de pilotes con un encepado rígido y se ha optado por la ejecución *in situ*, es decir que los elementos estructurales se construirán en el lugar en el que se ubicara la estructura. No se ha considerado utilizar pilotes prefabricados ya que estos pueden dañarse en el proceso de hinca. Esto se debe a que pueden fracturarse al intentar penetrar en la roca, es por ello por lo que la solución más idónea son pilotes perforados y hormigonados *in situ*. A continuación, se define las dimensiones que consta cada elemento de la cimentación. El grupo de pilotes se encuentra formado por 36 pilotes, los cuales tienen una longitud de 15 metros y un diámetro de 1 metro. El encepado de forma cuadrada en planta, consta con 20 metros de lado y 2.5 metros de canto. Al igual que en la Alternativa 2, este será cubierto por una potencia de 1.5 metros de relleno.

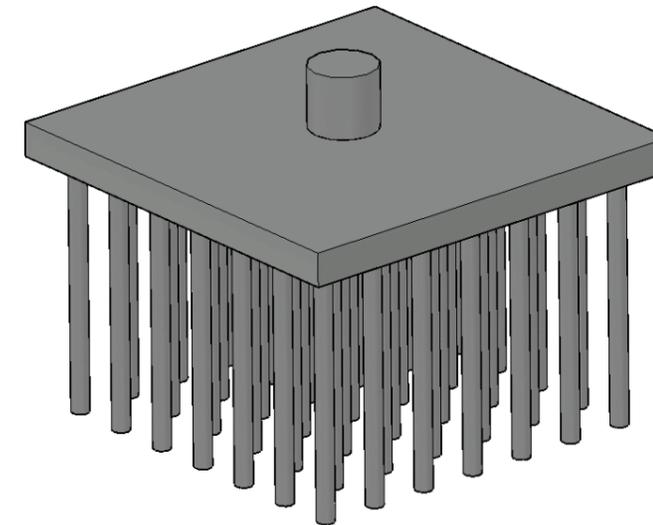


Figura 2.2. Alternativa 3: Cimentación indirecta. Fuente: Elaboración propia en software AutoCAD.

Cabe mencionar que la Alternativa 1: Cimentación compensada, se descarto a causa de la distribución no homogénea de los esfuerzos sobre el contacto estructura-terreno.

### 3. Metodología de estudio

El proceso de selección de la mejor alternativa, es decir la toma de decisiones, se puede realizar siguiendo diferentes métodos y herramientas, dependiendo del objetivo. Para este estudio en concreto, se ha optado por la toma de decisiones multi-criterio, *Multiple Criteria Decision-Making* (MCDM). Ya que este método se utiliza para resolver un problema teniendo en consideración diferentes criterios, por ser ampliamente empleado y porque el presente trabajo se encuentra en la fase de diseño.

Los métodos MCDM se dividen en dos métodos, el de toma de decisión multi-atributo, *Multi-Attribute Decision-Making* (MADM), y el multi-objetivo, *Multiple Objective Decision-Making* (MODM), esto ocurre tras la publicación de Hwang and Yoon (1981).

Los métodos MADM, son utilizados para evaluar variables discretas, es decir alternativas finitas, y la valoración se realiza a priori. En cambio, los métodos MODM, se emplean para determinar la mejor alternativa continua, es un proceso a aplicar a posteriori.

En el presente estudio se opta por emplear el método MADM, ya que el estudio abarca únicamente la fase de diseño. Una vez expuesto lo anterior, se procede a seleccionar un método o herramienta que permita la toma de decisiones multi-atributo, existen una gran variedad, así que a continuación se recogen los más utilizados.

Los métodos se agrupan en función de sus características, siendo la clasificación más habitual la propuesta por (de Brito & Evers, 2016; Hajkowicz & Collins, 2007).

Estos se recogen en la siguiente tabla:

GRUPO MADM	MÉTODO MADM
Métodos de puntuación directa	Ponderación aditiva simple (SAW)
	Evaluación proporcional compleja (COPRAS)
Métodos basados en la distancia	Programación de objetivos (GP)
	Programación de compromisos (CP)
	Técnica para ordenar la preferencia por similitud con la solución ideal (TOPSIS)
Métodos de comparación por pares	Optimización multicriterio y soluciones de compromiso (VIKOR)
	Proceso Analítico Jerárquico (AHP)
	Proceso Analítico de Red (ANP)

	Medición del atractivo mediante una técnica de evaluación basada en categorías (ELECTRE)
Métodos de superación	Método de organización de la clasificación de preferencias para el enriquecimiento de las evaluaciones (PROMETHEE)
	Eliminación y elección expresando la realidad (ELECTRE)
Métodos basados en funciones de utilidad o valor	Teoría de la utilidad multi-atributo (MAUT)
	Teoría del valor multi-atributo (MAVT)
	Modelo integrado de valor para evaluaciones sostenibles (MIVES)

Tabla 3.1. Clasificación de los métodos de MADM. Fuente: (Penadés-Plà et al., 2016)

Una vez expuestos los métodos más utilizados, se procede a justificar la elección del método de comparación por pares. Se emplea este procedimiento al ser sencillo para clasificar y calificar las alternativas, cuando la importancia de cada opción no puede evaluarse directamente al ser subjetivos. Debido a la dificultad de estudio de las alternativas estas se comparan y toman relaciones de preferencia, es decir cada una contiene cierto grado de preferencia o importancia sobre otra.

Dentro del método por pares, se encuentra el Proceso Analítico Jerárquico, AHP, fue el primero en desarrollarse y es uno de los procesos más utilizados en la toma de decisiones.

Su gran utilización viene motivada por las ventajas que presenta, las cuales son:

- La permisividad de poder considerar criterios tanto cuantitativos como cualitativos.
- La capacidad de identificar y priorizar problemas.
- La capacidad de descomponer el problema inicial en subproblemas, para poder analizarlo por partes.
- La facultad de establecer una jerarquización de las soluciones planteadas, teniendo en cuenta para ello unos criterios.
- Permite correcciones en las matrices de decisión al analizar la consistencia de las mismas.

Tras exponer lo anterior, se decide utilizar el método AHP, ante las ventajas que presenta y al ser idóneo para evaluar las alternativas propuestas.

El Proceso de Análisis Jerárquico (AHP), es un método basado en la evaluación de diferentes criterios que permiten jerarquizar un proceso y posteriormente decidir cuál es la opción más conveniente (Saaty, 1984). De esta forma siguiendo la estructura jerárquica, el objetivo final se presenta en el nivel más alto, y los subniveles y subcriterios en los inferiores.

El proceso por el cual se rige el modelo AHP, son los siguientes:

1. Jerarquización del problema.

El primer paso es identificar y estructurar los elementos del problema según una jerarquía, de manera que se define el objetivo principal a alcanzar. A continuación, para conseguir dicho objetivo, se jerarquiza los criterios que se van a tener en cuenta en el análisis. Los criterios seleccionados, pueden dividirse en subcriterios y así sucesivamente, hasta llegar a niveles en que los indicadores pueden ser cuantificables numéricamente o de forma cualitativa. Para que la aplicación del método sea eficaz los criterios y subcriterios deben seleccionarse de forma correcta, además deben ser excluyentes entre ellos y relevantes.

Tras definir los criterios, la siguiente tarea es identificar las alternativas factibles con las que alcanzar el objetivo general.

2. Comparación por pares.

Una vez definida la estructura jerárquica, se pasa a comparar los criterios de cada grupo del mismo nivel jerárquico y la comparación directa por pares de las alternativas. Este paso es fundamental ya que permite establecer las prioridades de las categorías principales y de las categorías inferiores. La comparación por pares se ha de realizar entre criterios del mismo nivel, para ello se emplea la escala fundamental, donde 1 representa la misma importancia entre los criterios comparados y 9 importancia extrema de uno respecto el otro.

El número de comparaciones a realizar es igual a  $n \cdot (n-1)/2$ , siendo  $n$  la dimensión de la matriz. El resultado de estas comparaciones es un matriz cuadrada recíproca (si  $a_{ij} = x$ , por tanto  $a_{ji} = \frac{1}{x}$ ), homogénea (si  $i$  y  $j$  son igual de importantes  $a_{ij} = a_{ji} = 1$  y  $a_{ii} = 1$ ) y positiva, denominada Matriz de comparaciones pareadas.

Escala numérica	Definición	Explicación
1	Igual importancia	Los dos elementos contribuyen igualmente a la propiedad o criterio
3	Importancia moderada	El juicio y la experiencia previa favorecen a un elemento frente al otro
5	Importancia grande	El juicio y la experiencia previa favorecen fuertemente a un elemento frente al otro
7	Importancia muy grande	Un elemento domina fuertemente. Su dominación está probada en práctica
9	Importancia extrema	Un elemento domina al otro con el mayor orden de magnitud posible
2, 4, 6 y 8	Valores intermedios entre los anteriores, se emplean cuando es necesario matizar el grado de importancia	

Tabla 3.2. Escala fundamental. Fuente: Basado en Saaty, 1984

3. Obtención de prioridad.

Tras definir la matriz de comparaciones pareadas, el siguiente paso es determinar la prioridad de los criterios, para ello se debe determinar el valor del vector de pesos de los criterios perteneciente al mismo grupo. El vector queda definido mediante la **Formula (1)**, donde  $i$  hace referencia al número de fila y  $j$  al número de columna de la matriz y  $\bar{x}_i$  la media geométrica de cada fila de la matriz.

$$w_i = \frac{\bar{x}_i}{\sum_{n=1}^n \bar{x}_i} \tag{1}$$

Este mismo procedimiento se sigue para determinar la importancia de cada alternativa respecto a un criterio.

4. Análisis de consistencia del sistema.

Antes de proceder a seleccionar la solución más idónea, se ha de determinar el grado de consistencia de la matriz de decisión. La matriz de decisión al estar elaborada por las consideraciones personales del decisor puede generar cierto grado de subjetividad. Por ello para comprobar que la matriz no contenga incoherencias y disminuir el grado de consistencia de la matriz, si es posible, se calcula el grado de consistencia.

El grado de consistencia se mide mediante la proporción de consistencia, (*Consistency Ratio*, CR) el cual se obtiene a partir del índice de consistencia (*Consistency Index*, CI) y el índice aleatorio, RI.

$$CR = \frac{CI}{RI} \tag{2}$$

Al calcular la proporción de consistencia CR, esta no puede excederse de los siguientes valores:

Tamaño de la matriz (n)	Ratio de consistencia
3	5 %
4	9 %
≥5	10 %

Tabla 3.3. Proporción de consistencia. Fuente: Basado en El Blog de Víctor Yepes, 2018.

En la **Ecuación (2)**, los elementos que conforman la expresión son:

$CI$ : índice de consistencia, se compone por  $n$ , dimensión de la matriz y  $e_{ij}$ , los errores de la matriz.

$$CI = \frac{1}{n \cdot (n - 1)} \cdot \sum_{i \neq j}^n (e_{ij} - 1) \quad (3)$$

$e_{ij}$ : errores de la matriz E.

$$e_{ij} = \frac{a_{ij} \cdot w_j}{w_i} \quad (4)$$

$RI$ : índice aleatorio, indica la consistencia de la matriz aleatoria, siendo los valores los que se presenta en la **Tabla 3.4**.

Tamaño de la matriz	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Índice aleatorio	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.42	1.45	1.49

Tabla 3.4. Índice aleatorio. Fuente: Basado en El Blog de Víctor Yepes, 2018.

#### 5. Elección de la alternativa idónea.

Es el último paso del método. Tras obtener el vector de pesos de los criterios, al realizar la comparación por pares de los diferentes niveles jerárquicos y el vector que refleja la importancia de cada alternativa frente cada criterio, el siguiente paso es obtener las puntuaciones de cada alternativa. Dicha puntuación se logra tras multiplicar los pesos de las categorías principales por los pesos asignados a las alternativas según cada criterio.

## 4. Estudio de las alternativas

### 4.1. Objeto

El objeto de la aplicación del AHP es seleccionar la mejor alternativa para realizar la cimentación para un aerogenerador. Las diferentes alternativas han sido definidas en el Apartado 2, y se evalúan mediante criterios basados en el desarrollo sostenible, siendo estos los principales aspectos el ambiental, el económico y el social.

A continuación, se procede a la jerarquización del problema, dicho de otra forma, los criterios y subcriterios. Seguidamente se obtiene los pesos globales de los criterios. Y finalmente se compara por pares las alternativas respecto cada criterio, para así obtener la idónea.

### 4.2. Definición y jerarquización de criterios

En el presente apartado se procede a definir los criterios que se han tenido en cuenta, antes de proceder con la jerarquización de estos. Los criterios considerados para evaluar los impactos han sido seleccionados basándose en los pilares del desarrollo sostenible, es decir aspectos ambientales, sociales y económicos; además se ha considerado oportuno añadir a estos anteriores el criterio de proceso constructivo.

De manera que los criterios y subcriterios quedan definidos a continuación:

- **Criterio económico.** Se basa en el coste de la estructura considerando únicamente la ejecución de esta.
- **Criterio ambiental.** Se basa en el grado en que la ejecución de la estructura afecta el emplazamiento.
  - o **Ecosistema.** Puntúa la afección y daño que produce cada alternativa sobre el ecosistema.
- **Criterio social.** Se basa en el grado en el que la ejecución de la estructura afecta a la población.
  - o **Comunidad local.** Cuantifica el impacto social que causa cada una de las alternativas sobre el conjunto de la sociedad.
- **Criterio proceso constructivo.** Se basa en el proceso de ejecución de la estructura.
  - o **Facilidad de ejecución.** Cuantifica la dificultad constructiva que puede presentar ciertos procesos constructivos.

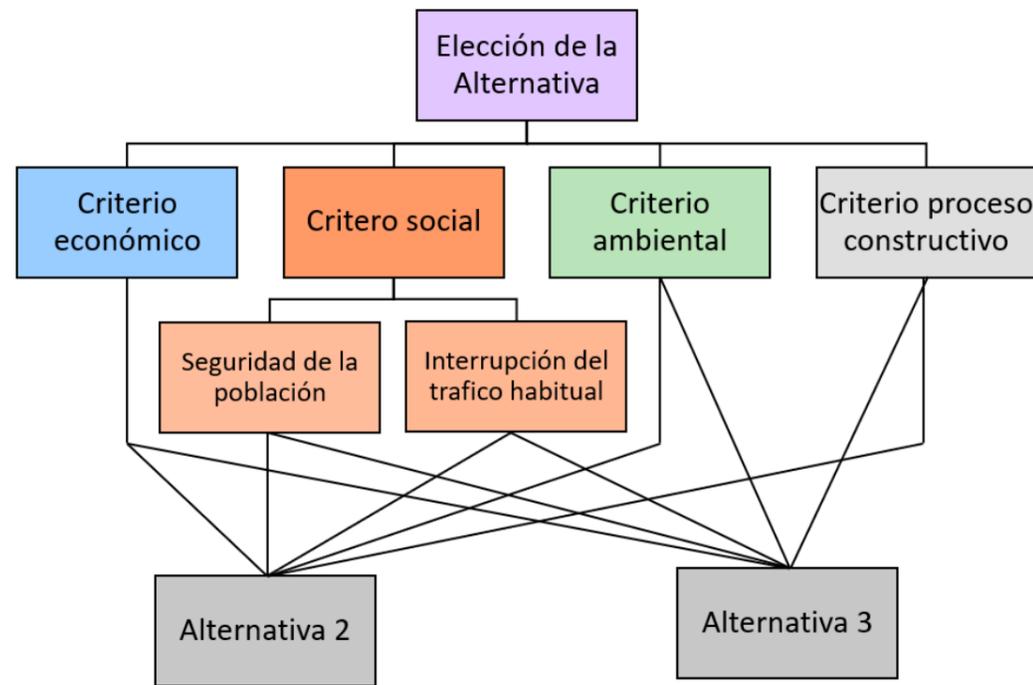


Figura 4.1. Estructura jerárquica de la AHP. Fuente: Elaboración propia

Para facilitar la comprensión de los siguientes pasos, a continuación se define cada uno de los criterios:

Código	Criterio	Código	Subcriterio
C1	Económico	C1.1	Coste económico
C2	Social	C2.1	Interrupción del tráfico habitual
		C2.2	Sensación de seguridad
C3	Ambiental	C3.1	Volumen de movimiento de tierras
C4	Proceso constructivo	C4.1	Facilidad del constructiva

Figura 4.2. Criterios y subcriterios del AHP. Fuente: Elaboración propia en software Excel.

### 4.3. Comparación por pares

Una vez definidos los criterios y subcriterios, se puede observar que estos siguen una estructura jerárquica. Es por ello por lo que, para determinar la puntuación de cada alternativa, se debe realizar la comparación por pares, mediante la matriz decisión, para obtener las ponderaciones

La obtención de las ponderaciones sigue el mismo orden que la estructura jerárquica de los criterios, de manera que en primer lugar se expone la ponderación de los criterios principales: económico, ambiental y social; para seguir con la ponderación de los subcriterios

#### 4.3.1. Ponderación criterios principales.

La ponderación de los criterios principales se obtiene de la siguiente matriz de decisión.

(a <sub>ij</sub> )	C1	C2	C3	C4
C1	1	3	3	2
C2	0.33	1	1	0.50
C3	0.33	1	1	0.50
C4	0.5	2	2	1

Figura 4.3. Matriz de decisión de los criterios principales. Fuente: Elaboración propia en software Excel

Tras la elaboración de la matriz, se comprueba la consistencia que presenta la matriz, por ello se comprueba el valor del CR, el cual es del 0.3%, siendo menor al 9% establecido en la **Tabla 3.3**, por tanto, se concluye con que la matriz es consistente.

Tal como se puede ver en la matriz, se ha considerado que tanto el criterio social y ambiental presentan la misma importancia, mientras que el económico y el de proceso constructivo es más importante que los anteriores, prevaleciendo sobre estos una posición en la escala fundamental.

La adopción de la importancia de los criterios viene justificada por la mayor importancia que presenta el criterio económico en el sector de la construcción, sobre todo en la toma de decisiones en la fase de diseño. Otro criterio que tiene gran consideración en la toma de decisiones es el proceso constructivo que presenta cada proyecto, ya que este puede influir en el coste económico del proyecto y en la sociedad. Tras la selección de la solución idónea se comprueba la compatibilidad ambiental y social, aumentando la importancia de estos.

Una vez definida la matriz de decisión se obtiene el vector de pesos de los criterios principales, empleando la **Formula (1)**, siendo los pesos de cada criterio los siguientes: 46% el criterio económico, 14% el criterio ambiental, 14% para el ambiental y el 26% restante para el criterio de proceso constructivo.

### 4.3.2. Ponderación de los subcriterios económicos.

Para este nivel solo se observa un subcriterio el de coste económico, es por ello por lo que su ponderación coincide con la del criterio principal, optando un valor del 46%.

El valor del coste económico de cada una de las alternativas se obtiene de realizar una prevaloración económica, una vez se ha determinado las dimensiones de las cimentaciones para cada alternativa.

El desarrollo de la prevaloración económica se encuentra en el siguiente apartado.

#### 4.3.2.1. Puntuación del subcriterio económico.

En el presente apartado se realiza una prevaloración económica en la cual se parte del dimensionamiento realizado en el **ANEJO N.º. 3: CÁLCULOS GEOTÉCNICOS**, en el que se concluye con el predimensionamiento de la Alternativa 2 y 3.

A continuación, se muestra unas tablas que recoge el precio de la ejecución de cada alternativa.

ALTERNATIVA 2				
UD	PROCESO	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	TOTAL
m2	Desbroce y limpieza del terreno con arbustos, con medios mecánicos.	900.00	1.67 €	1,503.00 €
u	Talado de árbol	30.00	30.92 €	927.60 €
m3	Transporte de residuos vegetales con camión.	285.00	3.45 €	983.25 €
m3	Canon de vertido por entrega de residuos vegetales a gestor autorizado.	285.00	6.83 €	1,946.55 €
m3	Voladuras del terreno a cielo abierto	3180.86	1.30 €	4,135.12 €
u	Transporte de equipos y proyecto de voladuras	1.00	3,800.00 €	3,800.00 €
m3	Transporte de tierras con camión	3180.86	4.83 €	15,363.57 €
m3	Canon de vertido por entrega de tierras a gestor autorizado	3180.86	2.28 €	7,252.37 €
m2	Capa de hormigón de limpieza	706.86	12.95 €	9,153.82 €
m2	Sistema de encofrado para zapata de cimentación	424.12	15.19 €	6,442.31 €
m3	Zapata de cimentación de hormigón armado	2827.43	199.62 €	564,412.25 €
<b>TOTAL</b>				<b>615,919.83 €</b>

Figura 4.4. Valoración económica del prediseño de la Alternativa 2. Fuente: Elaboración propia en software Excel.

ALTERNATIVA 3				
UD	PROCESO	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	TOTAL
m2	Desbroce y limpieza del terreno con arbustos, con medios mecánicos.	625.00	1.67 €	1,043.75 €
u	Talado de árbol	30.00	30.92 €	927.60 €
m3	Transporte de residuos vegetales con camión.	216.25	3.45 €	746.06 €
m3	Canon de vertido por entrega de residuos vegetales a gestor autorizado.	216.25	6.83 €	1,476.99 €
m3	Voladuras del terreno a cielo abierto	1000.00	1.30 €	1,300.00 €
u	Transporte de equipos y proyecto de voladuras	1.00	3,800.00 €	3,800.00 €
m3	Transporte de tierras con camión	2696.46	4.83 €	13,023.90 €
m3	Canon de vertido por entrega de tierras a gestor autorizado	2696.46	2.28 €	6,147.93 €
m2	Capa de hormigón de limpieza	400.00	12.95 €	5,180.00 €
m2	Sistema de encofrado para encepado de grupo de pilotes	160.00	18.38 €	2,940.80 €
m3	Encepado de grupo de pilotes	800.00	259.27 €	207,416.00 €
m	Pilote	540.00	223.26 €	120,560.40 €
<b>TOTAL</b>				<b>364,563.43 €</b>

Figura 4.5. Valoración económica del prediseño de la Alternativa 3. Fuente: Elaboración propia en software Excel.

### 4.3.3. Ponderación de los subcriterios sociales.

Para obtener la ponderación de los subcriterios sociales sobre la ponderación del criterio principal, se han tenido en cuenta dos consideraciones: interrupción del tráfico habitual (C2.1) y sensación de seguridad (C2.2). Al tratarse del estudio de la cimentación de un aerogenerador, se ha contemplado el criterio social durante la ejecución de esta y partiendo de la base de que ambas alternativas serán técnicamente eficientes una vez la obra esté en servicio. Es decir, en ningún caso se trata de evaluar el impacto social que puede provocar el aerogenerador, cuestión que no es objeto de este trabajo fin de grado.

	(a <sub>ij</sub> )	C2.1	C2.2
A =	C2.1	1	3
	C2.2	0.33	1

Figura 4.6. Matriz de decisión subcriterios sociales. Fuente: Elaboración propia en software Excel.



#### 4.3.5. Ponderación de los subcriterios proceso constructivo.

En este criterio, se considera como subcriterio únicamente la facilidad constructiva, de manera que la ponderación que le corresponde es del 26%, coincidiendo con la del criterio principal.

Este subcriterio valora los métodos y procesos que se tienen que llevar a cabo para cada alternativa. En el caso de la Alternativa 2, esta se caracteriza por ser una cimentación directa, en que se emplea voladuras, al tratarse de un terreno compuesto por rocas, además la potencia a excavar es de 4.5 metros, de manera que imposibilita la ejecución mediante elementos mecánicos, debido al bajo rendimiento de ejecución que se tendría. Por tanto, para la realización de las voladuras se necesita maquinaria y personal especializado, además de adoptar mayores sistemas y protocolos de seguridad, normalmente se suele subcontratar. Por otro lado, se tiene la Alternativa 3, la cual también requiere de maquinaria y personal especializado para realizar los pilotes. No obstante, la Alternativa 2 sigue presentando un nivel mayor de especialidad además que la ejecución de pilotes es más común que la realización de voladuras.

$$A = \begin{array}{c|cc} & (a_{ij}) & A2 & A3 \\ \hline A2 & & 1 & 4 \\ \hline A3 & & 0.25 & 1 \end{array}$$

Figura 4.8. Matriz de decisión del subcriterio C4.1. Fuente: Elaboración propia en software Excel.

Tras la comparación por pares se observa que los pesos de las alternativas adoptan una puntuación de 0.80 la Alternativa 2 y 0.20 la 3.

#### 4.3.6. Peso de los subcriterios

Tras obtener los vectores de pesos de los criterios y subcriterios, se ha de obtener los pesos conjuntos que se han de tener en cuenta en la evaluación mediante el método AHP. En su gran mayoría, los pesos de los subcriterios coinciden con los del criterio principal que los engloba, tal como se puede ver en la **Figura 4.9**.

Código	Descripción	Peso
C1.1	Coste económico	0.460
C2.1	Interrupción del tráfico habitual	0.106
C2.2.	Sensación de seguridad	0.035
C3.1	Volumen de movimiento de tierras	0.140
C4.1	Facilidad del constructiva	0.260

Figura 4.9. Vector de pesos de cada subcriterio. Fuente: Elaboración propia en software Excel.

### 4.4. Elección de la alternativa idónea

Antes de elegir la alternativa idónea, en la siguiente figura, se recoge las puntuaciones de cada subcriterio para cada una de las alternativas. Dichos valores se han obtenido en los apartados anteriores.

Por tanto, los datos quedan recogidos en la **Figura 4.10** con tal de facilitar la lectura del documento.

Código	Descripción	Alternativa 2	Alternativa 3
C1.1	Coste económico (€)	615919.83	364563.43
C2.1	Interrupción del tráfico habitual	1.15	1.00
C2.2.	Sensación de seguridad	0.80	0.20
C3.1	Volumen de movimiento de tierras (m <sup>3</sup> )	3465.86	2913.46
C4.1	Facilidad del constructiva	0.80	0.20

Figura 4.10. Resumen de las puntuaciones las alternativas para cada subcriterio. Fuente: Elaboración propia en software Excel.

A continuación, se procede a obtener la ponderación de cada alternativa, pero antes se normaliza las puntuaciones de la figura anterior. Las puntuaciones normalizadas se muestran en la **Figura 4.11**.

Código	Descripción	Alternativa 2	Alternativa 3
C1.1	Coste económico (€)	0.63	0.37
C2.1	Interrupción del tráfico habitual	0.53	0.47
C2.2.	Sensación de seguridad	0.80	0.20
C3.1	Volumen de movimiento de tierras (m <sup>3</sup> )	0.54	0.46
C4.1	Facilidad del constructiva	0.80	0.20

Figura 4.11. Resumen de las puntuaciones normalizadas de las alternativas para cada subcriterio. Fuente: Elaboración propia en software Excel.

De manera que la puntuación de cada alternativa atendiendo a los criterios queda recogida en la siguiente

**Figura 4.12.**

	Alternativa 2	Alternativa 3
C1	0.63	0.37
C2	0.60	0.40
C3	0.54	0.46
C4	0.80	0.20

Figura 4.12. Puntuaciones de las alternativas por criterios. Fuente: Elaboración propia en software Excel.

Finalmente, las puntuaciones finales de cada alternativa quedan recogidas en la siguiente figura.

	Puntuación final
Alternativa 2	0.656
Alternativa 3	0.344

Figura 4.13. Puntuación final de cada alternativa. Fuente: Elaboración propia en software Excel.

Con tal de facilitar la comprensión de los datos recogidos en las tablas, a continuación, se muestra una representación gráfica de estos.

En la primera figura, la **Figura 4.14**, se representa los datos de la **Figura 4.12**, es decir los impactos que genera cada alternativa según los criterios seleccionados. En dicha imagen se observa que el criterio de proceso constructivo es el que se ve más diferencia, siendo la Alternativa la 2 la de mayor puntuación, es decir, mayor grado de dificultad. A este le sigue el criterio económico en el que se vuelve a observar que la Alternativa 2, es la que tiene mayor coste.

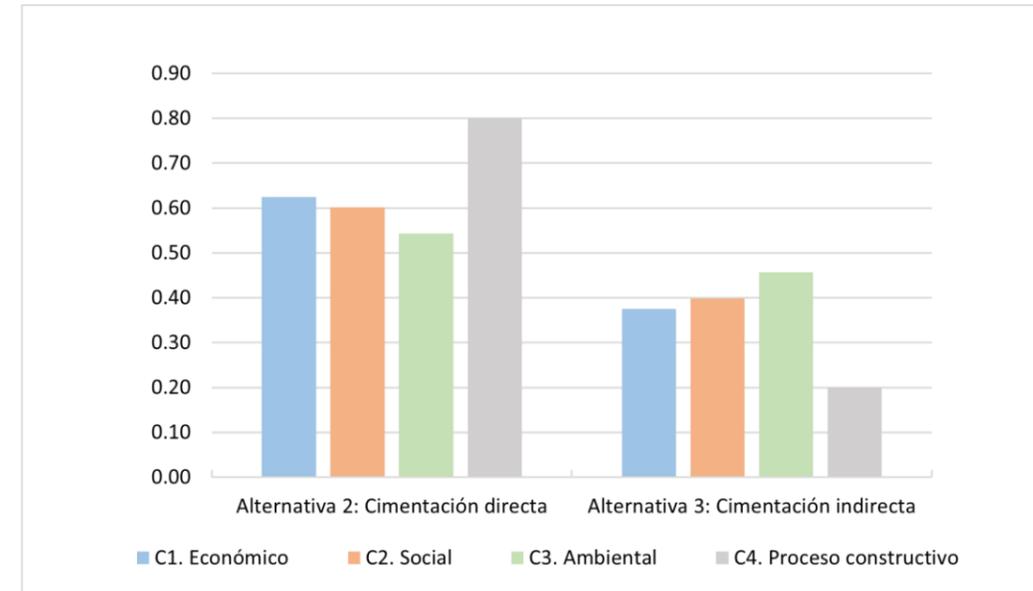


Figura 4.14. Puntuación por criterios de cada alternativa. Fuente: Elaboración propia en software Excel.

Seguidamente se muestra la **Figura 4.15** la cual engloba todos los resultados, representando el impacto total que produce cada alternativa, estos vienen recogidos en la **Figura 4.13**. Tras observar la imagen se concluye que la Alternativa 3 es la que presenta una menor puntuación y por ende es la solución idónea a ejecutar, ya que valorándola en su conjunto es la que mejores resultados ofrece, además de ser la opción que menores impactos produce sobre la sociedad y el medio ambiente.

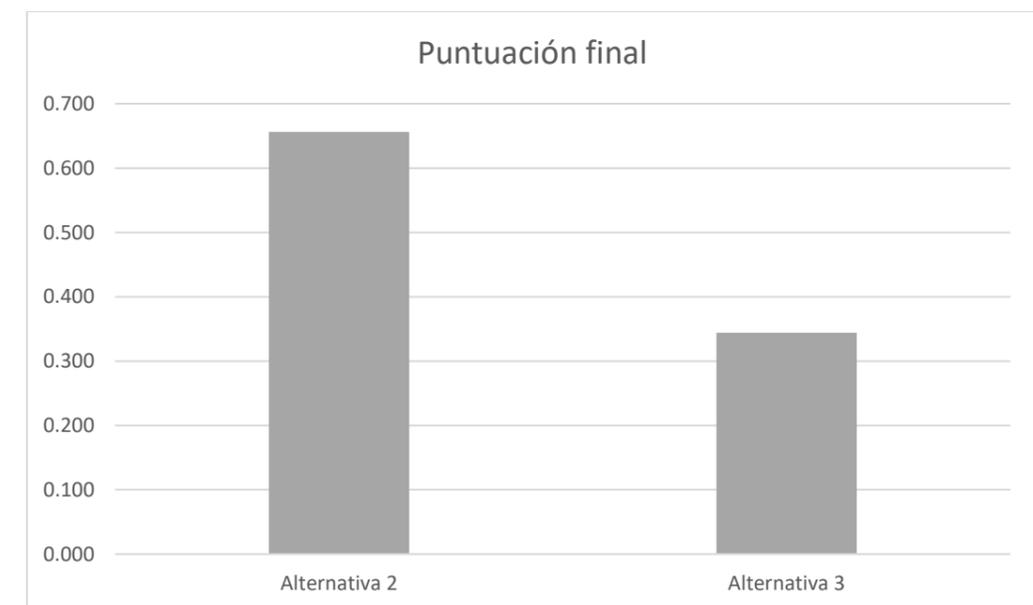


Figura 4.15. Puntuación final de cada alternativa. Fuente: Elaboración propia en software Excel.

## 5. Conclusiones

Para concluir el presente anejo, la elección de la mejor alternativa se ha hecho servir una evaluación multi-atributo (MADM) haciendo uso del método AHP, en el cual se ha obtenido los pesos de los criterios y subcriterios que intervienen en la elección de la solución idónea. Los criterios seleccionados son los tres pilares fundamentales de la sostenibilidad, el ambiental, social y económico. Por otro lado, se ha considerado necesario añadir otro criterio el de proceso constructivo.

De esta forma se observa que la solución más idónea para ejecutar la cimentación de un aerogenerador es la Alternativa 3, al presentar la puntuación más baja. Por lo tanto, una vez seleccionada la solución el siguiente paso es definir la cimentación desde el punto de vista estructural, la cual estará constituida por un encepado de 20 metros de lado y 2.5 metros de canto y un grupo de 36 pilotes de 1 metro de diámetro y 15 metros de longitud.

Dicho lo anterior se procede con el **ANEJO N.º 5: CÁLCULOS ESTRUCTURALES**.



# ANEJO N.º 5: CÁLCULOS ESTRUCTURALES

AUTOR: Ana Gabriela Caballero Vallejos  
TUTOR: María Elvira Garrido de la Torre  
COTUTOR: Juan Navarro Gregori

Grado en Ingeniería Civil  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería De Caminos, Canales y Puertos  
Universitat Politècnica de València



## CONTENIDO

1. Antecedentes y objeto .....	5
2. Datos de partida.....	5
3. Bases de cálculo .....	6
3.1. Normativa aplicada.....	6
3.2. Características de los materiales .....	6
3.3. Acciones consideradas.....	6
3.3.1. Acciones permanentes .....	6
3.3.2. Acciones variables .....	7
3.4. Combinación de acciones .....	8
3.4.1. Coeficientes de seguridad .....	8
3.4.2. Combinación de acciones en ELU.....	8
3.4.3. Combinación de acciones en ELS .....	9
4. Procedimiento de dimensionado.....	9
4.1. Armado de pilotes .....	9
4.1.1. Cálculos previos.....	9
4.1.2. Definición de la armadura .....	11
4.2. Armado del encepado .....	14
4.2.1. Cálculos previos.....	14
4.2.2. Definición de la armadura .....	17
5. Conclusiones .....	20
6. Referencias.....	20



## 1. Antecedentes y objeto

El fin del presente documento es el estudio y diseño de la cimentación de un aerogenerador, concretamente el modelo SG 2.1-114 de Siemens Gamesa Renewable Energy, en el término municipal de Arcos de las Salinas (Teruel).

Dicho lo anterior, el objeto del Anejo es realizar el cálculo de la armadura necesaria para la cimentación del aerogenerador, en concreto una cimentación indirecta, grupo de pilotes. Se ha de definir la cantidad de armadura a emplear tanto para los pilotes como el encepado, con tal que la estructura resista los esfuerzos. Una vez definido el acero a emplear se puede realizar la valoración económica de la cimentación.

## 2. Datos de partida

Como dato de partida se tiene la alternativa seleccionada tras analizar las diferentes propuestas. El procedimiento de selección y análisis de las diferentes opciones se encuentra desarrollado en el **ANEJO N.º 4: ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS**.

La propuesta seleccionada en el Anejo anterior es la Alternativa 3, una cimentación indirecta, la cual se caracteriza por estar compuesta por 36 pilotes repartidos en 6 filas y 6 columnas. Los pilotes se caracterizan por equidistar 3.5 metros en ambas direcciones y constar con 1 metro de diámetro, además constan con una longitud de 15 metros. Por otro lado, el encepado se caracteriza por tener una forma cuadrada en planta, en que cada lado mide 20 metros y el canto de la estructura es de 2 metros. Esta queda enterrada por una potencia de relleno de 0.5 metros.

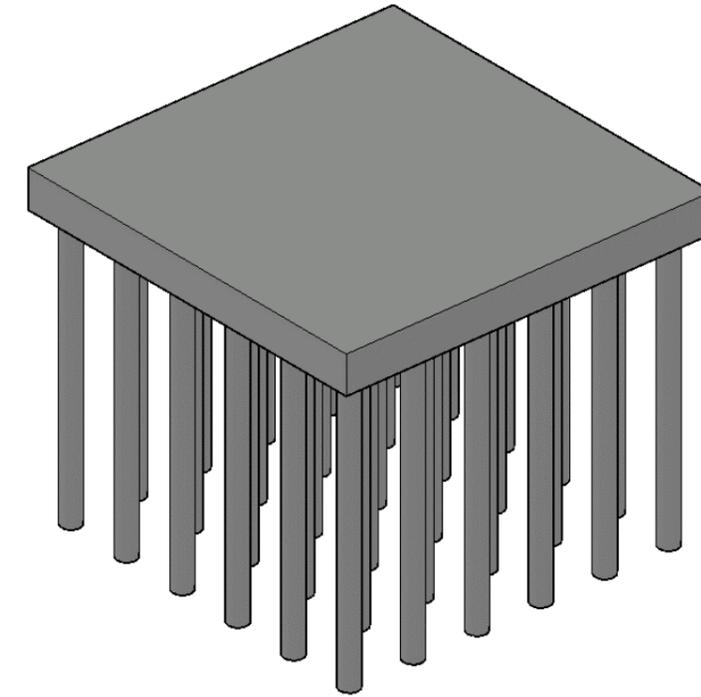


Figura 2.1. Alternativa 3: Cimentación indirecta. Fuente: Elaboración propia en software AutoCAD

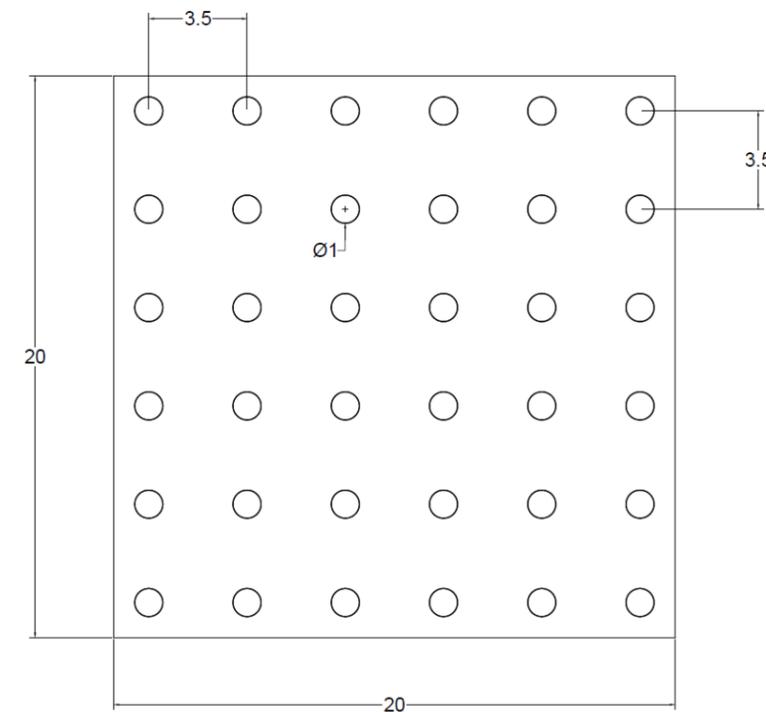


Figura 2.2. Vista en planta de la Alternativa 3: Cimentación indirecta. Fuente: Elaboración propia en software AutoCAD.

### 3. Bases de cálculo

#### 3.1. Normativa aplicada

Los cálculos desarrollados en el presente Anejo se han realizado considerando la siguiente normativa nacional:

- UNE-EN 1992-1-1 Eurocódigo 2: Proyecto de estructuras de hormigón. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación.
- Instrucción de Hormigón Estructural. EHE-08.

#### 3.2. Características de los materiales

Tras exponer la normativa empleada, se pasa a definir las características de los materiales empleados para calcular la armadura a disponer. Hay que mencionar que los elementos estructurales de hormigón armado se han diseñado para ser ejecutados con HA-30/B/20/IIa el encepado y con HA-30/F/12/IIa los pilotes. Por otra parte, el acero a emplear para armar los elementos de hormigón armado son barras corrugadas del tipo B 500 SD.

<b>Hormigón armado HA-30/B/20/IIa</b>	Peso específico ( $\gamma$ )	25 kN/m <sup>3</sup>
	Resistencia característica en compresión ( $f_{ck}$ )	30 N/mm <sup>2</sup>
<b>Hormigón armado HA-30/F/12/IIa</b>	Peso específico ( $\gamma$ )	25 kN/m <sup>3</sup>
	Resistencia característica en compresión ( $f_{ck}$ )	30 N/mm <sup>2</sup>
<b>Armadura pasiva B 500 SD</b>	Límite elástico característico ( $f_{yk}$ )	500 N/mm <sup>2</sup>
	Módulo de deformación longitudinal ( $E_s$ )	200 000 MPa
<b>Terreno</b>	Peso específico medio aparente	23 kN/m <sup>3</sup>
	Cohesión del suelo (c)	0 kPa
	Angulo de rozamiento ( $\Phi'$ )	48 °

Tabla 3.1. Características de los materiales. Fuente: Elaboración propia

#### 3.3. Acciones consideradas

En el presente apartado se define cada una de las acciones consideradas a la hora de calcular la cuantía de armadura necesaria. Algunas de las acciones por considerar ya han sido expuestas y explicadas en los siguientes Anejos: **ANEJO N.º 1: CÁLCULOS PREVIOS** y el **ANEJO N.º 3: CÁLCULOS GEOTÉCNICOS**.

Todo y que las acciones ya han sido definidas anteriormente, se procede a mencionarlas de nuevo con tal de facilitar la lectura del presente documento.

##### 3.3.1. Acciones permanentes

Son cargas que actúan en todo momento, de manera constante y ubicación fija, durante la situación de proyecto.

###### 3.3.1.1. Cargas gravitacionales

Son consideradas cargas gravitacionales, el peso propio. Dentro de estas acciones, se diferencia en tres tipos atendiendo al elemento que la origina.

- Peso propio del aerogenerador.

La acción del aerogenerador se calculó en el **ANEJO N.º 1: CÁLCULOS PREVIOS**, en la **Tabla 3.2** se expone los valores obtenidos.

Peso de la torre	P <sub>1</sub>	2 974 kN
Peso de la góndola + rotor	P <sub>2</sub>	1 024.20 kN
Peso total		3 998.20 kN

Tabla 3.2. Peso de cada una de las partes que forman el aerogenerador. Fuente: Elaboración propia en software Excel

- Peso propio de la cimentación.

Se ha obtenido a partir del peso específico del hormigón, en este caso de 25 kN/m<sup>3</sup>. Dicho lo anterior, por medio de la modelización geométrica de la Alternativa 3: Cimentación indirecta, desarrollada en el **ANEJO N.º 3: CÁLCULOS GEOTÉCNICOS**, se puede calcular el peso propio de la cimentación.

El peso de cada parte de la cimentación se expone en la **Tabla 3.2**.

Peso del encepado	20 000 kN
Peso de los pilotes	10 602.88 kN
Peso total	30 602.88 kN

*Tabla 3.3. Peso propio de la cimentación definida en la Alternativa 3. Cimentación indirecta. Fuente: Elaboración propia en software Excel*

No obstante, solo se considera el peso del encepado para determinar la armadura necesaria para los pilotes.

- Peso propio del relleno de tierras.

Se prevé un relleno de 0.5 metros tras la ejecución de la cimentación de manera que esta quede enterrada, protegiéndola de las acciones meteorológicas, además de reducir el impacto visual.

Para el relleno de tierra se reutiliza la anteriormente excavada, siendo por tanto su peso específico de 23 kN/m<sup>3</sup>. Dicho lo cual, atendiendo a la modelización de la cimentación de la Alternativa 3: Cimentación indirecta, se obtiene un valor para el peso propio del terreno de 4 452.73 kN.

### 3.3.2. Acciones variables

Son las cargas que pueden o no actuar, además de constar con una intensidad o ubicación que varía en a lo largo del tiempo.

#### 3.3.2.1. Cargas aerodinámicas

Estas corresponden con la acción del viento sobre el aerogenerador, en concreto sobre la torre y el rotor junto con las palas, el procedimiento seguido para obtener los valores se expone en el **ANEJO N.º 1: CÁLCULOS PREVIOS**. En la siguiente tabla se recoge los valores obtenidos.

Acción del viento sobre el rotor	$F_{V_{hub}}$	2 267.49 kN
Acción del viento sobre la torre	$F_{V_{torre}}$	87.85 kN
Acción del viento total		2 355.34 kN

*Tabla 3.4. Cargas aerodinámicas ejercidas sobre el rotor y la torre del aerogenerador. Fuente: Elaboración propia en software Excel*

### 3.4. Combinación de acciones

En el siguiente apartado se define las combinaciones de acciones realizadas para definir la armadura necesaria para armar la cimentación seleccionada en el Anejo anterior.

Para el cálculo estructural se diferencia dos combinaciones de acciones dependiendo del estado, es decir último o de servicio.

#### 3.4.1. Coeficientes de seguridad

En el cálculo estructural se emplea el método de los coeficientes de seguridad parcial, siendo los coeficientes empleados en el presente trabajo, los siguientes:

- Coeficiente de seguridad de los materiales.

Se emplean los definidos en el **Art. 15.3. de la EHE-08**, para el estudio de los Estados Límite Últimos, los valores de cálculo de los materiales se obtienen de dividir los valores característicos entre el coeficiente parcial de seguridad. Atendiendo al tipo de material, el coeficiente de seguridad es de 1.5 en el caso del hormigón y de 1.15 en el del acero.

- Coeficiente de seguridad empleados para los ELU.

Para realizar el estudio del Estado Límite Último, los coeficientes de seguridad empleados al realizar las combinaciones de acciones se recogen en la siguiente tabla, los cuales han sido definidos en el **Art. 12.1 de la EHE-08**.

ELU		
Situación persistente o transitoria		
Tipo de acción	Efecto favorable	Efecto desfavorable
Permanente gravitatoria	$\gamma_G = 1.00$	$\gamma_G = 1.35$
Resto de acciones permanentes	$\gamma_Q = 1.00$	$\gamma_Q = 1.50$
Variable	$\gamma_Q = 0.00$	$\gamma_Q = 1.50$

Tabla 3.5. Coeficientes parciales de seguridad para las acciones en situación persistentes o transitorias para la evaluación de los ELU. Fuente: EHE-08.

- Coeficiente de seguridad empleados para los ELS.

Por otro lado, se tienen los coeficientes parciales de seguridad de las acciones, para las comprobaciones de los Estados Límite de Servicio, los cuales se exponen en el Artículo 12.2 de la EHE-08.

Tipo de acción	ELS	
	Efecto favorable	Efecto desfavorable
Permanente	$\gamma_G = 1.00$	$\gamma_G = 1.00$
Resto de acciones permanentes	$\gamma_Q = 1.00$	$\gamma_Q = 1.00$
Variable	$\gamma_Q = 0.00$	$\gamma_Q = 1.00$

Tabla 3.6. Coeficientes parciales de seguridad para las acciones para la evaluación de los ELS. Fuente: EHE-08.

#### 3.4.2. Combinación de acciones en ELU

Tal como se ha expuesto anteriormente, el objetivo del presente anejo es la definición de la armadura necesaria para la cimentación, tanto la del encepado como de los pilotes. Para ello, se considera pertinente estudiar las posibles situaciones que pueden presentarse a lo largo del ciclo de vida de la estructura. No obstante, dadas las limitaciones que presenta el siguiente TFG, se define la estructura considerando que esta se encuentra parada. Dicho lo anterior, se considera solo la situación persistente o transitoria.

La combinación de acciones se realiza mediante la **Ecuación (1)** obtenida de la EHE-08:

$$\sum_{i \geq 1} \gamma_{G,i} \cdot G_{k,i} + \sum_{j \geq 1} \gamma_{G^*,j} \cdot G_{k,j}^* + \gamma_P \cdot P_K + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{l > 1} \gamma_{Q,1} \cdot \Psi_{0,l} \cdot Q_{k,l} \quad (1)$$

Cada elemento se refiere a:

- $G_{k,i}$ : Valor característico de las acciones permanentes.
- $G_{k,j}^*$ : Valor característico de las acciones permanentes de valor no constante.
- $P_K$ : Valor característico de la acción del pretensado.
- $Q_{k,1}$ : Valor característico de la acción variable determinante.
- $\Psi_{0,l} \cdot Q_{k,l}$ : Valor representativo de combinación de acciones variables concomitantes.

En las situaciones permanentes o transitorias, cuando la acción determinante de la  $Q_{k,1}$  no sea obvia de determinar, se ha de valorar las diferentes posibilidades, considerando cada una de las variables como determinantes. No obstante, en el presente TFG, solo hay una acción variable, la del viento, es por ello por lo que este paso no es necesario.

### 3.4.3. Combinación de acciones en ELS

Para Estados Límite Últimos solo se considera la situación de persistente y transitoria. La combinación de acciones viene determinada por la disposición que ocurran los hechos.

En el presente caso, se considera la combinación poco probable o característica, la cual se define en la EHE-08, y es la que se muestra a continuación:

$$\sum_{i \geq 1} \gamma_{G,i} \cdot G_{k,i} + \sum_{j \geq 1} \gamma_{G^*,j} \cdot G_{k,j}^* + \gamma_P \cdot P_K + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{l > 1} \gamma_{Q,l} \cdot \Psi_{0,l} \cdot Q_{k,l} \quad (2)$$

Cada elemento se refiere a:

- $G_{k,i}$ : Valor característico de las acciones permanentes.
- $G_{k,j}^*$ : Valor característico de las acciones permanentes de valor no constante.
- $P_K$ : Valor característico de la acción del pretensado.
- $Q_{k,1}$ : Valor característico de la acción variable determinante.
- $\Psi_{0,l} \cdot Q_{k,l}$ : Valor representativo de combinación de acciones variables concomitantes.

Al igual que en los ELU, cuando la acción determinante no se vea claro, de debe considerar todas las posibilidades, no obstante, este paso no es necesario, al solo presentar la acción del viento como carga variable.

No obstante, en el cálculo de la armadura a disponer, se ha tenido en cuenta solo la combinación de acciones en ELU.

## 4. Procedimiento de dimensionado

El presente apartado tiene como objeto la determinación de la armadura a disponer en la cimentación indirecta. Al tratarse de una cimentación por pilotes, la obtención de la armadura se diferencia atendiendo al elemento a estudiar, por una parte, la armadura longitudinal y estribos para los pilotes y por otra la armadura longitudinal principal y secundaria del encepado.

Cabe destacar que previo al procedimiento de dimensionamiento, se ha de realizar el reparto de las cargas sobre cada una de las partes de la cimentación.

Dicho lo anterior, se procede a definir de forma más extensa y detallada el dimensionamiento de la armadura de los pilotes y encepado.

### 4.1. Armado de pilotes

#### 4.1.1. Cálculos previos

Para definir la armadura a disponer en los pilotes es necesario conocer las cargas que han de resistir para ello, ha de realizarse un reparto de cargas entre los pilotes del grupo.

La distribución de las cargas se obtiene a partir de considerar que las cabezas de los pilotes se encuentran articuladas y que el encepado es infinitamente rígido. Dicho lo anterior, para realizar el reparto de las cargas se ha seguido las expresiones definidas en el **Apartado 5.7.** de la **Guía de cimentaciones en obras de carretera.**

$$N_i = \frac{A_i}{\sum A_i} \cdot V - \frac{A_i \cdot y_i}{\sum A_i \cdot y_i^2} \cdot M_x + \frac{A_i \cdot x_i}{\sum A_i \cdot x_i^2} \cdot M_y \quad (3)$$

$$Hx_i = \frac{A_i}{\sum A_i} \cdot Hx - \frac{A_i^2 \cdot y_i}{\sum A_i^2 \cdot (x_i^2 + y_i^2)} \cdot M_z \quad (4)$$

$$Hy_i = \frac{A_i}{\sum A_i} \cdot Hy - \frac{A_i^2 \cdot x_i}{\sum A_i^2 \cdot (x_i^2 + y_i^2)} \cdot M_z \quad (5)$$

Siendo cada uno de los elementos los que se muestran en la **Figura 4.1**.

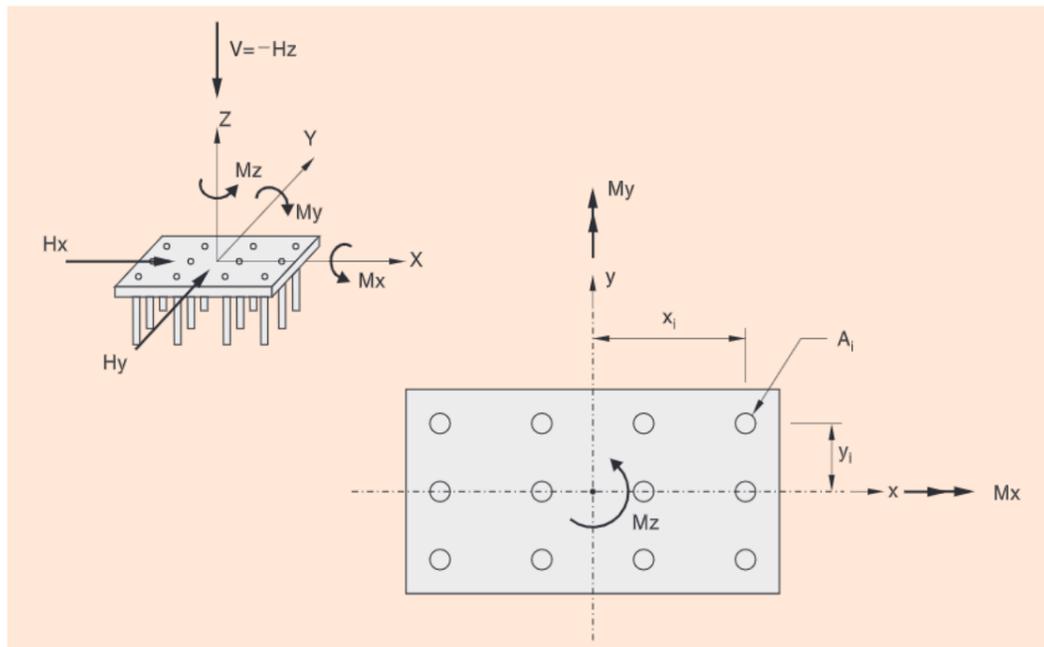


Figura 4.1. Distribución de cargas en la hipótesis de encepado rígido y pilotes articulados en cabeza. Fuente: Guía de cimentaciones en obras de carretera.

No obstante, en el presente problema solo se emplea la **Ecuación (3)** y **(4)**, ya que las resultantes de las acciones sobre las cimentaciones solo son la carga vertical ( $V$ ), la horizontal en la dirección  $x$  ( $H_x$ ) y el momento en el eje  $y$  ( $M_y$ ).

Tras exponer lo anterior, se calcula tanto la compresión y el cortante para cada uno de los pilotes. Los pilotes de los extremos, es decir los de la columna 1 y 6, son los que resisten el axil mínimo y máximo respectivamente. El cortante por otra parte será el mismo en todos los pilotes del grupo, esto se debe a que la estructura no se encuentra sometida a un esfuerzo de torsión en el eje  $z$ .

A continuación, en la **Tabla 4.1** se recoge los valores que determinan el armado de los pilotes.

<b>Axil máximo</b>	$N_6$	1 066.91 kN
<b>Axil mínimo</b>	$N_1$	-1 506.25 kN
<b>Cortante</b>	$V$	98.14 kN

Tabla 4.1. Cargas ejercidas en la cabeza del grupo de 36 pilotes. Fuente: Elaboración propia en software Excel.

Tras realizar el reparto de los esfuerzos se observa que los pilotes ubicados en la columna 6 se encuentran traccionados, a causa de la excentricidad de las cargas. Con tal de evitar la tracción de los pilotes y parte del encepado, se dispone una fila y columna más de pilotes, de manera que el número total de pilotes asciende a 49. Este procedimiento se lleva a cabo, con tal de que los pilotes se comporten de forma adecuada y no comprometan la estabilidad de la estructura. Además, se opta por aumentar en 1 metro el canto del encepado y 0.5 metros el relleno.

Por tanto, tras los convenientes cambios realizados, la cimentación queda definida por 49 pilotes de 1 metro de diámetro separados entre sí 3.5 metros desde el eje. Por otro lado, el encepado consta con un canto de 3 metros y medir cada lado 25 metros. El encepado es cubierto con un relleno de 1 metro.

Antes de seguir con los cálculos se debe realizar las comprobaciones de seguridad necesarias, es decir seguir el procedimiento expuesto en el **Apartado 4.3** del **ANEJO N.º 3: CÁLCULOS GEOTÉCNICOS**. Debido a que los pasos a seguir son análogos a los ya explicados, se considera innecesario repetirlo. Es por ello por lo que solo se anexa la siguiente tabla en la que se refleja el cumplimiento de la cimentación a los diferentes modos de fallo.

	<b>D = 1 m L = 15 m</b>	
	<b>B = 25 m N = 49</b>	<b>B* = 19.88 m N* = 36</b>
<b><math>Q &lt; Q_{adm}</math></b>	1 620.11 < 2 508.14 kN	2 205.15 < 2508.14 kN
<b><math>F_v \geq 2</math></b>	9.39	6.55
<b><math>F_d \geq 1.5</math></b>	44.32	44.32

Tabla 4.2. Valores de los coeficientes de seguridad para cada modelo de fallo tanto para el ancho real como eficaz. Fuente: Elaboración propia en software Excel.

Una vez se comprueba la seguridad del elemento, se vuelve a realizar el reparto de esfuerzos con los nuevos parámetros y se obtiene el valor de las cargas en la cabeza de los pilotes, **Tabla 4.3**.

$N_1 = 119.92$ kN	$V_1 = 72.10$ kN
$N_2 = 676.46$ kN	$V_2 = 72.10$ kN
$N_3 = 1 232.99$ kN	$V_3 = 72.10$ kN
$N_4 = 1 789.54$ kN	$V_4 = 72.10$ kN
$N_5 = 2 346.08$ kN	$V_5 = 72.10$ kN
$N_6 = 2 902.62$ kN	$V_6 = 72.10$ kN
$N_7 = 3 459.16$ kN	$V_7 = 72.10$ kN

Tabla 4.3. Cargas ejercidas en la cabeza del grupo de 49 pilotes. Fuente: Elaboración propia en software Excel.

En la tabla anterior, se puede ver que todos los pilotes se encuentran comprimidos, y que el pilote en la posición 7 es el que presenta mayor carga, mientras que el 1 es el menor cargado. Por otro lado, el cortante es el mismo en todos los pilotes.

A parte del axil y cortante obtenidos de la distribución de las cargas, ha de considerarse también la acción del momento a lo largo del eje y, el cual viene inducido por la acción del cortante, V, en la cabeza del pilote. El momento se define mediante la siguiente expresión  $M = V \cdot l$ , donde l es la longitud del pilote que no se encuentra perfectamente empotrada en el terreno y por tanto padea en dirección del cortante. La longitud del pilote que se encuentra perfectamente empotrada se considera 3 veces el diámetro del pilote, de manera que la longitud restante es de 12 metros, siendo por tanto 865.23 kN·m. el momento resistido en la cabeza del pilote.

Una vez realizado el reparto de cargas entre los pilotes puede calcularse la armadura a disponer en los pilotes, este paso se desarrolla en el siguiente subapartado.

#### 4.1.2. Definición de la armadura

La finalidad del presente apartado es la obtención de la armadura a disponer en el pilote. Dicho lo anterior el dimensionamiento de la armadura se diferencia según los esfuerzos que han de resistir, diferenciando por un lado la armadura longitudinal y por otro la transversal.

No obstante, antes de proceder a la definición de la armadura se ha de calcular el recubrimiento nominal del hormigón, con tal de asegurar la protección de las armaduras frente la corrosión. Este se calcula mediante la expresión obtenida del **Apartado 4.4 de la UNE-EN 1992-1-1**.

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev} \quad (6)$$

Dónde el valor de la desviación ( $\Delta c_{dev}$ ) es de 10 mm. Por otra parte, el recubrimiento mínimo ( $c_{min}$ ) ha de garantizar una transición segura de las tensiones de adherencia, la protección de las barras de acero frente la corrosión y la adecuada resistencia frente al fuego. Es por ello, que el valor del recubrimiento mínimo viene definido por el mayor de los siguientes valores:

$$c_{min} = \max. \{c_{min,b}; c_{min,dur} + \Delta c_{dur,\gamma} - \Delta c_{dur,st} - \Delta c_{dur,add}; 10 \text{ mm}\} \quad (7)$$

Donde:

$c_{min,b}$ : es el recubrimiento mínimo debido a la adherencia, su valor se obtiene mediante la Tabla 4.2 de la UNE-EN 1992-1-1. Al tratarse de barras aisladas, el recubrimiento ha de tener el mismo valor que la barra, es por ello por lo que se toma un valor de 20 mm, ya que es el diámetro de barra que normalmente se utiliza en pilotes.

$c_{min,dur}$ : es el recubrimiento mínimo por condiciones ambientales, 20 mm. La definición del recubrimiento se obtiene mediante las **Tablas 4.3N y 4.4N de la UNE-EN 1992-1-1**, para ello previamente debe definirse la clase de exposición, al tratarse de una cimentación es la XC2 (**Tabla 4.1 UNE-EN 1992-1-1**), la clase de estructura para una vida útil de proyecto de 50 años es S4 y la resistencia del hormigón se limita en C25/30 al tratarse de una estructura de hormigón armado y una clase de exposición XC2 (**Tabla E.1N de la UNE-EN 1992-1-1**).

$\Delta c_{dur,\gamma}$ ;  $\Delta c_{dur,st}$ ;  $\Delta c_{dur,add}$ : es el término de seguridad adicional, la reducción del recubrimiento mínimo por uso de acero inoxidable y reducción del recubrimiento mínimo por el uso de protección adicional respectivamente, en los tres casos el valor del término es 0.

Por tanto, el valor del recubrimiento mínimo es de 20 mm, de manera que el nominal tiene un valor de 30 mm, tras tener en cuenta los 10 mm de la desviación. No obstante, se recomienda disponer un recubrimiento mínimo de 60 mm en pilotes, de manera que se opta por este recubrimiento al ser el valor más restrictivo.

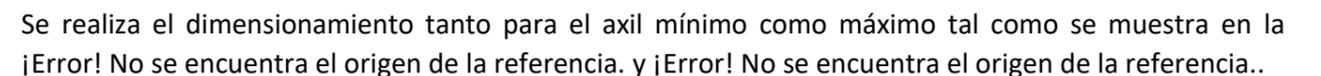
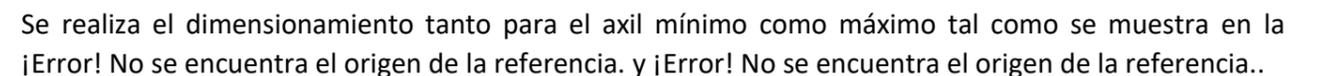
Una vez definido el recubrimiento se procede a explicar el cálculo del armado, el cual tal como se ha mencionado antes se diferencia entre longitudinal y transversal.

##### - Armadura longitudinal.

El cálculo de la armadura longitudinal viene condicionado tanto por la acción del axil como del momento. El momento actuante en la cabeza de los pilotes es el mismo en todos, ya que el cortante se reparte de forma igualitaria en los pilotes, no obstante, el axil es diferente para cada pilote. Hay que tener en cuenta que el cálculo del armado se realiza para los valores de las cargas determinantes, es decir el mínimo ( $N_1$ ) y máximo ( $N_7$ ) axil.

La obtención de las cuantías de armado se realiza mediante el software Calc Flex del departamento de Hormigón de la E.T.S.I.C.C.P. Este programa permite realizar la comprobación y dimensionado del armado de ciertas piezas de hormigón.

Para realizar este procedimiento es necesario, partir de una sección de hormigón y de unas cantidades de acero. Es por ello por lo que en el programa se introduce la sección circular del pilote, y la armadura con la que se parte, siendo estas 16 barras con un diámetro de 20 mm.

Se realiza el dimensionamiento tanto para el axil mínimo como máximo tal como se muestra en la . ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. y . ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..

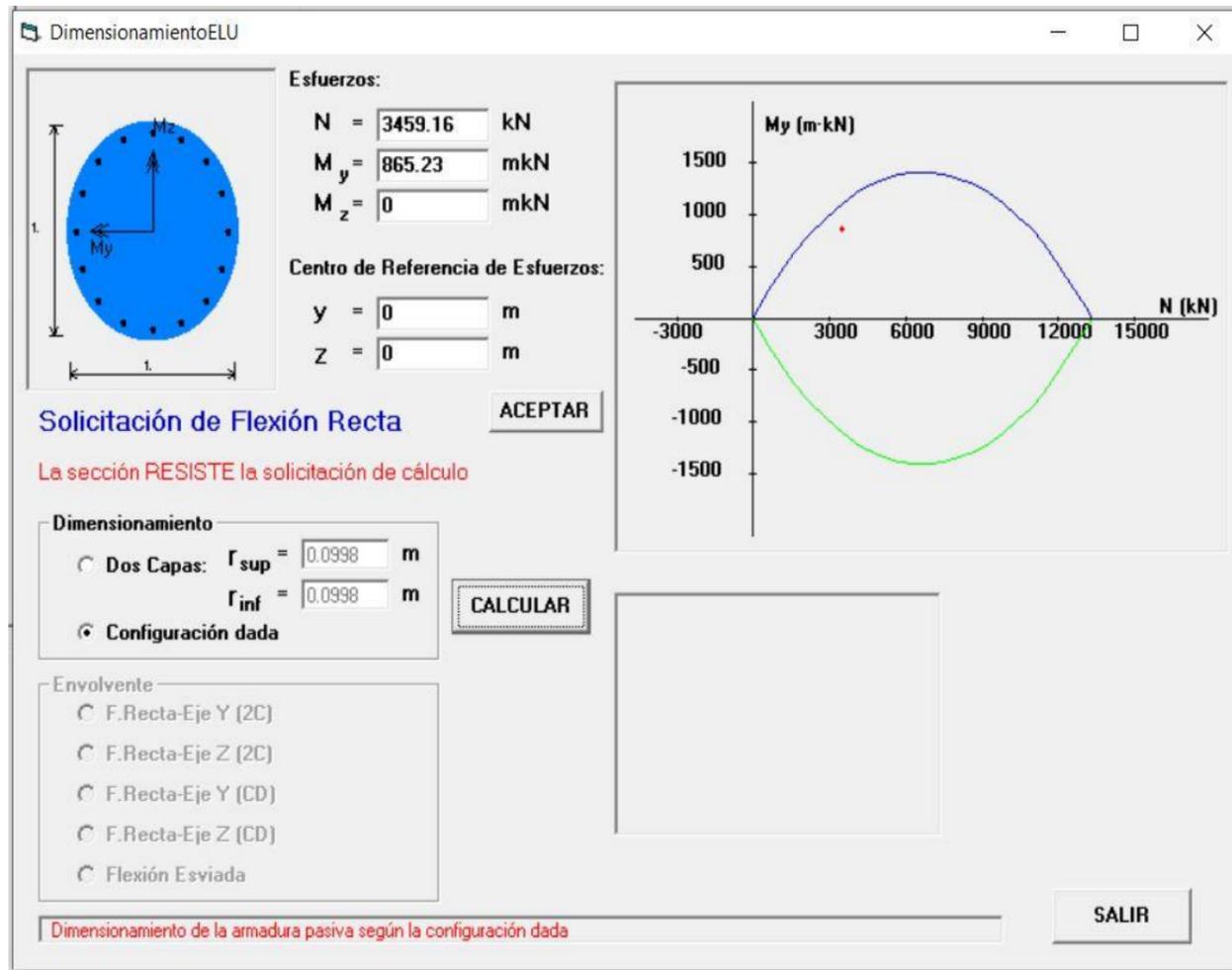


Figura 4.2. Armadura necesaria para la combinación de acciones de axil máximo y momento. Fuente: Elaboración propia en software Calc Flex

En la primera figura se ha realizado el dimensionado para el axil máximo, y se comprueba que la armadura dispuesta de base, la de referencia, resiste las sollicitaciones; de manera que no necesita más armadura. Esto se sabe ya que la sección se encuentra dentro de la zona A de dimensionamiento, tal como se ve en la figura y además porque el mismo programa indica que la sección resiste.

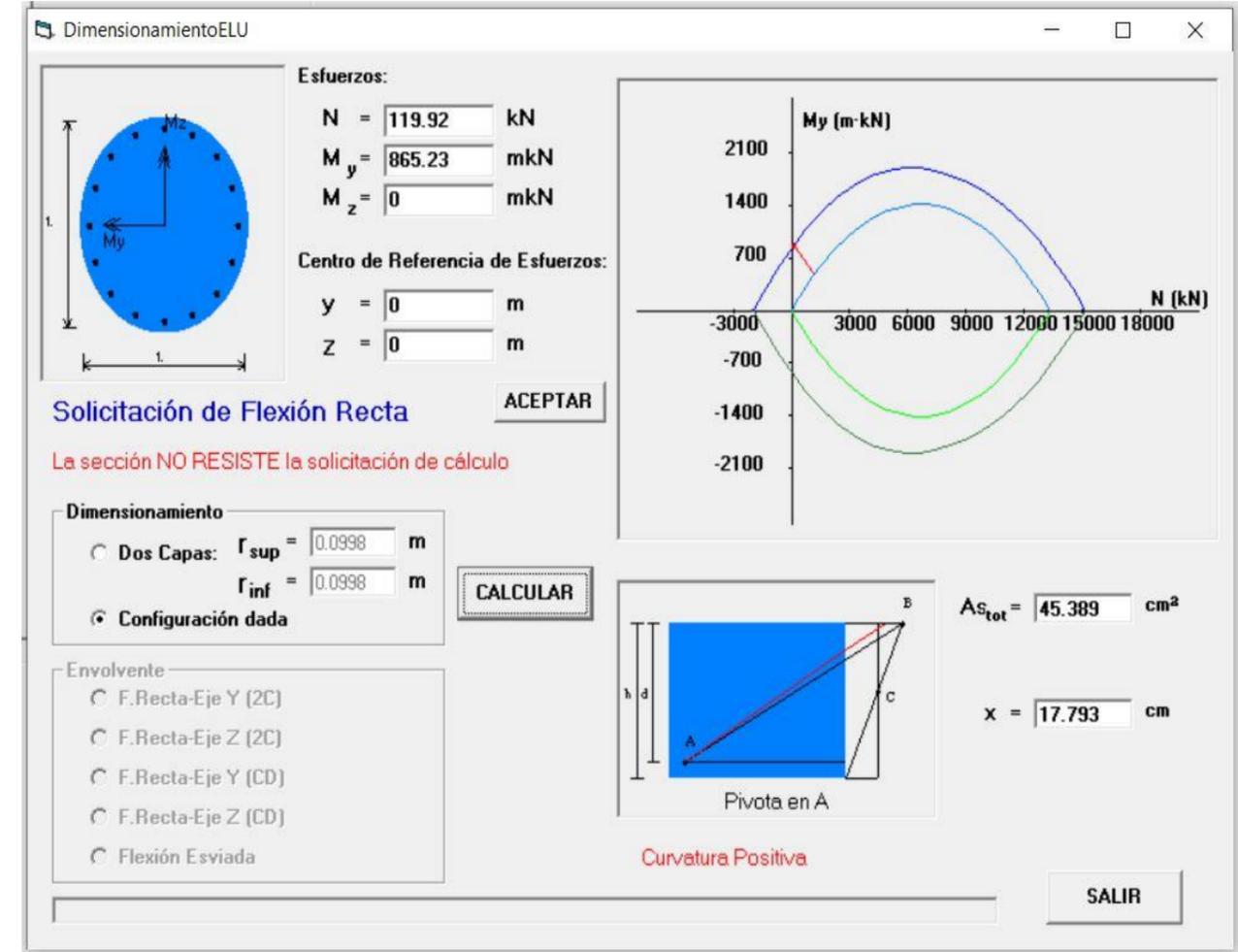


Figura 4.3. Armadura necesaria para la combinación de acciones axil mínimo y momento. Fuente: Elaboración propia en software Calc Flex.

En este caso, para el axil mínimo, se comprueba que la armadura necesaria por cálculo es de 45.39 cm<sup>2</sup>.

No obstante, el armado a disponer se encuentra condicionado no solo por aspectos de cálculo sino también por limitaciones de cuantía y por los detalles constructivos.

En cuanto a limitaciones referidas al armado en primer lugar, se procede con la mínima; se realiza el cálculo para la cuantía mínima de armadura longitudinal, para evitar roturas frágiles (**Apartado 9.5.2 de la UNE-EN 1992-1-1**), la cuantía de armadura mínima para control de fisuración (**Apartado 7.3.2 de la UNE-EN 1992-1-1**), la cuantía mínima de armadura longitudinal en pilotes (**Apartado 9.8.5 UNE-EN 1992-1-1**) y la cuantía mínima en tanto por 1000, referidas a la sección total del hormigón (**Tabla 42.3.5 de la EHE-08**). Siendo los valores obtenidos 7.96 cm<sup>2</sup> para el axil máximo y 0.28 cm<sup>2</sup> para el mínimo, 25 cm<sup>2</sup> y 12.34 cm<sup>2</sup> respectivamente. En cambio, para la cuantía máxima se realiza una única comprobación que queda definida en el **Apartado 9.5.2 de la UNE-EN 1992-1-1**, con 314.16 cm<sup>2</sup>.

En cuanto a los detalles constructivos, se recomienda que el diámetro de la armadura dispuesta sea de 32 mm como máximo y 12 mm de mínimo. Por otro lado, la separación de las barras debe ser como máximo el ancho nominal de la estructura o 200 mm y como mínimo 35 mm, con tal de asegurar el correcto vertido del hormigón y su distribución de este en la estructura.

Expuesto lo anterior, la armadura a disponer debe ser la más restrictiva, de manera que debe ser superior a 25 cm<sup>2</sup> e inferior a 314.16 cm<sup>2</sup>, de manera la armadura necesaria por cálculo que cumple el rango establecido. Finalmente, la armadura a disponer cumpliendo las disposiciones constructivas es de **15Ø20**.

- **Armadura transversal.**

En este caso, la obtención del armado transversal viene definido por el cortante, al ser este el que resiste los esfuerzos, a la vez que zuncha el armado longitudinal.

La cuantía de armado necesario a cortante según la envolvente de las combinaciones de ELU, sigue el procedimiento expuesto en el **Apartado 6.2 de la UNE-EN 1992-1-1**.

El primer paso que realizar es comprobar si en la región es necesario disponer de armadura de cortante por cálculo, por lo que se obtiene  $V_{Rd,c\,mín}$ .

$$V_{Rd,c\,mín} = \left[ \frac{0.075}{1.5} \cdot k^{3/2} \cdot f_{ck}^{1/2} + k_1 \cdot \sigma_{cp} \right] \cdot b_w \cdot d \quad (8)$$

Si se cumple la expresión  $V_{Ed} \leq V_{Rd,c\,mín}$ , el elemento es capaz de resistir el cortante por sí solo, se concluye que la sección no requiere de armadura que resista el esfuerzo.

De manera que enumerando los elementos de la **Ecuación (8)**:

$k$ : viene determinado por la expresión  $k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2.00$

$f_{ck}$ : viene determinado por el hormigón HA-30/B/20/IIa, por tanto, es de 30 MPa.

$b_w$ : es la menor anchura de sección transversal en la zona de tracción. Al ser la sección circular, se realiza una aproximación, en la que se inscribe un cuadrado dentro de la circunferencia, quedando el ancho efectivo definido por  $b_w = 2 \cdot R \cdot \sin \alpha$ , siendo el radio 0.5 m y  $\alpha = 39^\circ$ . El valor que adopta el ancho es de 0.63 metros.

$\sigma_{cp}$ : es la tensión normal debida al axil, teniendo en cuenta el pretensado. En este caso al no haber armadura activa, solo se considera el axil. La tensión normal se debe calcular tanto para el axil máximo como mínimo.

$k_1$ : queda definido por el **Anexo Nacional de la UNE-EN 1992-1-1**, como 0.15.

$d$ : es la distancia desde la fibra opuesta a la armadura de tracción, siendo de 0.93 m.

De manera que sustituyendo los valores en la **Ecuación (8)**, se obtiene el  $V_{Rd,c\,mín}$ . Este ha sido calculado para el axil mínimo y el máximo siendo 297.25 kN y 635.01 kN respectivamente, de manera que el  $V_{Ed}$  al ser 72.10 kN no es necesaria la armadura en la sección.

No obstante, por norma ha de disponerse como mínimo, en este caso 12.29 cm<sup>2</sup>/m. La mínima cuantía se define en el **Apartado 9.2.2 de la UNE-EN 1992-1-1**.

Atendiendo a los detalles constructivos, los diámetros que normalmente se utilizan son de 12 a 6 mm y la separación ha de ser de como máximo de 300 mm.

Es por ello por lo que la armadura a disponer es de Ø12/15, respetando así las recomendaciones antes expuestas.

## 4.2. Armado del encepado

### 4.2.1. Cálculos previos

Para definir el armado del encepado es necesario conocer las cargas. Dicho lo anterior, con tal de definir el comportamiento de la estructura se plantea el método de bielas y tirantes, al ser un procedimiento idóneo para estudiar regiones de discontinuidad, en el que la distribución de deformaciones no es lineal, como es el caso. Además, el encepado se define como región D, al presentar fuerzas concentradas.

El proceso de análisis se basa en la idealización de la estructura en un sistema de barras, que intenta reproducir el comportamiento de la estructura. Las barras dependiendo si trabajan a tracción o compresión se denominan tirantes o bielas respectivamente, y se unen en las zonas denominadas nudos.

El método de bielas y tirantes se caracteriza por ser un sistema biarticulado fundamentado en la teoría de la plasticidad, el cual se basa en el diagrama tensión-deformación de tipo rígido-plástico, es decir, no se deforma hasta que llega a la tensión de fluencia a partir de la cual se deforma, pero sin incremento de tensión.

El presente método es aplicable gracias a que el encepado es de tipo rígido. Dicho lo anterior, se procede a justificar la afirmación, siendo  $2 \cdot h = 6$  metros. Se comprueba que  $V_{m\acute{a}x}$  sea menor a 6 metros, para ello se ha tomado como  $V_{m\acute{a}x}$  la distancia entre el borde de la torre del aerogenerador hasta los pilotes número 3 y 5 y la distancia entre los bordes de los pilotes.

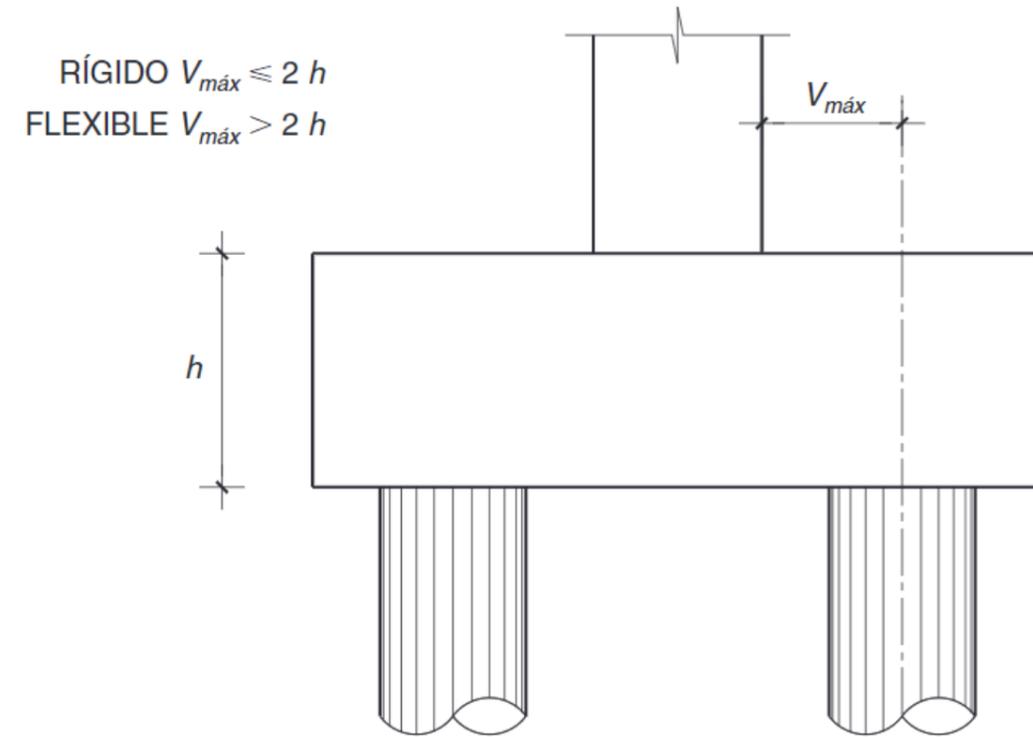


Figura 4.4. Clasificación del encepado. Fuente: Figura 58.2.1.a. de la EHE-08.

Tal como se ha expuesto anteriormente el método empleado para determinar los esfuerzos a lo largo del encepado es el de bielas y tirantes, **Art. 58.4.1.2. de la EHE-08**. Al emplear dicho procedimiento se ha realizado una simplificación, esto se debe en primer lugar por la simetría que presenta el encepado y por encontrarse fuera del alcance para un alumno de grado.

La simplificación realizada se basa en considerar el encepado como un modelo 2D. Para ello se realiza el sumatorio de las reacciones en la cabeza de los pilotes de cada columna, las cuales se engloba en la siguiente expresión  $N'_i = N_i \cdot n_c$ , donde  $n_c$  hace referencia al número de filas que presenta cada columna, en este caso 7, y  $N_i$  es la reacción característica en la cabeza de cada pilote.

$V_{m\acute{a}x \text{ p-p}}$	2.5 m
$V_{m\acute{a}x 3} = V_{m\acute{a}x 5}$	1.48 m

Tabla 4.4. Valores del vuelo máximo  $V_{m\acute{a}x}$  aplicado al caso de estudio. Fuente: Elaboración propia.

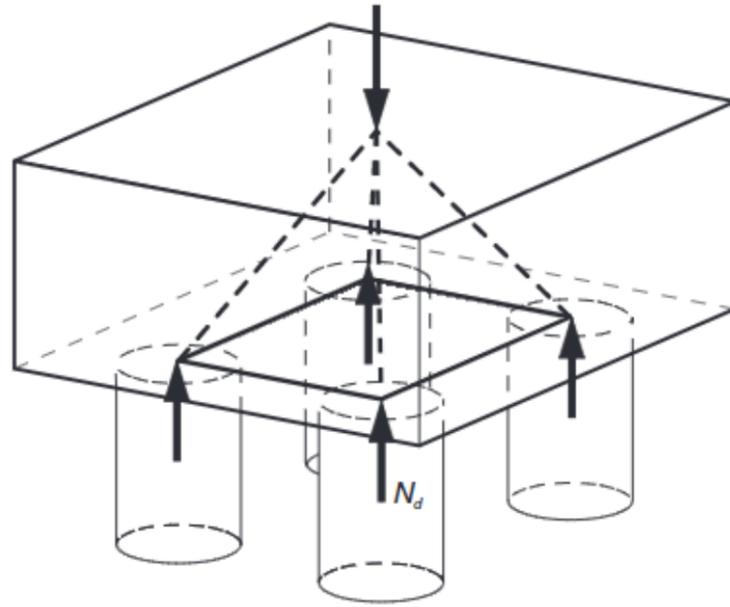


Figura 4.5. Método bielas y tirantes en 3D. Fuente: EHE-08.

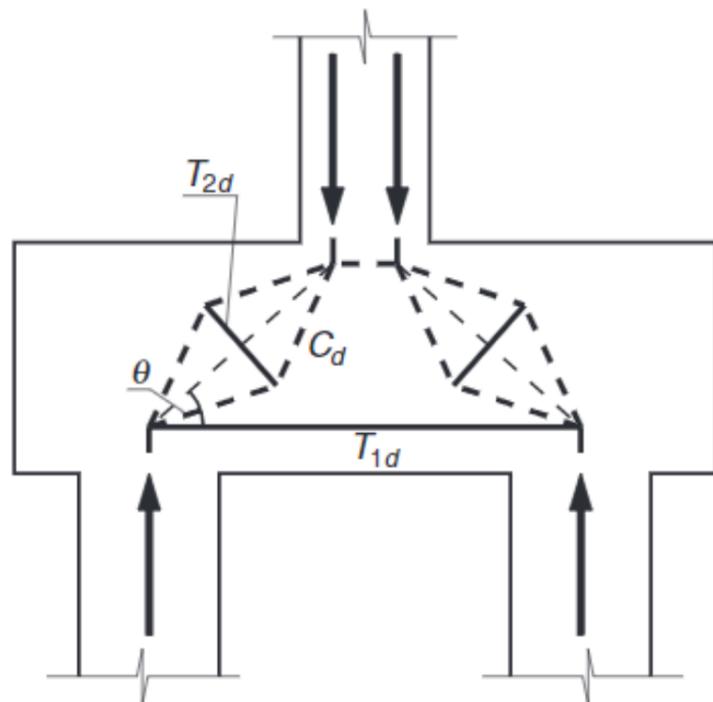


Figura 4.6. Método bielas y tirantes en 2D. Fuente: EHE-08.

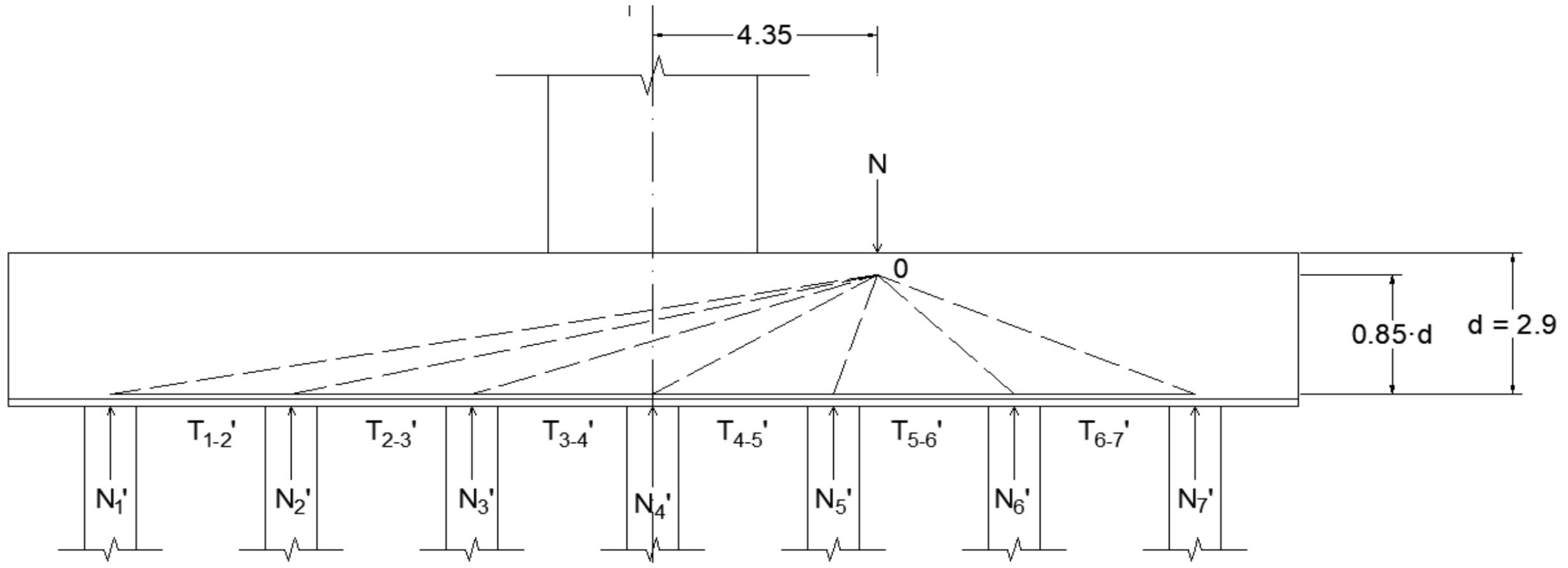


Figura 4.7. Representación de los esfuerzos al calcularlos por el método de bielas y tirantes. Fuente: Elaboración propia en software Excel.

Las reacciones resultantes, tras pasar de un modelo 3D a 2D, son las recogidas en la **Tabla 4.5**.

$N_1' = 839.42 \text{ kN}$	$V_1' = 504.72 \text{ kN}$
$N_2' = 4\,735.20 \text{ kN}$	$V_2' = 504.72 \text{ kN}$
$N_3' = 8\,630.99 \text{ kN}$	$V_3' = 504.72 \text{ kN}$
$N_4' = 12\,526.77 \text{ kN}$	$V_4' = 504.72 \text{ kN}$
$N_5' = 16\,422.55 \text{ kN}$	$V_5' = 504.72 \text{ kN}$
$N_6' = 20\,318.34 \text{ kN}$	$V_6' = 504.72 \text{ kN}$
$N_7' = 24\,214.12 \text{ kN}$	$V_7' = 504.72 \text{ kN}$

Tabla 4.5. Reacciones resultantes tras el sumatorio de las reacciones de cada pilote por columna. Fuente: Elaboración propia.

Por tanto, establecidas las reacciones en las cabezas de los pilotes, se procede a determinar los esfuerzos producidos en las bielas y tirantes del modelo empleando el método de los nudos.

Bielas	Tirantes
T1-2' = 5 124.75 kN	T0-1' = 5 056.32 kN
T2-3' = 26 622.55 kN	T0-2' = 22 013.13 kN
T3-4' = 53 723.86 kN	T0-3' = 28 442.48 kN
T4-5' = 75 520.44 kN	T0-4' = 25 139.83 kN
T5-6 = 81 104.17 kN	T0-5' = 17 346.02 kN
T6-7' = 59 566.73 kN	T0-6' = 29 609.06 kN
-	T0-7' = 64 300.23 kN

Tabla 4.6. Valores de los esfuerzos del encepado tras aplicar el método de bielas y tirantes. Fuente: Elaboración propia.

#### 4.2.2. Definición de la armadura

En el siguiente apartado se aborda el procedimiento seguido para obtener las cuantías de armado necesarias por cálculo para el encepado, tras haber obtenido las reacciones en las cabezas de los pilotes en el apartado anterior.

El cálculo del armado del encepado sobre varios pilotes sigue el procedimiento determinado en el **Art. 58.4.1.2.2. de la EHE-08**. De manera que este se distribuye en dos apartados atendiendo a la armadura, es decir longitudinal y transversal.

Debido a la simetría del encepado, la armadura dispuesta será la misma en las dos direcciones.

##### - Armadura longitudinal.

La armadura longitudinal del encepado se clasifica en armadura principal inferior, secundaria inferior y la superior. La principal se sitúa en las bandas sobre los pilotes, mientras que la secundaria entre las bandas, tal como se puede ver en la **Figura 4.8**.

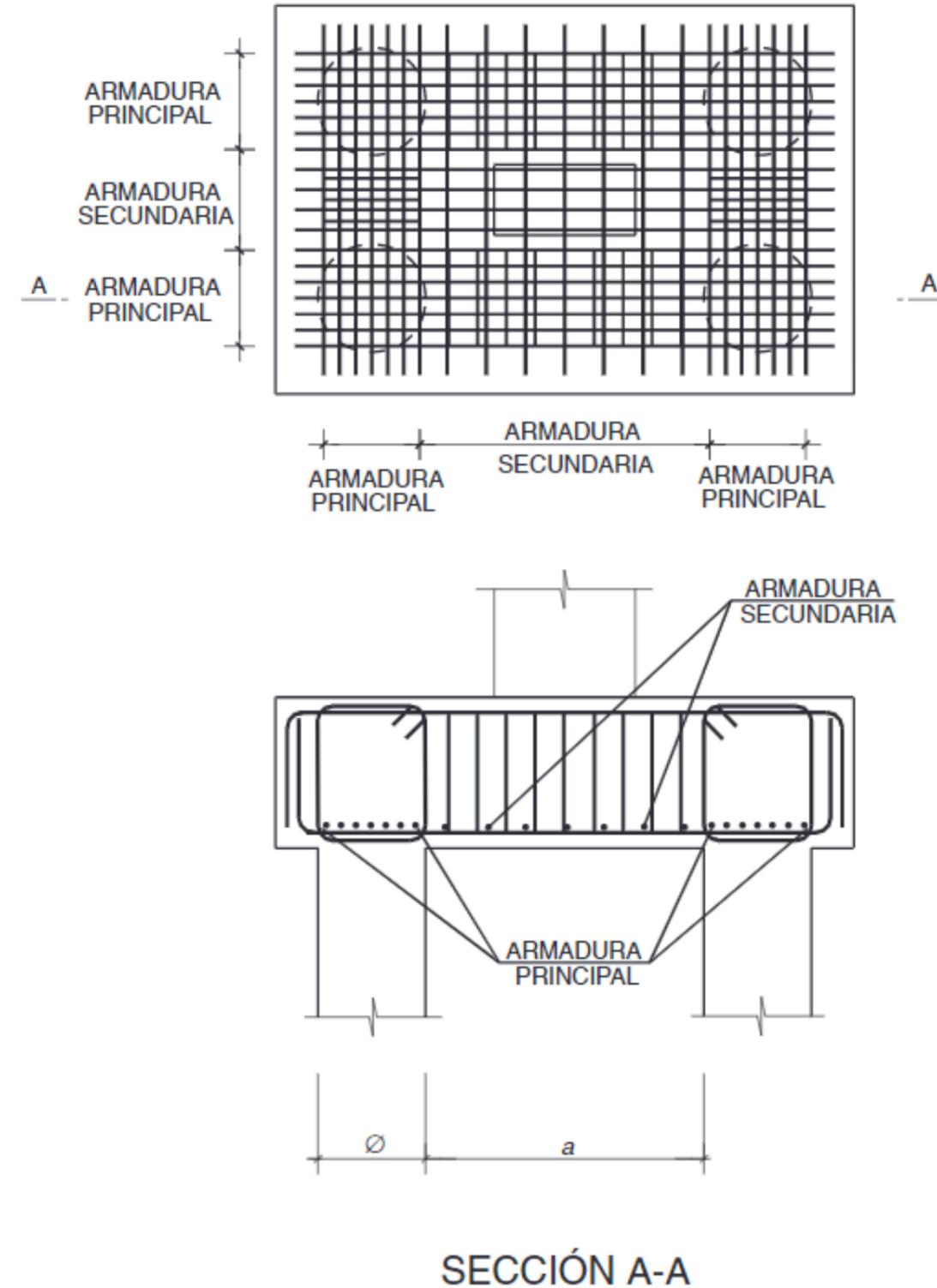


Figura 4.8. Armadura principal y secundaria. Fuente: Figura 58.4.1.2.2.a. de la EHE-08

○ **Armadura principal inferior.**

Tras definir la armadura principal se procede a determinar la cuantía necesaria, por ello una vez obtenidas las reacciones del modelo, el siguiente paso es determinar el comportamiento de la estructura mediante el método de bielas y tirantes, en el que se semeja la transmisión de las cargas de la torre del aerogenerador a los pilotes, mediante unas "bielas" de hormigón. Con tal de definir los esfuerzos producidos en la estructura, se aplica el método del equilibrio en los nudos. De manera que se determina el valor de los esfuerzos en cada biela y tirante. En la **Figura 4.7** se muestra una representación del modelo de bielas y tirantes del caso de estudio.

El último paso es obtener el armado necesario por cálculo, este viene determinado por el tirante más traccionado, en este caso se trata del tirante 5-6, el cual consta con un esfuerzo de  $T'_{5-6} = 81\ 104.17\ \text{kN}$ .

Con tal de determinar la cuantía de armado se emplea la **Ecuación (9)**.

$$T_{Ed} = A_s \cdot f_{yd} \quad (9)$$

No obstante, antes de aplicar la expresión anterior, debe de tener en cuenta que el esfuerzo  $T'_{5-6}$  se ha obtenido tras realizar el sumatorio de los esfuerzos de los 7 pilotes de cada columna. Es por ello por lo que dicho esfuerzo ha de repartirse entre 7 bielas, siendo el valor para cada biela de  $11\ 586.31\ \text{kN}$  y por tanto la cuantía de armadura queda definida en  $26\ 648.67\ \text{mm}^2$ , es decir  $34\phi 32$ .

Tal como se ha expuesto anteriormente, la armadura principal se dispone en bandas, estas se definen como zonas cuyos ejes es la línea que une los centros de los pilotes, y su ancho viene determinado por el diámetro del pilote más dos veces la distancia entre la cara superior del pilote y el centro de gravedad de la armadura del tirante, **Figura 4.9**.

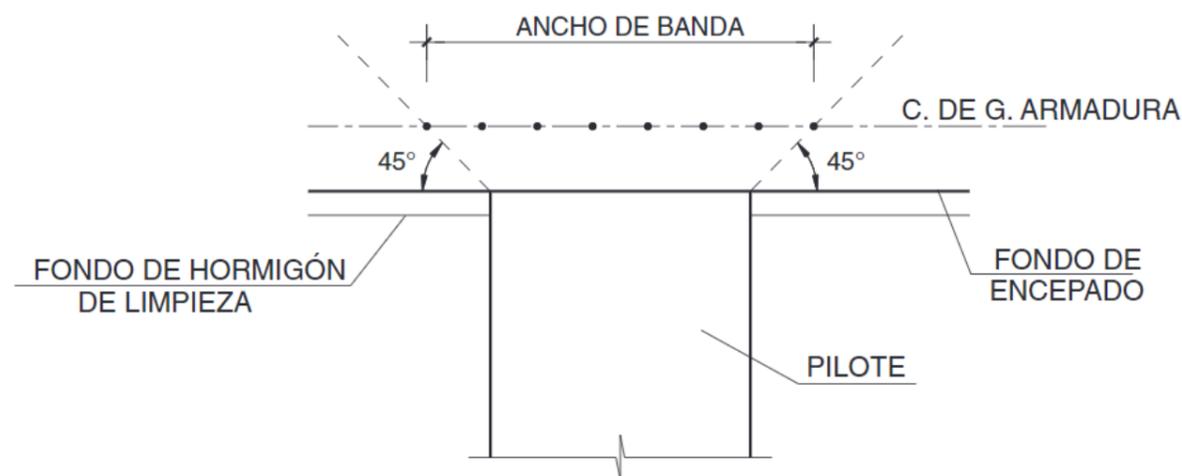


Figura 4.9. Definición de la banda. Fuente: Figura 58.4.1.2.2.b. de la EHE-08.

A causa del gran número de barras que han de disponerse en un ancho no mayor a 1.5 metros, se ha considerado distribuir las barras mediante pares, de manera que el centro de gravedad de las barras queda determinado en 10 cm, teniendo en cuenta la armadura longitudinal y la transversal, cumpliéndose el recubrimiento necesario para las armaduras. Dicho esto, la banda queda definida en 1.2 metros, distribuyéndose las barras cada 70 mm, dejando de esta manera el paso de vibradores entre las barras.

Aunque el encepado sea simétrico, la distribución del armado no lo es, ya que en la dirección y, no se encuentra aplicado ningún momento, siendo la armadura necesario mucho inferior a la dispuesta en el eje x, por ello se opta por disponer  $\frac{1}{4}$  de la armadura dispuesta en la dirección más comprometida.

Otro aspecto a tener en cuenta es que la armadura necesaria para resistir la tracción debe disponerse sin reducción, en toda la longitud del encepado, levantando las barras en su extremo, para asegurar el anclaje de las mismas (Rodríguez Ortíz, 1982).

○ **Armadura secundaria inferior.**

Es la que se dispone en retícula entre las bandas, y su capacidad mecánica en cada sentido no será inferior a  $\frac{1}{4}$  de la capacidad mecánica de las bandas o fajas.

Por tanto, si la capacidad mecánica de la banda es de  $11\ 586.31\ \text{kN}$ , la armadura secundaria debe resistir  $2\ 896.57\ \text{kN}$ . Tras aplicar la **Ecuación (9)**, se obtiene que la cuantía es de  $6\ 661.86\ \text{mm}^2$ , es decir  $14\ \phi 25$ .

○ **Armadura superior**

La armadura superior queda definida por un emparrillado ortogonal para soportar la retracción y la temperatura.

La cuantía de la armadura ha de tener una capacidad mecánica en cada sentido como mínimo del 10% de la resistencia de la banda (Calavera Ruiz, 2000). Por tanto, la armadura superior ha de resistir  $1\ 158.63\ \text{kN}$ , aplicando la **Ecuación (9)** se obtiene la cuantía a disponer es de  $2\ 664.74\ \text{mm}^2$ , es decir  $9\ \phi 20$ .

- **Armadura vertical.**

La armadura secundaria vertical se dispone para resistir las tracciones debidas a la dispersión del campo de compresiones, se sitúa a modo de cercos, atando la armadura principal de las bandas.

Esta debe tener una capacidad mecánica total no inferior al valor de  $T = \frac{N_d}{1.5 \cdot n}$ , siendo  $N_d$  el axil de cálculo del soporte y  $n$ , el número de pilotes, que ha de ser mayor o igual a 3, tal como se define en el **Art. 58.4.1.2.2 de la EHE-08**. Cabe destacar que  $\frac{N_d}{n}$  corresponde con el mayor esfuerzo axil en la cabeza de los pilotes, el cual es el  $N_7$  con 3 459.16 kN, aplicando la anterior expresión, se obtiene que la capacidad de los cercos ha de quedar limitada a valores superiores o iguales a 2 306.11 kN.

Tras definir la armadura necesaria por cálculo se procede a comprobar las dimensiones y armaduras mínimas del encepado de cimentación.

En primer lugar, se procede con la geometría de la cimentación, según se define en el **Art. 58.8 de la EHE-08**, el canto mínimo en el borde de los elementos de cimentación de hormigón armado no debe ser inferior a 40 cm si se trata de encepados de pilotes, además la distancia entre cualquier punto del perímetro del pilote y el contorno exterior de la base del encepado no debe ser inferior a 25 cm. En el caso de estudio ambas condiciones se cumplen, el canto del encepado es de 3 metros y la distancia entre el perímetro del pilote y el borde del encepado es de 1.5 metros.

A continuación, se prosigue con las armaduras mínimas a disponer:

- **Armadura longitudinal:** debe satisfacer los establecido en el **Art. 42 de la EHE-08**, concretamente la **Tabla 42.3.5**, la cual define que, para un encepado, la cuantía geométrica mínima ha de ser 1.8 por 1000, referido a la sección total de hormigón con aceros con  $f_y=500\text{N/mm}^2$ . Debido a que en el encepado se dispone armado tanto en la cara inferior como superior, en cada dirección se adoptará la mitad de estos valores. La cuantía que disponer a lo largo de toda la sección queda definida en  $67\,500\text{ mm}^2$ . Por tanto, por cada metro de encepado se debe disponer  $2\,700\text{ mm}^2$ , si la distancia entre bandas corresponde a 2.3 metros, la cuantía de armado mínima entre bandas es de  $6\,210\text{ mm}^2$  y si es en la banda. La cual mide 1.2 metros, es de  $3\,240\text{ mm}^2$ .
- **Armadura vertical:** si el encepado se comporta como una viga ancha la armadura mínima queda definida según la **Ecuación (10)** en el **Art. 44.2.3.4.1 de la EHE-08**.

$$\sum \frac{A_\alpha \cdot f_{y\alpha,d}}{\text{sen } \alpha} \geq \frac{f_{ct,m}}{7.5} \cdot b_0 \quad (10)$$

Siendo  $b_0$  la mitad del ancho de la banda, 1.2 metros,  $f_{y\alpha,d} = 434.8\text{ N/mm}^2$  y  $f_{ct,m} = 2.9\text{ N/mm}^2$ . De manera que la cuantía mínima para la armadura vertical queda definida en  $10.67\text{ cm}^2/\text{m}$ , es decir  $\emptyset 12/15$ .

Para finalizar el presente apartado, se comprueba que la armadura de cálculo sea superior o igual a la mínima, anteriormente calculada. En primer lugar, se procede con las armaduras longitudinales para continuar con la vertical.

La armadura longitudinal principal y secundaria cumple con las prescripciones, ya que superan la cuantía mínima. No obstante, la armadura superior no, ya que dentro de las bandas se establece que la armadura ha de ser como mínimo  $3\,240\text{ mm}^2$ , mientras la de cálculo es de  $2\,664.74\text{ mm}^2$ , por tanto, se dispondrá la mínima que corresponde con  $11\emptyset 20$ .

Siguiendo con la armadura vertical, tras definir la armadura mínima se comprueba que esta cumple la condición establecida por el método de bielas y tirantes. Por ello se calcula el valor del esfuerzo que es capaz de resistir los cercos, estos resistirán  $T$  a lo largo de la mitad de la distancia que equidistan los pilotes, 1.75 metros. Tras definir la distancia que resiste  $T$ , se disponen 12 barras de  $\emptyset 12$  a lo largo de ella, de manera que la tensión que resiste es  $1\,180.19\text{ kN}$ . Como la armadura vertical es menor a  $T=2\,306.11\text{ kN}$ , se dispondrán los cercos por pares. Estos se dispondrán solo hasta la mitad del encepado, ya que tal como se ha expuesto en la **Tabla 4.3** los esfuerzos disminuyen hacia el pilote 1 y no sería necesaria tanta armadura.

## 5. Conclusiones

Para finalizar con el presente anejo, se da como conseguido el objetivo definido, que es la determinación de la armadura a disponer en la cimentación.

No obstante, antes de listar la armadura correspondiente para cada parte de la cimentación, se considera necesario recordar las dimensiones de la cimentación tras su modificación por aspectos técnicos. La cimentación profunda finalmente queda definida con un encepado de forma cuadrada desde una vista en planta, de lado 25 metros y un canto de 3 metros. Por otra parte, el grupo de pilotes lo componen 49 pilotes distribuidos en 7 filas y 7 columnas, estos constan con una longitud de 15 metros y con un diámetro de 1 metro. Además, el encepado se sitúa 1 metro por debajo de la superficie del terreno.

Tras definir la geometría de la cimentación, se procede con la enumeración del armado a disponer, atendiendo al elemento estructural.

<b>Pilotes</b>	Armadura longitudinal	15Ø20
	Armadura transversal	Ø12/15
<b>Encepado</b>	Armadura longitudinal principal inferior	34Ø32
	Armadura longitudinal secundaria inferior	14Ø25
	Armadura superior	Ø20/10
	Armadura transversal	Ø12/15

Tabla 5.1. Armado según la tipología de la armadura y el elemento. Fuente: Elaboración propia.

Tal como se mencionó anteriormente, la armadura del encepado no será la misma en ambas direcciones, en el eje x se dispondrá tanto la armadura principal como secundaria inferior, no obstante, en la dirección y, solo se dispondrá armadura secundaria a lo largo de todo el encepado, tanto en las bandas como entre las bandas, de manera que se dispondrá 9Ø25 en las bandas y entre estas Ø25/15 (14 Ø25) que es la misma armadura. En el caso de la superior, se dispone la misma en ambas direcciones.

La disposición de la armadura se puede consultar en los planos adjuntados, **PLANO N.º 3: ARMADO DE LA CIMENTACIÓN**. Y los cálculos previos para el cálculo del armado se encuentra dispuesto en los **APÉNDICE F**.

El siguiente paso, una vez determinada la tipología de la cimentación, las dimensiones que presenta y la armadura, es realizar la valoración económica de la solución, esto se aborda en el siguiente anejo el **ANEJO N.º 6: VALORACIÓN ECONÓMICA**.

## 6. Referencias

- Calavera Ruiz, J. (1993). *Manual de detalles constructivos en obras de hormigón armado : edificación, obras públicas* [Book]. INTEMAC.
- Calavera Ruiz, J. (2000). *Cálculo de estructuras de cimentación* (4ª ed.) [Book]. INTEMAC.
- Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08 serie normativas 2011 GOBIERNO DE ESPAÑA MINISTERIO DE FOMENTO SECRETARÍA GENERAL TÉCNICA*. (n.d.).
- MartíVargas, J. R., BonetSenach, J. L., MiguelSosa, P. Francisco., FernándezPrada, M. A., PallarésRubio, L., NavarroGregori, J., & CastroBugallo, M. C. (2009). *Proyecto de estructuras de hormigón mediante el método de las bielas y tirantes* (J. R. Martí Vargas, J. L. Bonet Senach, P. Francisco. Miguel Sosa, M. A. Fernández Prada, L. Pallarés Rubio, J. Navarro Gregori, & M. C. Castro Bugallo, Eds.; 2a ed. amp. y adap.) [Book]. Ediciones VJ.
- Rodríguez Ortiz, J. M. (1982). *Curso aplicado de cimentaciones* (C. Oteo Mazo & J. Serra Gesta, Eds.; 1ª,5ª-7ª ed.) [Book]. Colegio Oficial de Arquitectos.
- UNE EN 1536. (2016). [www.aenor.es](http://www.aenor.es)
- UNE-EN 1992-1-1:2013/A1:2015 Eurocódigo 2: Proyecto de estruct... (n.d.). Retrieved September 4, 2021, from <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0055436>



# ANEJO N.º 6: VALORACIÓN ECONÓMICA

AUTOR: Ana Gabriela Caballero Vallejos

TUTOR: María Elvira Garrido de la Torre

COTUTOR: Juan Navarro Gregori

Grado en Ingeniería Civil

Escuela Técnica Superior de Ingeniería De Caminos, Canales y Puertos

Universitat Politècnica de València



## CONTENIDO

1. Objeto y antecedentes.....	4
2. Valoración económica.....	5
3. Resumen valoración.....	7



## 1. Objeto y antecedentes

El fin del presente documento es el estudio y diseño de la cimentación de un aerogenerador, concretamente el modelo SG 2.1-114 de Siemens Gamesa Renewable Energy, en el término municipal de Arcos de las Salinas (Teruel).

Una vez expuesta lo anterior, el fin del presente Anejo es estimar el coste que supone la ejecución de la cimentación, siguiendo la solución propuesta en la Alternativa 3: Cimentación indirecta. Para ello se ha realizado una relación valorada, donde los precios de las unidades se han obtenido a partir del Generador de Precios de España de CYPE Ingenieros S.A.

Con tal de facilitar el seguimiento de la valoración, se ha agrupado los procedimientos en capítulos.

## 2. Valoración económica

En las siguientes tablas, se recoge las mediciones de cada proceso constructivo, al igual que el precio unitario, pudiendo de esta forma obtener el de cada unidad de obra.

CAPÍTULO 1: ACTUACIONES PREVIAS						
Nº	UD	Unidad de obra	Descripción	Medición	Coste Unitario (€)	Coste directo (€)
1.01	m2	Desbroce y limpieza del terreno con arbustos, con medios mecánicos.	Desbroce y limpieza del terreno con arbustos, con medios mecánicos. Comprende los trabajos necesarios para retirar de las zonas previstas para la edificación o urbanización: arbustos, pequeñas plantas, tocones, maleza, broza, maderas caídas, escombros, basuras o cualquier otro material existente, hasta una profundidad no menor que el espesor de la capa de tierra vegetal, considerando como mínima 25 cm; y carga a camión. El precio no incluye la tala de árboles ni el transporte de los materiales retirados.	900.00	1.25	1125.00
1.02	u	Talado de árbol	Talado de árbol de hasta 5 m de altura, de 15 a 30 cm de diámetro de tronco y copa frondosa, con motosierra, con extracción del tocón, carga manual a camión y transporte de los residuos vegetales a vertedero específico, situado una distancia máxima de 10 km. El precio incluye el tiempo de espera en obra durante las operaciones de carga, el viaje de ida, la descarga y el viaje de vuelta.	30.00	30.92	927.60
1.03	m3	Transporte de residuos vegetales con camión.	Transporte con camión de residuos vegetales producidos durante los trabajos de limpieza de solares, poda y tala de árboles, a vertedero específico, situado a 10 km de distancia. El precio incluye el tiempo de espera en obra durante las operaciones de carga, el viaje de ida, la descarga y el viaje de vuelta, pero no incluye la carga en obra.	285.00	3.45	983.25
1.04	m3	Canon de vertido por entrega de residuos vegetales a gestor autorizado.	Canon de vertido por entrega de residuos vegetales producidos durante los trabajos de limpieza de solares, poda y tala de árboles, en vertedero específico. El precio no incluye el transporte.	285.00	6.83	1946.55

CAPÍTULO 2: MOVIMIENTO DE TIERRAS						
Nº	UD	Unidad de obra	Descripción	Medición	Coste Unitario (€)	Coste directo (€)
2.01	m3	Excavación de tierras a cielo abierto bajo rasante, empleando voladuras	Excavación a cielo abierto bajo rasante, en roca, de hasta 4 m de profundidad máxima, con voladuras de esponjamiento y ayuda de medios mecánicos y carga a camión. El precio no incluye el transporte de los materiales excavados.	2500	1.30	3250.00
2.02	u	Transporte de equipos y proyecto de voladura	Transporte hasta el emplazamiento de los equipos necesarios para realizar las voladuras y la redacción y estudio del proyecto de voladuras	1	3800.00	3800.00
2.03	m3	Transporte de tierras con camión	Transporte de tierras con camión de los productos procedentes de la excavación de cualquier tipo de terreno a vertedero específico, instalación de tratamiento de residuos de construcción y demolición externa a la obra o centro de valorización o eliminación de residuos, situado a una distancia máxima de 20 km. El precio incluye el tiempo de espera en obra durante las operaciones de carga, el viaje de ida, la descarga y el viaje de vuelta, pero no incluye la carga en obra.	2500	4.83	12075.00
2.04	m2	Canon de vertido por entrega de tierras a gestor autorizado	Canon de vertido por entrega de tierras procedentes de la excavación, en vertedero específico, instalación de tratamiento de residuos de construcción y demolición externa a la obra o centro de valorización o eliminación de residuos. El precio no incluye el transporte.	2500	2.28	5700.00

CAPÍTULO 3: CIMENTACIÓN						
Nº	UD	Unidad de obra	Descripción	Medición	Coste Unitario (€)	Coste directo (€)
3.01	m2	Capa de hormigón de limpieza	Capa de hormigón de limpieza y nivelado de fondos de cimentación, de 15 cm de espesor, de hormigón HL-150/B/20, fabricado en central y vertido con bomba, en el fondo de la excavación previamente realizada.	625.00	9.95	6218.75
3.02	m2	Sistema de encofrado para encepado de grupo de pilotes	Montaje de sistema de encofrado recuperable metálico, para encepado de grupo de pilotes, formado por paneles metálicos, amortizables en 108 usos, y posterior desmontaje del sistema de encofrado. Incluso elementos de sustentación, fijación y acodamientos necesarios para su estabilidad y líquido desencofrante, para evitar la adherencia del hormigón al encofrado.	300.00	15.38	4614.00
3.03	m3	Hormigón para armar en encepados	Hormigón para armar en encepados, HA-30/B/20/IIa, fabricado en central, y vertido con bomba.	1875.00	95.43	178931.25
3.04	kg	Armadura encepado	Acero UNE-EN 10080 B 500 SD para elaboración de la ferralla (corte, doblado y conformado de elementos) en taller industrial y montaje en encepado. Incluso alambre de atar y separadores.	105809.40	1.70	179875.98
3.05	m	Perforación de pilotes	Pilote de cimentación de hormigón armado de 100 cm de diámetro, para grupo de pilotes CPI-7 según NTE-CPI. Ejecutado por barrenado de tierras mediante sistema mecánico, sin entibación y posterior hormigonado continuo en seco del pilote. Realizado con hormigón HA-30/F/12/IIa fabricado en central con Distintivo de calidad Oficialmente Reconocido (D.O.R.), y vertido desde camión a través de tubo Tremie	540.00	180.17	97291.80
3.06	kg	Armadura pilotes	Acero UNE-EN 10080 B 500 SD para elaboración de la ferralla (corte, doblado y conformado de elementos) en taller industrial y montaje en pilote "in situ". Incluso alambre de atar y separadores.	39383.75	1.50	59075.63

### 3. Resumen valoración

A continuación, se muestra una tabla que recoge los precios totales de cada capítulo y el precio total.

<b>Presupuesto de Ejecución Material de la Alternativa 3: Cimentación indirecta</b>		
<b>Código</b>	<b>Capítulo</b>	<b>Importe</b>
01.	Actuaciones previas	4,982.40 €
02.	Movimiento de tierras	24,825.00 €
03.	Cimentación	526,007.41 €
<b>Presupuesto TOTAL de Producción y Construcción</b>		<b>555,814.81 €</b>

El presupuesto de ejecución material de la Alternativa 3: Cimentación indirecta asciende a la cifra de 555 814.81 €, es decir QUINIENTOS CINQUENTA Y CINCO MIL OCHOCIENTOS CATORCE EUROS CON OCHENTA Y UN CÉNTIMOS.







# CONTENIDO

PLANO N.º 1: SITUACIÓN Y EMPLAZAMIENTO

PLANO N.º 2: GEOMETRÍA DE LA CIMENTACIÓN

PLANO N.º 3: ARMADO DE LA CIMENTACIÓN



# ANEJO N.º 7: PLANOS

AUTOR: Ana Gabriela Caballero Vallejos

TUTOR: María Elvira Garrido de la Torre

COTUTOR: Juan Navarro Gregori

Grado En Ingeniería Civil

Escuela Técnica Superior De Ingeniería De Caminos, Canales Y Puertos

Universitat Politècnica De València



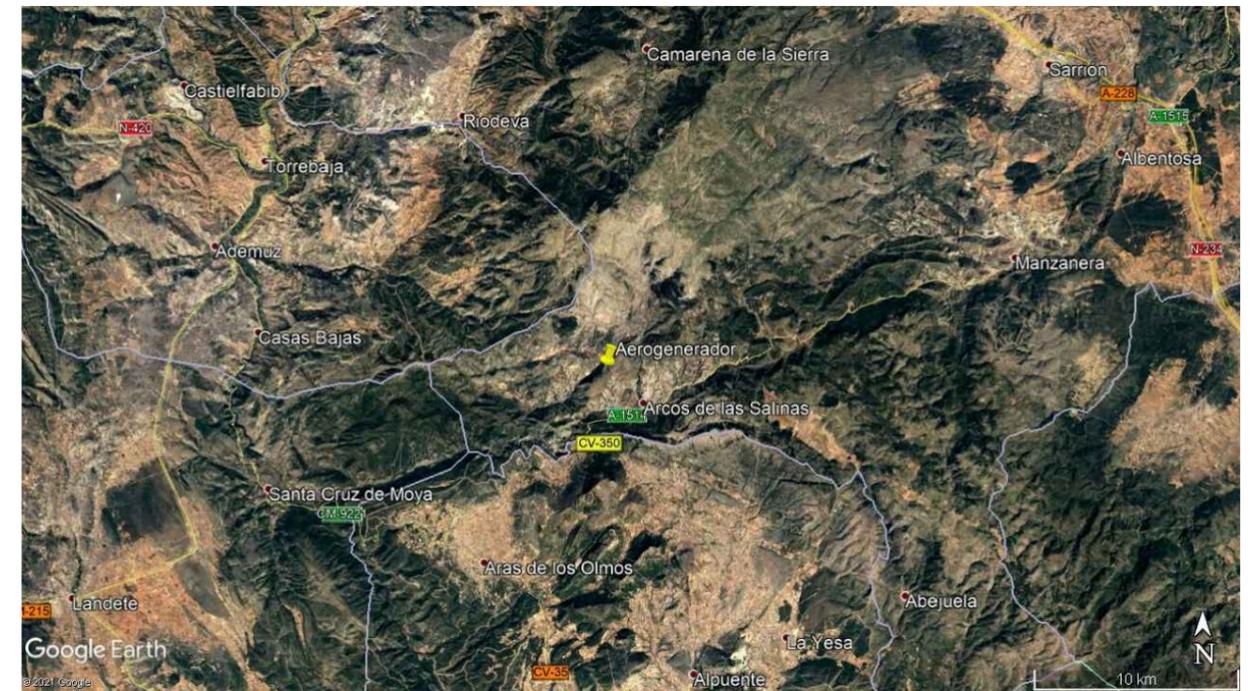
# CONTENIDO

PLANO N.º 1: SITUACIÓN Y EMPLAZAMIENTO

PLANO N.º 2: GEOMETRÍA DE LA CIMENTACIÓN

PLANO N.º 3: ARMADO DE LA CIMENTACIÓN





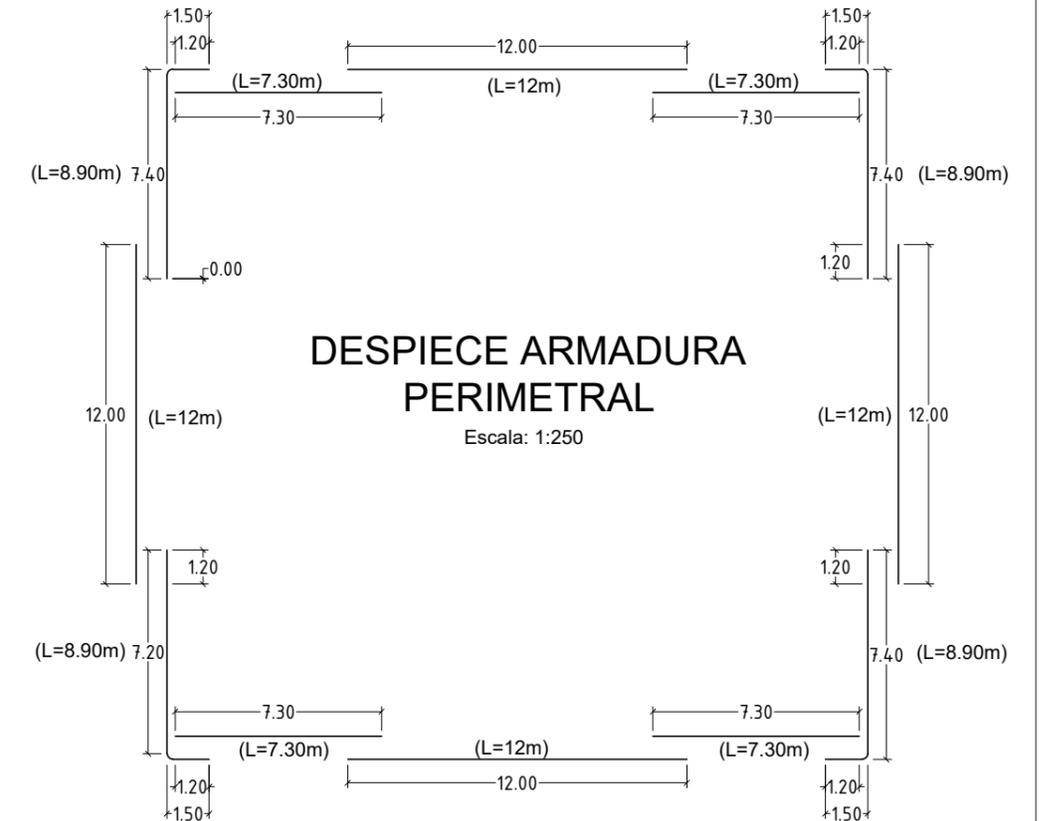
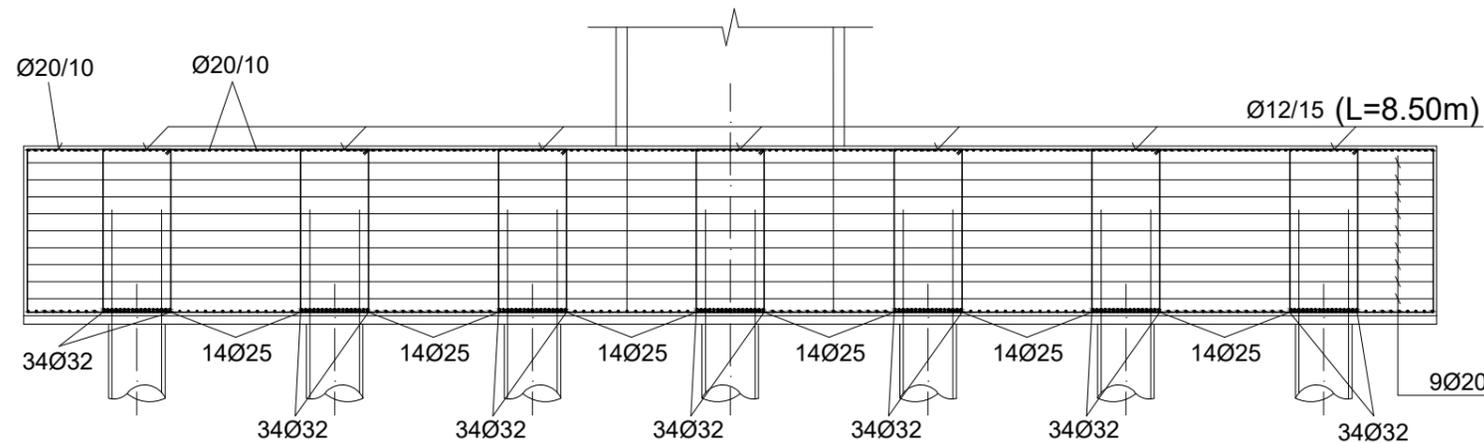
 <p>UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA</p>  <p>ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS</p>	<p>Autor:</p>  <p>Caballero Vallejos, Ana Gabriela</p>	<p>DISEÑO DE LA CIMENTACIÓN DE UN AEROGENERADOR EN EL TÉRMINO MUNICIPAL DE ARCOS DE LAS SALINAS (TERUEL)</p>	<p>SITUACIÓN Y EMPLAZAMIENTO</p>	<p>Escala: VARIAS</p>	<p>Plano n.º: 1</p>
--	--	--	----------------------------------	---------------------------	-------------------------



# ENCEPADO AEROGENERADOR

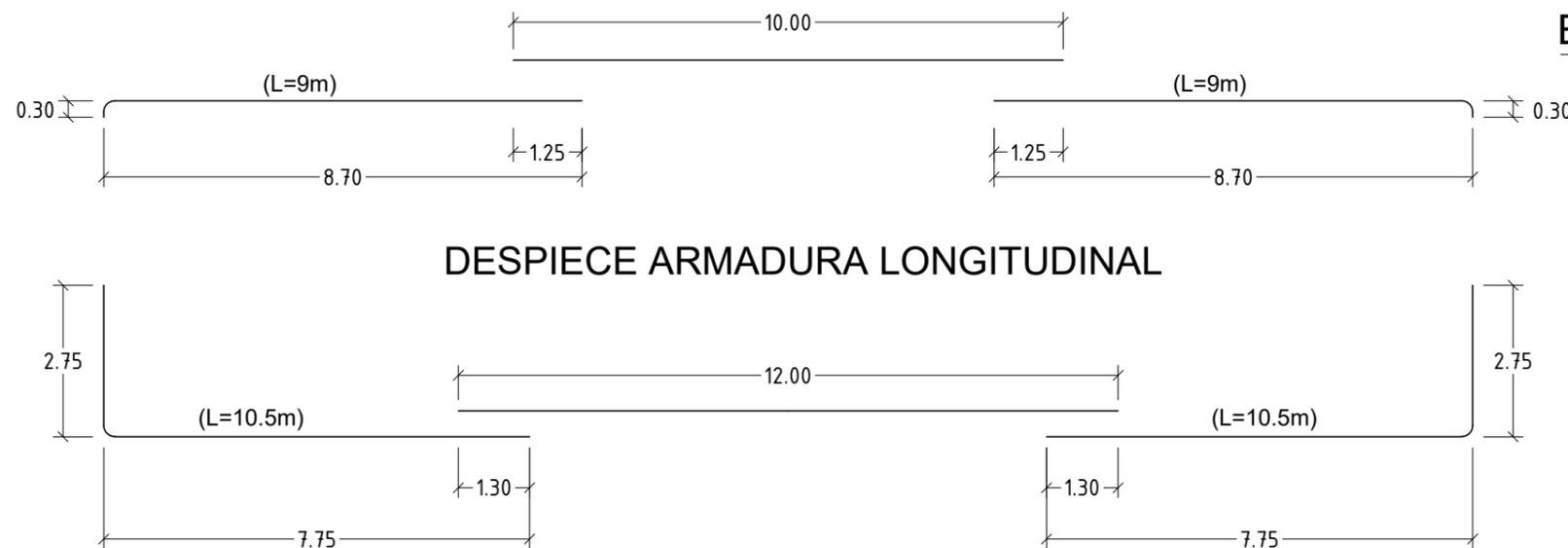
## SECCIÓN B-B'

Escala: 1:125



## DESPIECE ARMADURA PERIMETRAL

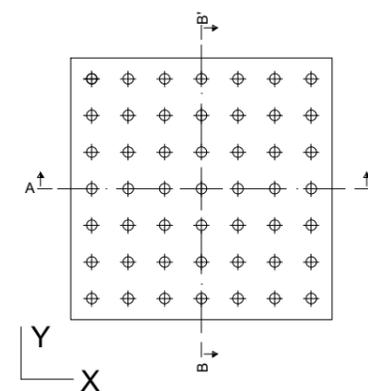
Escala: 1:250



## DESPIECE ARMADURA LONGITUDINAL

## ENCEPADO ESQUEMA PLANTA

Escala: 1:500



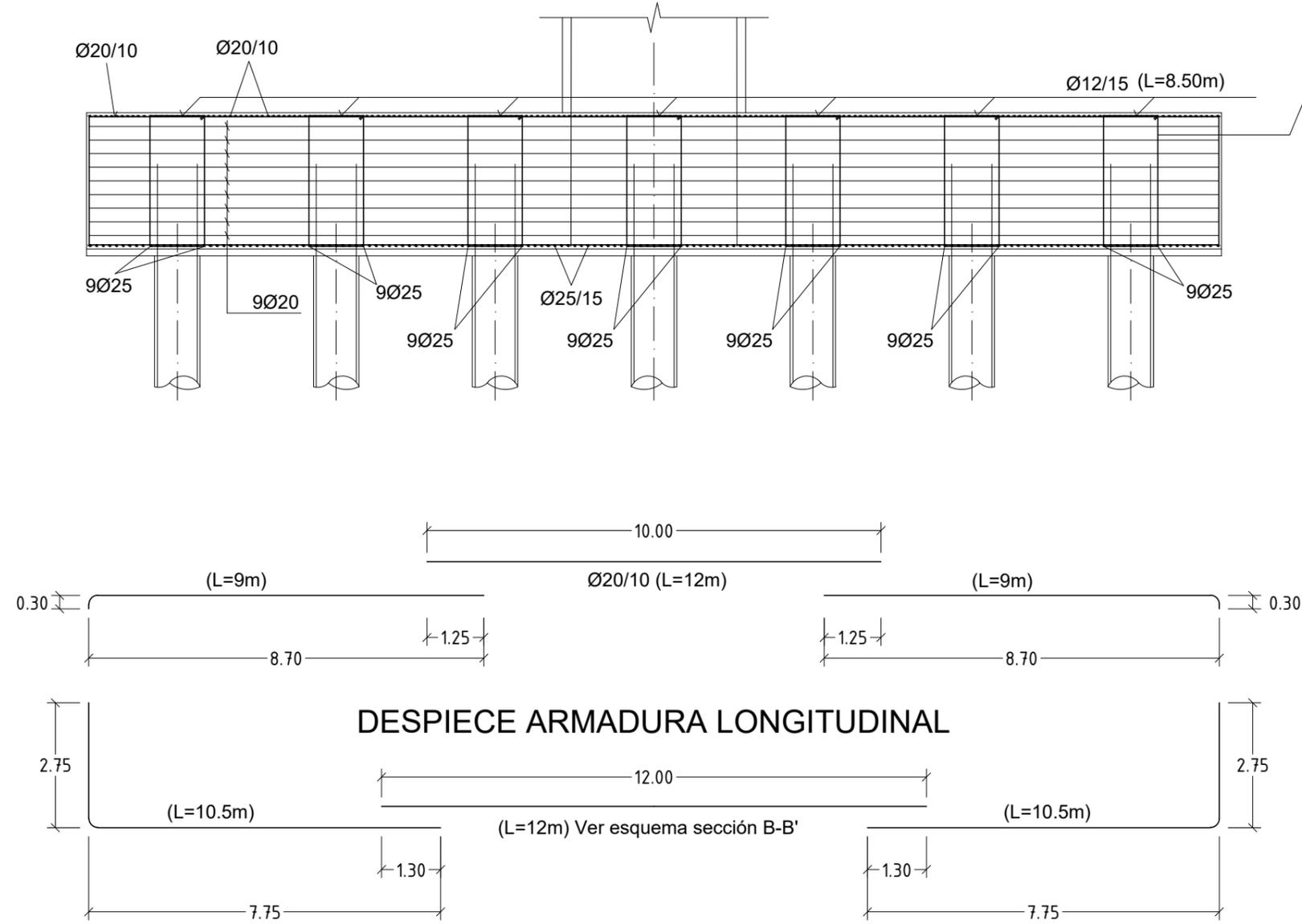
CUADRO DE CARACTERÍSTICAS DE LA EHE (MATERIALES, CONTROL DE CALIDAD Y COEFICIENTES DE SEGURIDAD)			
ELEMENTO	LOCALIZACIÓN	TIPO	COEFICIENTES DE SEGURIDAD
HORMIGÓN	ENCEPADO	HA-30/B/20/IIa	1,50
	PILAS	HA-30/F/12/IIa	1,50
ARMADURAS	PASIVAS	B 500 SD	1,15
EJECUCIÓN	TODA LA OBRA	CONTROL Y EJECUCIÓN INTENSO	SEGÚN EHE-08 art.12
RECUBRIMIENTOS GEOMÉTRICOS	ENCEPADO	6 cm	SOLAPES Y ANCLAJES SEGÚN EHE-08 art. 66.5
	PILOTE	6 cm	

# ENCEPADO AEROGENERADOR

## SECCIÓN A-A'

Escala: 1:125

NOTA: Se dispondrá cercos dobles hasta la mitad de la longitud del encepado

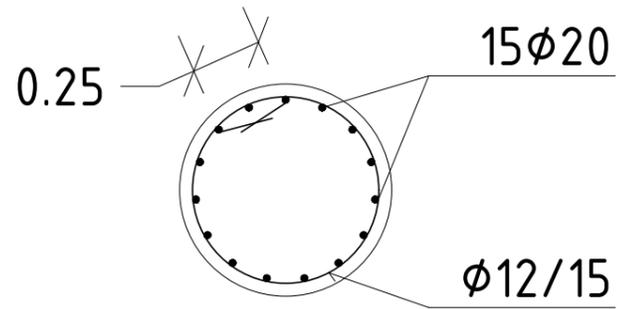


CUADRO DE CARACTERÍSTICAS DE LA EHE (MATERIALES, CONTROL DE CALIDAD Y COEFICIENTES DE SEGURIDAD)			
ELEMENTO	LOCALIZACIÓN	TIPO	COEFICIENTES DE SEGURIDAD
HORMIGÓN	ENCEPADO	HA-30/B/20/IIa	1,50
	PILAS	HA-30/F/12/IIa	1,50
ARMADURAS	PASIVAS	B 500 SD	1,15
EJECUCIÓN	TODA LA OBRA	CONTROL Y EJECUCIÓN INTENSO	SEGÚN EHE-08 art.12
RECUBRIMIENTOS GEOMÉTRICOS	ENCEPADO	6 cm	SOLAPES Y ANCLAJES SEGÚN EHE-08 art. 66.5
	PILOTE	6 cm	

# ARMADO PILOTES

## SECCIÓN C-C'

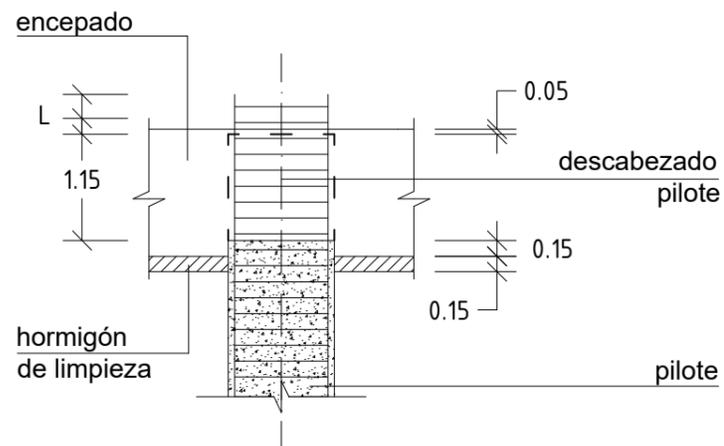
Escala 1:300



## DETALLE

### DESCABEZADO DE LOS PILOTES

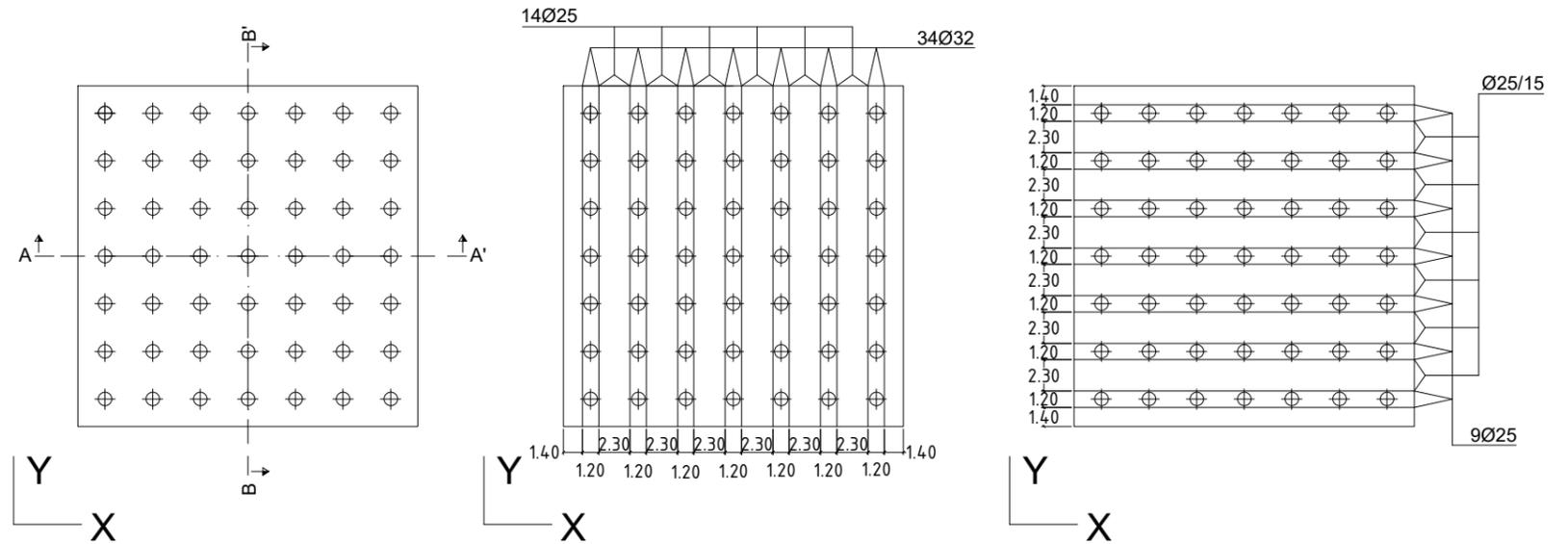
Escala 1: 600



NOTA: L, longitud de corte de la armadura de modo que aparezcan dos cercos por encima del paramento del encepado

## ENCEPADO ESQUEMA PLANTA

Escala: 1:500



CUADRO DE CARACTERÍSTICAS DE LA EHE (MATERIALES, CONTROL DE CALIDAD Y COEFICIENTES DE SEGURIDAD)

ELEMENTO	LOCALIZACIÓN	TIPO	COEFICIENTES DE SEGURIDAD
HORMIGÓN	ENCEPADO	HA-30/B/20/IIa	1,50
	PILAS	HA-30/F/12/IIa	1,50
ARMADURAS	PASIVAS	B 500 SD	1,15
EJECUCIÓN	TODA LA OBRA	CONTROL Y EJECUCIÓN INTENSO	SEGÚN EHE-08 art.12
RECUBRIMIENTOS GEOMÉTRICOS	ENCEPADO	6 cm	SOLAPES Y ANCLAJES SEGÚN EHE-08 art. 66.5
	PILOTE	6 cm	





# CONTENIDO

PLANO N.º 1: SITUACIÓN Y EMPLAZAMIENTO

PLANO N.º 2: GEOMETRÍA DE LA CIMENTACIÓN

PLANO N.º 3: ARMADO DE LA CIMENTACIÓN

