

Proyecto Fin de Carrera
Ingeniería Técnica Industrial: Mecánica
Curso 2012/2013

Cálculo de zapatas de grandes dimensiones para aerogeneradores

José María Estella Pozo

Directora: Elena Ibarz Montaner

Área de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras (MMCyTE)

Departamento de Ingeniería Mecánica

Escuela de ingeniería y arquitectura

Universidad de Zaragoza

Marzo 2013



Escuela de
Ingeniería y Arquitectura
Universidad Zaragoza



Departamento de
Ingeniería Mecánica
Universidad Zaragoza



RESUMEN

En el presente proyecto se ha realizado un estudio comparativo de zapatas flexibles cuadradas y circulares para la cimentación de aerogeneradores de grandes dimensiones.

Estas zapatas han sido modelizadas mediante el programa NX I-DEAS, en el que el suelo está simulado mediante el método del coeficiente de balasto, esto es, aproximar el comportamiento del suelo mediante muelles. La zapata de hormigón ha sido creada por elementos finitos.

Una vez diseñados los modelos, se han lanzado los cálculos en ABAQUS, donde se realiza un cálculo iterativo para la obtención de una solución convergente.

Con los datos de ABAQUS se ha hecho un estudio de las reacciones y los esfuerzos internos de la zapata para el cálculo de elementos de refuerzo y las principales comprobaciones ante los efectos de punzonamiento y cortadura. De esta manera, se sabe si se necesitan elementos secundarios con los que reforzar la armadura principal.

Como conclusión puede observarse que el comportamiento de las zapatas circulares reporta grandes beneficios en cuanto a reparto de tensiones en el terreno, esfuerzos internos y armado de la zapata comparadas con las cuadradas.

Índice de la memoria

1. INTRODUCCIÓN	- 1 -
1.1. Generalidades	- 1 -
1.2. Objetivo de estudio.....	- 2 -
1.3. Alcance del proyecto	- 2 -
2. ASPECTOS GENERALES.....	- 3 -
2.1. Zapatas para aerogeneradores.....	- 3 -
2.2. Factor de potencia.....	- 5 -
2.3. Cargas sobre la instalación	- 7 -
2.3.1. Cargas suministradas por el fabricante.....	- 7 -
2.3.2. Cargas del viento, peso propio y esfuerzos internos	- 9 -
2.4. Principios de diseño.....	- 10 -
2.4.1. Interacción suelo-estructura.....	- 11 -
2.4.2. Estado límite de agotamiento (ELU).....	- 14 -
2.4.3. Estado límite de servicio (ELS).....	- 14 -
2.5. Códigos técnicos.....	- 15 -
3. CALCULOS PREVIOS.....	- 16 -
3.1. Módulo de balasto	- 16 -
3.1.1. Zapatas cuadradas.....	- 17 -
3.1.2. Zapatas circulares	- 17 -
3.2. Distribución de reacciones del fuste.....	- 19 -
3.2.1. Zapatas cuadradas.....	- 19 -
3.2.2. Zapatas circulares	- 21 -
4. MODELADO MEDIANTE NX I-DEAS	- 25 -
4.1. Zapatas cuadradas.....	- 26 -
4.2. Zapatas circulares	- 29 -
5. ANÁLISIS.....	- 35 -
5.1. Archivo .INP.....	- 36 -
5.2. Procesado mediante ABAQUS.....	- 36 -
5.3. Cálculo del Momento flector y del esfuerzo cortante	- 37 -
5.3.1. Zapatas cuadradas.....	- 38 -
5.3.2. Zapatas circulares	- 40 -
5.4. Distribución de tensiones en el terreno	- 42 -
5.4.1. Zapata cuadrada.....	- 43 -
5.4.2. Zapata circular	- 44 -
5.5. Cálculo de la armadura de refuerzo.....	- 45 -
5.5.1. Zapatas cuadradas.....	- 47 -
5.5.2. Zapatas Circulares	- 48 -

5.6.	Comprobación a Punzonamiento.....	- 49 -
5.7.	Comprobación cortadura	- 51 -
5.7.1.	Cálculo armadura de cortante.....	- 53 -
6.	CONCLUSIONES.....	- 55 -
7.	TRABAJO FURURO	- 62 -

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Generalidades

El empleo de las energías renovables ha ganado popularidad a lo largo de los últimos años debido a su sostenibilidad. Existen diferentes tipos de energías renovables, cada método posee sus beneficios y desventajas. Lo que más interesa es un sistema eficiente que no afecte sobremanera al entorno.

De este modo, el uso del viento como recurso energético ha ido ganando popularidad a lo largo de los años debido a la necesidad de energía sostenible.

Gracias al desarrollo de nuevas tecnologías, con el paso del tiempo los aerogeneradores han ido aumentando de manera considerable su capacidad nominal y consecuentemente, su tamaño (Figura 1.1).

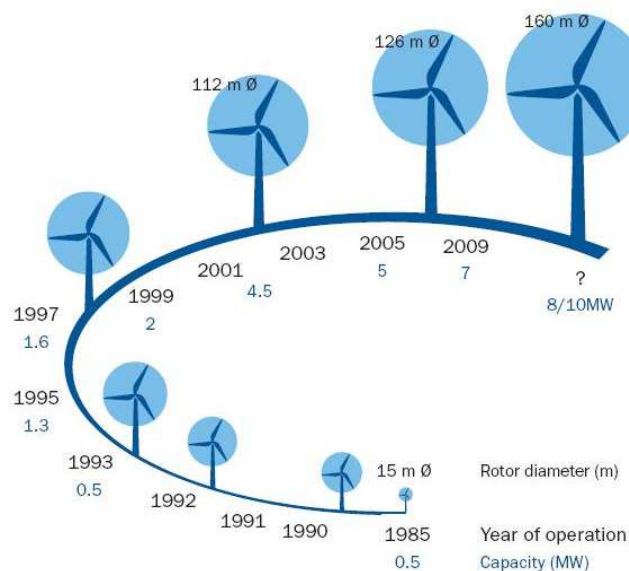


Figura 1.1 Evolución de los aerogeneradores

Desde el punto de vista estructural, dicho incremento significa que las cargas son mayores, por lo que el modelo debe ser diseñado para que sea seguro.

Las turbinas están sujetas a cargas y esfuerzos de una naturaleza muy específica. El viento en si actúa de manera imprevisible y cambiante, creando de este modo un ambiente propenso a la fatiga. Además, cuanto más grande sea la instalación, se verá sometida a vientos con velocidades más variables. Esto hace que existan vibraciones que crean grandes esfuerzos dinámicos en los componentes de la instalación, pudiendo llegar incluso a entrar en resonancia. Del mismo modo, la cimentación debe soportar el peso propio de la estructura y

el gran momento de vuelco que se genera al aplicar la fuerza de las palas en una góndola a más de 100 m de altura.

1.2. Objetivo de estudio

El objetivo de este proyecto es estudiar y analizar diferentes tipos de configuraciones de zapatas. Como el número de parques eólicos se prevé que aumentará en el futuro, será necesario construirlos en todo tipo de emplazamientos. Es por esto que en el presente proyecto se modelizarán diferentes tipos de zapatas, cuadradas y circulares, variando el canto de las mismas en suelos de tipo blando, medio y duro.

La rigidez del terreno se simulará mediante el módulo de balasto, que consiste en simular el piso mediante muelles. Esta aproximación se explicará con mayor profundidad más adelante. Las zapatas de hormigón, en cambio, se representarán mediante un modelo de elementos finitos que variará su forma y grosor.

1.3. Alcance del proyecto

El proyecto versará acerca de la realización de modelos de elementos finitos para dos tipologías geométricas de zapatas de aerogeneradores de cara a caracterizar la estabilidad de los mismos, sus esfuerzos, su interacción con el terreno, las condiciones de armado y comprobaciones ante punzonamiento y cortadura.

Como resultado del trabajo se obtendrán las directrices para la elección del tipo de zapata óptima para la cimentación del molino según el tipo de terreno considerado.

2. ASPECTOS GENERALES

2.1. Zapatas para aerogeneradores

Un molino de viento está compuesto por numerosos elementos los cuales se muestran en la figura 2.1. La zapata es la encargada de transmitir al suelo todos los esfuerzos, se utiliza para repartir la carga que llega a través del fuste al terreno y para dar estabilidad durante el periodo de vida útil de la instalación.

1. Cimentación

2. Torre

3. Góndola

4. Palas

5. Buje

6. Transformador



Figura 2.1 Partes principales de un molino.

Dado que la resistencia del terreno es menor que la del hormigón o el acero, es necesario realizar un reparto sobre la superficie del suelo a través de la zapata, que tiene una sección mucho mayor que la de la torre.

Para su dimensionamiento y comprobación hay que tener como datos de partida la resistencia admisible del terreno y las cargas sobre la zapata y a partir de ahí, estudiar tanto las tensiones del terreno como las condiciones de estabilidad. Al ser elementos de hormigón armado es necesario también el cálculo del refuerzo. Generalmente, la armadura inferior trabajará a flexión simple. Una vez calculada, será necesario realizar las comprobaciones que indica la norma a punzonamiento y cortante.

Las zapatas de aerogenerador tienen generalmente forma rectangular, circular u octogonal. La principal ventaja de las dos últimas radica en que trabajan de la misma forma en todas direcciones, esto no ocurre en las cuadradas. Además en la armadura de refuerzo para

flexión se pueden poner al menos cuatro capas en la parte inferior, lo que hace que resistan mejor los momentos flectores. El inconveniente que tienen es la dificultad de construcción, lo que incluye las diferentes posiciones del refuerzo y la complejidad del encofrado. Por este motivo, generalmente es más barato construir simplemente una zapata cuadrada.

La figura 2.2 muestra la construcción de una zapata de aerogenerador.



Figura 2.2 Construcción de una zapata.

El molino va a estar sometido a un gran momento de vuelco, por consiguiente, el diseño debe tenerlo en cuenta para cumplir las condiciones de seguridad exigibles por normativa.

Se debe prestar especial atención a la conexión entre la torre de acero y la cimentación, y así, asegurar una transferencia adecuada de la carga del molino en la zapata. La figura 2.3 muestra las tres variantes comúnmente empleadas para esta conexión.

a) Muestra un mecanismo de doble brida, donde un perfil gigante en I se dobla con forma de anillo y se coloca dentro del hormigón.

b) Presenta un tipo de construcción similar, la cual se emplea en cimentaciones muy gruesas. Se debe tener especial cuidado a la hora de diseñar la suspensión del refuerzo cuando la carga se transfiere a la zona de compresión de la zapata.

c) Expone una conexión a través de un anclaje pretensado. Un anillo de acero se incrusta en la parte inferior antes de fraguar el hormigón. En la parte superior se coloca un perfil en T doblado en forma de anillo. Los pernos son entonces tensados contra los platillos. La sujeción de la torre se sucede después de la misma manera que en las variantes previas.

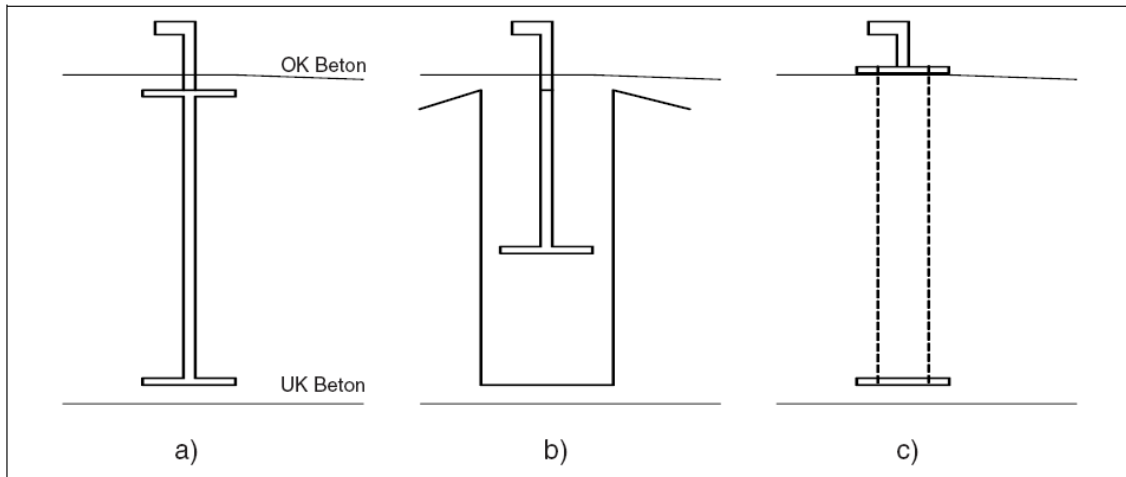


Figura 2.3 Variantes típicas para transferir la carga de la torre a la cimentación.

2.2. Factor de potencia

La potencia del viento nos da un primer límite para la capacidad energética de un aerogenerador. Para calcularla, evaluamos la energía cinética (E_k) de la masa de aire (m) que atraviesa por unidad de tiempo la sección barrida por las palas (A)

$$\text{Potencia} = \frac{\text{Trabajo}}{t} = \frac{E_k}{t} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot \frac{V^2}{t}$$

Como la masa de aire que atraviesa el área de acción de las palas en un tiempo t es

$$m = \rho \cdot A \cdot d, \text{ y } d = V \cdot t$$

Donde V es la velocidad del viento y el volumen es $A \cdot d$ (ver figura 2.4), tenemos que:

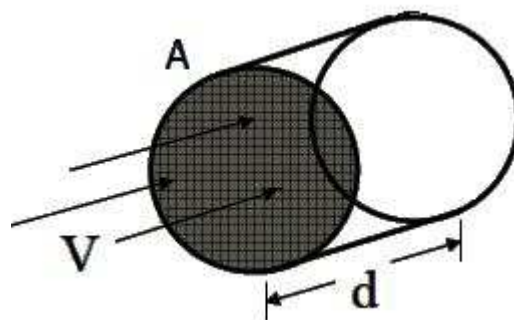


Figura 2.4 Esquema del volumen de aire que atraviesa el rotor en un tiempo t

$$\text{Potencia} = \frac{1}{2} \cdot (\rho \cdot A \cdot d) \cdot \frac{V^2}{t} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^2 \cdot \frac{d}{t} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3$$

De la fórmula anterior se deduce que la potencia depende de la velocidad al cubo, por tanto interesan velocidades de viento elevadas ya que poseen un mejor potencial energético.

Como muestra 2.5, la velocidad del viento aumenta con la altitud, es por eso que interesan molinos de la mayor altura posible pues su potencia eléctrica será superior.

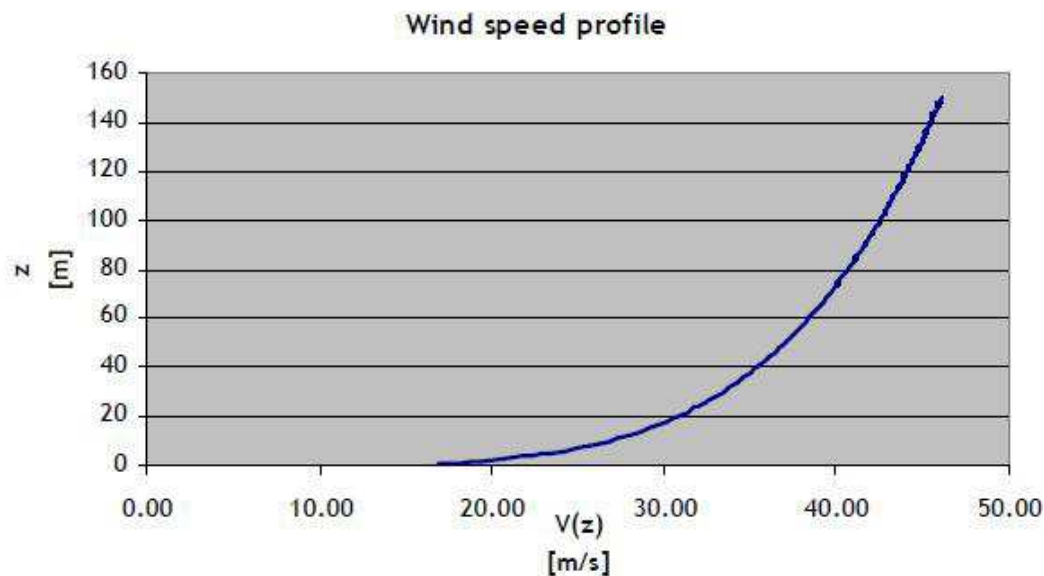


Figura 2.5 Variación del viento con la altura

La mayor velocidad del viento a mayor altura no es el único motivo por el que interesa una instalación de grandes dimensiones. Existe otro factor denominado como “capa de Ekman” (Ver figura 2.6). Esta capa, por encima de los 100 metros de altura, establece un límite a partir del cual se reducen las turbulencias. Por debajo de ella el viento es más turbulento, lo que influye negativamente tanto en el rendimiento como en la vida útil de la instalación. Así pues, se puede deducir que:

A mayor altura, mayor velocidad de viento y menores turbulencias lo que deriva en un mayor aprovechamiento energético.

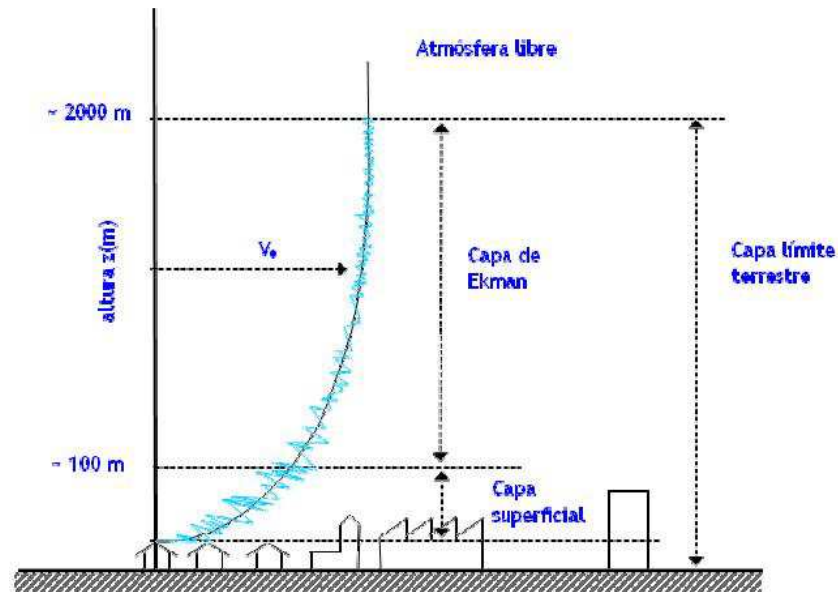


Figura 2.6 Capa de Ekman

Teniendo en cuenta lo anteriormente dicho, un molino más grande influirá directamente en los esfuerzos que se transmiten al terreno ya que serán mayores conforme aumente la altura de la instalación. Por tanto habrá que dimensionar la zapata para ser segura y poder soportar los esfuerzos que transmita la torre.

2.3. Cargas sobre la instalación

Esta sección describe las cargas que actuarán sobre la torre y la cimentación.

Las cargas de la torre están compuestas por el peso propio del molino y por la fuerza del viento que actúa sobre la instalación. Las cargas de la góndola, que actúan en la parte superior de la torre se obtienen a partir de la documentación que suministra el fabricante. Las fuerzas del viento y el peso propio se obtendrán empleando las fórmulas adecuadas.

Los esfuerzos que actúan sobre la cimentación son una consecuencia de las fuerzas que se ejercen sobre la torre y el peso propio del hormigón. Estos esfuerzos serán calculados mediante un análisis de elementos finitos.

Además, también hay que considerar que el viento es un fenómeno que no actúa de forma constante, por lo que la instalación estará sometida a esfuerzos dinámicos y vibraciones.

2.3.1. Cargas suministradas por el fabricante

Este proyecto asume que las cargas de la parte superior y de la cimentación son proporcionadas por la documentación que suministra el fabricante. De este modo, para llevar a cabo un análisis en dos dimensiones, los sets de fuerzas en tres dimensiones que se

suministran (Figura 2.7) se simplifican mediante el uso de la regla de la mano derecha (figura 2.8)

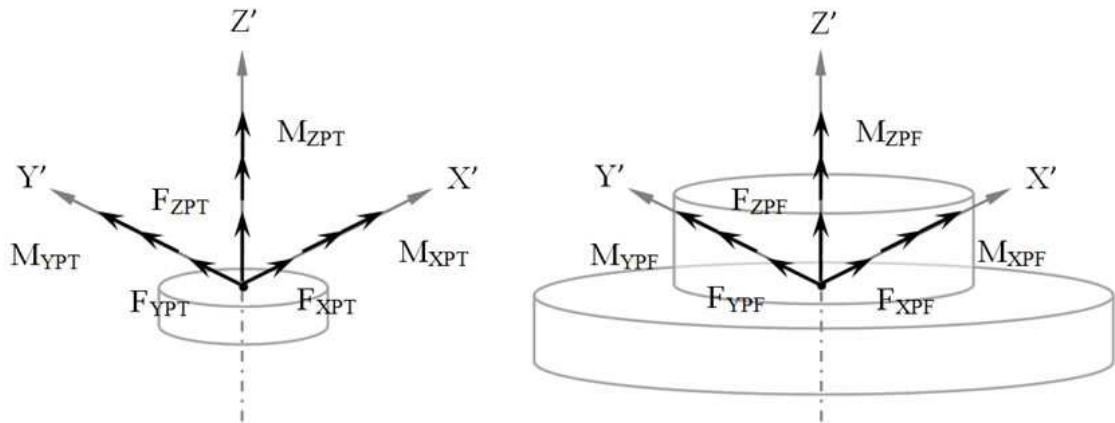


Figura 2.7 Componentes de las fuerzas en tres dimensiones en la parte superior e inferior.

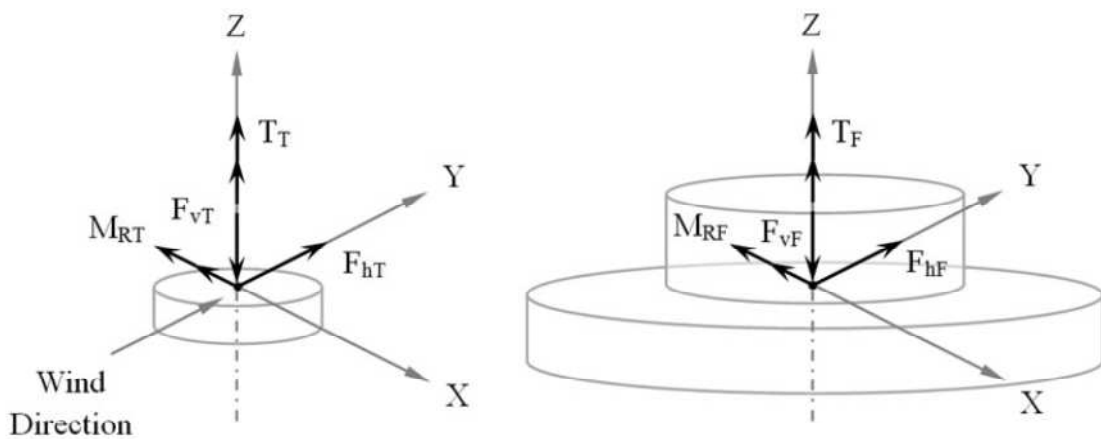


Figura 2.8 Componentes resultantes en dos dimensiones en la parte superior e inferior.

Las fuerzas resultantes en la parte superior equivalen a:

$$F_{hT} = \sqrt{F_{XPT}^2 + F_{YPT}^2}$$

$$F_{vT} = -F_{ZPT}$$

$$M_{RT} = \sqrt{M_{XPT}^2 + M_{YPT}^2}$$

$$T_T = M_{ZPT}$$

Las fuerzas resultantes en la parte inferior equivalen a:

$$F_{hF} = \sqrt{F_{XPF}^2 + F_{YPF}^2}$$

$$F_{vF} = -F_{ZPF}$$

$$M_{RF} = \sqrt{M_{XPF}^2 + M_{YPF}^2}$$

$$T_F = M_{ZPF}$$

2.3.2. Cargas del viento, peso propio y esfuerzos internos

Además de las cargas suministradas por el fabricante, también hay que considerar las cargas relativas al peso propio y al viento.

La distribución de fuerzas horizontales debido al viento equivale a:

$$w_h = c_f \cdot q_i \cdot DAF \cdot d_e(z)$$

Donde c_f es el coeficiente de fuerza de arrastre, q_i es la presión del viento a la altura z , DAF es el factor de amplificación dinámica (Dynamic Amplification Factor) y $d_e(z)$ es el diámetro exterior a la altura z .

El reparto de fuerzas verticales debido al peso propio y a los esfuerzos internos se calcula como:

$$w_v = w_{IF} + A(z) \cdot \gamma$$

Donde w_{IF} es la distribución de la carga debido a los esfuerzos internos, $A(z)$ es el área de la sección transversal a la altura z y γ es el peso específico del material de la torre.

La distribución de las cargas se muestra en la figura 2.9.

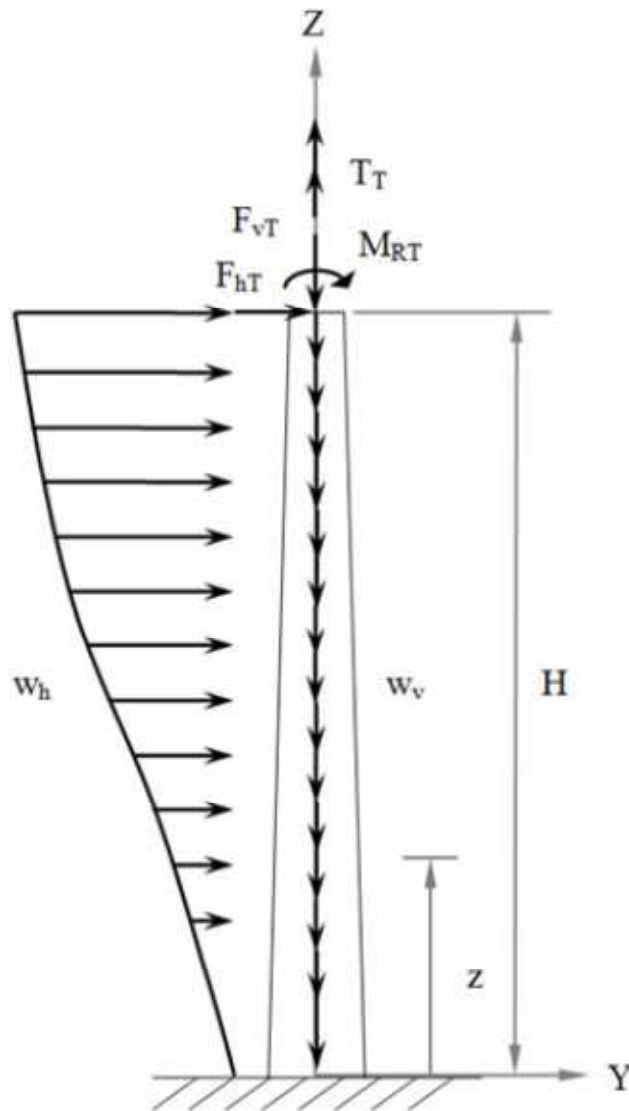


Figura 2.9 Distribución de las cargas.

2.4. Principios de diseño

El diseño de elementos y estructuras tiene como objetivo buscar soluciones de un determinado tipo que sean factibles y seguras durante el periodo de vida útil de la instalación, más adelante se muestran algunos factores que han de tenerse en cuenta, algunos más importantes que otros.

- La estructura debe ser estable.
- No se debe exceder el límite elástico de los materiales.
- La estructura debe permanecer funcional durante el periodo de vida útil.

- La estructura debe soportar los factores externos tales como fuego, inundaciones, heladas, humedad o cambios bruscos de temperatura.

2.4.1. Interacción suelo-estructura

El diseño de una cimentación está completamente regido por la distribución de presiones bajo la misma. El propósito de la zapata es repartir la carga más o menos concentrada, en un área mucho más extensa de manera que el suelo pueda soportarla sin consecuencias negativas. Es debido a esta distribución de presiones por lo que se crean momentos flectores y fuerzas de cortadura en la zapata. La forma de repartir la presión tiene un impacto decisivo en la magnitud de las fuerzas internas de la estructura.

Existen diferentes métodos para modelizar el reparto de cargas como se muestra a continuación.

➤ Distribución de presión lineal

Un modelo simple (apropiado para cálculos analíticos) para describir la distribución de presiones bajo la zapata es asumir que no hay interacción entre el suelo y la misma. El uso de esta teoría ($\sigma_{max/min} = V / A \pm M / W$) proporciona un reparto de presión de manera lineal que depende exclusivamente de la magnitud de las cargas aplicadas sobre la superficie de la zapata (Figura 2.10a). Para zapatas pequeñas este método es una aproximación bastante buena. En el caso de estudio, una zapata mucho más grande, este método es impreciso.

El reparto de presiones que contempla la norma está basado en un comportamiento rígido de las zapatas. Este tipo de distribución no suele ser válido para zapatas de aerogenerador porque al ser de gran tamaño se comportan como flexibles sufriendo deformaciones por flexión y alterando la repartición de tensiones en el terreno.

➤ Módulo de balasto

Un método muy usado para una aproximación simple del conjunto suelo-estructura es suponer un medio elástico compuesto por muelles bajo la estructura. El suelo es representado por una serie de resortes verticales e independientes los unos de los otros. Figura 2.10b. Por tanto, el único parámetro que describe la interacción entre el suelo y la estructura es la constante de rigidez K_x de los muelles por unidad de área, al cual se

denomina como módulo de balasto. De este modo, la distribución de presiones es proporcional a los desplazamientos de cada punto de estudio.

Este método ignora completamente la interacción de cada elemento con sus elementos vecinos y por tanto, en muchos casos no da resultados realistas a la hora de representar la deformación del suelo, aunque en el caso de una única carga concentrada concuerda bastante bien con métodos más sofisticados.

Una vez considerado lo anterior, el problema radica en determinar el valor del módulo de balasto. La determinación de la rigidez del suelo es un factor de importancia en el diseño de la cimentación. Generalmente el valor del módulo de balasto depende del suelo en cuestión y de las dimensiones de la losa.

Para el estudio realizado se han considerado tres tipos diferentes de terreno, blando, medio y duro, a los cuales se les ha asignado un módulo concreto.

Terreno duro	4,00E+07	N/m ³
Terreno medio	2,00E+07	N/m ³
Terreno blando	1,00E+07	N/m ³

$$K_b = \frac{F}{\delta \cdot A}$$

Donde:

F Es la fuerza vertical aplicada.

A Es el área de la superficie en contacto con el terreno donde se está aplicando la fuerza.

δ Es la distancia vertical de hundimiento lograda.

La definición anterior sólo es válida para un cierto rango de presiones ya que, una vez aparecen fenómenos de fluencia o plasticidad, la fuerza deja de ser proporcional al hundimiento y por tanto la relación fuerza-hundimiento no conserva una relación lineal y no tiene sentido hablar de un módulo constante.

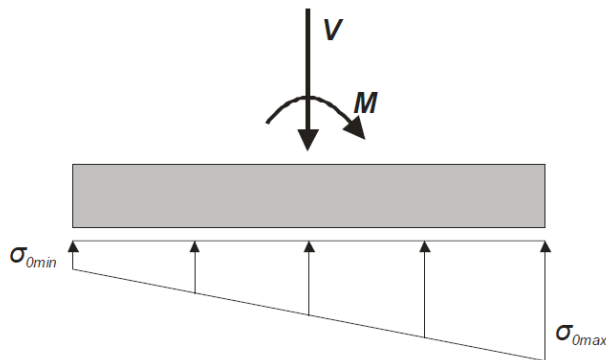


Figura 2.10a Modelo de distribución de presiones norma

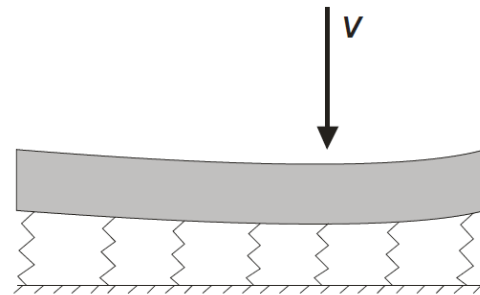


Figura2.10b Modelo basado en el coeficiente de balasto.

➤ Método de los elementos finitos

El método de los elementos finitos ofrece la posibilidad de modelizar el comportamiento del conjunto suelo-estructura de manera más precisa que los dos métodos anteriores. Cada elemento puede interactuar con sus elementos vecinos. Además no tiene en cuenta la rigidez del suelo en una sola dirección. Por tanto, aún cuando se asuma tan solo un comportamiento elástico e isotrópico (de esta forma los parámetros como el módulo de Young y el coeficiente de Poisson pueden ser considerados como características del suelo) la interacción del conjunto suelo-estructura puede ser descrita de un modo más realista que con el módulo de balasto. Por ejemplo, una zapata sometida a presión uniforme no tendrá fuerzas asociadas si descansa sobre un lecho de muelles, ya que la deformación de cada muelle individual será la misma. Sin embargo, un terreno modelizado mediante elementos finitos considerará un medio del suelo continuo y consecuentemente dará como resultado una deformación no uniforme.

El mayor problema de este método es el elevado coste computacional que conlleva.

El procedimiento que se va a emplear para realizar este estudio es una mezcla de las dos aproximaciones anteriormente mencionadas. Se simulará el suelo mediante el método del coeficiente de balasto. Por otro lado, la parte relativa a la zapata se modelizará mediante elementos finitos

2.4.2. Estado límite de agotamiento (ELU)

En el estado límite de agotamiento la estructura debe ser verificada ante cargas estáticas extremas. El análisis dinámico, incluyendo el cálculo a fatiga tanto para el hormigón como para el acero, no se ha requerido tradicionalmente para el cálculo de zapatas de aerogenerador pese a estar sometidas a cargas cíclicas extremas. La fatiga en el hormigón armado es un tema de vanguardia y por tanto, no se ha estudiado con demasiada profundidad. Incluso en los códigos de diseño más avanzados, la estructura está diseñada conforme a cargas estáticas. Pese a ello, los estudios de agotamiento están siendo objeto de interés en los últimos años, por lo que se puede suponer que las zapatas serán también verificadas a fatiga, puesto que se prevé que la normativa futura obligue a comprobar la zapata frente a este fenómeno.

Las comprobaciones esenciales del estado límite de agotamiento conforme a la norma son:

- Resistencia a flexión para el hormigón y la armadura
- Resistencia a cortadura con y sin armadura de refuerzo (incluido el punzonamiento)
- Verificación de las zonas más cargadas
- Fallo debido a grandes deformaciones
- Análisis numéricos detallados de aquellos problemas que un modelo simplificado no puede solventar
- Pérdida de estabilidad de la estructura

2.4.3. Estado límite de servicio (ELS)

La estructura también ha de ser comprobada para un funcionamiento adecuado durante el periodo de vida útil ante un uso normal. De acuerdo a la norma, este tipo de instalaciones han de durar al menos 20 años.

Las verificaciones esenciales en el estado límite de servicio conforme a la norma son:

- Limitaciones por fracturas
- Control de los asentamientos así como un análisis de la flexión en general
- Limitación de los esfuerzos para asegurar una durabilidad suficiente de la instalación
- Control de vibraciones, oscilaciones y resonancias

En el ELS, los coeficientes parciales de seguridad se fijan con valor unitario.

2.5. Códigos técnicos

Para el correcto diseño de estructuras existen códigos técnicos de edificación normalizados que especifican los factores de seguridad, los parámetros de los materiales, criterios de diseño y otras regulaciones que rigen la instalación. Si se siguen los códigos al crear un modelo se asegura que este se haya llevado a cabo de forma adecuada y que no incumplirá las normas ni las regulaciones.

Las normas a tener en cuenta serán:

- **Código técnico de la edificación (CTE) – CIMENTACIONES**
- **Instrucción de hormigón estructural EHE – 08**
- **International standard IEC 61400-1**

3. CALCULOS PREVIOS

Previo a la creación de los modelos en NX I-DEAS, es necesario realizar una serie de cálculos mediante Microsoft EXCEL teniendo en cuenta a priori el tamaño de zapata que se va a modelizar y el de los elementos de la malla.

Estos cálculos permitirán conocer el valor de la constante de rigidez K_x de los muelles con los que se simulará el terreno.

Análogamente, teniendo en cuenta de antemano el peso del molino y el área del fuste, se usarán las hojas de cálculo de EXCEL para determinar el valor de la fuerza aplicada en cada nodo. De esta manera, se hará una correcta distribución a la hora de emular los esfuerzos que se transmiten de la torre a la cimentación.

Estos cálculos asegurarán una correcta modelización del comportamiento del conjunto zapata-terreno. Cada configuración (cuadrada y circular) se calculará de manera diferente debido a los cambios de áreas, siendo más complejo el caso de las zapatas circulares.

Por último, en el caso de la zapata circular, será necesario crear una lista en EXCEL que permita saber la distancia que hay desde los nodos inferiores al punto crítico y el número de etiqueta.

3.1. Módulo de balasto

Este apartado describirá de manera general los cálculos para la obtención de las rigideces de los muelles para el módulo de balasto en las zapatas cuadradas y circulares. Se partirá inicialmente de la fórmula del módulo de balasto descrita en el apartado 2.4.1.

$$K_b = \frac{\sigma}{\delta} = \frac{F}{\delta \cdot A} = \frac{K_x \cdot \delta}{\delta \cdot A} = \frac{K_x}{A}$$

Despejando de la fórmula anterior, se obtiene una relación que proporcionará la rigidez de cada muelle en función de K_b y del área A tal que:

$$K_x = K_b \cdot A$$

3.1.1. Zapatas cuadradas

La rigidez del muelle que está debajo de cada nodo depende directamente del área de influencia de los elementos adyacentes al mismo. Esta área será mayor en los nodos centrales, completamente rodeados por más elementos, que en los nodos de los laterales y aún será más pequeña en las esquinas.

Debido a la forma cuadrada de todos los elementos, el cálculo será relativamente sencillo. Para el caso de los nodos centrales se considerara que hay una unidad de área. Los nodos laterales tendrán media unidad de área y finalmente, los nodos situados en las esquinas tendrán un cuarto. Esto se puede ver de manera más clara en la figura 3.1.

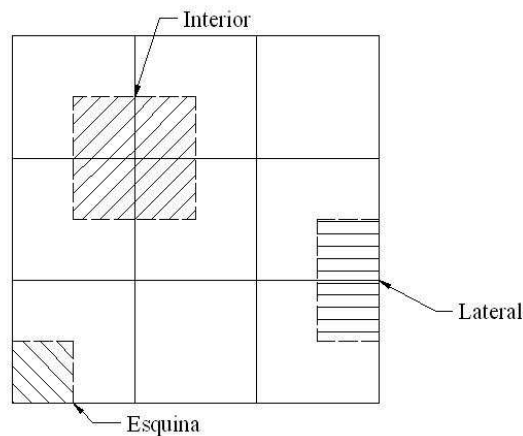


Figura 3.1 Distribuciones de área en cada tipo de nodo.

Aplicando la fórmula antes mencionada ($K_x = K_b \cdot A$) se podrán determinar los coeficientes K_x de cada resorte. En el caso de las zapatas cuadradas y debido a la sencillez de la geometría será suficiente calculando la rigidez de los muelles interiores y a partir de ahí, dividirla para dos para obtener la rigidez de los muelles laterales. Se procederá igualmente para calcular la rigidez en las esquinas dividiendo entre cuatro.

Este cálculo habrá que realizarlo para cada tipo de suelo, blando, medio y duro.

3.1.2. Zapatas circulares

Análogamente a lo mencionado en el anterior apartado, la constante K_x dependerá de la superficie sobre cada muelle. El cálculo se complica debido a que el área de los elementos no es uniforme a lo largo de toda la zapata. Cambia haciéndose más pequeña hacia el centro. Por tanto habrá que calcular cada área mediante el uso de hojas de cálculo. Es bastante ilustrativo ver la figura 3.2, que muestra como son los elementos de la zapata.

Las áreas interiores se calcularán iterando mediante el empleo de la siguiente fórmula:

$$A = \frac{\pi \cdot (R_{ext} - R_{int})}{n}$$

Donde A es el área sobre cada muelle, R_{ext} es el radio exterior de la circunferencia descrita por la línea de trazos, R_{int} es el radio interior de la circunferencia descrita por línea de trazos. Finalmente, n es el número de divisiones que contiene cada anillo creado por la resta de las dos circunferencias. El proceso de iteración consiste en restar a R_{ext} y a R_{int} el incremento Δ (correspondiente a la longitud de los elementos en la coordenada R) a lo largo del radio.

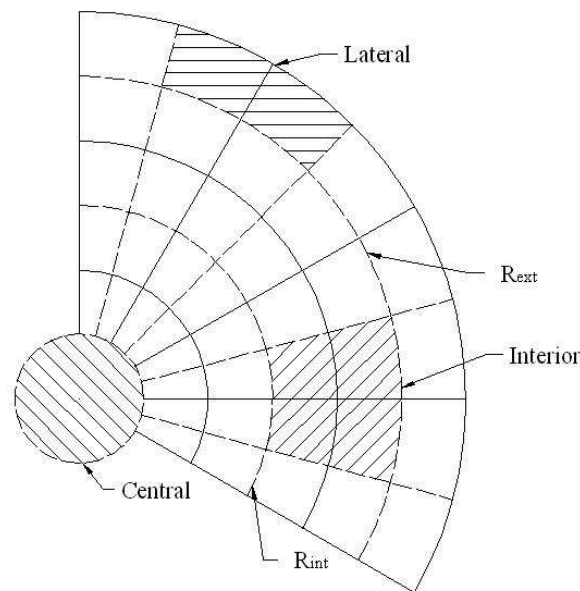


Figura 3.2 Distribuciones de área en cada tipo de nodo.

En el caso del cálculo del área de los elementos laterales bastará con emplear la fórmula antes descrita una sola vez. Las únicas diferencias radican en que el radio exterior (R_{ext}) será el radio total de la zapata y el radio interior será $R_{ext} - \frac{\Delta}{2}$ ya que cada nodo en esta parte no está rodeado completamente por vecinos.

Para el cálculo del área central bastará con emplear esta fórmula:

$$A = \pi \cdot \left(\frac{R_{\Delta}}{2}\right)^2$$

Esto es así debido a que la circunferencia que define el área alrededor del centro vale la mitad del radio. Es necesario concretar que en este caso no es necesario dividir por n debido a que sólo existe un nodo.

Para el caso estudiado se indicarán los valores de estas áreas en el cuarto apartado.

3.2. Distribución de reacciones del fuste

Este apartado describe los cálculos necesarios para la obtención de la fuerza aplicada en cada nodo para simular las fuerzas y momentos que transmite el fuste a la zapata.

Para la realización de dichos cálculos se empleará fórmula que describe la presión en función del área:

$$P = \frac{F}{A}$$

Donde P es la presión, F es la fuerza que se aplica en cada nodo y A es el área alrededor de cada nodo y sobre la cual se reparte la fuerza.

Para describir los momentos se utilizará la fórmula que describe los momentos en función de la fuerza.

$$M = F \cdot d$$

Donde M es el momento que se transmite a la zapata (conocido), F es la fuerza que se aplica en cada nodo y d es la distancia del nodo donde se aplica la fuerza hasta el punto de aplicación de la reacción.

La fuerza que simula el momento se aplica tan sólo en los nodos exteriores. El reparto real no ocurre así exactamente, ya que tiene una distribución lineal que alcanza sus máximos en los extremos. No obstante, se ha supuesto que el momento es transmitido solamente a través de estos nodos porque de esta forma el diseño será más sencillo y además permanecerá más del lado de la seguridad.

3.2.1. Zapatas cuadradas

La fuerza que se aplica en cada nodo para simular el fuste dependerá de la posición del mismo. El peso del molino se distribuye entre todos por igual. Esto es así ya que bajo la torre existe una superficie metálica con el único propósito de hacer este reparto más uniforme. No ocurre esto para los esfuerzos relativos al momento.

La figura 3.3 muestra una idea de cómo sería la distribución. En ella se puede apreciar que existen tres tipos diferentes de fuerzas.

- El tipo 1 de fuerzas corresponde al peso del molino. La fuerza en cada punto se conoce dividiendo el peso entre el número de nodos. Estas fuerzas actúan comprimiendo la zapata. Es negativa debido a la dirección en que actúa la gravedad.

$$Tipo\ 1 = -\frac{Peso}{nodos}$$

- El tipo 2 de fuerzas corresponde a la parte de tracción que surge al aplicar el momento, hay que añadirle también las fuerzas de tipo 1 que trabajan en dirección opuesta. Pese a ello, la fuerza creada por el momento es muy superior a la del peso, por lo que esta zona está traccionada.

$$Tipo\ 2 = \frac{Momento}{nodos\ laterales \cdot brazo} + Tipo\ 1$$

- El tipo 3 de fuerzas corresponde a la parte de compresión que surge al aplicar el momento, se suma con las fuerzas de tipo 1 debido a que trabajan en el mismo sentido. Es por ello que esta zona es la más cargada.

$$Tipo\ 3 = -\frac{Momento}{nodos\ laterales \cdot brazo} + Tipo\ 1$$

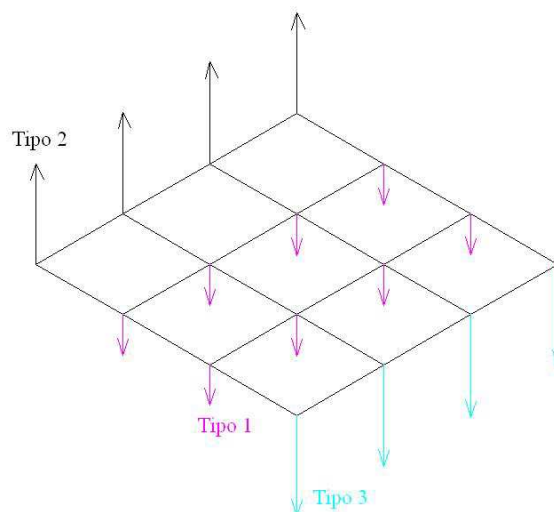


Figura 3.3 Distribuciones de la fuerza.

3.2.2. Zapatas circulares

Análogamente al anterior apartado, la fuerza en cada nodo variará en función de su posición. Sin embargo en esta ocasión, debido a que el área alrededor de cada nodo no es uniforme las componentes de la fuerza serán más heterogéneas.

Los esfuerzos debidos al peso cambian en cada hilera de nodos por el cambio de área. Las fuerzas que simulan el momento varían para cada nodo debido a que la longitud del brazo cambia dependiendo del punto.

Para el cálculo de las fuerzas relativas al peso, inicialmente se parte de la fuerza que se crea bajo el fuste debido al reparto del peso entre la sección del mismo de la siguiente forma:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Una vez se conoce σ se multiplica por el área proporcional encima de cada nodo A_i .

$$F_i = \sigma \cdot A_i$$

Las áreas son las que se han calculado previamente para el cálculo del módulo de balasto. La única diferencia es que para los nodos de la fila exterior, el área será la mitad que la del módulo de balasto ya que en este caso esta fila es la exterior, por lo que los nodos no están completamente rodeados. Esto mismo ocurriría con los nodos laterales para el cálculo del módulo de balasto.

Para calcular la fuerza aplicada en cada nodo de la hilera exterior que simulará el momento flector se hará del siguiente modo:

Se parte del valor del momento que transmite la torre a la cimentación por lo que se puede asumir que:

$$M = \sum F_i \cdot d_i$$

Donde M es el momento que ya conocemos, F_i es la fuerza en cada nodo de la hilera exterior y d_i es el brazo de cada nodo.

Hay que encontrar la manera de expresar la anterior expresión de manera que podamos despejar directamente F_i : Para ello hay que poder expresar la distancia del brazo.

$$d_i = R \cdot \cos \alpha_i$$

R corresponde al radio de la hilera en la que estamos aplicando el momento, α_i es el ángulo que se emplea para indicar el cambio de nodo a lo largo de la hilera.

Como la distribución de las fuerzas se hace de forma lineal, se puede asumir que se cumple lo siguiente:

$$\frac{F_{max}}{R} = \frac{F_i}{d_i} = \frac{F_i}{R \cdot \cos \alpha_i}$$

De la anterior fórmula se despeja que:

$$F_i = F_{max} \cdot \cos \alpha_i$$

Volviendo a la fórmula inicial y haciendo las pertinentes sustituciones gracias a las conclusiones a las que se ha llegado:

$$M = \sum F_i \cdot d_i = \sum F_{max} \cdot \cos \alpha_i \cdot R \cdot \cos \alpha_i = F_{max} \cdot R \cdot \sum (\cos \alpha_i)^2$$

Despejando quedará finalmente:

$$F_{max} = \frac{M}{R \cdot \sum (\cos \alpha_i)^2}$$

El sumatorio del coseno al cuadrado se calcula iterando mediante Excel. Una vez se ha determinado se despeja F_{max} y se aplica la siguiente ecuación para conocer la componente de fuerza en cada nodo en función del ángulo:

$$F_i = F_{max} \cdot \cos \alpha_i$$

Lo que se hace es iterar la anterior ecuación mediante la hoja de cálculo para conocer todos los valores de la fuerza en cada nodo relativa al momento. Una vez que se conocen se les ha de sumar la parte relativa al peso propio del molino.

Finalmente la distribución de fuerzas quedará como muestra la figura 3.4. Las componentes pintadas en magenta corresponden a los esfuerzos tipo 2, creados por el momento y el peso

propio. Las componentes en verde son las fuerzas tipo 1, son solo relativas al peso propio y repartidas a lo largo de toda la base mediante la base metálica que antes se ha mencionado.

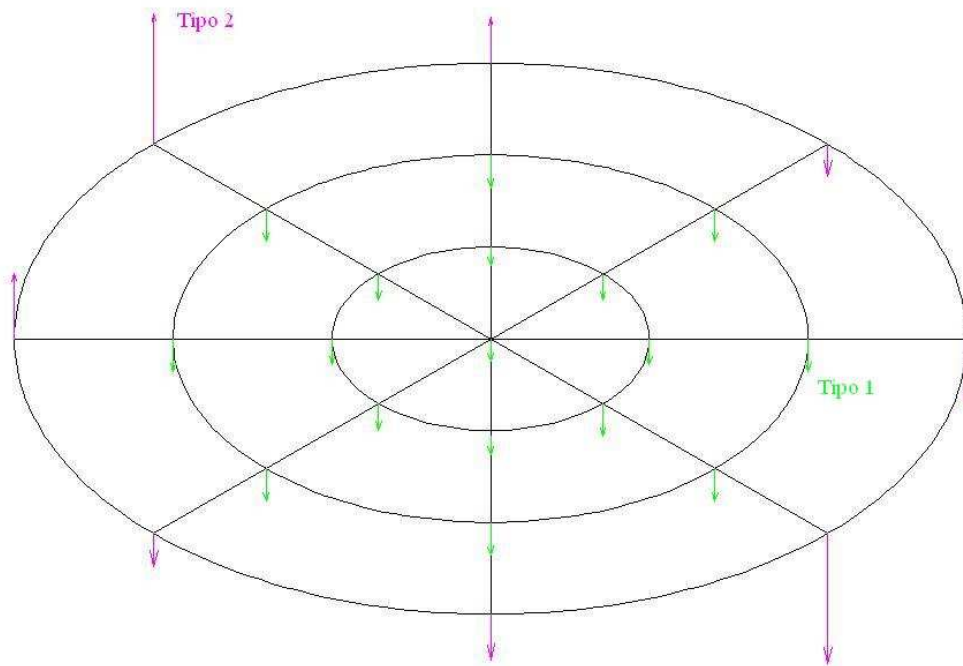


Figura 3.4 Distribuciones de la fuerza.

El último cálculo que habrá que realizar de manera previa mediante EXCEL servirá para saber el nombre y posición de cada nodo inferior de la zapata ya que, es aquí donde se aplican las reacciones. Así pues será de vital importancia conocer la posición de cada uno de cara a poder conocer el momento flector que sufre la zapata en el punto crítico. Esto se ve de manera más clara en la figura 3.5.

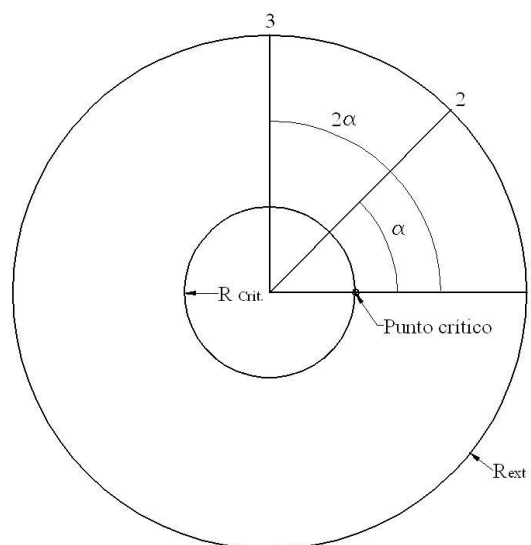


Figura 3.5 Posición y etiqueta de nodos en la base.

Los puntos 1, 2 y 3 emulan los nodos de una hilera. Como puede apreciarse hay una distancia diferente de cada uno al punto crítico. Es por eso que la fuerza aplicada en cada uno ejercerá un momento flector diferente en el punto crítico.

Para conocer la distancia hay que tener en cuenta que sólo interesa el brazo de cada punto en torno a X, no la distancia absoluta, pues el momento sólo se aplica en una dirección. La fórmula empleada para conocer las distancias será:

$$d = R_{ext} \cdot \cos \alpha_i - R_{crit}$$

Con esta fórmula y numerando cada distancia obtenida con EXCEL se conocerán los brazos y el nodo al que corresponden.

4. MODELADO MEDIANTE NX I-DEAS

Para la realización de este estudio se han de crear previamente los modelos empleando el programa NX I-DEAS. Dicho análisis constará de dos configuraciones diferentes de zapatas. Un diseño cuadrado y otro circular. Las dimensiones de las mismas serán de 20 metros de canto y diámetro respectivamente.

Ambas estructuras se estudiarán para diferentes casos de grosor variando desde una zapata flexible de dos metros de espesor hasta un modelo ultra rígido de 4 metros. El incremento que se empleará es de 0,5 metros.

Una vez se conocen las dimensiones principales de cada zapata hay que estipular el tamaño de los elementos de la malla. Para las dimensiones en torno a las coordenadas X, Z se usará una longitud de 0,5 metros en el caso de la zapata cuadrada. La cimentación circular tendrá elementos de 0,5 metros en torno a la coordenada R , la coordenada θ variará su longitud, ya que el perímetro de cada hilera de nodos varía con el radio. No obstante se ha supuesto una longitud aproximada de 0,5 metros para el radio exterior, es por esto que cada hilera contendrá 128 elementos que se harán más estrechos conforme más se avance hacia el centro.

La coordenada Y en ambas configuraciones de zapata tendrá elementos de 0,25 metros de altura. Para esta dimensión la longitud es menor ya que interesa un comportamiento más realista. De este modo se podrá prever mejor el desplazamiento de los elementos o el levantamiento de la estructura cuando se le aplique un gran momento de vuelco.

La fuerza debido al peso del molino y el momento de vuelco también se conoce de antemano y será igual en ambas configuraciones. Estas tienen un valor de 5.000 kN y 100.000 kN·m respectivamente y corresponden al ELU (Estado límite último).

Las fuerzas debidas al peso y al momento de vuelco que se aplican en cada nodo se habrán calculado de antemano usando Excel.

La rigidez de los muelles para simular la dureza del terreno se calculará de manera previa teniendo en cuenta el área en torno a los nodos mediante EXCEL.

Los cálculos anteriormente mencionados relativos a la dureza del terreno y a la distribución de fuerzas se explican en el tercer apartado. Para llevarlos a cabo hay que tener en cuenta las dimensiones de la estructura y de los elementos así como el área en torno a cada nodo y la del fuste. Ya que ahora se conocen estas dimensiones, estos cálculos deben realizarse ahora, antes de hacer el modelo de elementos finitos.

Con respecto a las zapatas circulares, también habrá que generar la hoja de cálculo adicional con la que se sabrá cómo nombrar los nodos inferiores en función de su posición.

Otro aspecto común en ambas configuraciones es el material, se empleará un hormigón HA-30. Posteriormente, en el siguiente apartado, se explicarán los cálculos para determinar la armadura de refuerzo y las comprobaciones de la estructura.

Los procedimientos para crear los modelos de elementos finitos se explicarán de manera más detallada en el Anexo 1

4.1. Zapatas cuadradas

Para el modelado mediante I-DEAS de las zapatas cuadradas se partirá inicialmente de un cubo de las dimensiones 20x4x20 metros. Para construirlo se usará el catálogo de partes, pues permite crear exactamente el bloque que se necesita.

Posteriormente se procederá creando una malla cuyos elementos tengan las dimensiones antes mencionadas (0,5x0,25x0,5 metros) por lo que habrá 40x16x40 elementos. La figura 4.1 muestra el aspecto de la malla.

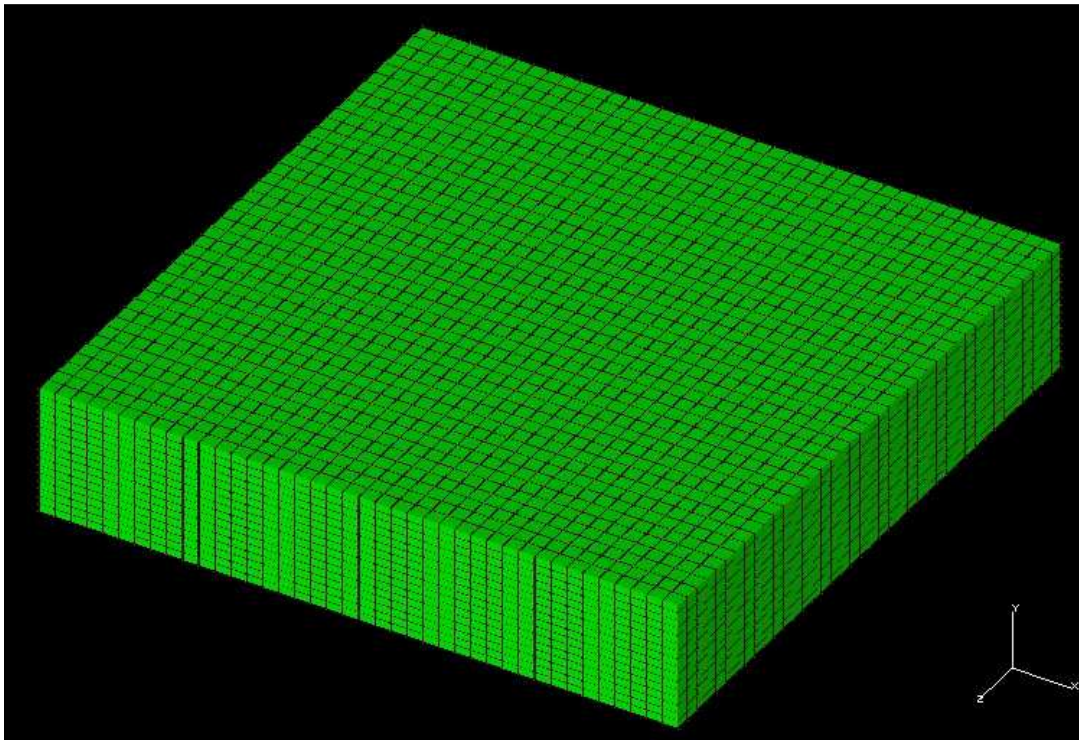


Figura 4.1 Mallado de la zapata cuadrada.

Una vez se ha realizado el mallado del bloque se debe copiar un nodo de una de las esquinas dos veces hacia abajo con intervalos de 0,5 metros. En el intervalo situado más cerca de la malla se colocará un elemento SPRING, que simula el comportamiento del suelo. En el otro hueco que ha quedado más abajo se colocará un elemento GAP, un tope. Estos toques se colocan para que cuando la zapata se levante del suelo, los muelles no puedan actuar

sujetándola de manera que el despegue no esté impedido. Una vez se ha definido este conjunto de elementos SPRING-GAP hay que copiarlos a lo largo de toda la superficie inferior de manera que haya uno bajo cada nodo. La manera más rápida de hacer esto consiste en copiar el primer conjunto a lo largo de toda la arista. Una vez hecho eso, se copiará toda la hilera de elementos SPRING-GAP a lo largo del resto de la zapata. El resultado se muestra en la figura 4.2.

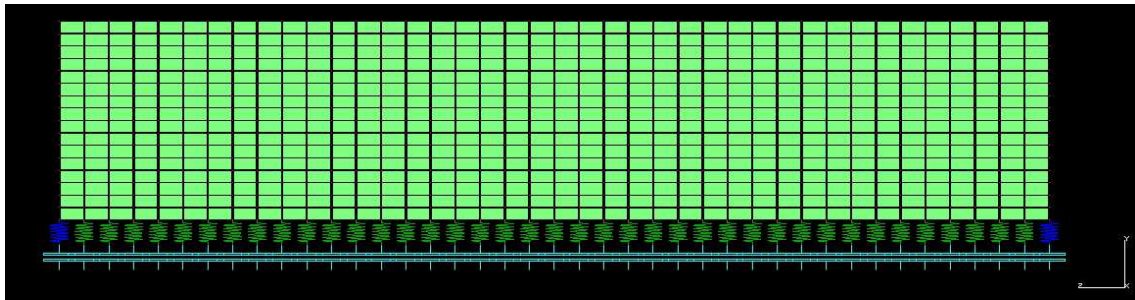


Figura 4.2 Muelles bajo la zapata cuadrada.

Ahora es el momento de imponer la rigidez de los muelles para simular el terreno mediante el módulo de balasto. Como se ha explicado en el tercer apartado, la rigidez de los muelles depende del tipo de suelo que se quiera simular y del área proporcional encima de cada nodo. De este modo se obtendrán nueve tipos diferentes de K_x .

Multiplicando por el área de cada tipo de nodo se obtienen los siguientes coeficientes de rigidez:

	INTERIOR	LATERAL	ESQUINA	
Terreno duro	1,00E+07	5,00E+06	2,50E+06	N/m
Terreno medio	5,00E+06	2,50E+06	1,25E+06	N/m
Terreno blando	2,50E+06	1,25E+06	6,25E+05	N/m
Área proporcional	0,25	0,125	0,0625	m ²

Tabla 4.1

Será necesario tener en cuenta el modelo que se esté haciendo para simular correctamente el terreno. También es importante definir los muelles con comportamiento uniaxial, de otro modo el modelo dará errores y no convergerá posteriormente.

El siguiente paso consiste en imponer las condiciones de contorno. Esto incluye el peso propio del hormigón, la definición de la zapata como simétrica y las imposiciones de los movimientos de los nodos.

Para imponer el peso propio basta con definir la aceleración de la gravedad y la dirección en que actúa, junto con la densidad del hormigón.

Para concretar el plano de simetría de la zapata habrá que seleccionar todos los nodos de la malla situados en el plano central que divide la malla.

Los nodos inferiores, en los que se apoya toda la estructura, se impondrán como empotrados. Al conjunto de nodos entre los muelles y los separadores se les restringirán todos los movimientos salvo los verticales (eje Y). De este modo se permitirá el levantamiento al aplicar las fuerzas. La última restricción consiste en limitar los nodos de la arista inferior en torno a la cual giraría la zapata si en un hipotético caso volcara debido a la acción del momento. Para conseguir esto basta con imponer como fijos los desplazamientos en torno a X.

Las condiciones de apoyo se muestran en la figura 4.3.

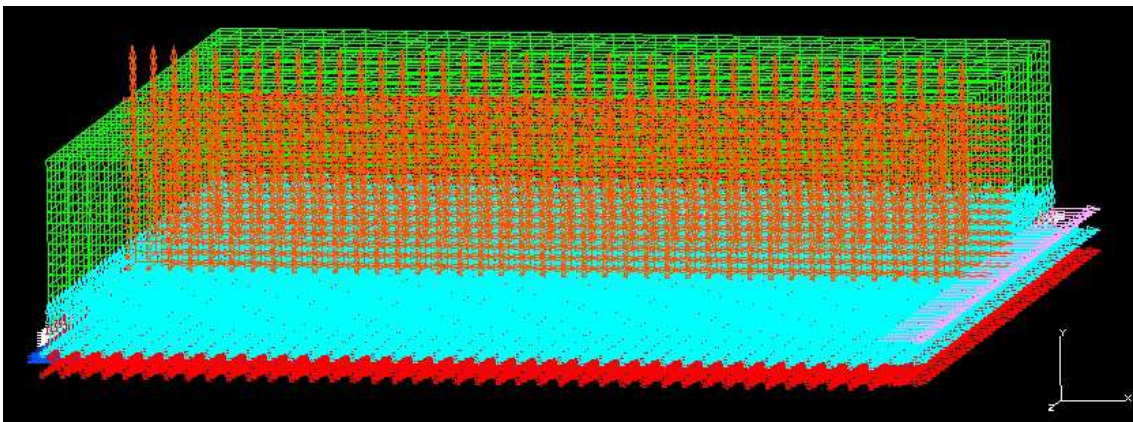


Figura 4.3 Condiciones de contorno de la zapata cuadrada.

Los empotramientos se han pintado de rojo. La restricción entre el muelle y el separador es de color azul. Los nodos inferiores que permiten el movimiento vertical de la zapata son los rosas. Por último, la condición de simetría se representa con el color naranja.

A continuación será necesario introducir las cargas que actúan sobre la zapata. Las cargas en cada nudo se han calculado como explica el tercer apartado. La tabla 4.2 muestra los valores de cada hilera de nodos en función de la posición.

TIPO 1	-61,7283	kN
TIPO 2	5493,8271	kN
TIPO 3	-5617,2839	kN

Tabla 4.2

- Las fuerzas “TIPO 1” corresponden a la fuerza que hay que aplicar para representar el peso propio de la estructura.

- Las fuerzas “TIPO 2” corresponden a la componente que tracciona el hormigón al aplicar el momento. Se le ha restado el peso propio.
- Las fuerzas “TIPO 3” corresponden a la componente que comprime el hormigón al aplicar el momento. Se le ha añadido el peso propio.

De este modo las fuerzas quedan representadas en la zapata como muestra la figura 4.4

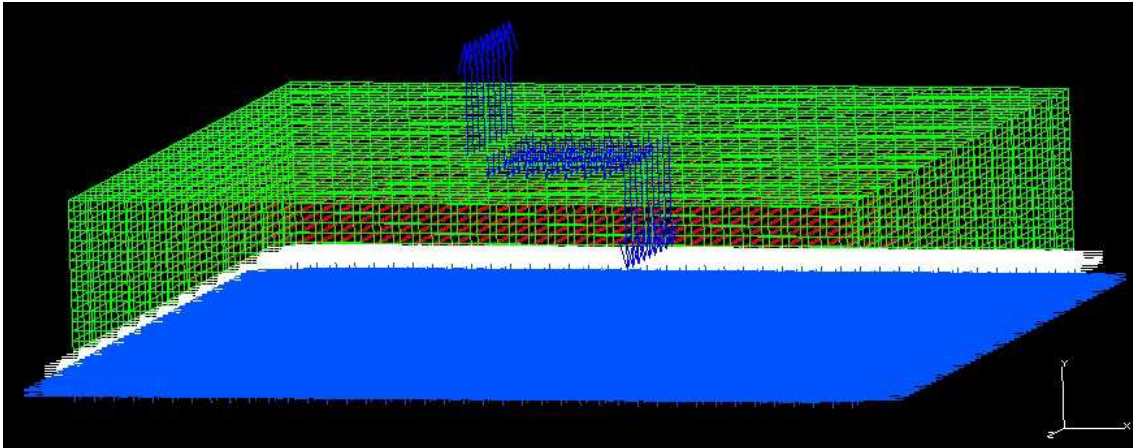


Figura 4.4 Representación de las fuerzas en la zapata cuadrada.

El siguiente paso será crear una “Solution Set” y exportar el archivo .INP, archivo que ABAQUS procesará.

Para crear el resto de modelos sólo es necesario suprimir los elementos de dos hileras de elementos intermedios de la zapata en el plano XZ. Lo único que varía es el espesor. Las cargas y condiciones de contorno son iguales en cada. Luego se volverán a unir ambas partes de las mallas. Una vez se ha hecho este paso se volverá a exportar el .INP de la nueva malla.

4.2. Zapatas circulares

El modelado mediante I-DEAS de las zapatas circulares partirá inicialmente de un plano de las dimensiones 10x4 metros. Para construirlo se usará el catálogo de partes ya que permite crear de manera sencilla dicha superficie.

Posteriormente se procederá creando una malla de elementos planos (Tipo SHELL) con unas dimensiones de 0,5x0,25. De este modo habrá 20 elementos a lo largo del radio y 16 de altura. La zapata se obtendrá mediante la revolución de esta superficie, no sin antes mencionar que al ejecutar esta operación se definirán los elementos revolucionados como sólidos. Se harán un total de 128 divisiones. De este modo se obtendrá una malla como la que muestra la figura 4.5.

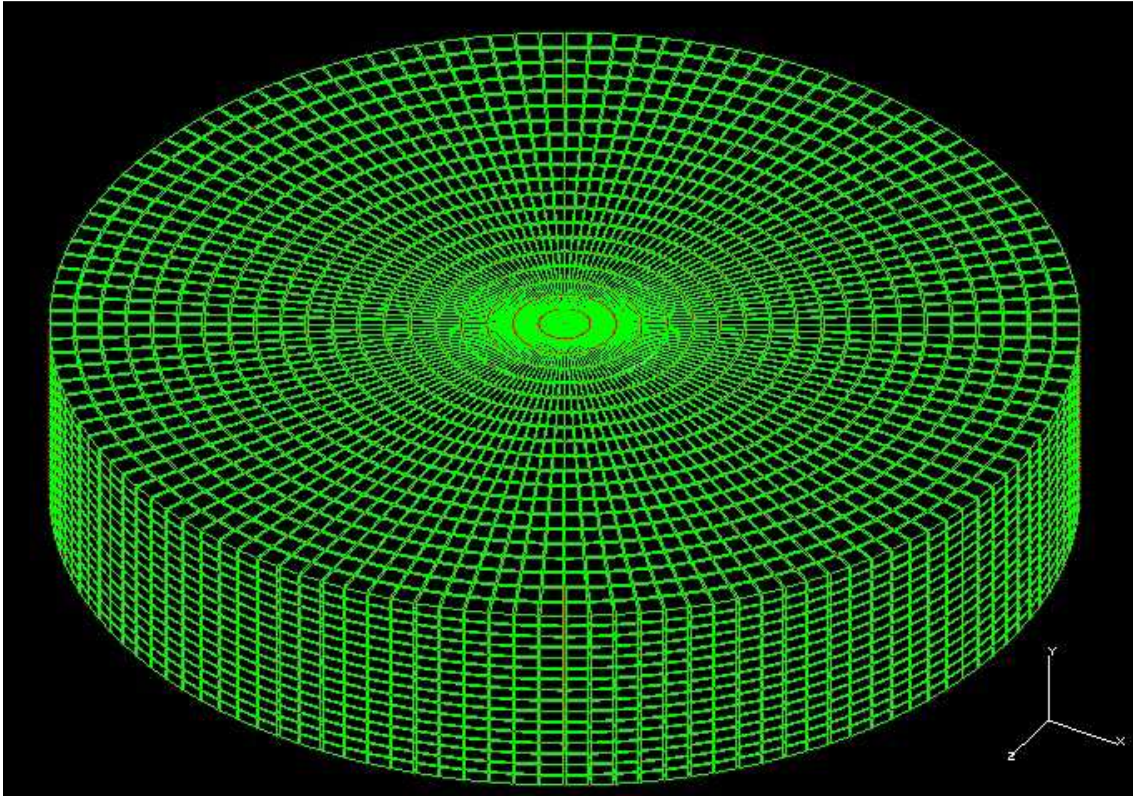


Figura 4.5 Mallado de la zapata circular.

Una vez se ha creado la malla cilíndrica hay que simular el suelo. Se debe copiar un nodo del radio exterior dos veces hacia abajo con intervalos de 0,5 metros. Como antes, se colocarán un elemento SPRING (muelle) y un elemento GAP (tope). Así se puede imponer la rigidez del suelo y, en caso de despegue, el muelle no actuará.

Este conjunto habrá que copiarlo primero a lo largo del radio. Después se copiará toda la hilera revolucionándola bajo la zapata un total de 128 veces. De esta forma el terreno estará simulado. La figura 4.6 muestra lo que se debe obtener.

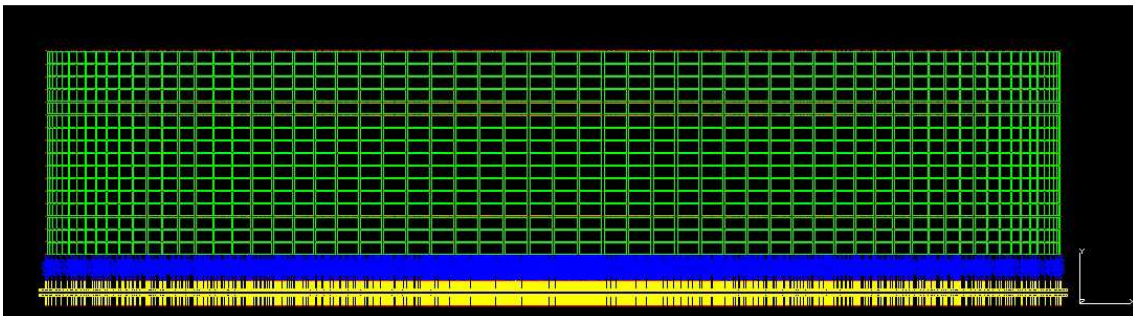


Figura 4.6 Muelles bajo la zapata circular.

Antes de continuar con nada, es necesario suprimir los elementos redundantes que se han generado al modelizar la zapata circular. Estos elementos son: la malla de elementos planos

de cuya revolución se ha creado la zapata y los conjuntos MUELLE-GAP que se han copiado unos encima de otros, por ejemplo en el caso del nodo central hay 128.

Con estos elementos borrados es el momento de definir las propiedades del suelo.

Nuevamente la rigidez de los muelles dependerá del tipo de suelo que se quiera simular y del área proporcional encima de cada nodo. Habrá múltiples coeficientes de rigidez K_x ya que el área proporcional sobre cada nodo varía con el radio. La tabla 4.3 muestra las diferentes rigideces de los anillos de muelles. La numeración de cada hilera crece conforme aumenta el radio.

Anillo Muelles	Área proporcional	DURO	MEDIO	BLANDO
1	0,0015	61359,2	30679,6	15339,8
2	0,0123	490873,9	245436,9	122718,5
3	0,0245	981747,7	490873,9	245436,9
4	0,0368	1472621,6	736310,8	368155,4
5	0,0491	1963495,4	981747,7	490873,9
6	0,0614	2454369,3	1227184,6	613592,3
7	0,0736	2945243,1	1472621,6	736310,8
8	0,0859	3436117,0	1718058,5	859029,2
9	0,0982	3926990,8	1963495,4	981747,7
10	0,1104	4417864,7	2208932,3	1104466,2
11	0,1227	4908738,5	2454369,3	1227184,6
12	0,1350	5399612,4	2699806,2	1349903,1
13	0,1473	5890486,2	2945243,1	1472621,6
14	0,1595	6381360,1	3190680,0	1595340,0
15	0,1718	6872233,9	3436117,0	1718058,5
16	0,1841	7363107,8	3681553,9	1840776,9
17	0,1963	7853981,6	3926990,8	1963495,4
18	0,2086	8344855,5	4172427,7	2086213,9
19	0,2209	8835729,3	4417864,7	2208932,3
20	0,2332	9326603,2	4663301,6	2331650,8
21	0,1212	4847379,3	2423689,6	1211844,8
	m ²	N/m	N/m	N/m

Tabla 4.3

Se seleccionarán los anillos conforme a su posición y se definirán las propiedades de cada grupo de muelles. Nuevamente destacar que los muelles sean uniaxiales. De esta forma el suelo estará modelado.

Análogamente al caso de las zapatas cuadradas, habrá que imponer las condiciones de contorno, son del mismo tipo: Peso propio, simetría y restricción de movimientos. Los grupos de nodos en los que se aplican son los mismos. La única diferencia es que a la hora de impedir el desplazamiento de los nodos inferiores en torno a X, solamente se limitará un nodo, esto es irrelevante ya que gracias a la condición de simetría quedará el movimiento perfectamente restringido. La figura 4.7 muestra el modelo.

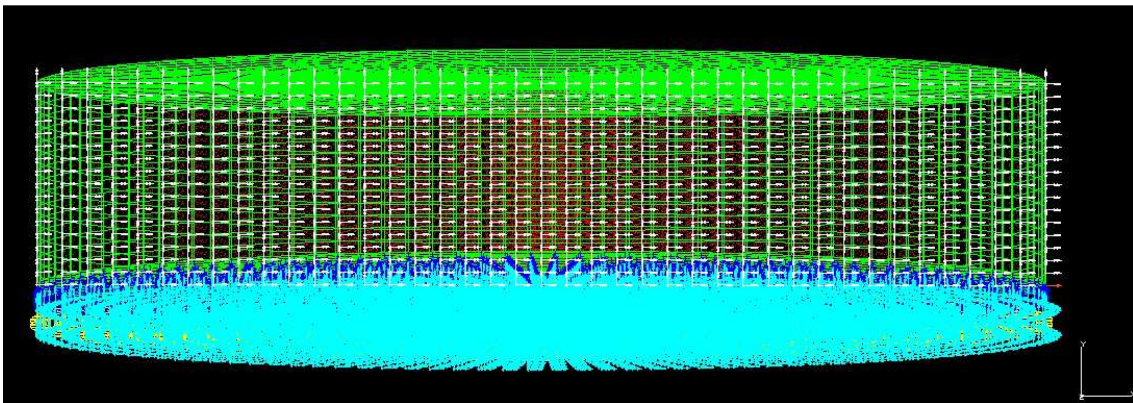


Figura 4.7 Condiciones contorno de la zapata circular.

Las condiciones de empotramiento y movimiento libre en Y de la parte inferior están coloreadas en azul. La restricción en torno a X está pintada en naranja, en la parte inferior derecha. El plano de simetría en torno a XY se ha representado en blanco.

Cargar esta zapata es algo más problemático debido al cambio de áreas ya mencionado, además, los momentos no actúan de igual modo. El brazo se va reduciendo conforme se recorre la circunferencia.

Lo primero son las fuerzas relativas al peso, sus valores conforme al radio se representan en la tabla 4.4. Sólo se indican los valores en las cuatro primeras filas. En la quinta actúan momento y peso y se indicarán sus valores más adelante.

FILA	RADIO	AXIL NUDO
1	0	-78125
2	0,5	-4882,81
3	1	-9765,62
4	1,5	-14648,43
	m	N

Tabla 4.4

En la quinta fila además del peso, actúa un momento que varía en función de la posición porque el brazo varía en torno a X. Se indican sólo 65 valores, la estructura es simétrica y dichos valores se introducirán por duplicado salvo las dos fuerzas situadas en el plano de simetría, que no tendrán su homónimo. Los valores se expresan en las tablas 4.5

NODO	ÁNGULO	FUERZA
1	0,00000	-790405,27
2	0,04909	-789464,22
3	0,09817	-786643,34
4	0,14726	-781949,42
5	0,19635	-775393,77
6	0,24544	-766992,19
7	0,29452	-756764,91
8	0,34361	-744736,57
9	0,39270	-730936,16
10	0,44179	-715396,91
11	0,49087	-698156,26
12	0,53996	-679255,75
13	0,58905	-658740,91
14	0,63814	-636661,16
15	0,68722	-613069,69
16	0,73631	-588023,34
17	0,78540	-561582,45
18	0,83449	-533810,71
19	0,88357	-504775,03
20	0,93266	-474545,36
21	0,98175	-443194,52

NODO	ÁNGULO	FUERZA
34	1,61988	29178,85
35	1,66897	67420,62
36	1,71806	105477,91
37	1,76715	143259,04
38	1,81623	180672,99
39	1,86532	217629,63
40	1,91441	254039,92
41	1,96350	289816,16
42	2,01258	324872,14
43	2,06167	359123,43
44	2,11076	392487,50
45	2,15984	424883,97
46	2,20893	456234,81
47	2,25802	486464,48
48	2,30711	515500,16
49	2,35619	543271,90
50	2,40528	569712,79
51	2,45437	594759,14
52	2,50346	618350,61
53	2,55254	640430,36
54	2,60163	660945,20

22	1,03084	-410798,04	55	2,65072	679845,71
23	1,07992	-377433,97	56	2,69981	697086,36
24	1,12901	-343182,69	57	2,74889	712625,61
25	1,17810	-308126,70	58	2,79798	726426,03
26	1,22718	-272350,47	59	2,84707	738454,36
27	1,27627	-235940,18	60	2,89616	748681,64
28	1,32536	-198983,54	61	2,94524	757083,23
29	1,37445	-161569,59	62	2,99433	763638,87
30	1,42353	-123788,46	63	3,04342	768332,79
31	1,47262	-85731,16	64	3,09251	771153,68
32	1,52171	-47489,39	65	3,14159	772094,73
33	1,57080	-9155,27		Radianes	N
	Radianes	N			

Tabla 4.5

Una vez aplicados los valores a cada nodo a lo largo los anillos se tendrá un modelo como el de la figura 4.8.

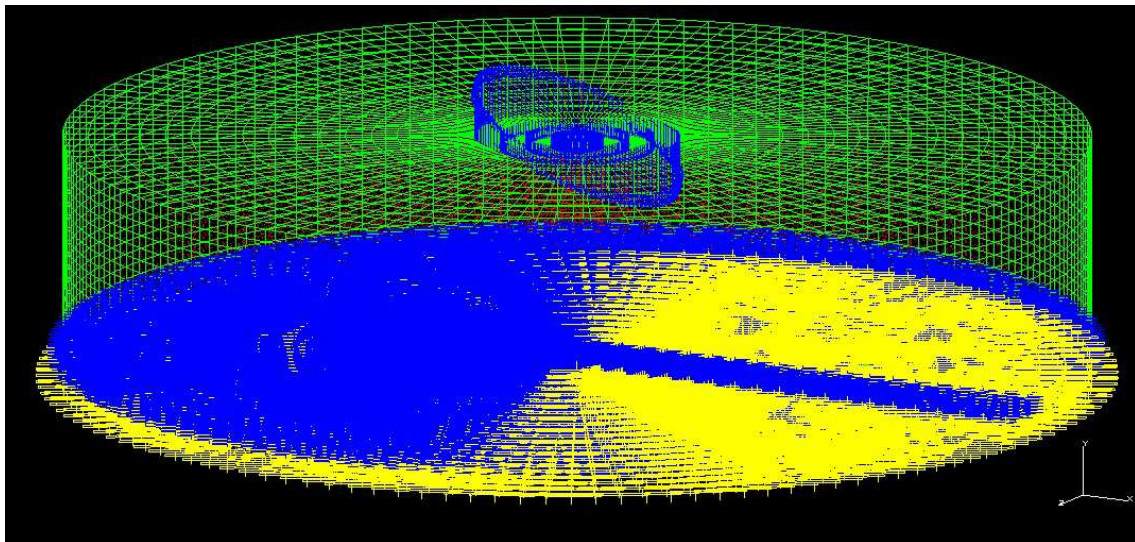


Figura 4.8 Representación de las fuerzas en la zapata circular.

Con todo esto el modelo ya estará completo. Se generará la solución y se exportará el .INP para su posterior cálculo en ABAQUS.

Crear el resto de modelos será de modo análogo a las zapatas cuadradas. Se borran dos filas de elementos en torno al plano XZ y se vuelven a unir. De esta manera se tendrá otra malla lista para exportar como .INP.

5. ANÁLISIS

El análisis consistirá en calcular las tensiones a lo largo del suelo y la zapata tras haber impuesto las cargas del peso propio y el momento de vuelco. Estos valores se necesitarán de cara a realizar una cimentación segura conforme a la normativa.

La distribución de presiones que contempla la norma corresponde a un tipo lineal, lo cual se ajusta bastante a la realidad para el caso de zapatas de pequeñas dimensiones. Para el caso de grandes estructuras como la cimentación de un aerogenerador, este modelo de distribución no sirve. La zapata tiene un comportamiento flexible y el reparto de tensiones bajo la estructura es del tipo no lineal. De ahí surge la necesidad de modelar una zapata que pueda emular este comportamiento para así poder estudiar la distribución de presiones.

Para la obtención de un modelo flexible ya se ha explicado que se puede optar por simular el terreno mediante muelles (método del coeficiente de balasto) o mediante elementos finitos, más certeros pero con coste computacional mucho más elevado. En el apartado cuarto ya se ha explicado que se opta por el coeficiente de balasto para el suelo y un modelo de elementos finitos para simular la zapata. Para el caso estudiado este sistema concuerda muy bien con los elementos finitos aportando resultados que no difieren de los que se obtendrían mallando el suelo situado por debajo de la zapata.

De acuerdo con lo visto, la distribución de tensiones se conocerá teniendo en cuenta que la tensión se relaciona directamente con el desplazamiento de cada nodo a través del coeficiente de rigidez K_x .

Hay que prestar especial atención al hecho de que, al tratarse de una zapata flexible, puede haber cierto levantamiento de la estructura en alguna zona. Esto provocará una nueva distribución de tensiones ya que se varía el área en que se reparten. Por esta razón el problema será del tipo no lineal.

Mediante ABAQUS se realizará un cálculo iterativo que proporcionará una solución convergente, en la cual se estudiarán las tensiones.

Inicialmente se parte de un archivo .INP que exporta I-DEAS como se ha explicado en el cuarto apartado. A este archivo habrá que realizarle una serie de modificaciones para su posterior procesado.

Una vez ABAQUS haya obtenido una solución que converja, se estará en posición de estudiar los esfuerzos en el terreno y la zapata para poder realizar las comprobaciones establecidas por la norma de cara a garantizar la seguridad. Estas operaciones consisten en el cálculo de la armadura de refuerzo y las verificaciones ante fallos producidos por punzonamiento y cortadura.

5.1. Archivo .INP

Inicialmente se parte del archivo .INP. A este archivo hay que realizarle una serie de cambios.

En función del suelo que se quiera estudiar habrá que variar la rigidez de los conjuntos de muelles. De esta manera se ahorra el tener que modelar cada suelo en I-DEAS con un coeficiente de K_x diferente. Esto no sería un gran problema en el caso de las zapatas cuadradas, pero ahorra mucho trabajo en el caso de las circulares, que poseen 21 grupos diferentes de muelles. Así se aprovecha el potencial de los archivos .INP. Por tanto solo será necesario imponer las rigideces una vez en I-DEAS, ya sea para el caso de suelo blando, medio o duro.

El coeficiente de fricción es algo que hay que alterar ya que, por defecto, es cero. La realidad es otra, por lo que habrá que imponer un coeficiente de 0,5.

Otra modificación importante consiste en aumentar el número de iteraciones que ABAQUS realizará, en un principio en el archivo hay 10. Hay que aumentar a 1000 ese número para garantizar una solución convergente. Si existe el programa parará antes de llegar a las 1000 iteraciones.

La última modificación necesaria consiste en añadir una orden para que se representen en un archivo de texto (.DAT) las reacciones en los empotramientos inferiores. Esta orden es la siguiente:

```
*NODE PRINT, NSET={El grupo de nodos empotrados en la base}
RF
*CONTACT PRINT
```

Los resultados obtenidos en ese archivo de texto servirán para calcular los esfuerzos del momento flector y el cortante en el punto crítico.

El Anexo 2 muestra un ejemplo de archivo .INP.

5.2. Procesado mediante ABAQUS

Como ya se ha indicado antes, una estructura tan grande como una zapata de aerogenerador sufre deformaciones por flexión al aplicarle una gran carga alterando la distribución de tensiones en el terreno. Una zapata que se flexiona puede permitir que parte de su base se desprende del suelo cuando se aplica un momento importante. Si ese fuera el caso, la carga del peso y el propio momento habría de repartirse en un área más pequeña. Por lo que se

tendría una nueva serie de condiciones que al aplicarse podrían o no permitir el levantamiento de una zona diferente a la de antes.

De ahí que surge la problemática de un cálculo no lineal y por el cual se emplea ABAQUS, pues permite realizar un cálculo iterativo hasta que se obtiene una solución convergente, es decir, se alcanza un equilibrio entre los levantamientos y las fuerzas en el terreno, de manera que la estructura permanece en equilibrio. La figura 5.1 muestra un ejemplo en el que se comparan los desplazamientos verticales con una zapata sin desplazamientos.

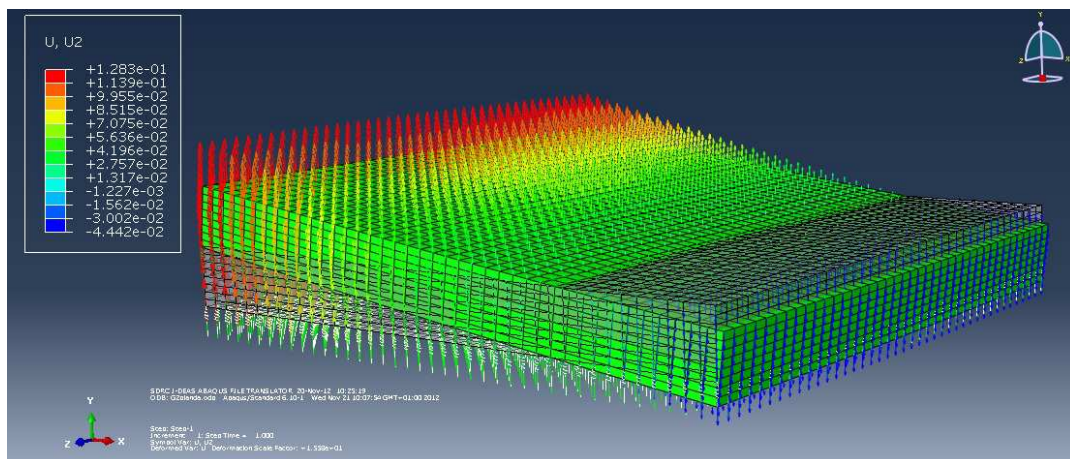


Figura 5.1 Despegue de la zapata

La figura 5.2 muestra el mapa de desplazamientos verticales.

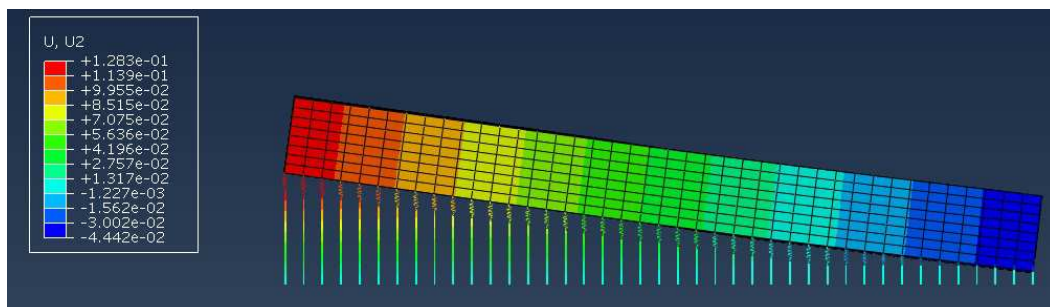


Figura 5.2 Despegue de zapata

5.3. Calculo del Momento flector y del esfuerzo cortante

Cuando ya se haya realizado la simulación del modelo mediante ABAQUS y se tenga una solución, hay que obtener las fuerzas que solicitan al punto crítico, aquel en que los esfuerzos actúen de manera más desfavorable. Este punto se sitúa bajo el fuste, en la zona en la que el peso propio y los esfuerzos creados por el momento se suman.

Para calcular dichas fuerzas hay que conocer las reacciones en cada punto de la base y la distancia (brazo del momento) que existe entre él y el punto crítico.

Las reacciones se obtienen tras el procesado. En el .INP se había programado la orden de escribir los esfuerzos de la base en un archivo .DAT. Se usará este archivo para esta tarea.

Los esfuerzos en la zona sobre la que se apoya la zapata son los únicos que nos interesan (Los positivos), de esta manera, para calcular estos esfuerzos hay que programar una columna de la hoja de cálculo con una orden booleana como se muestra a continuación:

$$\langle \text{Si}(\text{valor de la reacción} > 0; \text{valor de la reacción}; 0) \rangle$$

Tras haber obtenido los valores positivos se estará en posición de calcular los cortantes y los momentos flectores de la sección crítica.

Debido a la dirección de las cargas que solicitan a la zapata, no habrá fuerzas en torno al plano horizontal definido por las coordenadas XZ, solamente existirán esfuerzos verticales en torno a la coordenada Y.

5.3.1. Zapatas cuadradas

La figura 5.3 muestra cual es la zona de interés en la zapata cuadrada y cuál es la sección crítica.

Los valores de cortadura en estas zapatas se obtendrán al realizar la suma de los esfuerzos positivos verticales obtenidos previamente. Después habrá que restar la parte del peso de esa zona, la rayada.

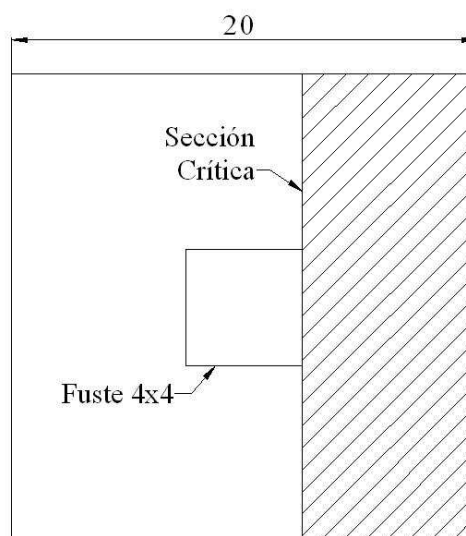


Figura 5.3 Zona apoyada zapata cuadrada

Como el fuste se sitúa en la mitad de la zapata y esta mide 20x20 metros, la zona rayada tendrá unas dimensiones de 20x8 metros. Para conocer el valor del peso hay que aplicar la siguiente fórmula:

$$\text{Peso} = \text{Área} \cdot \text{Profundidad} \cdot \text{Densidad hormigón} \cdot g$$

La profundidad varía en función de cada zapata (de 2m a 4m). La densidad del hormigón es de 2.500 Kg/m^3 y la constante de gravedad vale $9,8067 \text{ m/s}^2$.

Restando los valores se elabora la tabla 5.1, que indica las cortaduras en la sección crítica en función del suelo y la profundidad de la zapata.

	GROSOR (m)				
Cortante	2	2,5	3	3,5	4
BLANDO	16768,5	19710,4	22652,4	25594,4	28536,5
MEDIO	16768,4	19710,4	22652,4	25594,4	28536,4
DURO	16768,4	19710,4	22652,4	25594,4	28536,4
	kN	kN	kN	kN	kN

Tabla 5.1

Los valores de los esfuerzos de momento flector se calculan a base de multiplicar el esfuerzo en cada nodo por su distancia al punto crítico. El cálculo de la distancia al punto crítico no resulta complicado en este caso. I-DEAS nombra los nodos de manera consecutiva. Sabiendo que cada hilera tiene 41 elementos y que la variación es de 0,5 metros, el cálculo es relativamente sencillo de programar con una tabla EXCEL. El momento se calculará como:

$$M = \sum F_i \cdot d_i$$

Haciendo la autosuma de todos los momentos obtenidos a lo largo de los 1681 nodos se obtendrá el esfuerzo en la sección crítica. A este valor hay que restarle el momento creado por el peso de la estructura, este valor se calcula como:

$$\text{Momento} = \text{Área} \cdot \text{Profundidad} \cdot \text{Densidad hormigón} \cdot g \cdot \text{Distancia CDG}$$

Donde los valores son los mismos empleados antes, para el caso estudiado, el centro de gravedad (CDG) se sitúa en la mitad del área rayada. A 4 metros.

La tabla 5.2 muestra los momentos flectores en la sección crítica:

Flector	GROSOR (m)				
	2	2,5	3	3,5	4
BLANDO	119391,2	102112,6	90561,6	84450,2	81173,1
MEDIO	119390,7	102043,7	90158,5	83993,2	80819,8
DURO	119390,9	101943,2	89458,1	83140,3	80135,6
	kN.m	kN.m	kN.m	kN.m	kN.m

Tabla 5.2

5.3.2. Zapatas circulares

La figura 5.4 muestra cual es el punto de interés en la zapata circular y cuál es la zona crítica. Análogamente al anterior apartado, los valores de cortadura en estas zapatas se obtendrán al realizar la suma de los esfuerzos positivos verticales obtenidos previamente. Después habrá que restar la parte del peso de la zapata de esa zona. La zona rayada.

El cálculo del área se ha realizado empleando las siguientes fórmulas:

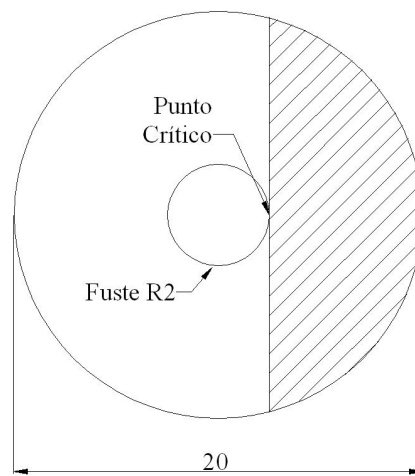
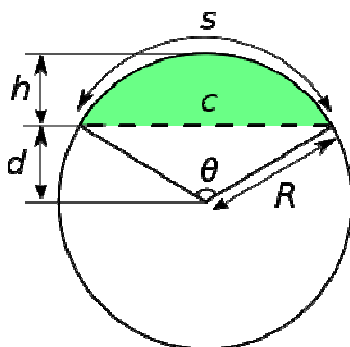


Figura 5.4 Zona apoyada zapata circular



$$\text{Área} = \frac{R^2}{2} \cdot (\theta - \sin \theta)$$

$$\theta = 2 \cdot \cos^{-1} \frac{d}{R}$$

$$C = 2 \cdot R \cdot \sin \frac{\theta}{2}$$

El radio R de la circunferencia tiene un valor de 10 metros. La distancia d es el radio del fuste, por tanto será de 2 metros.

El peso de esa sección, necesario para el cálculo se obtendrá como:

$$\text{Peso} = \text{Área} \cdot \text{profundidad} \cdot \text{Densidad hormigón} \cdot g$$

El área se calcula mediante las fórmulas ya expuestas y posee un valor de $117,348 \text{ m}^2$. Las profundidades varían con cada zapata. El hormigón tendrá la misma densidad que en el caso de las cuadradas, 2.500 Kg/m^3 . La gravedad también tampoco cambia.

Los valores de cortadura se obtienen a base de restar las reacciones positivas con el peso, dando lugar a la tabla 5.3.

	GROSOR (m)				
Cortante	2	2,5	3	3,5	4
BLANDO	14644,1	17055,2	19466,2	21877,3	24288,3
MEDIO	14644,1	17055,2	19466,2	21877,3	24288,3
DURO	14644,1	17055,2	19466,2	21877,2	24288,1
	kN	kN	kN	kN	kN

Tabla 5.3

Los valores de los esfuerzos de momento flector se calculan a base de multiplicar el esfuerzo en cada nodo por su distancia al punto crítico. El cálculo de la distancia al punto crítico se ha realizado en una tabla EXCEL en el que se conocen las etiquetas de cada punto en función de su distancia. Multiplicando los múltiples brazos por cada fuerza y sumándolos se calculan los momentos en el punto crítico.

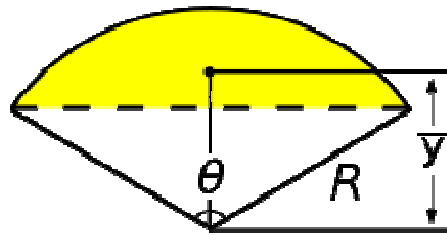
$$M = \sum F_i \cdot d_i$$

Al hacer la suma de todos los momentos obtenidos a lo largo de los 2561 nodos se obtiene el momento total. A este valor hay que restarle el momento creado por el peso de la estructura, este valor se calcula como:

$$\text{Momento} = \text{Área} \cdot \text{Profundidad} \cdot \text{Densidad hormigón} \cdot g \cdot \text{Distancia CDG}$$

La distancia al centro de gravedad de un segmento circular al centro de la propia circunferencia se calcula como:

$$\bar{y} = \frac{4 \cdot R \cdot (\sin \theta / 2)^3}{3 \cdot (\theta - \sin \theta)}$$



Resultando CDG=7,1295m. A este resultado hay que restarle el radio del fuste (2 metros) para tener la separación entre el punto crítico y el CDG. De esta manera el brazo del momento creado por el peso valdrá 5,1295 metros. Con este valor se podrán obtener los valores del momento flector, que se muestran en la tabla 5.4 a continuación.

	GROSOR (m)				
Flector	2	2,5	3	3,5	4
BLANDO	34940,5	29167,0	25138,3	21898,0	19071,5
MEDIO	34474,6	28746,3	24863,9	21725,2	18957,7
DURO	33725,3	27973,3	24339,2	21390,8	18736,5
	kN.m	kN.m	kN.m	kN.m	kN.m

Tabla 5.4

Como conclusión de este análisis puede decirse que la dureza del terreno no influye en gran medida en los esfuerzos de cortadura o momentos flectores. El factor más influyente es sin duda el grosor de la zapata.

5.4. Distribución de tensiones en el terreno

Las tensiones en el terreno se determinarán a través de los desplazamientos y el balasto a través de la formula:

$$K_b = \frac{\sigma}{\delta}$$

Los desplazamientos se ya se han calculado al realizar el cálculo mediante ABAQUS. Se conocerán estos valores visualizando los desplazamientos en torno a Y de los elementos inferiores de la zapata.

La parte que más interesa será obviamente la de la tensión máxima, ya que, si el terreno plastifica en alguna zona será primero ahí. Por tanto, si el terreno cumple los requerimientos de esta zona, el suelo será válido.

Los Anexos 4 y 5 contienen las imágenes de los desplazamientos para cada configuración.

5.4.1. Zapata cuadrada

Los desplazamientos de la zapata en cada tipo de suelo se muestran en la tabla 5.5. Surgen del análisis con ABAQUS, un ejemplo de estas imágenes es la figura 5.5 que corresponde a una zapata de 2,5 metros de grosor en terreno duro. La zona azul es la que interesa pues es la que se hunde en el terreno. Las partes rojas son irrelevantes pues no hacen contacto con el suelo.

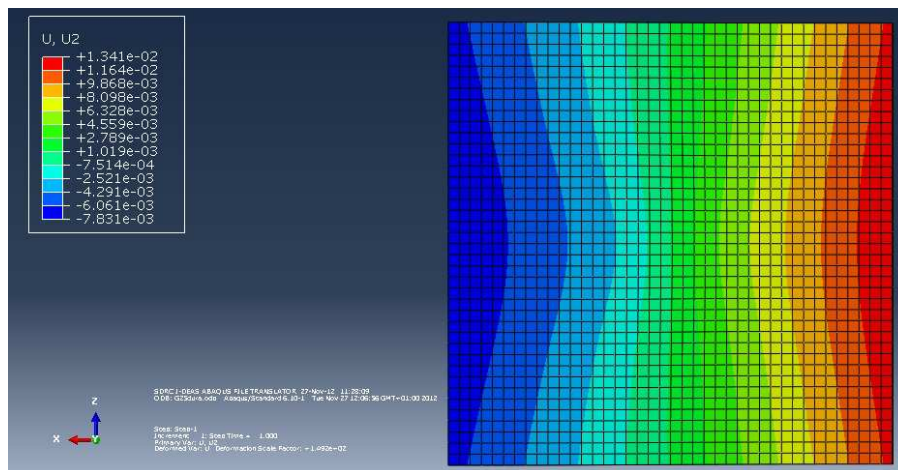


Figura 5.5 Distribución de Tensión/desplazamientos zapata cuadrada

δ	GROSOR(m)				
	2	2,5	3	3,5	4
BLANDO	4,44	3,072	2,734	2,66	2,685
MEDIO	2,26	1,548	1,367	1,327	1,341
DURO	1,162	0,7831	0,6827	0,6608	0,6684
	cm	cm	cm	cm	cm

Tabla 5.5

La tabla 5.6 representa el valor de las máximas tensiones en cada configuración. Se han obtenido multiplicando el balasto de cada tipo de terreno por el desplazamiento.

	GROSOR(m)				
σ	2	2,5	3	3,5	4
BLANDO	444	307,2	273,4	266	268,5
MEDIO	452	309,6	273,4	265,4	268,2
DURO	464,8	313,24	273,08	264,32	267,36
	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa

Tabla 5.6

5.4.2. Zapata circular

Los desplazamientos de la zapata en cada tipo de suelo se muestran en la tabla 5.7. Un ejemplo de distribución de estos desplazamientos es la figura 5.6 que ilustra el caso de una zapata de 2,5 metros sobre terreno duro.

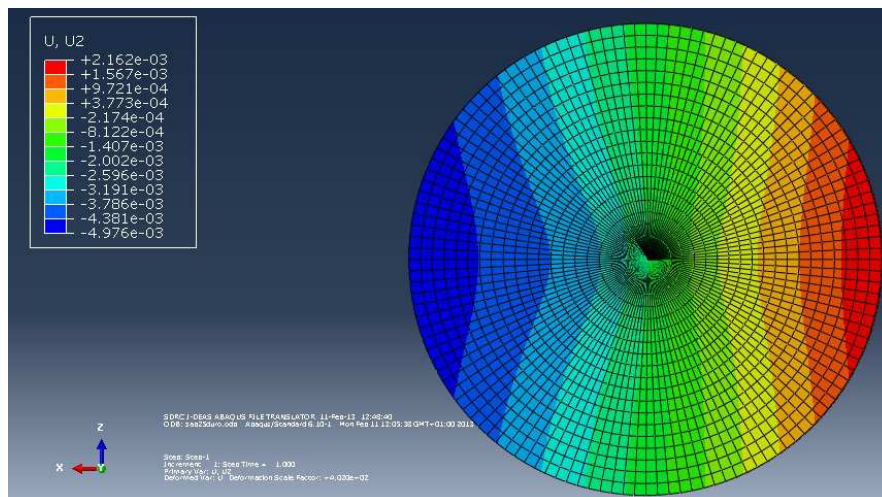


Figura 5.6 Distribución de Tensión/desplazamientos zapata circular

	GROSOR(m)				
δ	2	2,5	3	3,5	4
BLANDO	2,159	2,132	2,193	2,289	2,402
MEDIO	1,04	1,041	1,082	1,135	1,195
DURO	0,4858	0,4976	0,5265	0,5584	0,5913
	cm	cm	cm	cm	cm

Tabla 5.7

La tabla 5.8 indica el valor de las máximas tensiones en cada configuración. Se han obtenido multiplicando el balasto del cada tipo de terreno por el desplazamiento.

σ	GROSOR(m)				
	2	2,5	3	3,5	4
BLANDO	215,9	213,2	219,3	228,9	240,2
MEDIO	208	208,2	216,4	227	239
DURO	194,32	199,04	210,6	223,36	236,52
	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa

Tabla 5.8

5.5. Cálculo de la armadura de refuerzo

La armadura de refuerzo es un emparrillado que se coloca en la parte inferior con objeto de reforzar la estructura cuando esta trabaje a flexión.

La figura 5.7 muestra un ejemplo.

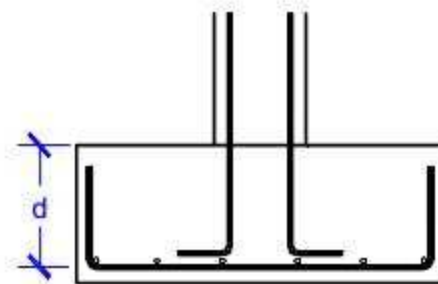


Figura 5.7 Esquema armadura de refuerzo

El cálculo de esta armadura está regido por el número de barras que hay que colocar en la parte inferior (n_b), la resistencia mecánica de estas barras (f_{yd}) y por la capacidad mecánica de toda la armadura (U_s).

Para conocer la capacidad mecánica de la armadura U_s es necesario conocer la capacidad mecánica del hormigón U_0 , el momento de cálculo M_d que solicita a la zapata y el canto útil de la misma (d). Estos datos se calcularán de la siguiente forma:

$$U_0 = f_{cd} \cdot b \cdot d$$

Donde f_{cd} es la resistencia de cálculo del hormigón y b es la anchura de la zapata en la sección crítica. f_{cd} Se calcula como:

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{30}{1.5} = 20MPa$$

Donde f_{ck} es la resistencia característica del hormigón (30Mpa) y γ_c es el coeficiente de minoración (1.5).

Para conocer el canto útil de la zapata d hay que restarle al canto de la zapata (h) la altura del recubrimiento inferior (d') y así queda:

$$d = h - d'$$

El último dato relevante para el cálculo de la capacidad mecánica es el momento de cálculo M_d este se calcula de la siguiente manera:

$$M_d = \gamma_f \cdot M_{total}$$

Donde M_{total} es el momento flector que existe en la estructura y que ya se ha calculado y γ_f es el coeficiente de mayoración con valor 1,5.

Con todos estos datos se obtendrá el valor de la capacidad mecánica de la armadura como:

$$U_s = U_0 \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot M_d}{U_0 \cdot d}}\right)$$

Ahora habrá que determinar el número de barras. Para ello hay que dividir la capacidad mecánica de la estructura entre la fuerza que puede soportar una barra. Después se toma la parte entera de ese número y se le añade 1 ya que no se puede dividir una barra para que el cálculo quede exacto.

La resistencia de cálculo del acero se obtiene como:

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = \frac{500}{1.15} = 434.78 MPa$$

Donde f_{yk} es la resistencia característica del acero (500MPa) y γ_s es el coeficiente de minoración (1,15).

Ahora es necesario saber cuánto puede soportar una barra. Por lo que se multiplicará la resistencia de cálculo por el área transversal. En el caso considerado se han tomado barras de 25 mm de diámetro.

$$Fuerza\ barra = Área \cdot f_{yd} = \frac{25^2 \cdot \pi}{4} \cdot 434.78 = 213.42KN$$

El número de barras necesario se obtiene dividiendo la capacidad mecánica de la armadura por la resistencia de cada barra de acero.

$$n_b = entero \left(\frac{U_s}{Fuerza\ barra} \right) + 1$$

Con todo lo anterior conocido se programará una tabla EXCEL para el cálculo del número de barras.

5.5.1. Zapatas cuadradas

En este apartado se muestran las tablas con los valores necesarios para el cálculo de la armadura.

	GROSOR(m)				
M_d	2	2,5	3	3,5	4
BLANDO	1,79E+08	1,53E+08	1,36E+08	1,27E+08	1,22E+08
MEDIO	1,79E+08	1,53E+08	1,35E+08	1,26E+08	1,21E+08
DURO	1,79E+08	1,53E+08	1,34E+08	1,25E+08	1,20E+08
	N.m	N.m	N.m	N.m	N.m

	GROSOR(m)				
U_s	2	2,5	3	3,5	4
BLANDO	1,01E+08	6,60E+07	4,78E+07	3,78E+07	3,15E+07
MEDIO	1,01E+08	6,60E+07	4,76E+07	3,76E+07	3,14E+07
DURO	1,01E+08	6,59E+07	4,72E+07	3,72E+07	3,11E+07
	N/m ²	N/m ²	N/m ²	N/m ²	N/m ²

	GROSOR(m)				
n_b	2	2,5	3	3,5	4
BLANDO	472	310	224	177	148
MEDIO	472	310	223	176	148
DURO	472	309	222	175	146
	Barras	Barras	Barras	Barras	Barras

5.5.2. Zapatas Circulares

En este apartado se exponen las tablas con todos los valores necesarios para el cálculo de la armadura.

	GROSOR(m)				
M_d	2	2,5	3	3,5	4
BLANDO	5,24E+07	4,38E+07	3,77E+07	3,28E+07	2,86E+07
MEDIO	5,17E+07	4,31E+07	3,73E+07	3,26E+07	2,84E+07
DURO	5,06E+07	4,20E+07	3,65E+07	3,21E+07	2,81E+07
	N.m	N.m	N.m	N.m	N.m

	GROSOR(m)				
U_s	2	2,5	3	3,5	4
BLANDO	2,81E+07	1,84E+07	1,31E+07	9,70E+06	7,35E+06
MEDIO	2,77E+07	1,81E+07	1,29E+07	9,62E+06	7,31E+06
DURO	2,71E+07	1,76E+07	1,27E+07	9,47E+06	7,22E+06
	N/m ²	N/m ²	N/m ²	N/m ²	N/m ²

	GROSOR(m)				
n_b	2	2,5	3	3,5	4
BLANDO	132	87	62	46	35
MEDIO	130	85	61	46	35
DURO	127	83	60	45	34
	Barras	Barras	Barras	Barras	Barras

5.6. Comprobación a Punzonamiento

El punzonamiento es un esfuerzo producido por tracciones en una pieza debidas a los esfuerzos tangenciales originados por una carga localizada en la superficie.

La comprobación en ambos casos de zapatas se realizará del mismo modo debido a la forma real del fuste.

Para su comprobación es esencial conocer el perímetro de punzonamiento (u_1) (figura 5.8) donde r es el radio del fuste, d es el canto útil de la zapata y R el radio crítico.

$$R = r + 2d$$

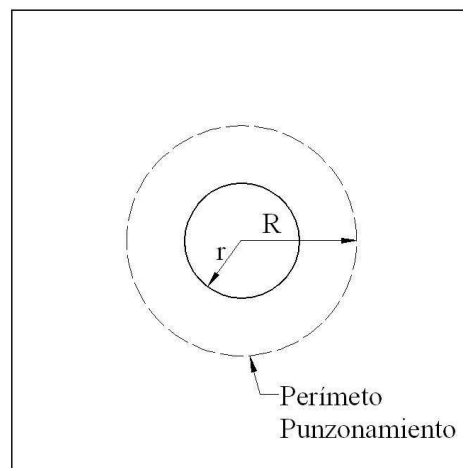


Figura 5.8 Esquema perímetro punzonamiento

Para que la zapata cumpla la normativa de la norma de debe establecer que:

$$\tau_{sd} \leq \tau_{rd}$$

Donde τ_{sd} es la tensión tangencial nominal de cálculo en el perímetro crítico y τ_{rd} es la tensión máxima resistente.

El cálculo de τ_{sd} se lleva a cabo mediante:

$$\tau_{sd} = \frac{F_{sd,ef}}{u_1 \cdot d}$$

$F_{sd,ef}$ Es el esfuerzo efectivo de punzonamiento de cálculo. Se calcula como:

$$F_{sd,ef} = \beta \cdot F_{sd}$$

En el que β es el coeficiente que tiene en cuenta el momento (vale 1,5) y F_{sd} es el esfuerzo de punzonamiento de cálculo expresado como:

$$F_{sd} = N \cdot \gamma_f = 5.000 \cdot 1.5 = 7500 \text{ kN}$$

Es el peso de la instalación (En el caso estudiado 5.000 kN) y expresa el coeficiente de mayoración, que posee un valor de 1,5.

De esta manera se calculará , la tensión tangencial nominal de cálculo. La tabla 5.9 muestra los valores para los distintos grosores de zapata.

		GROSOR (m)				
		2	2,5	3	3,5	4
τ_{sd}		0,162	0,110	0,079	0,060	0,047
		N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²

Tabla 5.9

Ahora hay que realizar los cálculos para la comprobación de τ_{rd} . Esta se expresa mediante la siguiente fórmula:

$$\tau_{rd} = \frac{0.18}{\gamma_c} \cdot \xi \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{cv})^{1/3}$$

ρ_l es la cuantía geométrica de la armadura (su área transversal total) y γ_c es un coeficiente de minoración de valor 1,5. f_{cv} es la resistencia efectiva del hormigón (30 MPa).

$$\xi = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0 \quad \text{Con } d \text{ expresado en mm}$$

Con los datos anteriores se calcula τ_{rd} cuyos valores para zapatas cuadradas se muestran en la tabla 5.10 a continuación.

		GROSOR (m)				
		2	2,5	3	3,5	4
τ_{rd}		140,786	119,072	104,688	95,246	88,569
		N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²

Tabla 5.10

Para las zapatas circulares τ_{rd} se muestran los valores en la tabla 5.11:

		GROSOR (m)				
		2	2,5	3	3,5	4
τ_{rd}		92,067	77,958	68,225	60,782	54,771
		N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²

Tabla 5.11

En ningún caso se sobrepasa el límite por lo que las zapatas están correctamente diseñadas ante esfuerzos de punzonamiento.

5.7. Comprobación cortadura

Como los valores de cortadura son prácticamente iguales en los tres tipos diferentes de suelo sólo se indicarán para el caso del suelo medio.

Para un correcto diseño a cortadura se debe cumplir que el cortante máximo multiplicado por un coeficiente de seguridad no supere a el que estipula la norma.

$$1,5 \cdot V \leq V_{u2}$$

El cálculo de los esfuerzos de cortadura ya se ha hecho en el apartado 5.3, donde se ve que los datos son muy parecidos cuando del grosor de la zapata se trata. Es por esto que sólo se calculará el caso del suelo blando, por ejemplo.

Para el caso de las zapatas cuadradas los cortantes multiplicados por el coeficiente se expresan en la tabla 5.12.

		GROSOR (m)				
		2	2,5	3	3,5	4
V BLANDO		2,52E+04	2,96E+04	3,40E+04	3,84E+04	4,28E+04
		kN	kN	kN	kN	kN

Tabla 5.12

En el caso de las zapatas circulares los valores están indicados en la tabla 5.13.

	GROSOR (m)				
	2	2,5	3	3,5	4
V BLANDO	2,20E+04	2,56E+04	2,92E+04	3,28E+04	3,64E+04
	kN	kN	kN	kN	kN

Tabla 5.13

El cálculo de V_{u2} se rige mediante la fórmula:

$$V_{u2} = \frac{0.18}{\gamma_c} \cdot \xi \cdot (100 \cdot \rho_1 \cdot f_{cv})^{1/3} \cdot b_0 \cdot d$$

ρ_1 es la cuantía geométrica de la armadura. Se calcula como:

$$\rho_1 = \frac{n_b \cdot \text{Seccion barra}}{b_0 \cdot d}$$

γ_c es un coeficiente de minoración de valor 1,5 y f_{cv} es la resistencia efectiva del hormigón (30 MPa).

$$\xi = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0 \quad \text{con } d \text{ expresado en mm}$$

Habiendo calculando los pertinentes coeficientes se expresan las capacidades máximas de esfuerzo cortante con una sola capa de armadura en la tabla 5.14.

	GROSOR (m)				
	2	2,5	3	3,5	4
V_{u2} Cuad(1 capa)	1,59E+04	1,57E+04	1,57E+04	1,59E+04	1,62E+04
V_{u2} Circu(1 capa)	1,03E+04	1,02E+04	1,01E+04	9,99E+03	9,86E+03
	kN	kN	kN	kN	kN

Tabla 5.14

Se puede ver que no cumple. Se opta por duplicar la armadura de flexión poniendo otra capa en la parte superior de la zapata. Los resultados se indican en la tabla 5.15.

	GROSOR (m)				
	2	2,5	3	3,5	4
V_{u2} Cuad(2 capas)	2,00E+04	1,98E+04	1,98E+04	2,00E+04	2,04E+04
V_{u2} Circu(2 capas)	1,29E+04	1,28E+04	1,27E+04	1,26E+04	1,24E+04
	kN	kN	kN	kN	kN

Tabla 5.15

Este caso seguiría sin cumplir con las especificaciones, es necesario aumentar la cuantía geométrica de la armadura. Esto se puede conseguir aumentando la sección de las barras de refuerzo de 25 mm de diámetro a 32 mm. La siguiente tabla muestra las capacidades máximas.

	GROSOR (m)				
	2	2,5	3	3,5	4
V_{u2} Cuad(2 capas) + AREA	2,36E+04	2,34E+04	2,33E+04	2,36E+04	2,40E+04
V_{u2} Circu(2 capas) + AREA	1,51E+04	1,50E+04	1,49E+04	1,47E+04	1,46E+04
	kN	kN	kN	kN	kN

Tabla 5.16

Se ve que en ningún caso se cumplen los requerimientos. De ahí que se tenga que optar por implantar una armadura de cortante, una opción más cara pero, para una zapata de tales dimensiones se ha demostrado que es más que necesario.

5.7.1. Cálculo armadura de cortante

Para poder obtener una zapata plenamente funcional de aerogenerador es necesario también armarla ante esfuerzos de cortadura. La figura 5.9 ilustra cómo es esta armadura. Se ha supuesto que hay dos capas de armadura de flexión. De esta manera el entramado de barras tiene una sujeción mejor.

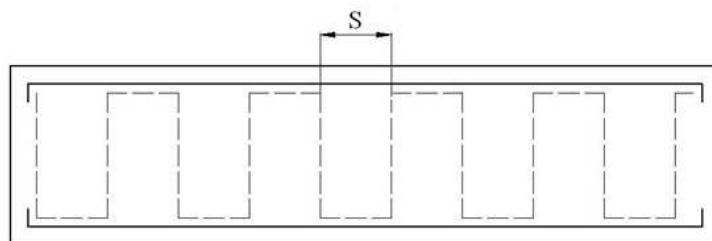


Figura 5.8 Esquema armadura de cortadura

Su cálculo está gobernado por la siguiente expresión:

$$V_{su} = V - V_{u2} = \frac{0.9 \cdot d}{S} \cdot A_s \cdot f_{yd}$$

En la que el único dato que se desconoce es , la cuantía geométrica de la armadura. S tiene un valor de 200mm impuesto por el diseño. De manera que despejando quedará:

$$S \cdot \frac{V_{su}}{0.9 \cdot d \cdot f_{yd}} = A_s$$

El número total de barras de refuerzo se determinará mediante la división de A_s entre la sección de cada barra $A_{s\phi}$:

$$n_{bc} = \text{entero} \left(\frac{A_s}{A_{s\phi}} \right) + 1$$

Esto es así ya que se necesita un número entero por encima de las cuantía de barras necesarias. A continuación se exponen las tablas 5.17 y 5.18, que muestran varias posibilidades para el número de barras de la armadura de cortante en función del diámetro de las mismas.

ZAPATAS CUADRADAS

		Diámetro Barras			
		$A_{s\phi}$ 6mm	$A_{s\phi}$ 8mm	$A_{s\phi}$ 10 mm	$A_{s\phi}$ 12mm
Nº barras armadura cortante	Grosor 2m	49	28	18	13
	Grosor 2,5 m	74	42	27	19
	Grosor 3 m	89	50	32	23
	Grosor 3,5 m	98	56	36	25
	Grosor 4 m	104	59	38	26

Tabla 5.17

ZAPATAS CIRCULARES

		Diámetro Barras			
		$A_{s\phi}$ 6mm	$A_{s\phi}$ 8mm	$A_{s\phi}$ 10 mm	$A_{s\phi}$ 12mm
Nº barras armadura cortante	Grosor 2m	86	49	31	22
	Grosor 2,5 m	97	55	35	25
	Grosor 3 m	103	58	37	26
	Grosor 3,5 m	108	61	39	27
	Grosor 4 m	112	63	41	28

Tabla 5.18

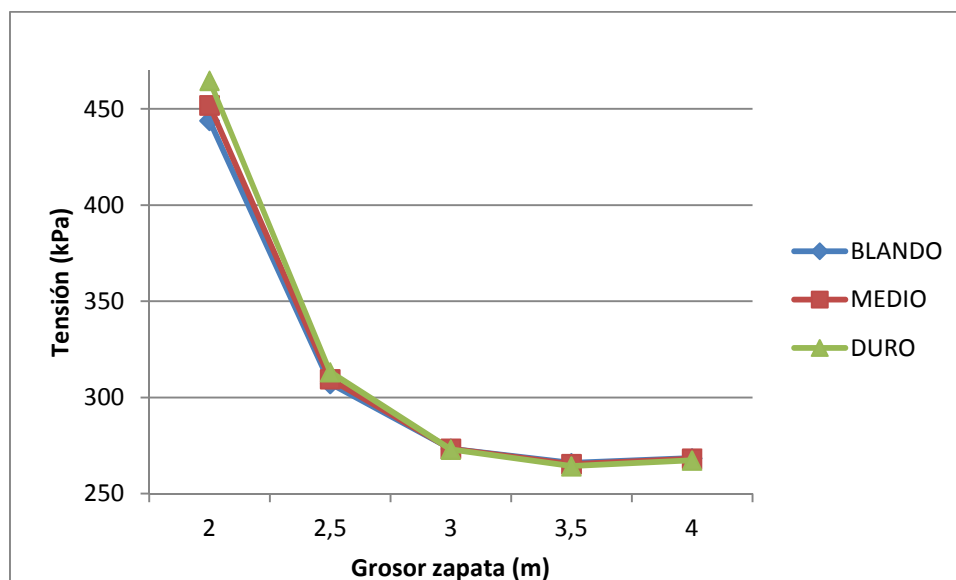
6. CONCLUSIONES

En una instalación eólica la cimentación es la parte menos visible pero no por ello menos importante.

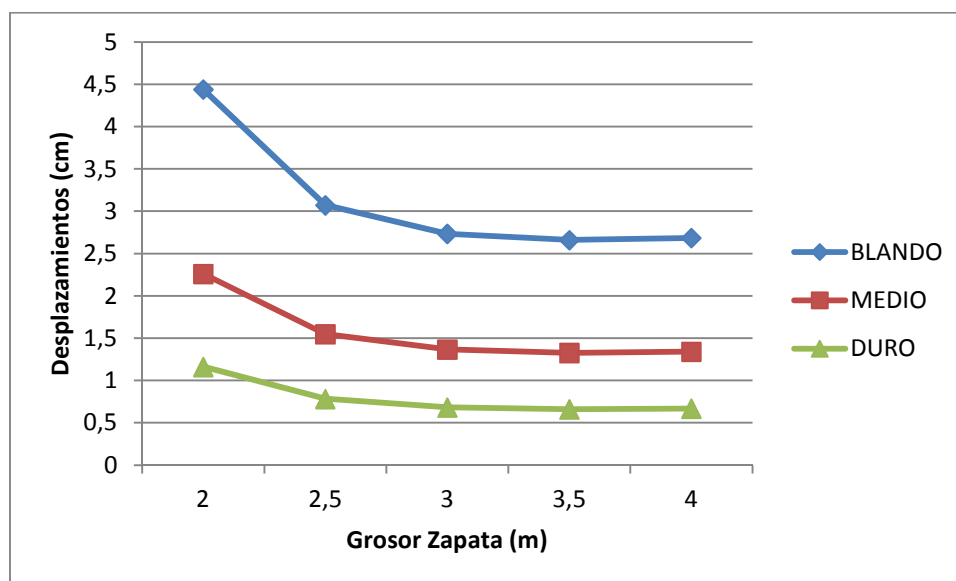
Ya se ha visto que cada configuración tiene sus características en cuanto a hundimiento/despegue (δ) de la zapata, distribución de tensiones en el terreno (σ) y esfuerzos en la estructura se refiere (M y V)

En este apartado se mostrarán las gráficas comparativas entre las principales propiedades y el grosor de la losa en los casos de suelos blandos, medios y duros. Para concluir se cotejarán estas propiedades entre los dos tipos de configuraciones. Cuadrada y circular.

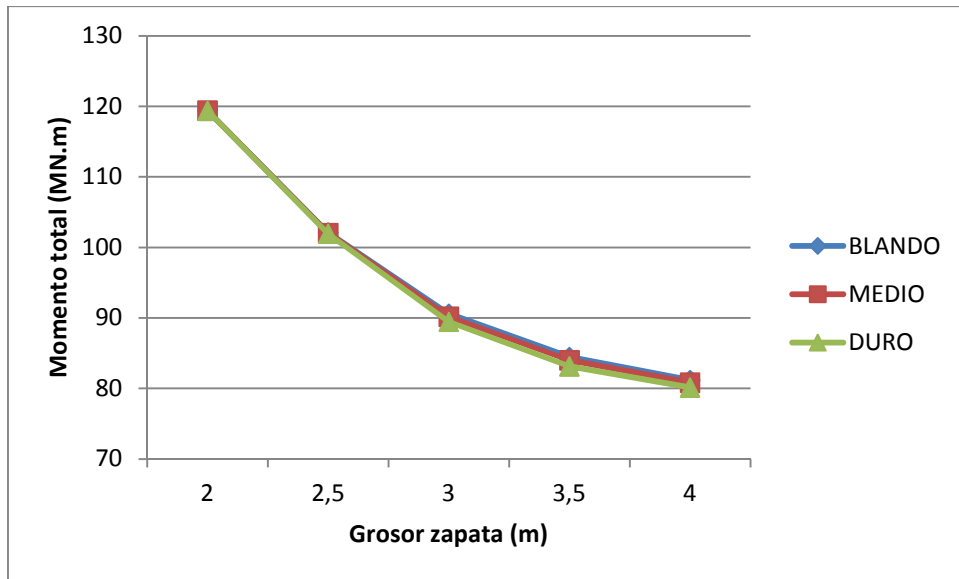
ZAPATAS CUADRADAS



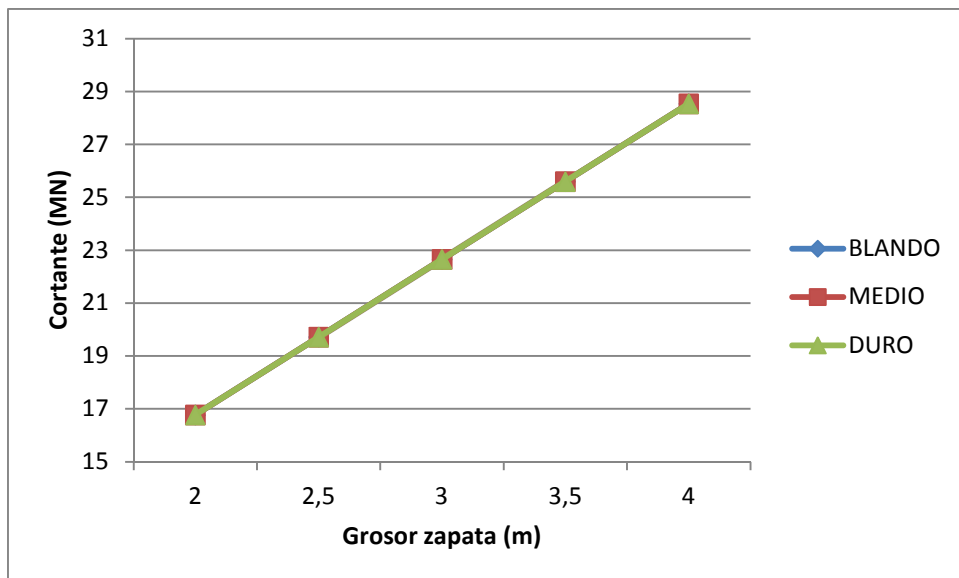
Tensiones bajo la zapata cuadrada



Desplazamientos bajo la zapata cuadrada

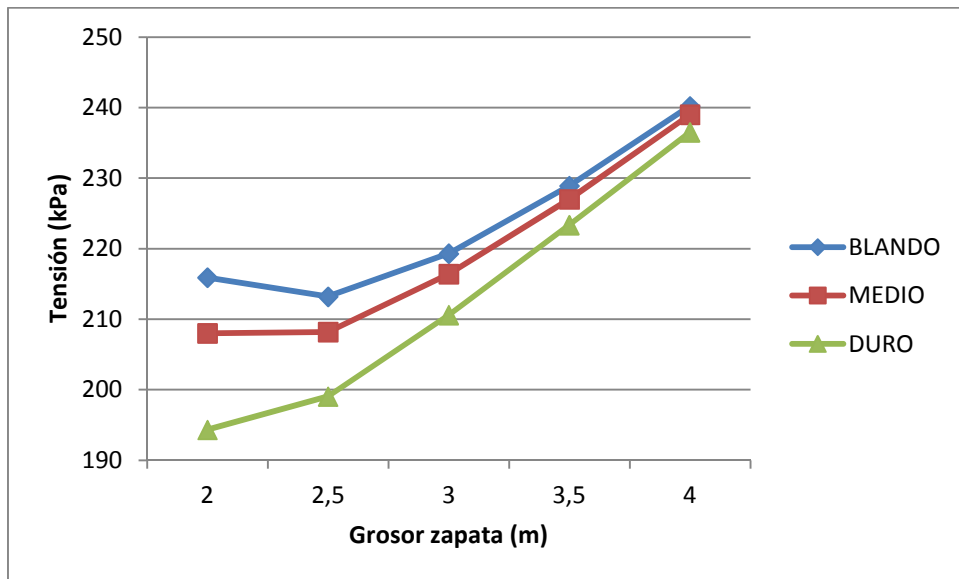


Momento flector sección crítica zapata cuadrada

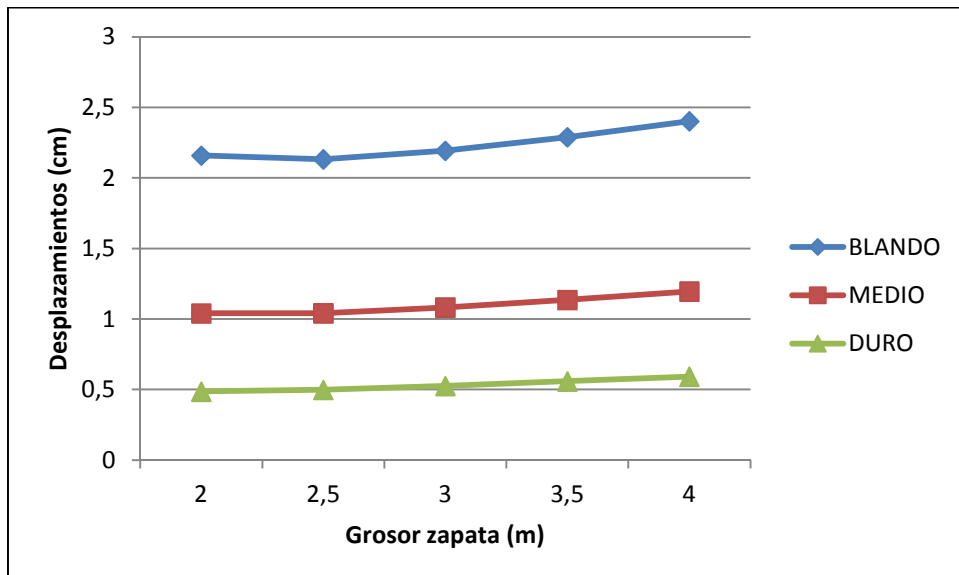


Cortante sección crítica zapata cuadrada

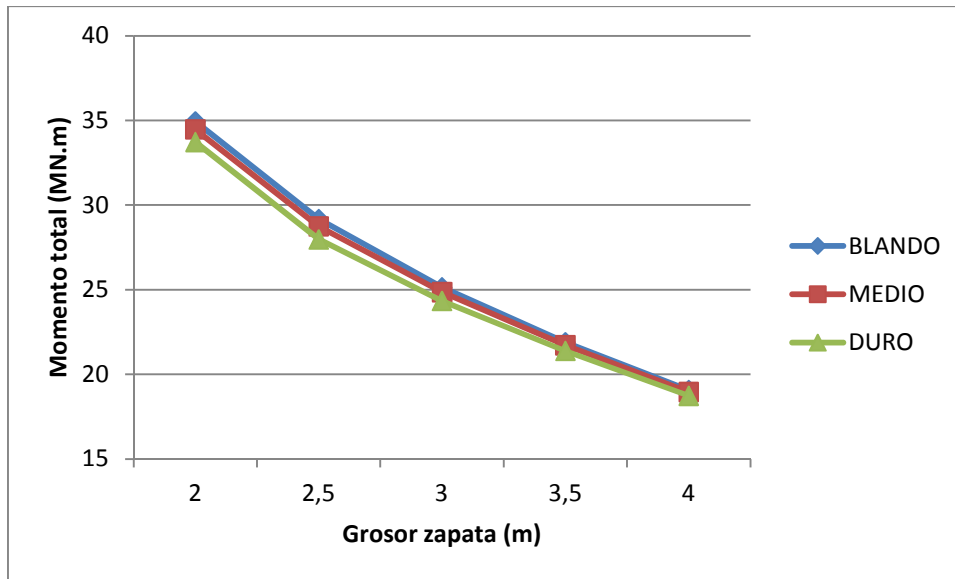
ZAPATAS CIRCULARES



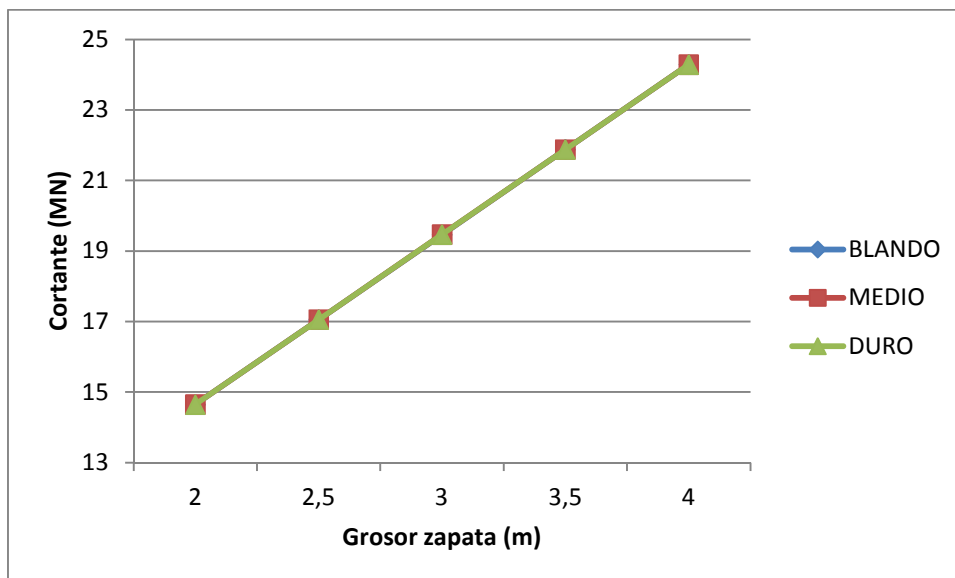
Tensiones bajo la zapata circular



Desplazamientos bajo la zapata circular



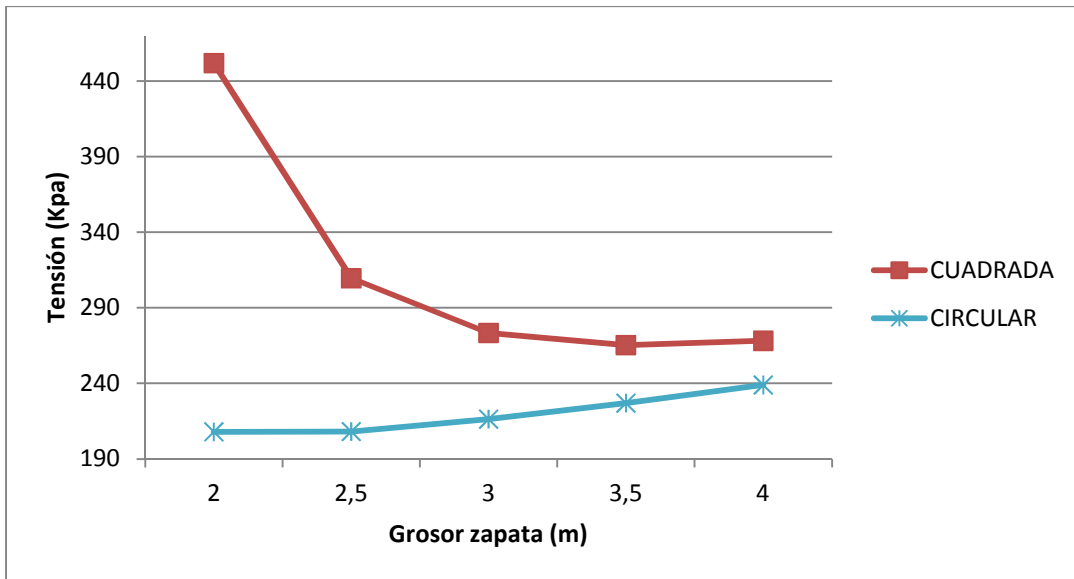
Momento flector sección crítica zapata circular



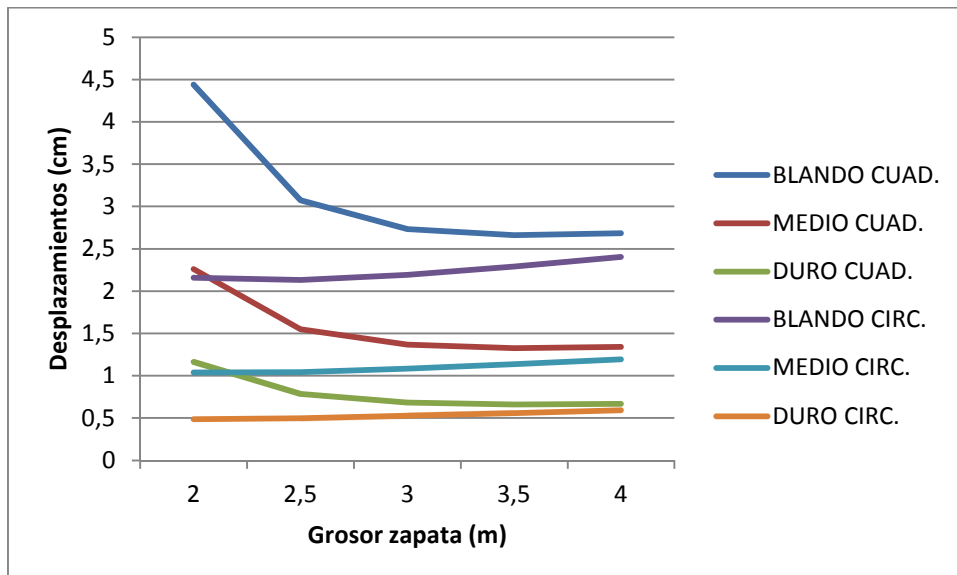
Cortante sección crítica zapata circular

Como era de esperar, la dureza del suelo es un factor muy influyente junto con el grosor de la zapata en cuanto a los desplazamientos verticales se refiere.

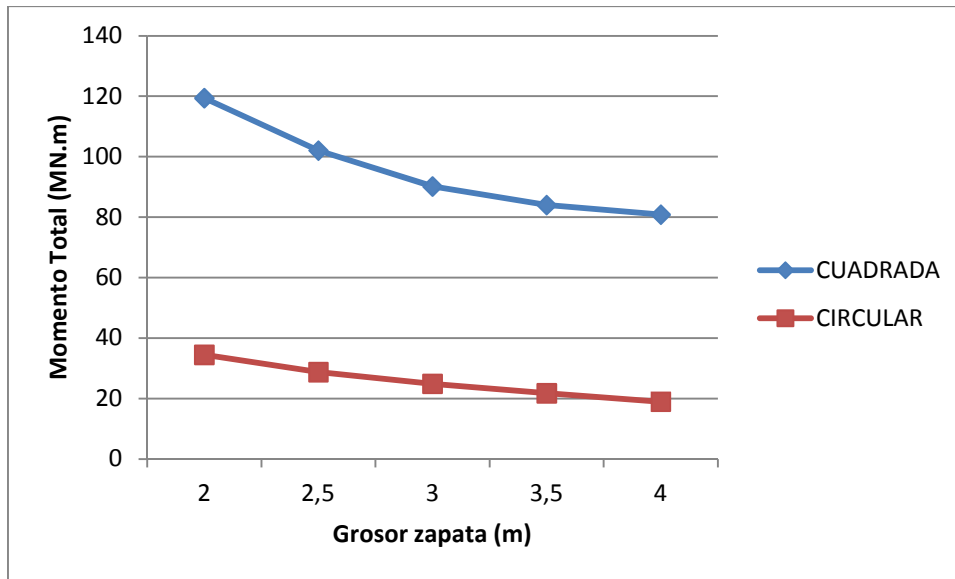
Para el caso de las tensiones, momentos y cortantes los datos apenas difieren en función del tipo de suelo aunque sí lo hacen en función del canto de la zapata. Por este motivo, la comparativa entre las dos configuraciones geométricas se hará para un determinado tipo de suelo. El medio.



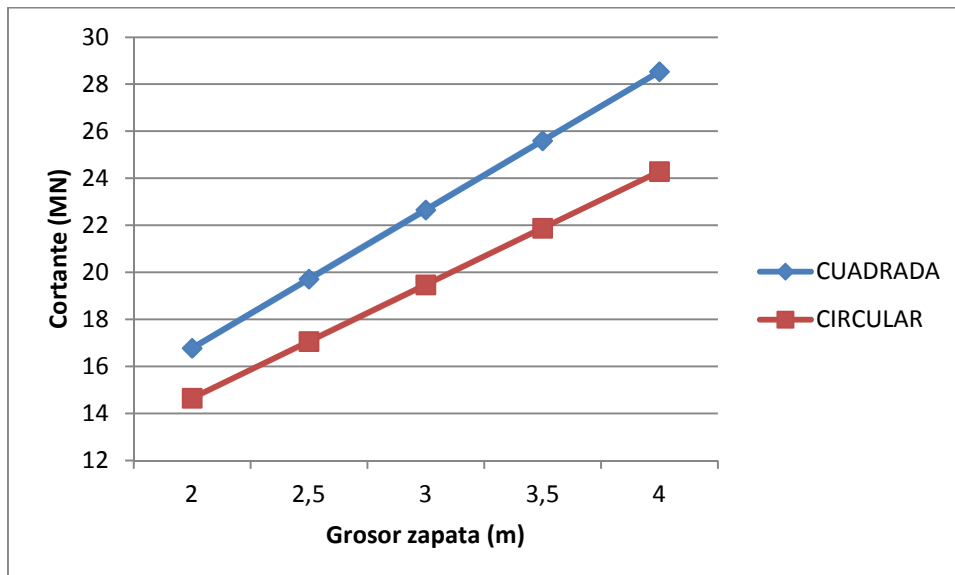
Comparativa tensiones



Comparativa desplazamientos

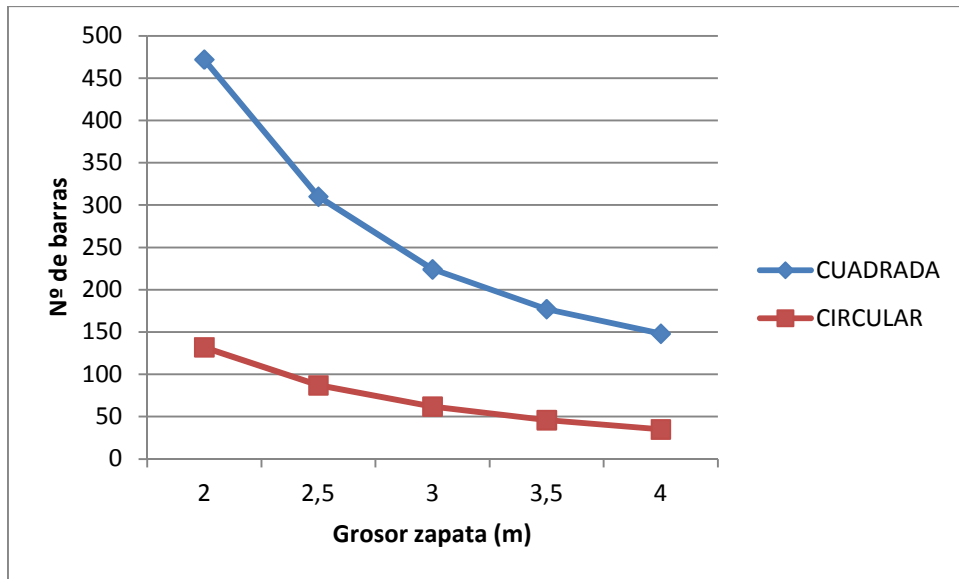


Comparativa momento flector sección crítica

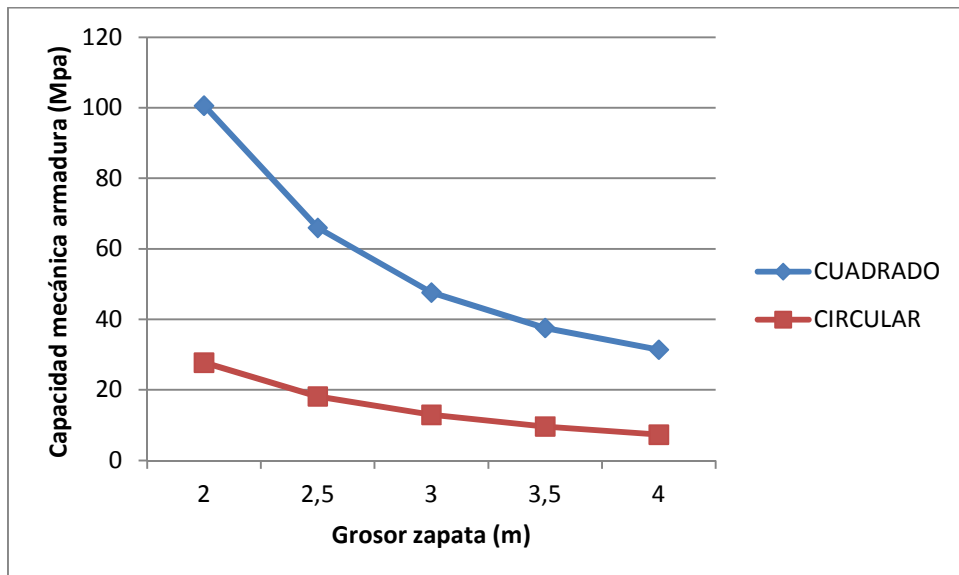


Comparativa cortante sección crítica

Los últimos factores a comparar entre sí son la capacidad mecánica de la armadura (U_s) y el número de barras (n_b) en cada configuración.



Comparativa número de barras



Comparativa capacidad mecánica armadura

7. TRABAJO FURURO

En el presente proyecto se ha estudiado el comportamiento de la zapata en función de de los esfuerzos transmitidos por la torre. Un tema en el que apenas se ha profundizado es el estudio de cómo se produce esta unión.

Existen múltiples métodos de anclaje a la zapata. Estudiar cómo se produce este acoplamiento es vital para realizar una transmisión de esfuerzos óptima.

La forma circular en una zapata la hace excelente para trabajar en todas direcciones. No ocurre lo mismo con la configuración cuadrada, que trabajaría de diferente manera si se viera solicitada por esfuerzos diagonales.

Analizar este comportamiento es necesario de cara a garantizar un comportamiento adecuado y seguro.

Un aspecto adicional a considerar sería el estudio de zapatas de canto variable de cara a optimizar su coste.