



Escola de Camins

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

Estudio de un método novedoso de cimentación de estructuras ligeras

Treball realitzat per:

Roberto Páez Álvarez

Dirigit per:

Ignacio Valero López

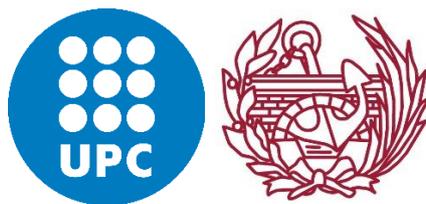
Grau en:

Enginyeria Civil

Barcelona, Octubre de 2016

Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental

TREBALL FINAL DE GRAU



TREBALL DE FI DE GRAU

Estudio de un método novedoso de cimentación de estructuras ligeras

Autor de la memòria:

Páez Álvarez, Roberto

Supervisat per:

Prof. Valero López, Ignacio

Grau en Enginyeria Civil

Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona

Universitat Politècnica de Catalunya

Octubre 2016

Resumen

El *Piloedre* es un nuevo elemento de cimentación prefabricado, pensado para substituir los elementos tradicionales utilizados hasta ahora para estructuras ligeras. Una de sus mayores ventajas es la reutilización y la facilidad de ser instalado y retirado. Esto hace que el impacto ambiental y económico sea mucho menor que otros rivales como pueden ser construcciones auxiliares, pasarelas, mobiliario urbano, etc.

Actualmente el *Piloedre*, ya se encuentra disponible para su uso comercial, sin embargo se encuentra en una fase de mejora y de necesidad de respuesta frente a ciertas situaciones hipotéticas, para ampliar sus horizontes y ofrecer una mayor amplitud de posibilidades de utilización.

En relación con esta situación particular, este estudio se centrará en un aspecto de ámbito estructural y constructivo sobre el producto. El objetivo principal para el estudio, será realizar un modelado tridimensional gracias al conocido software de proceso *GiD* de CIMNE, para realizar cálculos estructurales de desplazamientos y esfuerzos con el 'solver' *RAMSERIES*, que sean de utilidad para dar respuesta a las situaciones anteriormente mencionadas y colaborar en el desarrollo del *Piloedre*.

En primer lugar, se realiza el modelado de la geometría del *Piloedre* en tres dimensiones y posteriormente, con la disposición de ensayos reales se compara resultados al someterlo a cargas a compresión y tracción, y se procede a un calibrado para poder representar lo más fielmente posible el comportamiento real del producto.

En segundo lugar, y una vez calibrado el modelo, se proceden a simular situaciones de interés para la empresa creadora de *Piloedre*, debido a la facilidad de realizarlo desde un entorno virtual frente a los costes de un ensayo real. Con estas respuestas se intentará colaborar al desarrollo de la novedosa cimentación y con ello mejorar aspectos estructurales y por tanto su sostenibilidad ambiental y económica, además de lograr una guía valiosa para *Piloedre* en el momento de decidir las condiciones a imponer en un ensayo real.

Agradecimientos

Me gustaría agradecer especialmente a Ignacio Valero López, mi tutor del estudio, el esfuerzo realizado y el tiempo dedicado a mi persona durante la realización del mismo. Ha sido un tutor de gran ayuda, compartiendo su experiencia y conocimientos en todo momento conmigo, ayudando y animándome en todo momento. Especial agradecimiento a su dedicación en periodos no lectivos para darme soporte y su rápida atención en todo momento. Gracias por todo.

También me gustaría agradecer la aportación de Juan José Rosas Alaguero, el colaborador externo para este estudio, y diseñador del elemento constructivo que se analiza, el *Piloedre*. Gracias por el tiempo dedicado, y por la aportación de todo tipo de documentos necesitados en todo momento a lo largo de la realización del estudio. Gracias por depositar tu confianza en mí y este estudio.

Gracias también al departamento de COMPASS, en especial a Daniel Sá y Ramón Ribó, encargados del 'solver' utilizado, *RAMSERIES*, por ofrecerme asistencia sobre éste siempre que la he necesitado.

Finalmente agradecer a mi familia y amigos, en especial a mi hermano Enrique, que siempre han estado apoyándome y reforzándome con positividad cuando lo he necesitado. Especial agradecimiento a ti, Anna, por el grandísimo apoyo que siempre encuentro, y he encontrado, en tu persona a lo largo de todo mi recorrido académico.

Gracias a todos por vuestro apoyo.

Tabla de contenidos

CAPÍTULO 1. Introducción.....	9
1.1 Elemento de estudio. El <i>Piloedre</i>	9
1.2 Objetivo del estudio.....	10
1.3 Realización del estudio.....	12
CAPÍTULO 2. Creación y calibrado del modelo.....	13
2.1 Elección del ‘solver’ para el modelo.....	13
2.2 Geometría del Piloedre.....	15
2.3 Asignación de propiedades y cálculo.....	17
2.3.1 Propiedades de los materiales.....	17
2.3.2 Terreno.....	17
2.3.3 Opciones de cálculo.....	19
2.4 Mallado del conjunto.....	20
2.5 Postproceso y resultados.....	21
2.6 Calibración y comparación de resultados con ensayos reales.....	22
2.7 Limitaciones de los resultados.....	24
CAPÍTULO 3. Estudio de casos prácticos de simulación computacional de PILOEDRE.....	26
3.1 Respuesta frente tipos de esfuerzos.....	27
3.1.1 Esfuerzos de tracción.....	27
3.1.2 Esfuerzos flectores.....	30
3.1.3 Esfuerzos laterales.....	31
3.2 Durabilidad.....	34
3.3 Instalación y uso.....	37
3.3.1 Uso del Piloedre con cimentación adicional.....	37
3.3.2 Problema en la penetración de un tubo.....	40
3.4 Morfología y diseño.....	42
3.4.1 Longitud de los tubos.....	43
3.4.2 Inercia del tubo.....	46
3.4.3 Esfuerzos de flexión con tubos más largos.....	48
3.5 Influencia del Terreno.....	49
3.6 Materiales utilizados.....	51
CAPÍTULO 4. Conclusiones y futuras revisiones.....	54
CAPÍTULO 5. Bibliografía.....	58

Lista de figuras

CAPÍTULO 1. Introducción.....	9
1.1: Recreación en tres dimensiones del Piloedre.....	9
1.2. Diversos usos para el Piloedre (de izquierda a derecha, de arriba a abajo: Bungalow, mástil y puente ligero).....	10
CAPÍTULO 2. Creación y calibrado del modelo.....	13
2.1. Esquema de funcionamiento del software utilizado. (De izquierda a derecha, arriba abajo: Preproceso, postproceso, objeto de entrada, objeto de salida).....	13
2.2. Geometría completa del Piloedre.....	16
2.3. Geometría final del Piloedre en GiD (dos perspectivas diferentes).....	16
2.4. Representación gráfica de una de las funciones de rigidez del terreno utilizadas.....	19
2.5. Mallado del Piloedre en GiD (dos perspectivas diferentes).....	21
2.6. Postproceso. Resultados de desplazamiento vertical y deformación.....	22
2.7. Comparativa realizada durante el calibrado entre los hundimientos producidos por diferentes cargas puntuales en el Piloedre.....	24
CAPÍTULO 3. Estudio de casos prácticos de simulación computacional de PILOEDRE.....	26
3.1. Comparativa de resultados de levantamiento al aplicar una carga de tracción entre el modelo y ensayo real.....	27
3.2. Resultados de levantamiento y tensión en los tubos.....	28
3.3. Tensiones máximas en el bloque de hormigón frente a tracciones.....	28
3.4. Visualización de las tensiones.....	29
3.5. Desplazamientos y direcciones frente a esfuerzo a flexión.....	31
3.6. Desplazamientos en el eje vertical bajo esfuerzo lateral de 20kN.....	32
3.7 Análisis de desplazamientos laterales (en dirección del esfuerzo aplicado) y desplazamientos verticales máximos frente a esfuerzos laterales.....	33
3.8 Análisis de tensión de Von Misses en las láminas tubulares.....	33
3.9 Análisis de tensiones de tracción máximas producidas en el bloque de hormigón.....	34
3.10. Hundimiento experimentado en carga incremental para diferentes porcentajes de oxidación.....	35

3.11. Hundimientos máximos de la cimentación para diferentes porcentajes de oxidación.....	36
3.12. Tensión de Von Mises en los tubos máxima para diferentes porcentajes de oxidación...	36
3.13. Tracciones máximas en el bloque para diferentes porcentajes de oxidación.....	36
3.14. Piloedre con cimentación adicional.....	38
3.15. Desplazamientos verticales en el Piloedre con y sin cimentación adicional.....	39
3.16. Análisis de tensión de Von Mises en tubos de acero con y sin cimentación adicional.....	39
3.17. Análisis de tracciones en el bloque de hormigón aramdo con y sin cimentación adicional.....	39
3.18. Piloedre con problema en penetración de tubo y resultado de desplazamientos.....	40
3.19. Análisis de tensión de Von Mises en los tubos de acero. Valores máximos.....	41
3.20. Comparativa de tracciones en la cara inferior del bloque (máximas).....	42
3.21. Comparativa de hundimientos máximos según longitud de tubo.....	44
3.22. Deformación visual (factor 50) de las diferentes longitudes de tubo.....	44
3.23. Comparativa de tensiones máximas en tubos según longitud.....	45
3.24. Comparativa de tracciones máximas en el bloque según longitud.....	45
3.25. Hundimientos máximos en función del espesor del tubo.....	46
3.26. Tensiones máximas en los tubos en función de su espesor.....	47
3.27. Tracciones máximas en el bloque de hormigón según espesor de tubos.....	47
3.28. Deformaciones y direcciones con tubos de 150 cm.....	48
3.29. Comparativa de hundimientos máximos según rigidez del terreno.....	49
3.30. Comparativa de tensiones de Von Mises máximas en los tubos según rigidez del terreno.....	50
3.31. Comparativa de tracciones máximas en el bloque según rigidez del terreno.....	50
3.32. Hundimientos (mm) y deformación (aumentada en factor 50).....	51
3.34. Comparativa de tracciones producidas en el bloque en el proceso de carga.....	52
3.35. Comparativa de tensiones producidas en los tubos durante el proceso de carga.....	52

Capítulo 1. Introducción

1.1 Elemento de estudio. El *Piloedre*.

El sistema *Piloedre*, es un método novedoso de cimentación adecuado para la instalación de estructuras ligeras. Se define como “la cimentación prefabricada y recuperable para estructuras ligeras”. Es un elemento prefabricado compuesto por un bloque de hormigón armado (con un peso menor de 30 kg) con cuatro perforaciones cilíndricas, a través de las cuales se introducen elementos de acero, que se anclan al terreno mediante un martillo manual eléctrico. El *Piloedre* está pensado para sustituir cimentaciones tradicionales en el ámbito de estructuras ligeras, como por ejemplo construcciones auxiliares, pasarelas, y más.

La principal ventaja de este sistema, es su sencillez para instalarlo con maquinaria manual, y su capacidad para ser desinstalado, lo que significa que puede ser reutilizado y por lo tanto que tiene una gran sostenibilidad, especialmente en el ámbito ambiental, frente a las soluciones tradicionales.



Fig. 1.1: Recreación en tres dimensiones del *Piloedre*.

El *Piloedre* ya se encuentra en fase comercial, por lo que significa que ya se encuentra en un estado avanzado para su uso y disponible en el mercado. Sin embargo, es un producto novedoso y reciente, y sus diseñadores se encuentran aún, intentando dar respuesta sobre su comportamiento frente a situaciones poco comunes. Así mismo aún están intentando hallar mejoras en su diseño, ya sea en su morfología, composición de materiales u otros aspectos, para tratar de garantizar aún más su éxito técnico y comercial.

“Los PILOEDRES dotan al mercado de una nueva herramienta que puede representar una mejora competitiva para productos que impliquen la necesidad de resolver una cimentación ligera. El hecho de poder solucionar la problemática de cimentación mediante un producto claramente más evolucionado que las soluciones tradicionales, puede implicar una importante ventaja competitiva, tanto a nivel nacional como internacional.” (Piloedre.COM)

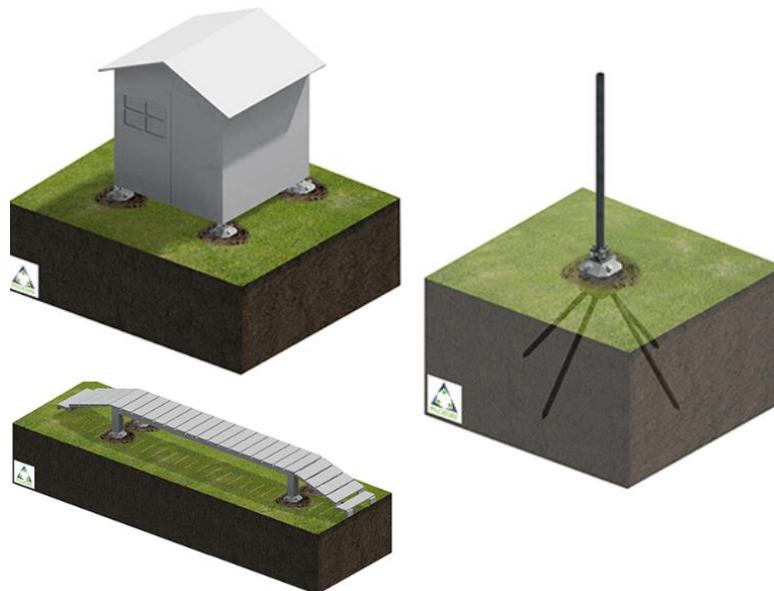


Fig. 1.2. Diversos usos para el Piloedre (de izquierda a derecha, de arriba a abajo: Bungalow, mástil y puente ligero).

1.2 Objetivo del estudio.

Como se ha comentado anteriormente, el *Piloedre*, se encuentra en fase de desarrollo y mejora continua. Es por ello que se inicia este estudio en colaboración con la empresa externa creadora del *Piloedre*.

La principal dificultad en una fase como la que se encuentra el *Piloedre* es el coste continuo de ensayos de campo. Debido a esto, se requiere de la construcción de un modelo tridimensional

de cálculo con interacción suelo estructura que pueda validarse con los resultados de los ensayos existentes.

El objetivo principal, es que este modelo, una vez creado y testado, pueda servir como un punto de referencia para el desarrollo del *Piloedre*. Sea capaz de indicar que elementos le benefician (material, morfología, terreno, uso...) y de qué forma. También es su objetivo dar respuesta, de lo que sería a priori, el comportamiento del elemento frente a situaciones peculiares, difíciles de ensayar en la realidad, como por ejemplo diferentes tipos de suelo o diversos grados de oxidación del acero.

Las ventajas de realizar este tipo de análisis computacionales en la actualidad son muchas y variadas. Sin embargo, se puede resumir que la mayor pretensión es reducir el coste de ensayo y mejorar la eficiencia del *Piloedre*, y por lo tanto aumentar sus características de sostenibilidad económica y ambiental. Por ejemplo, la profundización y mejora de su comportamiento en referencia a la deformación de los tubos de acero, lograría aumentar enormemente su capacidad de reutilización.

El estudio se realizará con la ayuda de un software -del cual se justifica su elección respecto a otros similares- que realiza el cálculo mediante métodos de elementos finitos. También, se dispone de todo tipo de datos técnicos y resultados de ensayos de campo, ofrecidos por parte de *Piloedre*.

Durante la realización del estudio se pueden discernir dos fases. Una primera fase, desarrollada a lo largo del capítulo número 2, en la que se parte de cero y se crea la geometría del elemento de cimentación, posteriormente se asigna propiedades y se malla para el análisis de elementos finitos. En este punto, gracias a los resultados de ensayos de campo proporcionados, se ajusta el modelo creado para dar unas respuestas frente a esfuerzos coherentes con la realidad.

En la segunda fase del modelo, desarrollada en el capítulo 3, se utilizará el modelo calibrado, para poder simular las situaciones y estados del *Piloedre* que más dudas generan en su desarrollo, y poder así proponer resultados y recomendaciones, sobre qué tipo de refuerzos o ensayos serían adecuados para la mejora del producto. Algunas de las preguntas propuestas tienen por ejemplo relación con la calidad del terreno, otras con la morfología, otras con los materiales, y diversos temas más.

Finalmente, para cada caso, se procederá a comparar los resultados y hacer unas pequeñas valoraciones y recomendaciones, que puedan servir de orientación para el desarrollo del producto.

1.3 Realización del estudio.

Para la realización del estudio, se han recopilado datos fundamentales, relacionados con el desarrollo del producto. Algunos públicos y otros bajo la confidencialidad pertinente al tratarse de un producto comercial. Todo ha sido obtenido con la colaboración de su desarrollador principal. Se han obtenido fichas técnicas, así como resultados de ensayos de campo como pueden ser ensayos a compresión y a tracción.

Por otra parte, para la creación del modelo, se ha contado con el soporte de las empresas diseñadoras del programa de preprocesado (Centre Internacional de Mètodes Numèrics a l'Enginyeria, *CIMNE*) y de cálculo y postproceso de resultados (Compass Ingeniería y Sistemas, *COMPASS*), las cuales han proporcionado material para el conocimiento de las herramientas y soporte en determinadas cuestiones.

Capítulo 2. Creación y calibrado del modelo

Para la simulación que el modelo tridimensional de cálculo nos puede ofrecer, son necesarias dos claras fases de proceso. La primera de ellas es la creación de este modelo. Una vez escogido el software adecuado para modelar y calcular, se debe crear la geometría y asignar todo tipo de propiedades y restricciones al propio modelo. Cuando este proceso finaliza y se llega a un punto de representación del elemento real dentro del software, es el momento del calibrado. Para ello se necesita unas guías en forma de ensayos de campo, que se han realizado en la realidad con el *Piloedre*, a través de ajustes y modificaciones se espera del modelo que produzca unos resultados iguales –o coherentemente similares- a los obtenidos en la realidad.

2.1 Elección del ‘solver’ para el modelo.

Para el desarrollo del estudio y el modelo de cálculo tridimensional, actualmente existen infinidad de softwares y solvers capaces de realizar cálculos muy precisos, y con una buena representación del comportamiento real si son debidamente configurados.

Se ha seleccionado software basado en el cálculo de elementos finitos. Actualmente, es un método muy utilizado en ingeniería para el modelado y cálculo de una gran variedad de problemas físicos. Fundamentalmente, se describe un problema físico (por ejemplo la geometría de *Piloedre*), para después asignar unas propiedades (materiales) y condiciones (cargas, restricciones) y finalmente realizar un mallado que discretiza el problema en nodos y elementos, a partir de los cuales el software formula y resuelve ecuaciones diferenciales.

Para el preprocesado (creación de la geometría y mallado) se ha seleccionado el software GiD (creado por una empresa colaboradora de la Universitat Politècnica de Catalunya, como es CIMNE) que es un sistema CAD para la definición de la geometría. El software proporciona un conjunto de opciones para la definición de la geometría mediante puntos, líneas, superficies y

volúmenes, y también incluye características geométricas típicas, tales como transformaciones (traslaciones, rotaciones, copiados, etc), operaciones booleanas o intersecciones.

Además, para el mallado y solución del problema de cálculo de elementos finitos, es necesario combinar GiD con un 'solver' específico para cada tipo de problemas (figura 2.1). Los 'solvers', son los encargados de añadir todas las propiedades del caso estudiado, es decir, materiales, cargas, tipo de análisis, elementos de cálculo y muchas otras opciones.

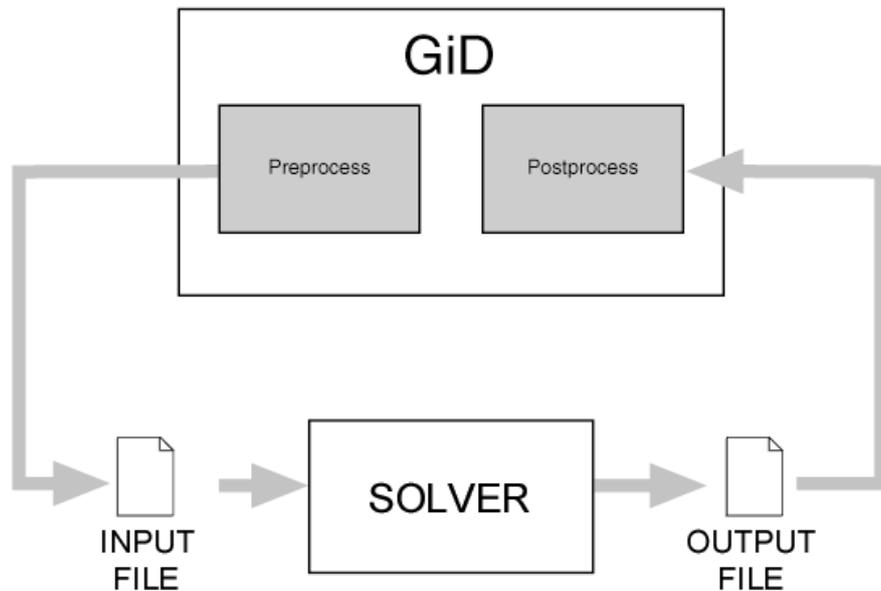


Fig. 2.1. Esquema de funcionamiento del software utilizado. (De izquierda a derecha, arriba abajo: Preproceso, postproceso, objeto de entrada, objeto de salida).

Se ha seleccionado como 'solver', RAMSERIES de la empresa COMPASS que es un entorno de elementos finitos (FEM) para el análisis estructural. Este 'solver' es capaz de reproducir un completo rango de elementos 3D como pueden ser laminas, solidos, vigas, cables, o membranas y trabaja con una amplia gama de análisis no lineales -interesante para reproducir las restricciones que ofrece el terreno a una cimentación- con diversas leyes de materiales.

2.2 Geometría del *Piloedre*.

La geometría del elemento es el paso inicial para la creación del modelo tridimensional de cálculo. Para su generación se ha utilizado el programa de preproceso GiD, el cual dispone de un entorno CAD para geometría.

Las dimensiones de la pieza han sido proporcionadas por *Piloedre* mediante planos de la pieza, muy completos, y a partir de los cuales se puede trasladar todo a un entorno tridimensional.

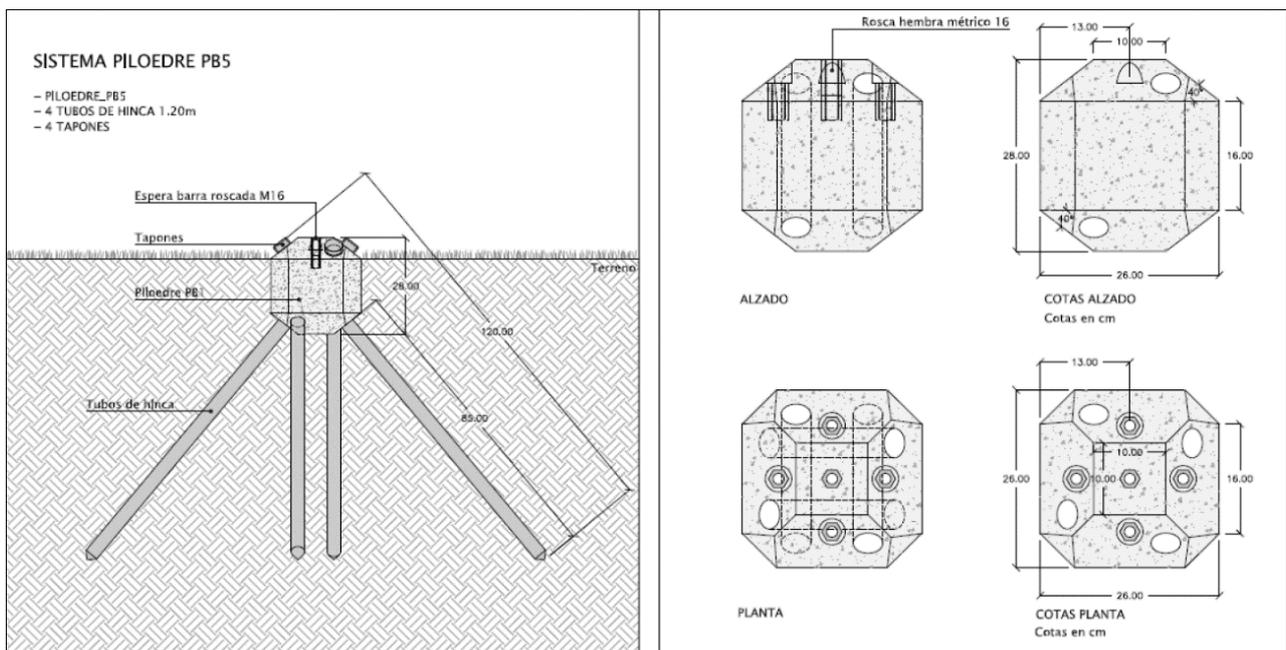


Fig. 2.2. Geometría completa del *Piloedre*.

Piloedre es un sistema de cimentación de estructuras ligeras reutilizable formado por 4 barras de anclaje al terreno inclinadas y entrelazadas entre sí. Un bloque de hormigón armado conecta las barras por su parte superior e incorpora los mecanismos de conexión con la estructura a soportar. Por lo tanto es un elemento sencillo, con una geometría no muy compleja.

A partir de los planos se ha creado la geometría en el entorno mencionado a partir de líneas, superficies NURBS (B-splines racionales no uniformes, elemento matemático muy usado en la computación gráfica), volúmenes y todo tipo de transformaciones y operaciones booleanas. El armado del hormigón no se ha interpretado como geometría, sino que el 'solver' permite asignarlo como un tipo de material.

La longitud de los tubos dependerá del tipo de terreno, en terrenos medios y duros la longitud será de 900 mm (tipo 1) y en terrenos blandos, muy blandos y super-blandos la longitud es de 1200 mm (tipo 2). La inclinación de las barras respecto a la vertical es de aproximadamente 40º sexagesimales. Se han modelado como tipo 2, debido a que los ensayos proporcionados eran en terreno blando, y como láminas cilíndricas de 2,9 mm de grosor tal y como se especifica.

El bloque de hormigón, se ha modelado como un sólido íntegro, al que mediante operaciones booleanas se le ha extraído los volúmenes que ocupan los tubos de acero. Respecto a otro tipo de elementos de pequeño tamaño, como puede ser la rosca situada en la parte central superior del bloque de hormigón, donde van situados los anclajes a la estructura ligera que se debe soportar, estos se han ignorado por recomendación de ambas partes, ya que no representa una gran influencia en el comportamiento técnico.

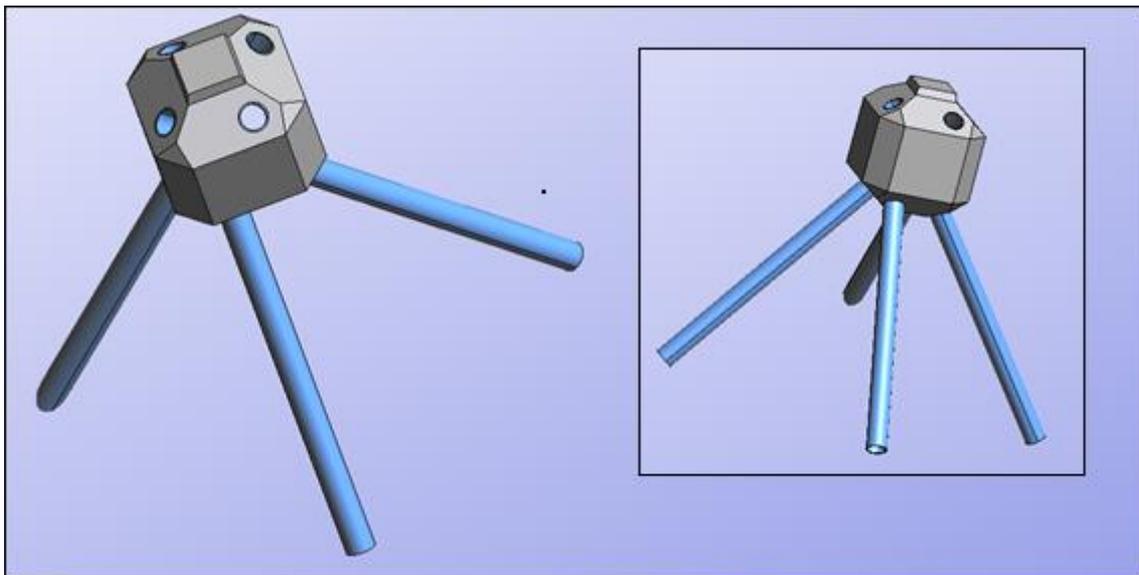


Fig. 2.3. Geometría final del Piloedre en GiD (dos perspectivas diferentes).

Las terminaciones de los tubos en forma de punta, no se han representado al considerarse elementos puramente técnicos para la instalación y penetración del terreno en los mismos, y sin mayor influencia en los resultados posteriores.

2.3 Asignación de propiedades y cálculo.

En primer lugar, una vez generada la geometría, se asignan las propiedades a los materiales que componen *Piloedre*. Después se asignan las opciones del cálculo que debe realizar RAMSERIES, para finalmente poder mallar el elemento y proceder al cálculo.

2.3.1 Propiedades de los materiales.

Para el bloque de hormigón, se conoce que el material que lo compone es un hormigón armado de una resistencia mínima de 30 MPa. RAMSERIES tiene diversos materiales comunes preestablecidos, y en este caso se asigna al volumen del bloque el material HA-30 con los valores:

- $E = 28577.0$ MPa (Young)
- $\nu = 0.25$ (Poisson)
- Peso específico de $2.5e4$ N/m³

Los otros cuatro elementos por su parte son tubos de acero estructural de calidad N80 según la norma API 5CT con un límite elástico mínimo de 500 MPa. Se han modelado como una lámina isotrópica con las siguientes características:

- $E = 210000.0$ MPa (Young)
- $\nu = 0.3$ (Poisson)
- Peso específico de 76900 N/m³

En segundo lugar, se asignan las cargas del conjunto. Inicialmente y para calibrarlo se utiliza un ensayo a compresión proporcionado por *Piloedre*, ya que es la principal función. Se aplican cargas puntuales con los mismos valores que en el ensayo a compresión en el centro de la cara más superior. También deben añadirse el peso de los elementos, el cual es calculado automáticamente por el 'solver' con tan solo indicárselo.

2.3.2 Terreno.

Finalmente, en lo que se refiere a asignar propiedades, se aborda el tema restrictivo que representa el terreno. En este sentido hay diversas opciones que se han ido testando para encontrar la más óptima de las soluciones. En un primer lugar, se pretendía modelar el suelo como un bloque sólido alrededor del *Piloedre*, esta sería una buena solución ya que permitiría observar directamente las tensiones sobre el terreno e interacciones suelo-estructura. Sin

embargo, mediante esta alternativa no se ha logrado un calibrado aceptable posteriormente, ya que RAMSERIES solo ofrece formas de describir sólidos con propiedades de materiales estructurales y no con las típicas de terreno (cohesión, ángulo de rozamiento interno, y otras), y por lo tanto no se representaba correctamente el comportamiento del terreno con un sólido.

La solución que mejor se ha logrado calibrar, tras varias alternativas, es la representación del terreno como la aplicación de restricciones elásticas en los tubos y caras del *Piloedre*. Se representan las restricciones como una idealización de muelles elásticos con los parámetros de rigidez del terreno.

En primera instancia se consideró el terreno con una rigidez uniforme en todas sus direcciones, es decir valores K_x , K_y , K_z como constantes.

No obstante, en un refinamiento final, se consideraron unas condiciones no lineales como las que mejor representaban la realidad, y que así demostraron en la fase de calibrado posterior. Para ello, en COMPASS disponen de unas funciones de rigidez del terreno, que dependen de que terreno estamos estudiando, y en las que se pueden modificar parámetros como el ángulo de rozamiento interno o la cohesión, para que muestren el comportamiento particular de un terreno. Estas funciones de puntos, son empíricas y obtenidas de diversos casos particulares en campo.

El 'solver' permite introducir todos los valores que componen la función de forma sencilla, al tratarse de condiciones no lineales. Se han utilizado diversas funciones para la dirección z y para las direcciones x-y. También se ha incorporado una función en N/m para la reacción del borde final de los tubos, conocida en pilotes como 'tip reaction'.

En la figura 2.4, se puede apreciar una de las muchas variantes que se incluyen en la recopilación de datos obtenida. Ésta en particular, representa el comportamiento de una arena media, y se representa la rigidez del terreno frente al hundimiento. Son unas funciones muy utilizadas en la interacción suelo-estructura de pilotes.

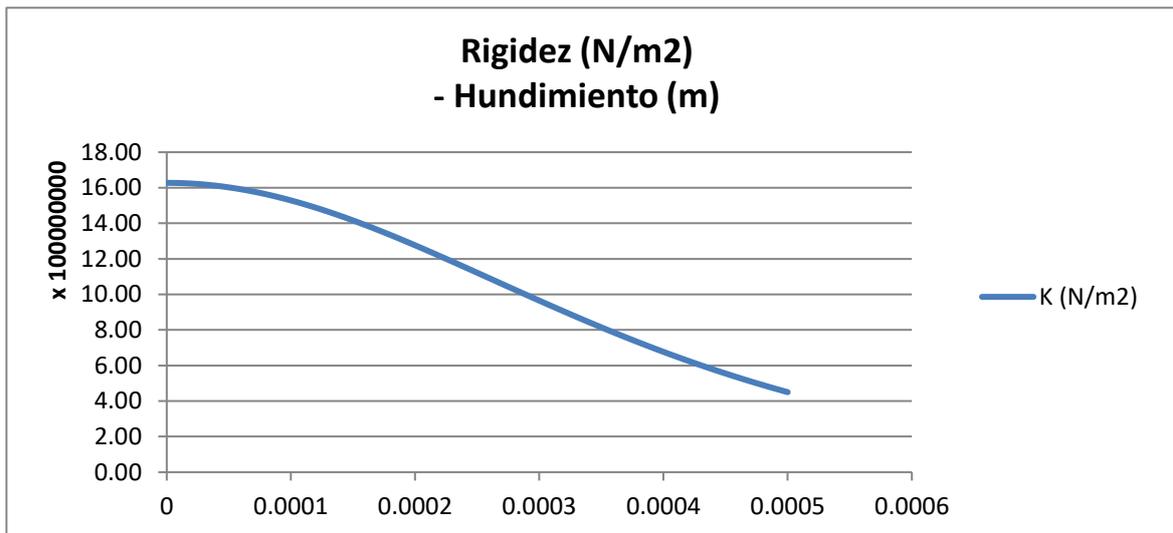


Fig. 2.4. Representación gráfica de una de las funciones de rigidez del terreno utilizadas.

Las fuerzas de rozamiento no se han tenido en cuenta, por recomendación del desarrollador, que indica que respecto al contacto tubo-terreno y tubo-bloque, los ensayos apuntan que no son elementos especialmente críticos, ya que el mecanismo resistente es básicamente geométrico, de forma que la posible resistencia asociada al rozamiento tubo-terreno es comparativamente poco transcendente.

2.3.3 Opciones de cálculo.

El 'solver' RAMSERIES, permite realizar diferentes tipos de análisis de cálculo. Entre ellos análisis fluido-mecánico, termoanálisis, multifísico, y más. En este caso se ha seleccionado el Análisis Estructural para realizar los cálculos, y se han activado sólidos y láminas como elementos de cálculo (ya que no disponemos de ningún otro tipo de elemento).

En referencia con las opciones de cálculo, en primer lugar se ha seleccionado unas condiciones de contorno no lineales. Esta opción se ha determinado principalmente por el terreno, para poder modelar su comportamiento con las funciones mencionadas en el apartado anterior.

El análisis puede ser estático, dinámico o incremental de cargas. El dinámico es descartado ya que no interesa su evolución en el tiempo si no sus reacciones al aplicar determinadas cargas y esfuerzos. Las condiciones de contorno no lineales, implican que el análisis no puede ser estático, y por lo tanto se ha seleccionado un análisis incremental de cargas. El análisis simplemente divide el cálculo en iteraciones, que dividen la carga aplicada hasta llegar a la

introducida. En realidad, el análisis es el más práctico para comparar con los resultados de ensayo obtenidos, en los que se aplican cargas incrementales.

Finalmente se seleccionan algunos parámetros como número de iteraciones (fijado en 10), linealidad de materiales, tolerancia de convergencia, y más. También se escoge con que 'solver' estructural se resolverán las ecuaciones para el mallado. Se utiliza el recomendado por RAMSERIES, el 'solver' 'Sparse-Hybrid', éste resuelve las ecuaciones con un solucionador de gradientes conjugados con almacenamiento disperso.

2.4 Mallado del conjunto.

En el método de elementos finitos, la generación de la malla es un punto clave del modelado. En ella recae todo el peso del cálculo y debe ajustarse y representar debidamente la geometría real de los elementos. Es, probablemente, el punto en el que podría tener más problemas si no llevamos a cabo correctamente.

Como puede darnos a entender la intuición, podemos pensar que cuantos más elementos, más pequeños y regulares, obtendremos el mejor y más preciso resultado. En cierta medida, eso es correcto, pero hay que tener en cuenta que la eficacia y el coste computacional son muy importantes por lo que debemos tratar de llegar a soluciones precisas usando mallas razonables.

Para el mallado del *Piloedre*, se ha intentado la realización de las concentraciones de elementos mayores allí donde se intuye que vamos a tener grandes gradientes de tensiones y permitiendo a tener menos allí donde nuestros esfuerzos apenas cambian. Sin embargo, no se ha permitido diversos tamaños diferentes elementos, porque de lo contrario se pueden distorsionar los resultados.

La malla la permite realizar el software de preproceso GiD, con diversas opciones en cuanto a tamaños y tipos de elemento. Para una buena representación, se ha determinado una malla estructurada en triángulos en las láminas que representan el acero con un número adecuado de divisiones, deducido a partir de ver resultados con diferentes tamaños para observar su influencia. Por su parte, el bloque ha sido discretizado en una malla no estructurada de tetraedros de tamaño coherente. El contacto entre ambos tipos de elementos se ha realizado con una velocidad de transición lenta, para una mejor estructuración de la malla.

Finalmente, y tras el mallado, ya se puede indicar al 'solver' que inicie el proceso de cálculo. El proceso es totalmente automático, y únicamente se pueden ver detalles del proceso en la ventana de cálculo.



Fig. 2.5. Mallado del Piloedre en GiD (dos perspectivas diferentes).

2.5 Postproceso y resultados.

Una vez calculado el modelo, se procede al postproceso donde se pueden apreciar resultados desde tensionales, a desplazamientos, o análisis como Von-Misses o Rankine. En la figura 2.6 se pueden apreciar los resultados de desplazamiento en el eje vertical, junto con una deformación (aumentada en un factor de 50 para ser más visible), tras aplicar una carga de 28,57 kN que es la máxima en el primer incremento de un resultado de ensayo a compresión real sobre el *Piloedre*.

En la figura 2.6. se puede apreciar la visualización de resultados que ofrece RAMSERIES tras efectuar el proceso de cálculo. En este caso se trata de los resultados del *Piloedre* una vez calibrado en el que el hundimiento (de 5,26 mm) se aproxima enormemente al obtenido en el ensayo de compresión para la misma carga. Sin embargo, previamente a estos resultados, ha sido necesario un proceso de calibrado a base de perfeccionar los parámetros introducidos (principalmente las funciones de rigidez del terreno), para poder llegar a resultados que sean coherentes y similares a la realidad, para posteriormente poder testar otras situaciones hipotéticas propuestas.

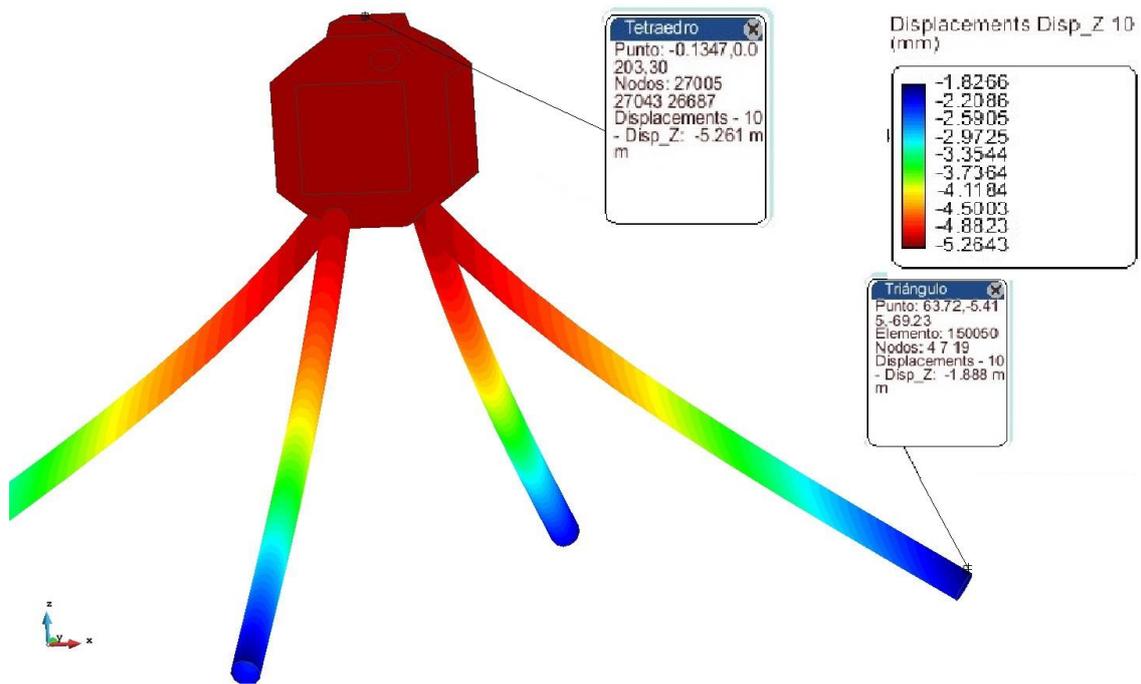


Fig. 2.6. Postproceso. Resultados de desplazamiento vertical y deformación.

2.6 Calibración y comparación de resultados con ensayos reales

El proceso de calibrado es el que más cuidado y atención requiere, ya que sobre él recae la veracidad de los análisis posteriores. Es también el más complejo y largo de realizar, ya que se parte de datos empíricos, los cuales dependen de muchas variables y factores que se reducen a una simplificación en un modelo que simplemente asigna propiedades, cargas y restricciones para obtener los resultados.

La calibración del modelo se ha centrado básicamente en la forma de las restricciones, ya que las cargas y propiedades del material están definidas y no hay variación posible. Como se explica en el apartado de 'Terreno', se ha pasado por varias fases para intentar simular la reacción que este ofrece a la cimentación.

Con la primera modelación que se obtuvo éxito de calibrado para una carga concreta, fue la representación del suelo como un sólido suficientemente grande, que envolvía al *Piloadre*. La

carga que siempre se ha intentado calibrar era la máxima del ensayo a compresión ofrecido por los desarrolladores (28.57 kN).

El terreno, representado como un sólido, daba un comportamiento bastante similar en cuanto a hundimiento en comparación con el resultado del ensayo. No obstante, los contactos tensionales, no quedaban bien definidos, y al variar la carga el hundimiento variaba en un orden de milímetros frente al ensayo, por lo que no era un modelo consistente. El 'solver', no está desarrollado para representar suelos de esa forma, y no podría representar roturas o interacciones siguiendo un modelo como el de Mohr-Coulomb, por lo que esta solución fue descartada.

Después de otras soluciones con resultados muy alejados de la realidad, se representó el terreno como un entorno de restricción elástica para el *Piledre*, en este punto se consideraron constantes elásticas constantes –valores de k típicas de suelos blandos y medios- y con ellas se calibró el modelo para la carga mencionada anteriormente. El resultado muestra una mejora en las tensiones experimentadas y coherencia con la realidad, sin embargo al variar de carga todavía existían dispersiones de un orden considerable (entorno al mm). Por lo que se intentó profundizar en este aspecto.

Finalmente, con las recomendaciones de los gestores del software, se incluyeron unas condiciones no lineales en las restricciones representadas en las funciones anteriormente mencionadas en el apartado 'Terreno'.

Con estas funciones se ha calibrado el modelo, primero para la carga de ensayo, y posteriormente verificando cargas menores en las diferentes iteraciones del programa durante el análisis de carga incremental, y se obtuvieron los resultados reflejados en la figura 2.7. En ella se puede observar la dispersión que existe en el modelo frente a la realidad. En este caso los hundimientos se alejan en un orden de 10^{-4} metros en el mayor de los casos, por lo que se ha considerado una precisión más que suficiente para empezar a testar el modelo en diferentes situaciones.

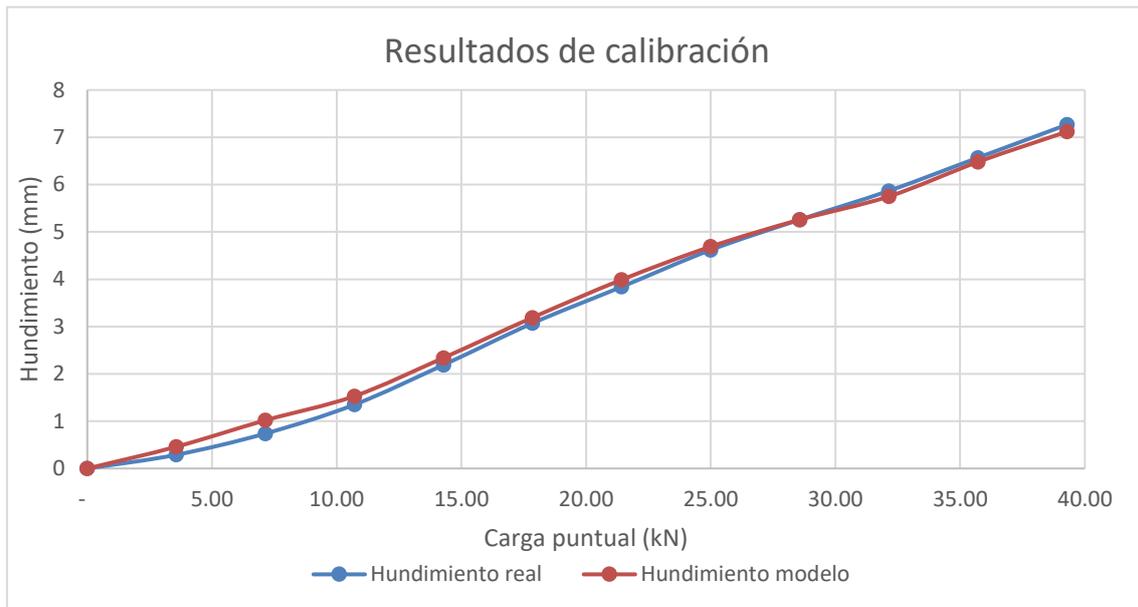


Fig. 2.7. Comparativa realizada durante el calibrado entre los hundimientos producidos por diferentes cargas puntuales en el Piloedre.

Asimismo, como se puede observar, en el rango de 0 a 28.57 kN el modelo representa un hundimiento algo mayor, por lo que a pesar de las desviaciones respecto a la realidad, se encuentra del lado de la seguridad si se utiliza para tomar decisiones.

2.7 Limitaciones de los resultados.

Los resultados obtenidos y mostrados en la figura 2.7, son bastante coherentes y respetuosos con el comportamiento en un ensayo a compresión real del *Piloedre*. No obstante, no deja de ser un modelo simplificado y la respuesta frente a las diferentes situaciones que se propondrán más adelante deben tomarse como recomendación y como orientación para aplicarlo en el producto.

El punto más débil de estos resultados se encuentra en la limitación del software a las estructuras. Se trata de un 'solver' diseñado para estructuras y no se pueden representar los comportamientos del terreno. Se ha realizado una buena representación del comportamiento de este como restricción, pero no podemos visualizar ni contemplar la interacción suelo-estructura producida al cargar el *Piloedre* y transmitir las tensiones al suelo. Por lo tanto, es imposible reproducir comportamientos de rotura en el terreno, o interacciones entre el *Piloedre* con otros elementos cercanos, o incluso el comportamiento en grupo, ya que no se

pueden representar los bulbos de tensión producidos y que afectarían al hundimiento y distribución de tensiones de los elementos vecinos, y los producidos por estos sobre él.

También existe otra limitación, debida a la complejidad de resolución de este tipo de problema, que es el contacto no lineal entre tubo y pieza. El contacto entre estos elementos se ha solucionado como un contacto continuo, en el que se pueden observar diferencias en las distribuciones tensionales debidas a las propiedades cada elemento, pero se mantienen unidas a la perfección en todo momento. No se puede ver lo que ocurre al producirse deformación en los tubos, y una posible pérdida de contacto entre algunas zonas internas. Este problema se podría llegar a resolver con RAMSERIES, no obstante, con una complejidad muy elevada y conocimientos profundos del software.

Capítulo 3. Estudio de casos prácticos de simulación computacional de PILOEDRE

Durante el capítulo anterior se ha seguido el proceso de creación del modelo tridimensional para la realización de simulaciones con el elemento de cimentación de estructuras ligeras *Piloedre*.

Se ha procedido al calibrado, parte fundamental, para la utilidad de este modelo. A partir de aquí, y teniendo en cuenta las limitaciones del propio citadas en el anterior capítulo, se pueden proponer diversas situaciones, en las que se cambian condiciones, ya sean de contorno o inherentes al propio producto, y se desconoce la respuesta por parte de los desarrolladores o se pretende profundizar en la interpretación de sus resultados.

Los desarrolladores de *Piloedre* han elaborado una lista de preguntas y situaciones, en las que están interesados que el modelo creado pueda dar respuesta. Estas respuestas se pueden agrupar en diferentes categorías según su tipología, las cuales serán analizadas en el desarrollo del actual capítulo. Las categorías son:

- Esfuerzos
- Durabilidad
- Instalación y Uso
- Morfología y diseño
- Terreno
- Materiales

3.1 Respuesta frente tipos de esfuerzos.

En esta categoría se analizará cómo se comporta el *Piloedre* frente a esfuerzos laterales, flectores y tracción. Son unos esfuerzos poco ensayados y de los que se dispone únicamente de un resultado de ensayo a tracción realizado sobre el *Piloedre*. Al carecer de ensayos en profundidad, en esta sección se comentan simplemente los hundimientos y tensiones máximas, sin llegar a comparar con la situación normal (de compresión) como en las siguientes secciones de análisis. Los ensayos se realizan en el mismo terreno que el de calibración.

3.1.1 Esfuerzos de tracción.

Se analizan esfuerzos de tracción, representados como cargas puntuales, del mismo modo que en compresión pero en sentido contrario vertical. Para este caso se dispone de una relación entre hundimiento y carga de tracción obtenida en un ensayo de campo.

En primer lugar, y con el modelo calibrado, se introduce la carga del ensayo (10kN) para comparar los datos de hundimiento con el ensayo de campo. Los resultados, tal y como pueden verse en la figura 3.1 son otra vez coherentes, y del lado de la seguridad.

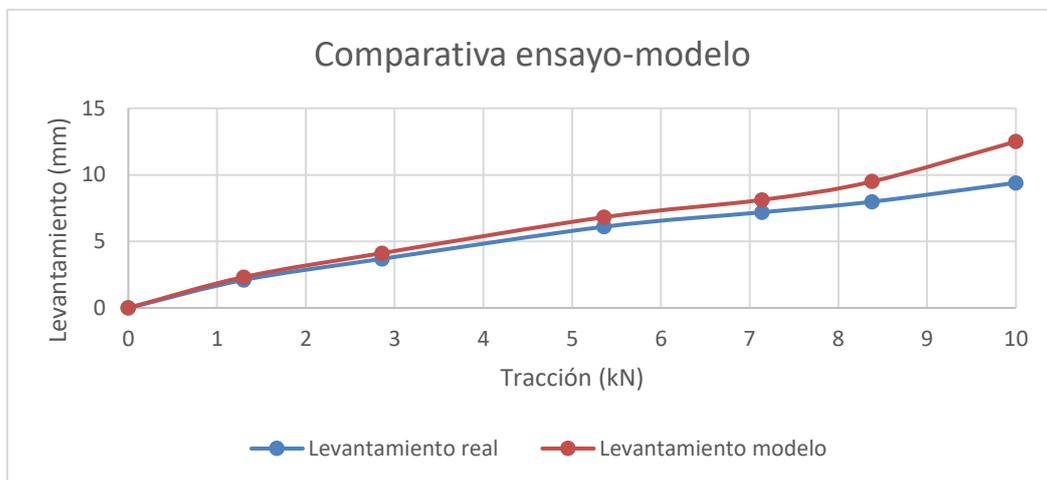


Fig. 3.1. Comparativa de resultados de levantamiento al aplicar una carga de tracción entre el modelo y ensayo real.

En la figura 3.2 se puede observar la deformada (siempre ampliadas un factor de 50 para ser visible), y la distribución de tensiones de Von Mises en las laminas tubulares. En todos los modelos testados el punto crítico es lógicamente en el contacto final con el hormigón, donde los tubos ejercen una tensión debido a la deformación impedida. Las tensiones que se visualizan de entorno 65MPa, son coherentes, y significan plastifica que, de hecho, es lo que se ve en el modelo tridimensional. Los desarrolladores han comentado que al *Piloedre* le quedan deformaciones grandes remanentes, por lo que no son elásticas y es lo que transmiten los resultados. No obstante, probablemente sean algo menores ya que la deformación frente a la realidad aumenta un 32% en la carga final –la representada–.

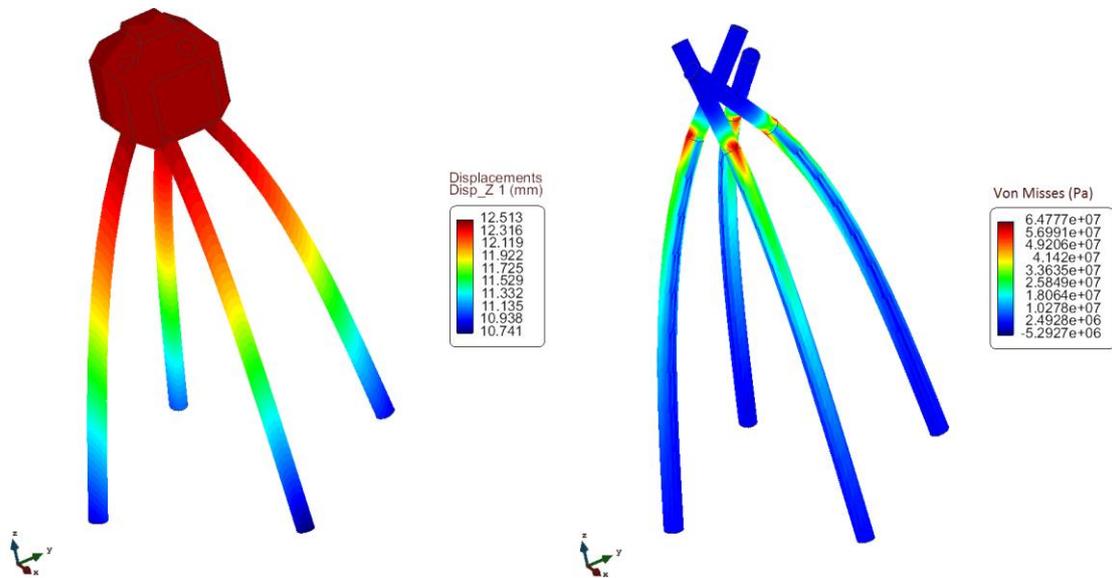


Fig. 3.2. Resultados de levantamiento y tension en los tubos.

Respecto a la distribución de tensiones presentada en el bloque, se obtienen los resultados mostrados en la figura 3.3.

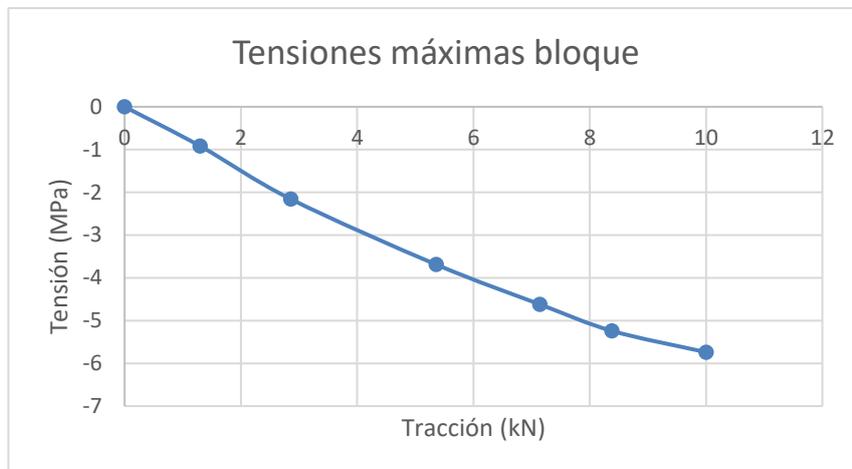


Fig. 3.3. Tensiones máximas en el bloque de hormigón frente a tracciones.

Para analizar estos resultados, la Instrucción EHE indica que cuando no se disponga de resultados experimentales sobre el hormigón con el que se trabaja, en función de la resistencia característica de proyecto a compresión f_{ck} podemos hallar la resistencia media a tracción. Si bien es cierto que trabajamos con hormigón armado HA-30, podemos utilizar esta formulación para tener una idea de las tensiones a las que está sometido el bloque. En este caso:

$$f_{ct,m} = 0,3 \sqrt[3]{f_{ck}^2} = 0,3 \sqrt[3]{30^2} = 2,9 \text{ MPa}$$

La tensión máxima en el bloque es de 5,74 MPa. No obstante estas tensiones se producen en unos puntos donde el acero debe deformarse y separarse del hormigón (figura 3.4), por lo que como el modelo impone una unión solidaria entre los dos elementos (no es así en la realidad) esta tensión no sería tan grande. Y teniendo en cuenta de que disponemos de un hormigón armado, y que el modelo está representando un hundimiento mayor al real en este caso concreto, con toda probabilidad el hormigón no sufrirá daños. Será el acero el que tenga una deformación plástica (la cual se puede visualizar fácilmente en la figura 3.2, incluso su valor de unos 2 mm de diferencia entre tubo y bloque) y que habrá que valorar si permite su reutilización haciendo posible la extracción del tubo al finalizar la carga.

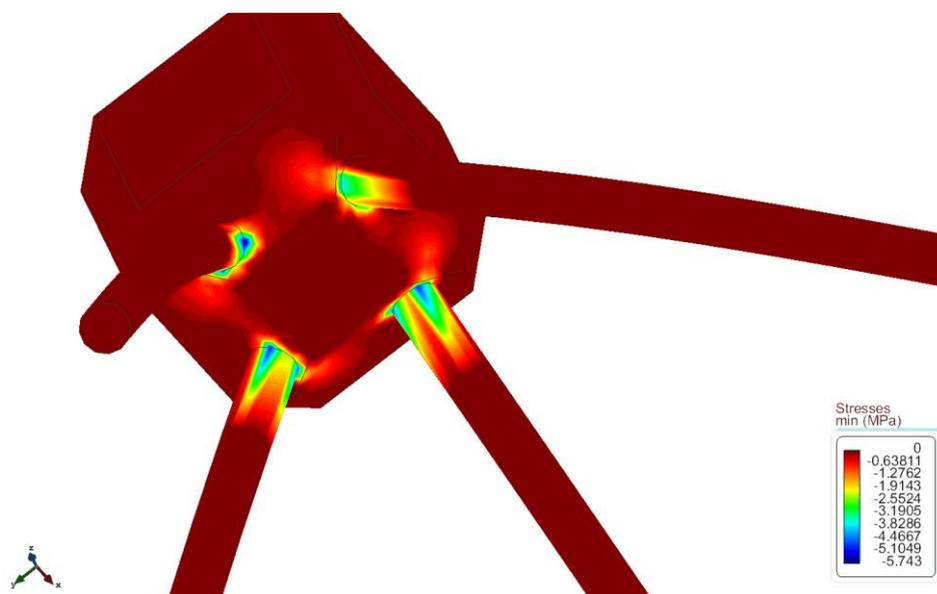


Fig. 3.4. Visualización de las tensiones.

3.1.2 Esfuerzos flectores.

Para este caso no se dispone de ningún ensayo real, por lo que serán de gran valor los datos de hundimiento y tensiones que se puedan extraer. Este caso es interesante, ya que el *Piloedre* puede utilizarse para cimentar mobiliario urbano, como puede ser una farola o un mástil de bandera. En estos casos con el viento o cualquier elemento superior que reciba un esfuerzo lateral, se produce en el *Piloedre* un esfuerzo flector, que se representará en el modelo como un momento sobre el eje x o y (indiferente) ya que el z no era interesante, y del que no se tiene mucha información respecto a las reacciones que produzca.

El momento máximo recomendado por su ficha técnica es de 5 kN·m, que es el momento representado. No obstante por limitaciones de construcciones del modelo, no se han obtenido tensiones coherentes con la realidad, por lo que se ha decidido estudiar los desplazamientos para tener una idea de cómo trabaja a flexión el *Piloedre* para en apartados futuros realizar alguna comparación. Esto es debido a que la única forma de la que se han podido realizar cálculos es añadiendo una lámina infinitesimal en la superficie superior del *Piloedre* a la que se le ha añadido el momento M_x de 5 kN·m, ya que no se puede aplicar sobre sólidos al no disponer de esa libertad de rotación. Esto ha permitido ver los desplazamientos al tener un contacto continuo, pero no la correcta transmisión de tensiones.

En la figura 3.5 se pueden apreciar los desplazamientos. Se observa la dificultad del *Piloedre* de resistir esfuerzos de flexión, ya que aumentamos el orden de desplazamiento al centímetro, llegando a un máximo de 3,2 centímetros en la zona superior del bloque. En la figura se observa el conjunto desde el eje x, que es el que contiene el momento, y se puede visualizar la rotación que impone en la cimentación, haciendo que un tubo ascienda y el otro se hunda más en el terreno.

Hay que recalcar que para este modelo no se disponen de datos a flexión, y por lo tanto los datos deben ser considerados de forma orientativa, al no poderse realizar un calibrado debidamente. En una próxima sección del estudio, se valora la inclusión de tubos más largos para comprobar si mejora el comportamiento frente esfuerzos de flexión, y por lo tanto también serán resultados orientativos, en los que únicamente se podrá valorar si ha mejorado o empeorado la situación.

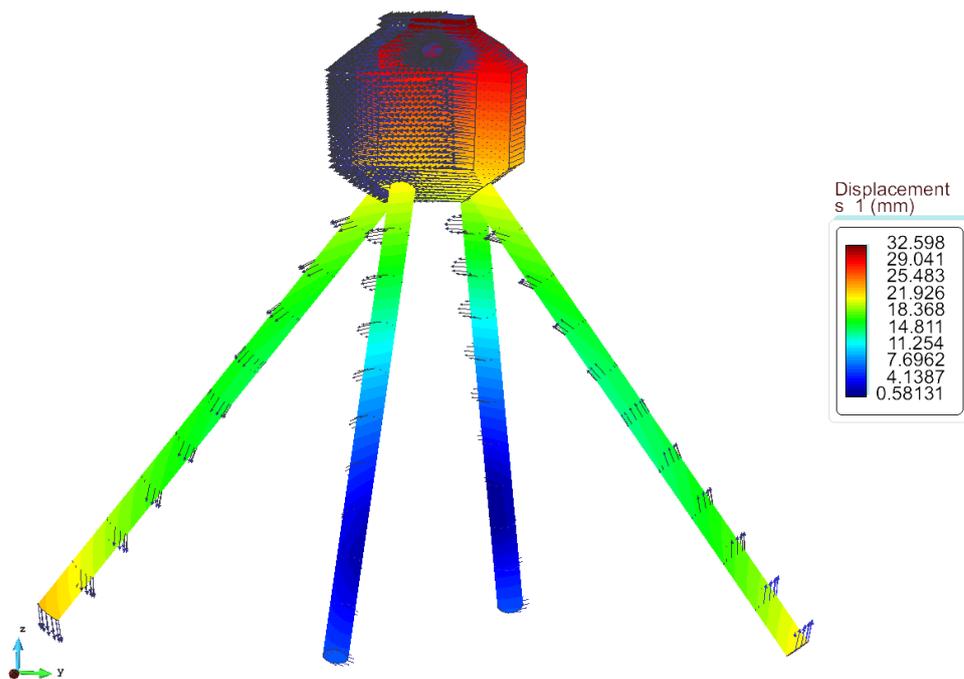


Fig. 3.5. Desplazamientos y direcciones frente a esfuerzo a flexión.

3.1.3 Esfuerzos laterales.

En este sentido tampoco se disponen de datos de campo. Se aplica una carga lateral en el mismo punto de siempre, en el eje x o y indiferentemente. Se ha aplicado una carga de 20 kN y se ha hecho de forma incremental, con siete iteraciones. Se conoce por la ficha técnica del *Piloedre* y sus recomendaciones que los esfuerzos laterales no deben sobrepasar 15 kN, sin embargo se ha testado un poco más allá.

En la siguiente figura, se pueden apreciar las deformaciones en el eje vertical. Como se puede observar son bastante grandes en la iteración 7, (del orden de 4 centímetros) en la cual doblamos la carga lateral permitida en las especificaciones del *Piloedre*. También hay que tener en cuenta que la barra situada en la dirección a favor de la tensión se hunde, mientras que la opuesta se levanta, lo que produce una rotación en el elemento.

En la figura 3.6 se pueden observar las deformaciones verticales, con su signo, donde se visualiza que uno de los tubos (el contrario al sentido de aplicación de la fuerza) asciende mientras el opuesto se hunde.

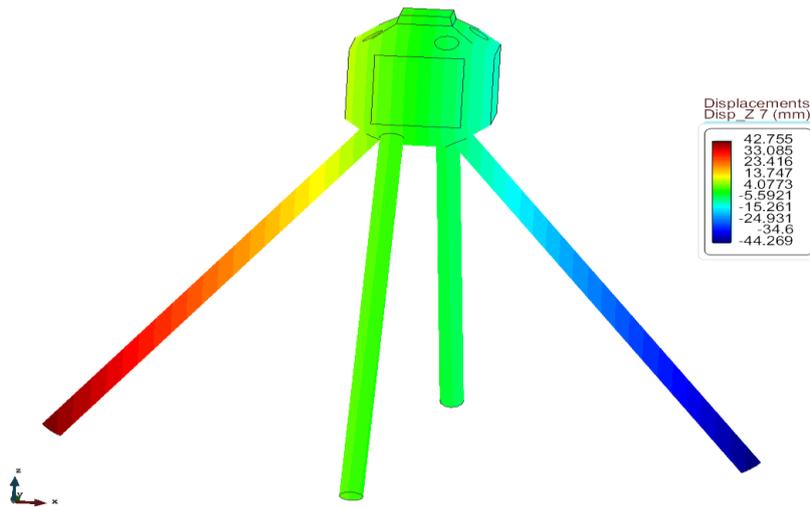


Fig. 3.6. Desplazamientos en el eje vertical bajo esfuerzo lateral de 20kN.

En las figuras siguientes se analizan los desplazamientos y las tensiones:

-Figura 3.7: Se pueden observar los desplazamientos máximos laterales, que se producen en el bloque de hormigón, en el mismo sentido en el que se aplica el esfuerzo lateral. En su carga máxima permitida (10 kN), existe un desplazamiento de 3,01 centímetro, el cual se debe tener en cuenta ya que es de un orden superior a las magnitudes de desplazamientos cuando aplicamos esfuerzos verticales. Esto es debido a que las funciones que representan el terreno asumen curvas mucho menores en las direcciones x-y, ya que el suelo aumenta en mayor medida su rigidez en dirección vertical debido a la compactación generada a medida que generamos hundimientos, propiedad común en suelos.

-Figura 3.8: Se realiza el análisis de la tensión de Von Mises en los tubos, ya que se considera un buen análisis que combina las tensiones principales para detectar fallo en materiales dúctiles. En él se puede observar, que la tensión máxima soportada en los tubos es de 70,3 MPa para un esfuerzo lateral de 10 kN (máximo recomendado). Es una tensión similar a la soportada en tracción y como se ha mencionado es coherente. Sin embargo cabe recordar, que es una tensión producida en el mismo lugar que en la figura 3.2 y que es debido a que el modelo no permite separarse a acero y hormigón en ese punto, cuando la deformación de los tubos lo requiere. Nos indica entonces, que se siguen produciendo deformaciones plásticas y se necesita de un ensayo para ver si son lo suficientemente grandes como para no permitir a los tubos ser extraídos. Ignorando este punto todas las tensiones de los tubos son inferiores a 10MPa por lo que no significan ningún problema estructural.

-Figura 3.9: Se analiza nuevamente las tracciones producidas en el bloque de hormigón. Se ha comprobado que las tensiones de compresión no superan los 20MPa en el caso de duplicar el esfuerzo máximo permitido, por lo que no existirá ningún problema estructural a compresión. Se puede observar que la tensión de tracción máxima producida en el bloque para el esfuerzo de 10 kN es de 5,21 MPa, similar a la tensión generada en el caso de esfuerzos de tracción sobre el *Piloedre*. De nuevo son esfuerzos situados en el mismo punto de contacto con el tubo de acero a la salida del bloque, por lo que el mayor problema podría darse en forma de descantillamiento del bloque en esa pequeña zona.

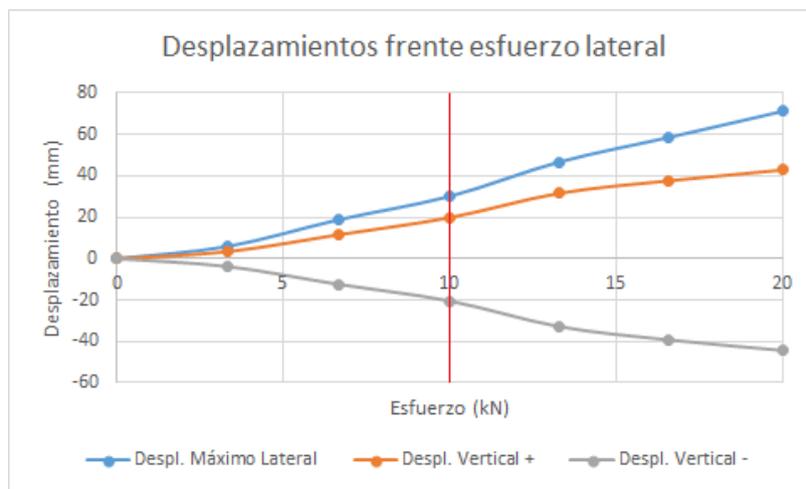


Fig. 3.7 Análisis de desplazamientos laterales (en dirección del esfuerzo aplicado) y desplazamientos verticales máximos frente a esfuerzos laterales.



Fig. 3.8 Análisis de tensión de Von Mises en las láminas tubulares.

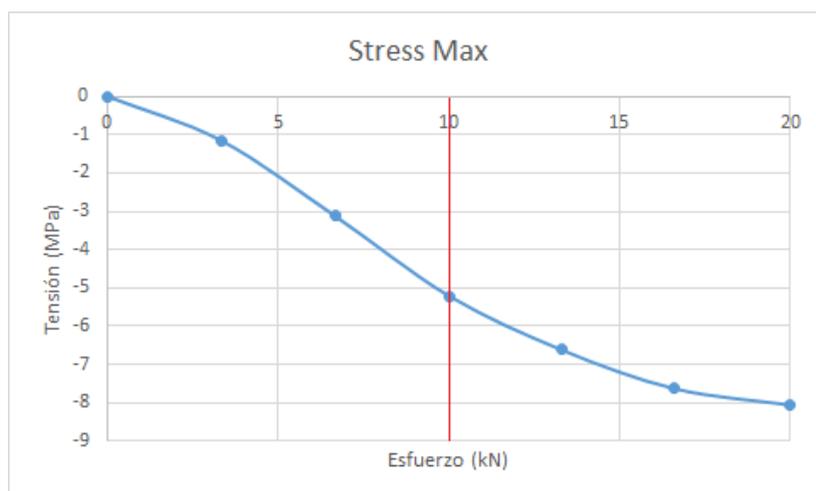


Fig. 3.9 Análisis de tensiones de tracción máximas producidas en el bloque de hormigón.

3.2 Durabilidad.

En términos de durabilidad, el único elemento que puede llegar a preocupar a los responsables de *Piloedre*, viene en referencia con los tubos laminares de acero. El proceso que comprometer su calidad estructural es la oxidación.

Se han realizado diversos modelos con diferentes porcentajes de oxidación. Los porcentajes escogidos son del 10%, 25%, 50% y 70%, a los que obviamente no se espera llegar en ninguna condición, pero puede ser útil para ver evolución de tensiones. Para modelar estas oxidaciones simplemente se ha reducido la sección del acero, originalmente en 2,9 mm en los porcentajes referidos. Finalmente se hace una comparación de desplazamientos, tensiones en los tubos y tracciones en el bloque (ya que una vez más las tensiones compresivas están muy por debajo del límite del hormigón armado utilizado).

- Figuras 3.10 y 3.11: En la primera de ellas se puede ver la evolución de hundimientos (en milímetros) para los diferentes porcentajes de oxidación seleccionados. Se puede apreciar que no existe un aumento significativo –simplemente de un orden inferior al milímetro– sin un gran porcentaje de óxido, por lo que asumiendo que en condiciones normales no se generará un gran deterioro en el acero, no debe preocupar la aparición y reducción de sección en referencia con los hundimientos.

En la siguiente podemos observar la evolución del hundimiento máximo bajo la carga de 28,57 kN utilizada siempre. Se puede observar una tendencia creciente que describe un comportamiento intuitivo, a medida que nos acercamos al 100% de oxidación y por lo tanto

desaparición de los tubos como elemento estructural, los hundimientos aumentan considerablemente.

- Figura 3.12: En esta figura, se analiza nuevamente las tensiones de Von Mises en los elementos de acero, para ver la evolución de tensión máxima bajo la carga de 28,57 kN en diferentes porcentajes de oxidación. Estas tensiones, se generan nuevamente en el contacto con el hormigón donde el acero requiere deformarse. Las cargas, son considerables (superiores a 100MPa), sin embargo el acero N80 tiene 552 MPa de límite elástico según la norma API 5CT, por lo que no debería surgir ningún problema estructural. Se observa un aumento creciente en función de la pérdida de sección del acero.

- Figura 3.13: Finalmente se analiza la distribución de tracciones máximas en el hormigón (punto de contacto con acero), y se observan unas tensiones que superarían la resistencia del hormigón, por lo que nuevamente se podría producir descantillamiento del hormigón en esa zona por las presiones del acero al intentar deformarse. Se observa, una evolución diferente, ya que al perder gran parte de la sección del acero, la curva de tracciones máximas disminuye, lo que podría significar que al perder demasiada sección el acero se deforme más fácilmente y no transmita tantas tensiones al hormigón en ese punto de contacto.

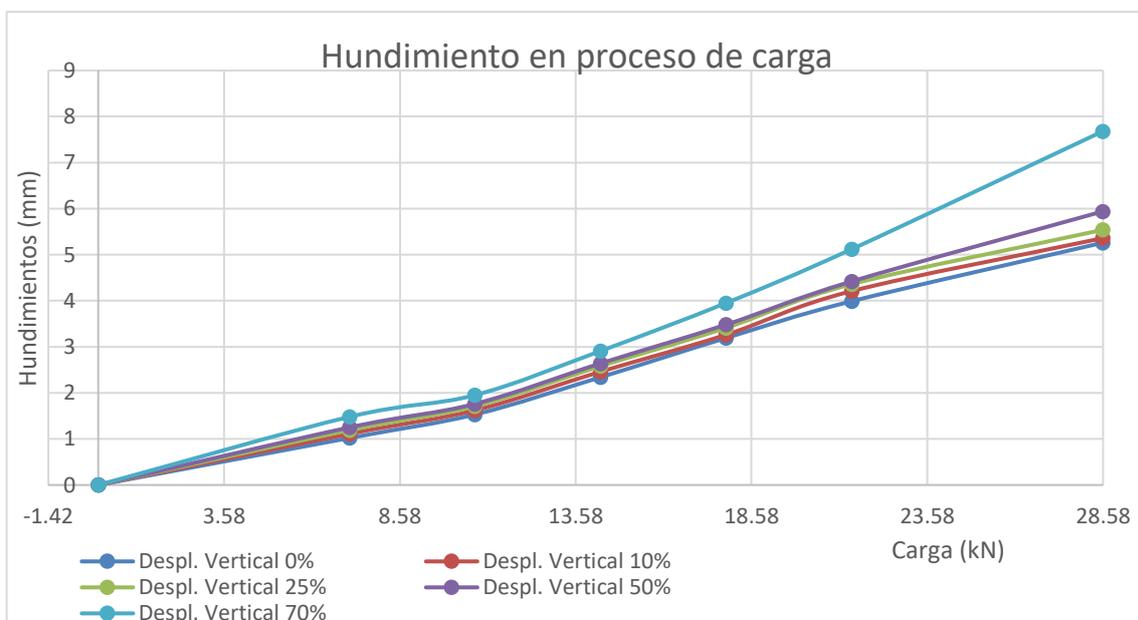


Fig. 3.10. Hundimiento experimentado en carga incremental para diferentes porcentajes de oxidación.

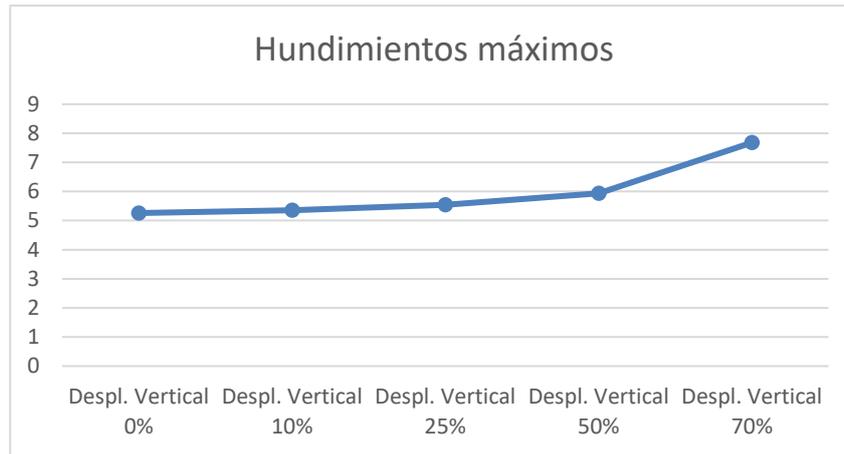


Fig. 3.11. Hundimientos máximos de la cimentación para diferentes porcentajes de oxidación.

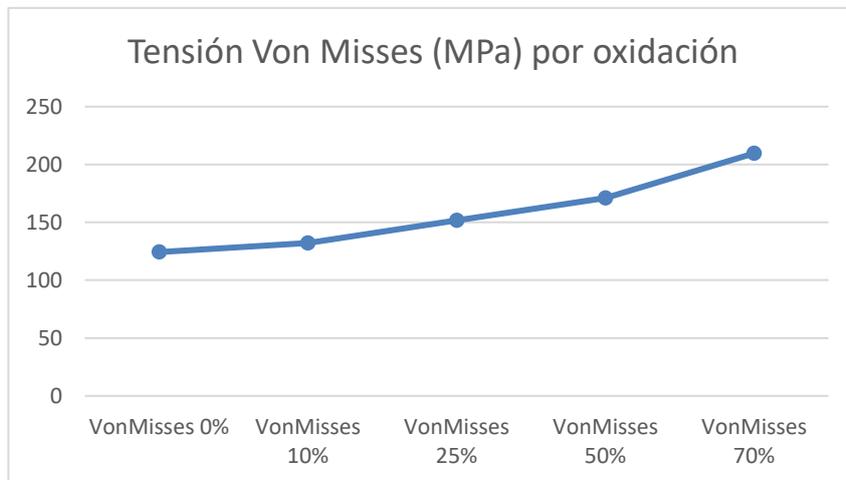


Fig. 3.12. Tensión de Von Misses en los tubos máxima para diferentes porcentajes de oxidación.

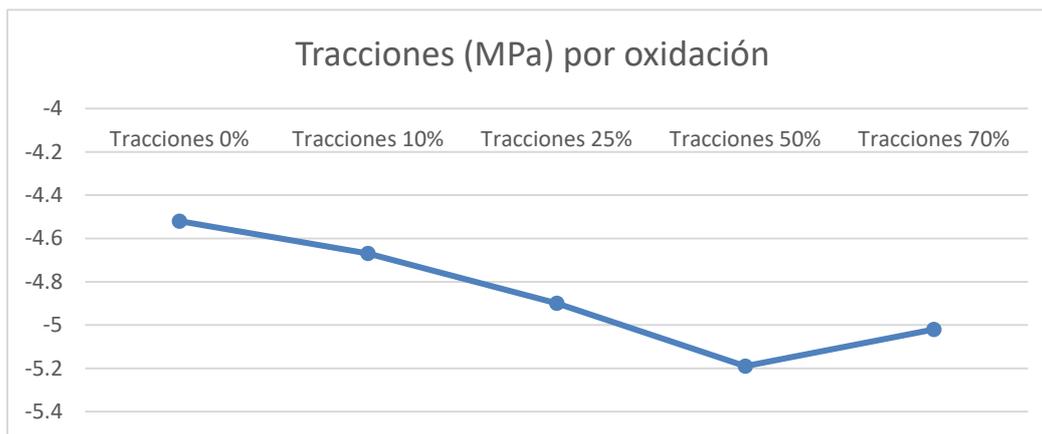


Fig. 3.13. Tracciones máximas en el bloque para diferentes porcentajes de oxidación.

3.3 Instalación y uso.

En este aspecto, los responsables de *Piloedre* están interesados en ver qué tipo de respuesta ofrece el producto frente a diversas situaciones que pueden darse a la hora de instalarlo in situ. Principalmente, se comentan dos situaciones, una problemática y otra de refuerzo.

La situación problemática que quieren estudiar, y que sin duda puede darse a la hora de instalar el *Piloedre*, es de que manera afecta al desarrollo estructural el que un tubo no llegue a penetrar completamente por culpa de un factor externo, como puede ser la intercepción de roca dentro del terreno al penetrar.

La situación de “refuerzo” viene sugerida por la instalación adicional de una cimentación superficial tradicional. Los responsables están interesados en observar si merece la pena, en ciertas situaciones –ya una de las ventajas de *Piloedre* es su sencillez de instalación–, acompañar el producto con una cimentación adicional, si es que genera grandes mejoras o ventajas respecto a la solución normal.

3.3.1 Uso del *Piloedre* con cimentación adicional.

Para simular la cimentación adicional, se ha recurrido a una solución sencilla, siguiendo el concepto de la sencillez de instalación del *Piloedre*. Ésta, se ha representado como una lechada de cemento con las propiedades típicas de un mortero que se incluye como un material preestablecido en RAMSERIES. Se ha generado un sólido alrededor del *piloedre* de 1 metro cuadrado por 16 centímetros de alto. El contacto entre ambos sólidos se ha fijado como continuo ya que el mortero endurecerá alrededor del *Piloedre*.

En la figura 3.14 se puede observar como se ha diseñado la geometría del modelo, haciendo coincidir la cimentación con las paredes laterales del *Piloedre* y aplicándole las mismas restricciones de terreno que existían antes sobre estas.

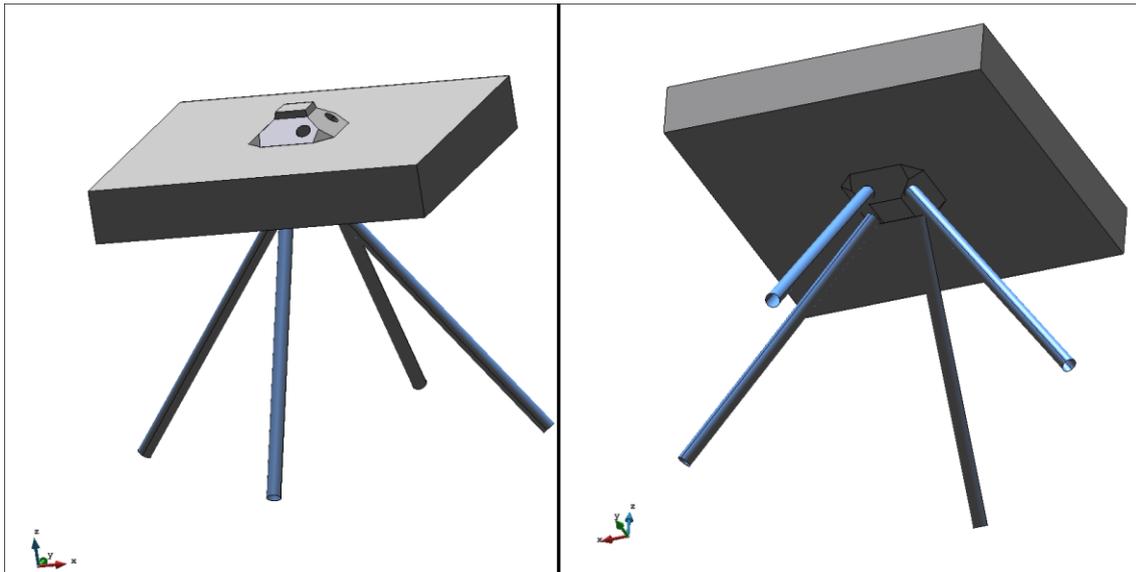


Fig. 3.14. Piloedre con cimentación adicional.

En las figuras inferiores se pueden apreciar los resultados siguientes:

-Figura 3.15: Puede observarse como la cimentación adicional supone una gran reducción en los desplazamientos verticales del conjunto. De un desplazamiento máximo de 5,26 mm se reduce a un desplazamiento máximo de 1,35 mm lo que supone una reducción del 75%. Por lo tanto, pese a perder una de las mayores ventajas de *Piloedre*, que es la instalación sencilla y rápida, se puede considerar esta solución cuando los hundimientos permitidos sean muy restrictivos.

-Figuras 3.16 y 3.17: Se puede apreciar una reducción enorme en cuanto a la tensión en tubos, por lo que nos encontramos en rangos muy aceptables para el acero. También en cuanto a las tracciones ocasionadas –nuevamente las compresiones no se acercan a ningún límite estructural- en el bloque de hormigón, se obtienen unos valores menores a 2MPa, por lo que con el hormigón utilizado no hay problema estructural. Estas tensiones máximas, son producidas, como en todos los casos, en la zona de contacto entre tubos y bloque a la salida de este. En esta situación evitamos el descantillamiento, y en gran medida la deformación de los tubos, por lo que prácticamente garantiza la reutilización de estos posibilitando su extracción.

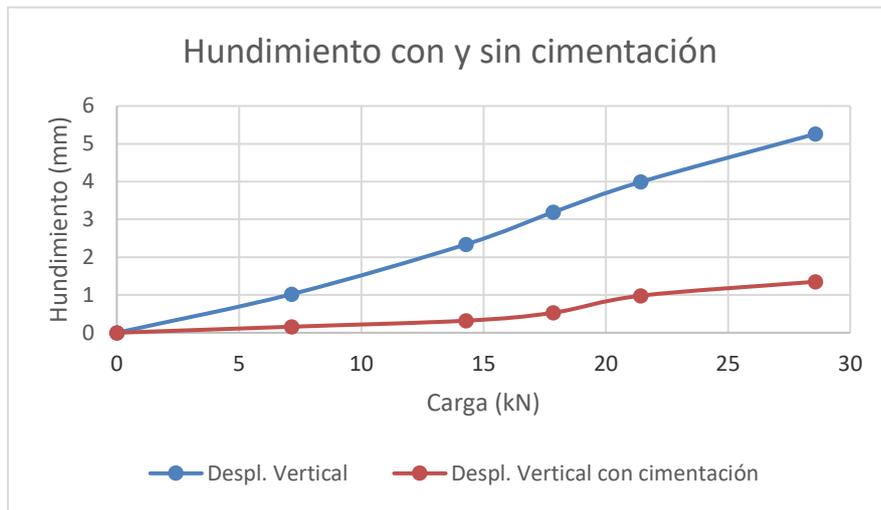


Fig. 3.15. Desplazamientos verticales en el Piloedre con y sin cimentación adicional.

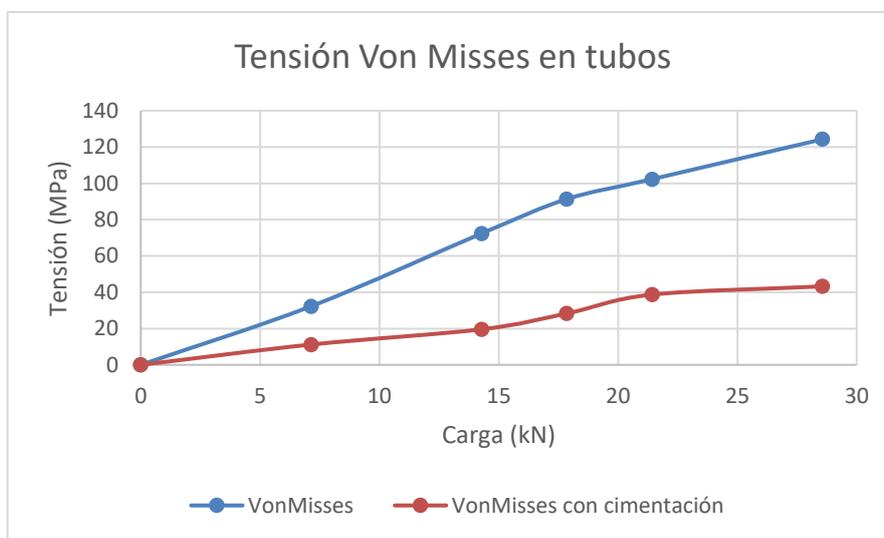


Fig. 3.16. Análisis de tensión de Von Mises en tubos de acero con y sin cimentación adicional.

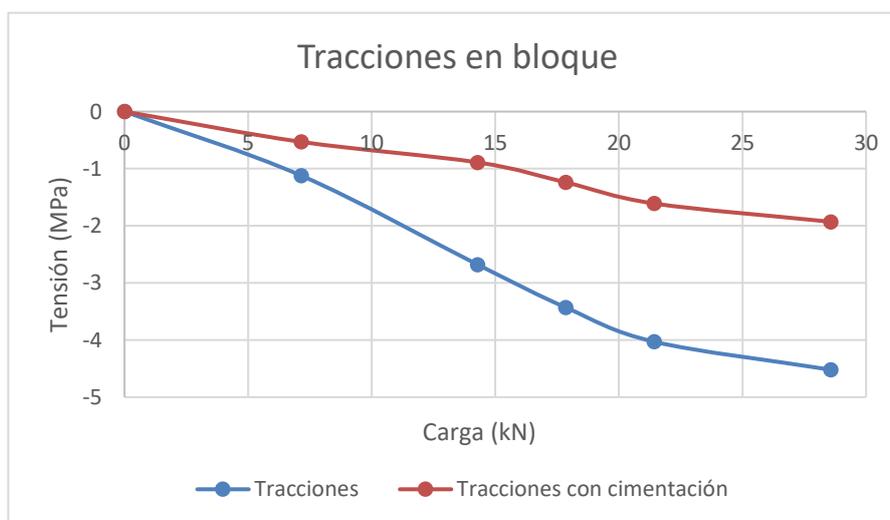


Fig. 3.17. Análisis de tracciones en el bloque de hormigón armado con y sin cimentación adicional.

3.3.2 Problema en la penetración de un tubo.

Este caso supone la imposibilidad de uno de los tubos de penetrar completamente en el terreno, por ejemplo por un estrato rocoso, y por lo tanto de su reducción de la capacidad actuando en el conjunto. Para comprobar qué efectos tiene sobre la cimentación, se ha simulado la traslación de uno de los tubos 30 centímetros hacia el exterior, y posteriormente se ha procedido a la carga habitual para ver cuál es el alcance del efecto de esta problemática en la instalación del *Piloedre*.

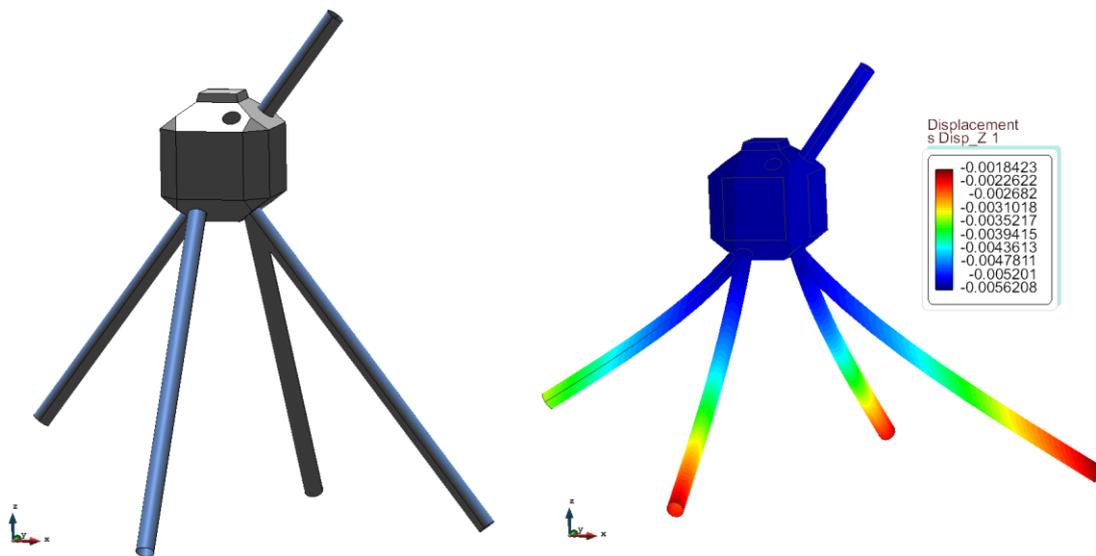


Fig. 3.18. Piloedre con problema en penetración de tubo y resultado de desplazamientos.

En la figura 3.18 se puede observar como se ha simulado la problemática en la penetración de uno de los tubos escogidos al azar. También se pueden observar los desplazamientos y la deformación (aumentada en un factor de 50 como anteriormente), bajo la carga tipo de 28.57 kN utilizada en toda simulación a compresión.

Se observa un desplazamiento máximo del bloque de 5,62 milímetros, con lo que en referencia a desplazamientos, se puede adelantar que la imposibilidad de penetrar totalmente de uno de los tubos, no supone una gran pérdida de rendimiento.

En el ámbito de las tensiones, se analiza la tensión en los tubos y las tracciones del bloque como en los casos anteriores:

- Figura 3.19: En el análisis de tensión de los tubos realizado, no se observa un gran incremento que pueda comprometer la integridad estructural más de lo que se puede llegar a comprometer con los cuatro tubos situados correctamente. Las tensiones mostradas,

corresponden a la tensión máxima en cada tubo, que se produce en la misma situación de siempre. En el tubo con menos penetración, la tensión máxima solo alcanza 107,4 MPa por lo que se aprecia una reducción de la carga y deformación soportada por éste.

- Figura 3.20: En cuanto a las tracciones presentadas por el hormigón, las tracciones máximas se generan como habitualmente en la cara inferior del *Piloedre* entre los tubos y su contacto con ellos. En este caso, sí que podemos apreciar un gran aumento, del orden de 2MPa frente al comportamiento entre el caso normal y el tubo penetrando de forma impedida. Por lo tanto hay que tener especial cuidado en esta situación por roturas excesivas en esta cara, que puedan significar movimientos no deseados y deformaciones mayores en los tubos, con lo que se imposibilita su reutilización.

No obstante, hay que recordar que el modelo –por su limitación- no permite en esta zona la separación de nodos del bloque y del tubo, y la necesidad del tubo de deformarse, al ser impedida genera estas grandes tracciones en el bloque. Esto debe ensayarse en campo para poder asegurar con total certeza, si se producen roturas indeseadas o descantillamientos excesivos en la parte inferior que puedan comprometer al *Piloedre*, o si por el contrario no se llegan a producir tensiones tan elevadas y no supone un problema.

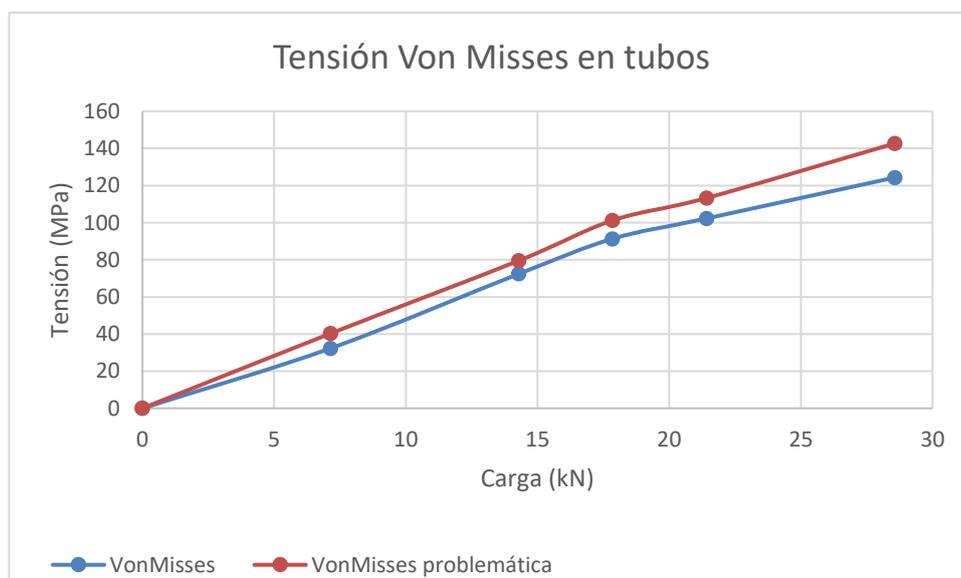


Fig. 3.19. Análisis de tensión de Von Mises en los tubos de acero. Valores máximos.

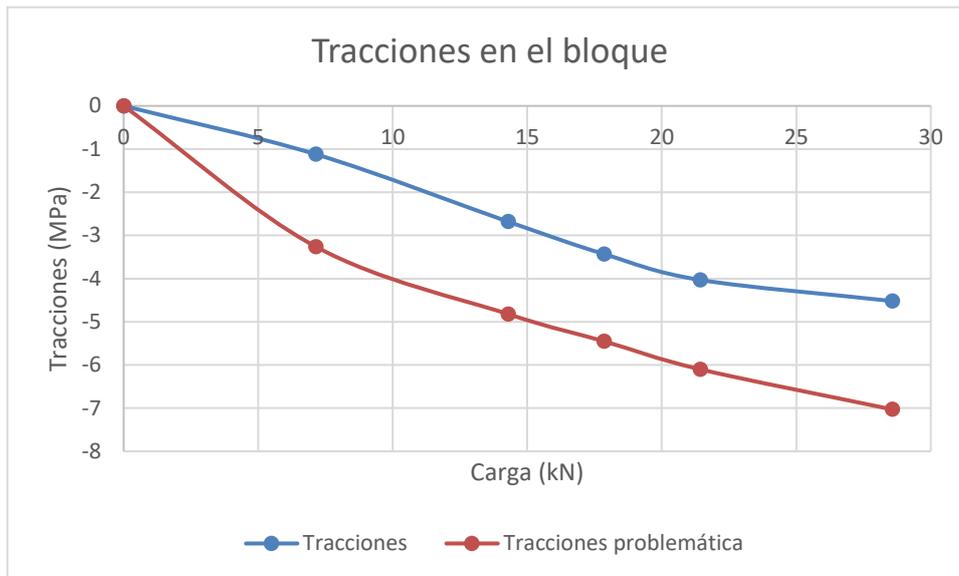


Fig. 3.20. Comparativa de tracciones en la cara inferior del bloque (máximas).

3.4 Morfología y diseño

Referente a la morfología, los responsables de *Piloedre*, están interesados en mejorar, o comprobar si aportan significativas mejoras, cambios en la geometría y la forma del *Piloedre*. Tal y como se indica en su propia ficha técnica, se considera que el producto funciona estructuralmente por su geometría, es decir, en su geometría reside la capacidad resistente de la cimentación.

En este sentido, hay infinidad de opciones y cambios que se podrían realizar en el *Piloedre*, pero los desarrolladores intuyen que las siguientes tres situaciones podrían significar una mejora del producto simplemente modificando algún parámetro:

- ¿Aporta algo el hecho que los tubos sean 30 centímetros más largos o más cortos?
- En que influye la inercia del tubo, ¿aporta algo aumentar el espesor?
- ¿Mejora el funcionamiento del conjunto frente a esfuerzos de flexión si se hacen tubos más largos?

Se ha procedido al estudio de las situaciones planteadas, para comprobar si realmente merece la pena el estudio en profundidad y ensayo en campo, o no son de utilidad.

3.4.1 Longitud de los tubos.

Actualmente, los tubos han sido modelados con una longitud de 120 centímetros. Estos tubos tienen la misma longitud que los tubos utilizados en ensayos a compresión y a tracción de los cuales se han usado datos durante el estudio.

La ficha técnica de *Piloedre* indica que para terrenos de dureza considerable se puede reducir la longitud de los tubos a 90 centímetros, y para suelos más blandos se debe mantener la longitud de 120 centímetros. En esta sección se va a comprobar la diferencia en los resultados, entre 90, 120 y 150 centímetros como se preguntan los responsables. La diferencia reside en la utilización del mismo terreno para los tres tipos de tubos, para poder valorar el efecto de la longitud en los hundimientos y tensiones. Todos los modelos han utilizado la carga tipo de 28,57 kN.

En primer lugar se han comparado los valores máximos que se han ido comparando las diferentes secciones. En cuando al hundimiento, tal y como se observa en la figura 3.21, se aprecia un comportamiento que puede ir en contra de la intuición, y es que a medida que los tubos son más cortos, se reduce el hundimiento. Es un comportamiento extraño, ya que cuanto más largo es un tubo, más superficie de restricción posee, y por lo tanto más dificultad debería encontrar para que se produzca hundimiento.

También en el sentido de los hundimientos, se ha querido comprobar y cuantificar cual es la deformación que sufren los tubos en función de su longitud. Es un parámetro de vital interés para el desarrollo del *Piloedre* para permitir su reutilización. En la figura 3.21 se puede apreciar las deformaciones para los tubos con longitud de 90 y 150 centímetros respectivamente. Para cuantificar las deformaciones se ha calculado la diferencia entre el hundimiento máximo (producido en el bloque y el inicio de los tubos) y el mínimo (producido en el extremo final de los tubos), y se ha relativizado a su longitud total, en definitiva:

- Deformación para tubos de 90 cm: $(5,088-2,855)/900 = 0,00248$, es decir un 0,25%
- Deformación para tubos de 120 cm: $(5,26-1,82)/1200 = 0,002866$, es decir un 0,29%
- Deformación para tubos de 150 cm: $(6-0,387)/1500 = 0,00374$, es decir un 0,37%

Por lo que se observa, la deformación es mayor a medida que aumentamos el tamaño de tubo, y esta no aumenta de forma lineal, como sucede con los hundimientos. Por lo que si

aumentamos el tamaño de tubo tenemos que considerar este factor, para la posible reutilización del *Piloedre*.



Fig. 3.21. Comparativa de hundimientos máximos según longitud de tubo.

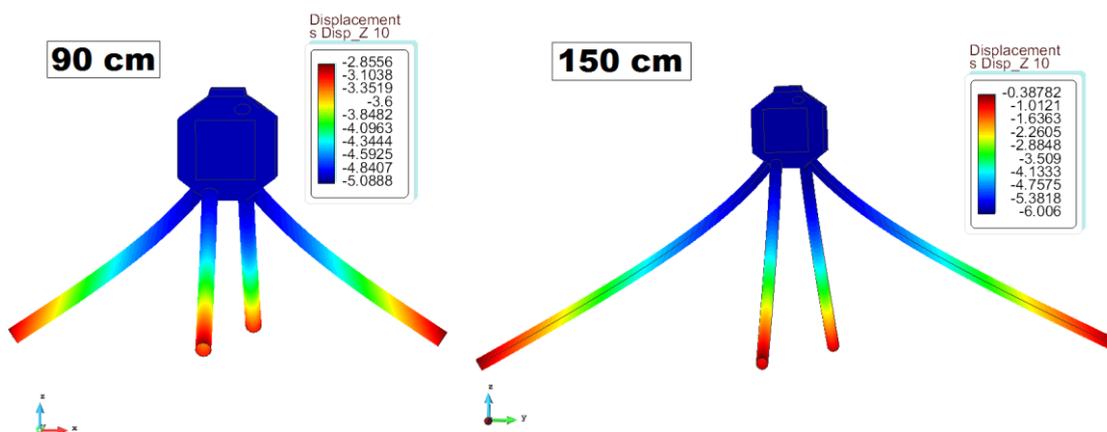


Fig. 3.22. Deformación visual (factor 50) de las diferentes longitudes de tubo.

En cuanto al análisis tensional, se pueden observar dos comportamientos que llaman la atención.

Si nos centramos en las tensiones máximas en los tubos (análisis tensional de Von Mises, figura 3.23), podemos observar que el caso estándar de 120 centímetros representa el mínimo de los tres. En este análisis los tubos de 90 centímetros representan un incremento –no muy elevado– de las tensiones en los tubos que no deberían suponer ningún problema estructural. En los tubos más largos, sin embargo, tenemos un aumento considerable de las tensiones y

habría que tener especial cuidado, ya que significan una mayor deformación (como ya se ha comprobado anteriormente).

En referencia con las tracciones máximas del bloque de hormigón –teniendo en cuenta que se ha verificado que no hay problemas a compresión- nos encontramos lo contrario al anterior análisis (figura 3.24). En este caso, el tubo estándar de 120 centímetros representa el máximo de tracciones, y la reducción y ampliación de longitud un descenso. Se puede considerar un descenso bastante semejante, por lo que en ambos se produciría un beneficio en cuanto a los descantillamientos y tensiones en la parte inferior del bloque de hormigón.

Teniendo en cuenta todos los resultados, el modelo indica que disminuir la longitud de los tubos es el resultado más equilibrado. Sin embargo, habría que ensayar estos tubos en suelos blandos, ya que según la ficha técnica de *Piloedre* no son recomendados.

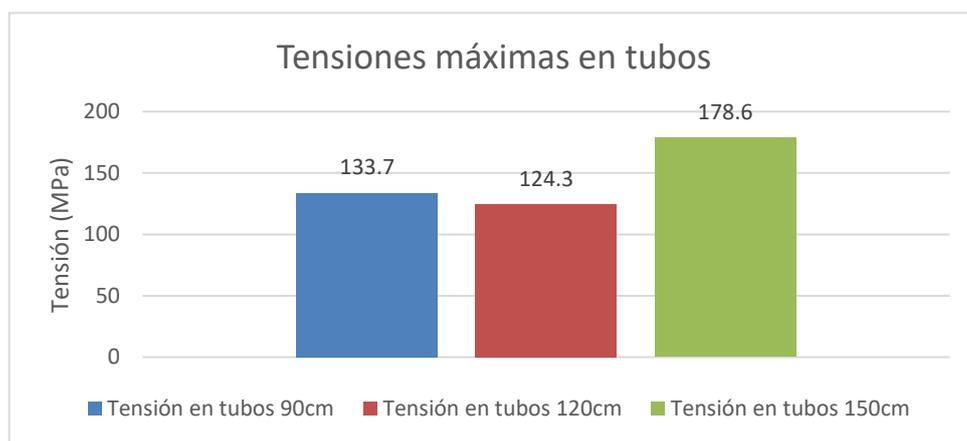


Fig. 3.23. Comparativa de tensiones máximas en tubos según longitud.

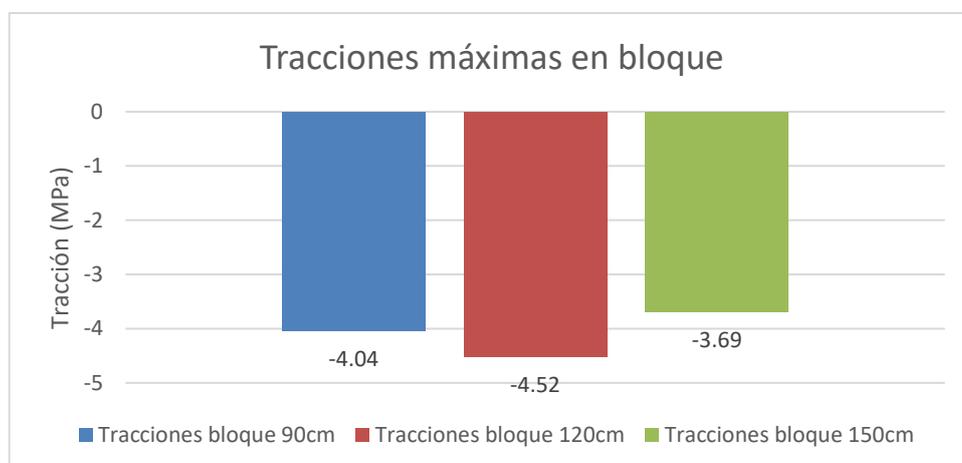


Fig. 3.24. Comparativa de tracciones máximas en el bloque según longitud.

3.4.2 Inercia del tubo.

Se tiene interés en conocer los resultados derivados de cambiar la inercia del tubo aumentando su sección. De forma similar a la sección de durabilidad, se ha procedido a realizar un modelado progresivo con un aumento del 10%, 25%, 50% y 100% del espesor inicial de 2,9 milímetros. De esta forma los espesores a modelar son 3,19, 3,625, 4,35 y 5,8 respectivamente.

Los resultados se pueden observar en las figuras siguientes. En referencia con los hundimientos se aprecia una clara tendencia a reducirse más en función de la inercia de los tubos. De hecho no es una reducción lineal si no que cada vez es mayor. En las tensiones máximas sobre los tubos de acero (análisis de Von Misses), se puede apreciar un comportamiento similar a cuando se alarga o acorta el tubo, se asume un máximo (10% de aumento) de tensiones sufridas en ellos, no obstante no es un aumento significativo y que pueda comprometer la cimentación mucho más que con espesor normal. Finalmente en cuanto a tracciones máximas en la cara inferior del bloque, podemos también observar un comportamiento opuesto a las tensiones de los tubos, y es un mínimo en el mismo punto (10%), y un aumento de las tracciones a partir de aquí, por lo tanto hay que tener en cuenta que un gran aumento de la sección del tubo, significará más tensión en el bloque y más descantillamiento o posibles roturas.

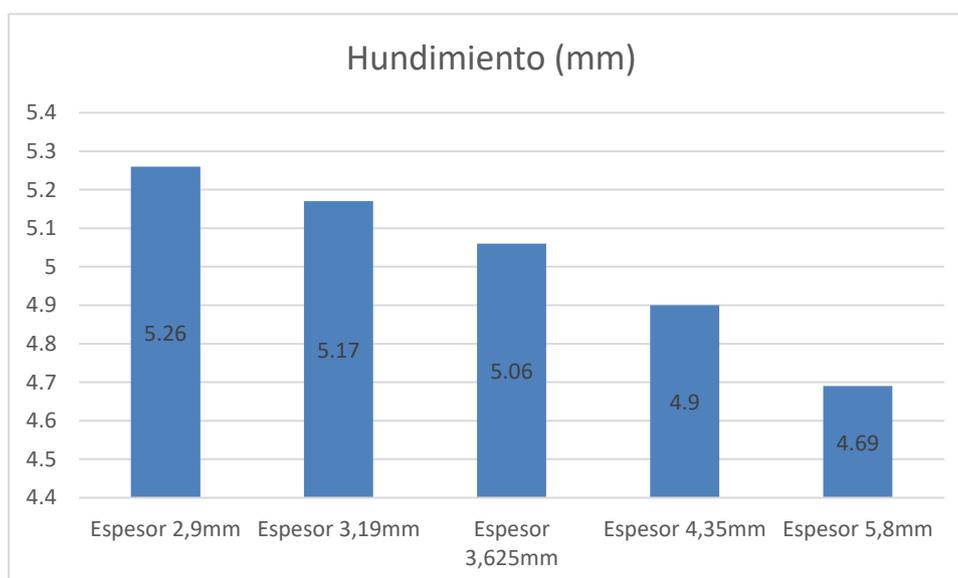


Fig. 3.25. Hundimientos máximos en función del espesor del tubo.

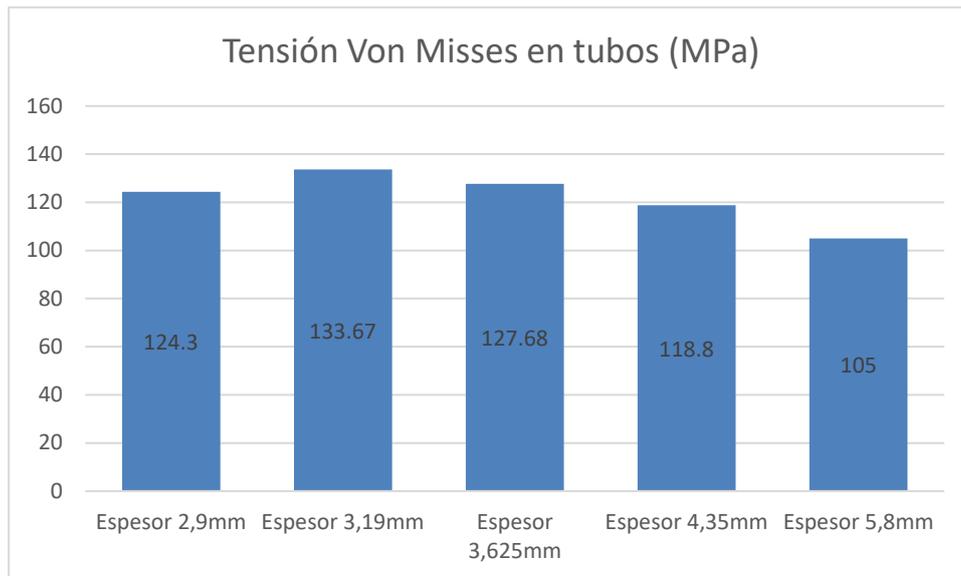


Fig. 3.26. Tensiones máximas en los tubos en función de su espesor.

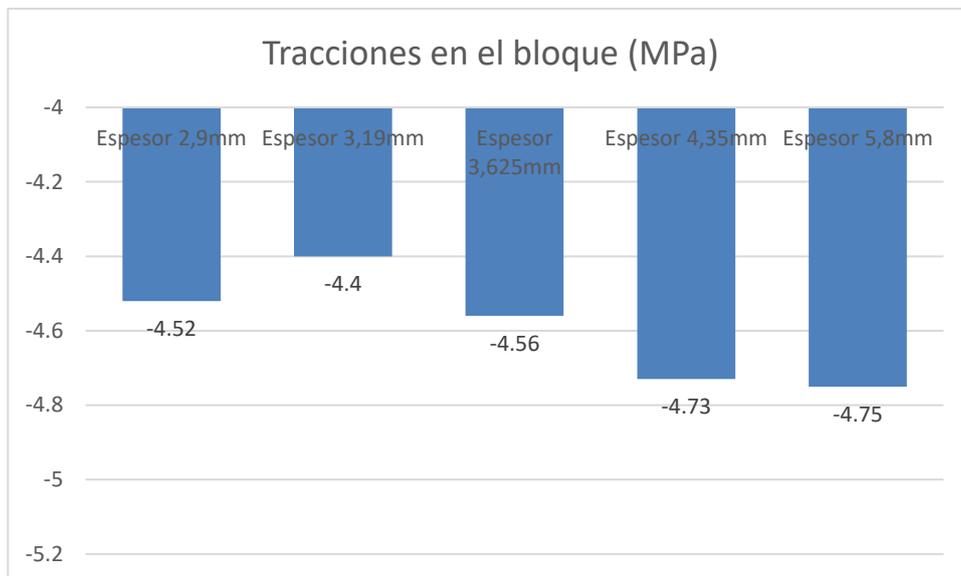


Fig. 3.27. Tracciones máximas en el bloque de hormigón según espesor de tubos.

Así mismo se ha comprobado la deformación del tubo y comparado con el espesor normal.

Para el espesor de 5,8 mm la deformación resulta:

- Deformación: $(4,69-2,42)/1200 = 0,001891$ o lo que es lo mismo de un 0,19%

En definitiva, se ha reducido la deformación longitudinal del tubo en más de un 10% respecto al grosor normal de 2,9 mm, un resultado a tener en cuenta.

3.4.3 Esfuerzos de flexión con tubos más largos

Esta cuestión es complicada de tratar sin ningún resultado de referencia. Por eso se tratara como una combinación de las secciones 3.4.1 (longitud de tubos) y 3.1.2 (esfuerzos de tracción). Por ello se comparará únicamente los desplazamientos producidos en el *Piloedre* con la situación normal –tubos de 120cm-, ya que no se ha logrado calibrar la transmisión de tensiones adecuadamente en una situación de esfuerzos flectores. El esfuerzo que se utiliza es siempre de 5 kN·m ejercido en la cara superior del *Piloedre* y en el eje x (Mx).

En la figura 3.28 podemos observar un gran cambio respecto a la figura 3.5, esta vez el centro de rotación del *Piloedre* se sitúa más arriba, y se reducen en un 50% aproximadamente los desplazamientos del bloque hasta los 1,5 centímetros. Sin embargo recae en el final de los tubos un desplazamiento como el que antes se presentaba en el bloque de 3 cm. Por lo tanto aumenta la deformación de los tubos y se reduce el desplazamiento en el bloque, lo que puede significar una ventaja en alguna situación en la que se deban soportar flectores y sacrificar la capacidad de reutilización del *Piloedre*.

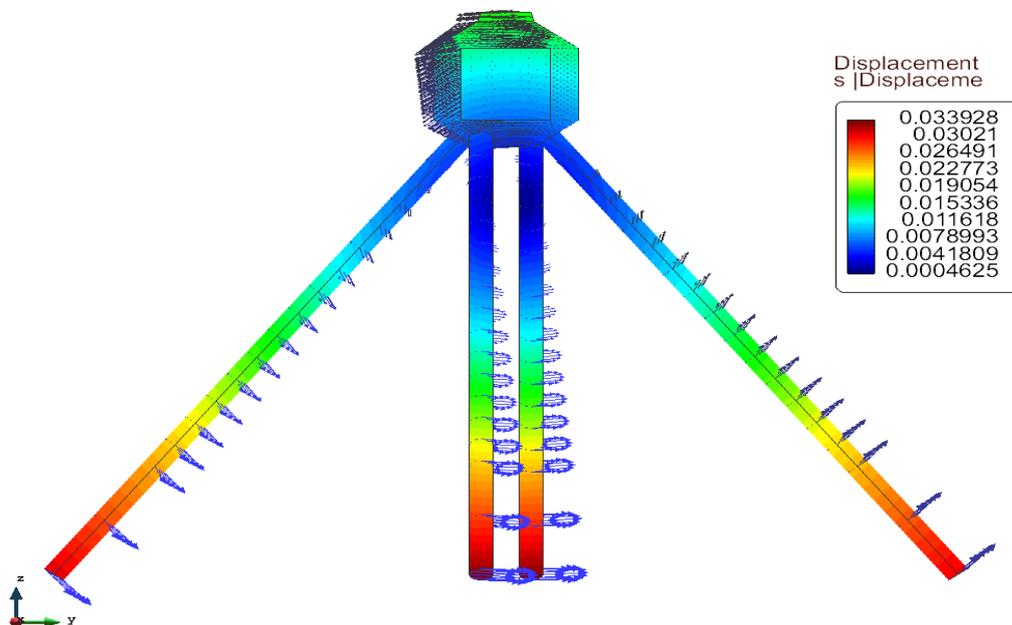


Fig. 3.28. Deformaciones y direcciones con tubos de 150 cm

3.5 Influencia del Terreno

La influencia del terreno en el comportamiento es un elemento clave, que determina incluso los parámetros geométricos en su ficha técnica. Está recomendado que cuanto más blando sea el suelo, mayor longitud deben tener los tubos de acero. Por ello, los desarrolladores quieren conocer diferentes tipos de reacción que produce el terreno si variamos sus parámetros.

Como ya se ha comentado, una de las mayores limitaciones de RAMSERIES para este estudio particular, es la de no poder caracterizar el terreno como un elemento, si no como una restricción, y por consiguiente, la imposibilidad de ver interacciones suelo-estructura. No obstante se realizará un análisis básico cambiando fundamentalmente la elasticidad de los suelos, como interpretación de su rigidez.

Para comparar la influencia del terreno en el comportamiento del *Piloedre*, se ha procedido a testar el modelo con 3 suelos diferentes, el original o blando con un módulo de elasticidad de 20 MPa, el medio con un módulo de elasticidad de 70MPa y finalmente un suelo duro de módulo de elasticidad de 200MPa.

Como se puede observar en la figura 3.29, y como era de esperar, los hundimientos se van reduciendo a medida que se aumenta la rigidez del terreno. Es un resultado coherente y esperado.

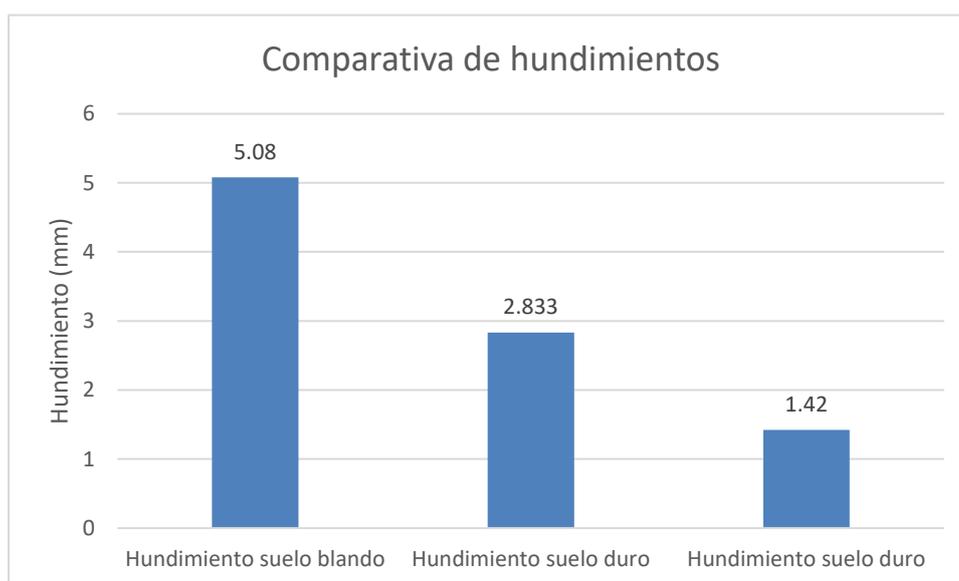


Fig. 3.29. Comparativa de hundimientos máximos según rigidez del terreno.

En las siguientes figuras, también se observa una disminución de las presiones máximas en ambos elementos. Esto es debido a que se producían en el contacto entre ambos, y al restringir las deformaciones con mayor intensidad el terreno, no se generan tantas presiones de contacto. Sin embargo sí que aumenta la media de presiones en los tubos debido a la imposibilidad de deformación, pero en valores inferiores a los 20 MPa.

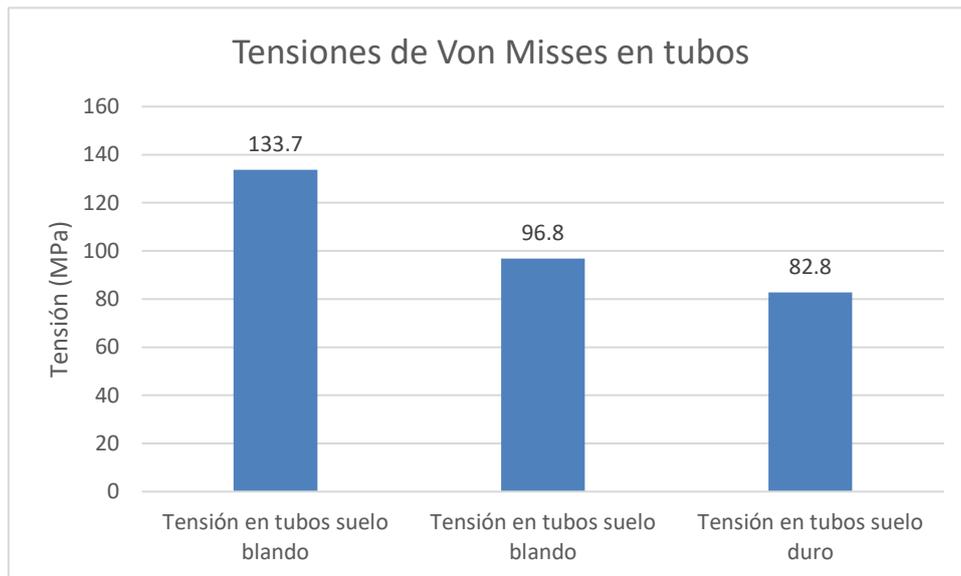


Fig. 3.30. Comparativa de tensiones de Von Mises máximas en los tubos según rigidez del terreno.

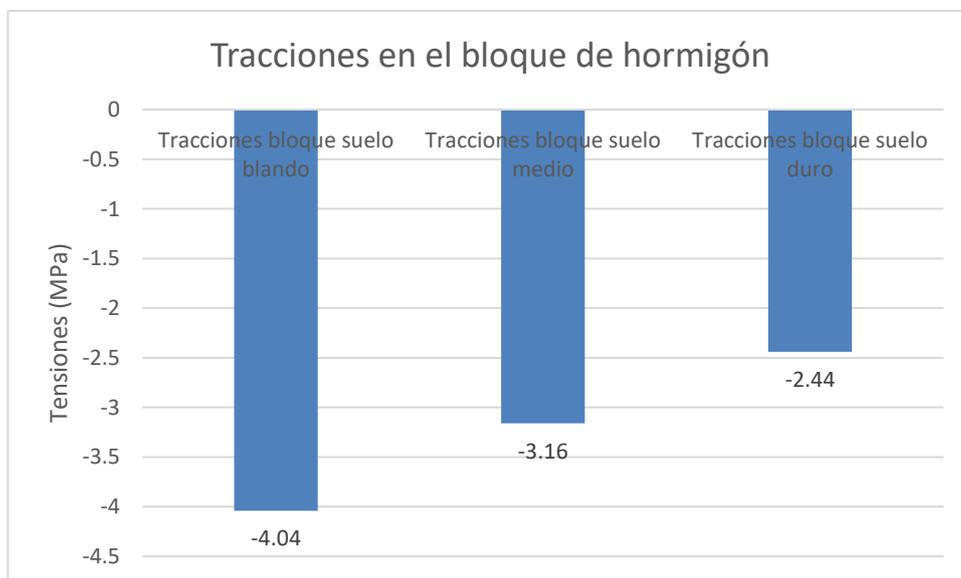


Fig. 3.31. Comparativa de tracciones máximas en el bloque según rigidez del terreno.

Finalmente se han calculado las deformaciones longitudinales de los tubos y se han reducido del 0.29% inicial a 0.16% y 0.066% al aumentar la rigidez. El terreno impide las deformaciones con mayor intensidad.

3.6 Materiales utilizados

En esta sección final, se toca el último de los aspectos en el que los desarrolladores de *Piloedre* han mostrado su interés. Los materiales del *Piloedre* están bien definidos, por un lado el hormigón armado HA-30 ofrece la resistencia necesaria para las compresiones y tracciones (exceptuando pequeños descantillamientos y fracturas en zona de gran tensión al contactar con acero en la salida), y el acero N80 de alto módulo ofrece un comportamiento estructural adecuado.

Sin embargo existen en muchas situaciones y ensayos deformaciones plásticas en los tubos, que dificultan o imposibilitan la extracción de los mismos, y la posterior reutilización del *Piloedre*, factor clave del producto.

La simulación se ha realizado con tubos macizos tal como se solicitaba con las características siguientes para la fibra de vidrio:

- $E = 72000.0$ MPa (Young)
- $\nu = 0.2$ (Poisson)
- Peso específico de 26290.8 N/m³

En la figura 3.32 se pueden observar los resultados de desplazamientos en el eje vertical en milímetros y la deformación del conjunto aumentada en 50.

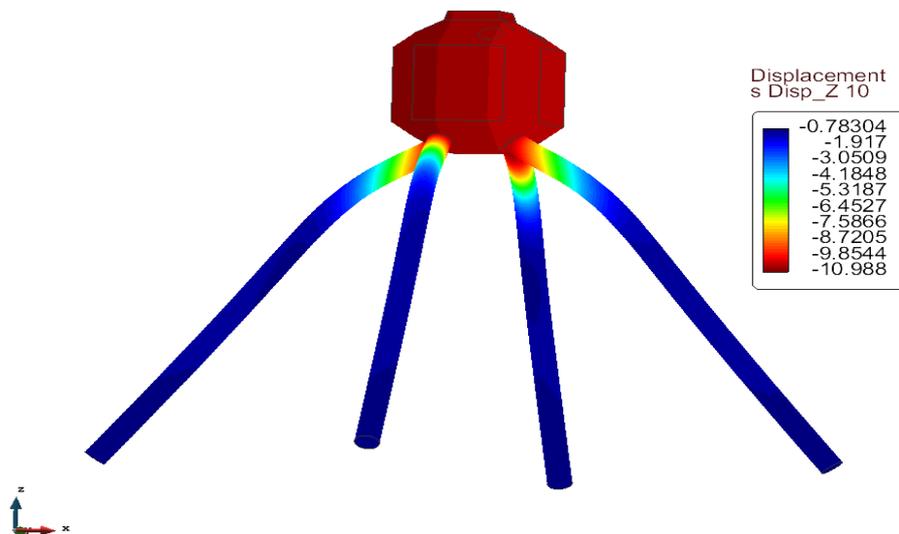


Fig. 3.32. Hundimientos (mm) y deformación (aumentada en factor 50).

Como se puede observar, se trata de un resultado totalmente contrario a los tubos de acero. En ellos la deformación describía una forma “cóncava”, mientras que con las barras macizas de fibra de vidrio sucede al contrario, disponiendo de una forma “convexa”.

Las barras se deforman mucho más en el contacto con el hormigón, forzadas por este, y apenas transmiten estas deformaciones hacia sus extremos, motivo que sugiere que se puede reducir su longitud drásticamente sin afectar al hundimiento del bloque.

En este caso el hundimiento del bloque son aproximadamente 11 mm, más del 100% que en el caso de tubos de acero, por lo que hay que tener especial cuidado con los hundimientos permitidos.

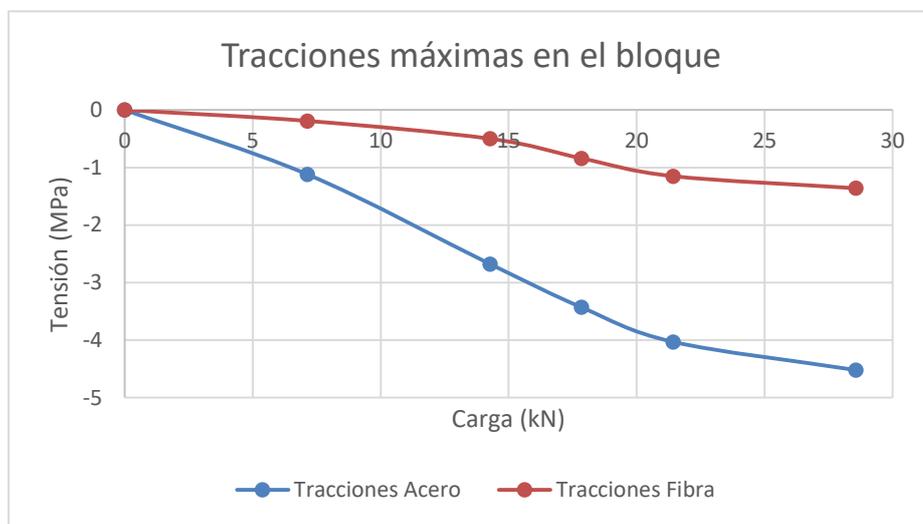


Fig. 3.34. Comparativa de tracciones producidas en el bloque en el proceso de carga.

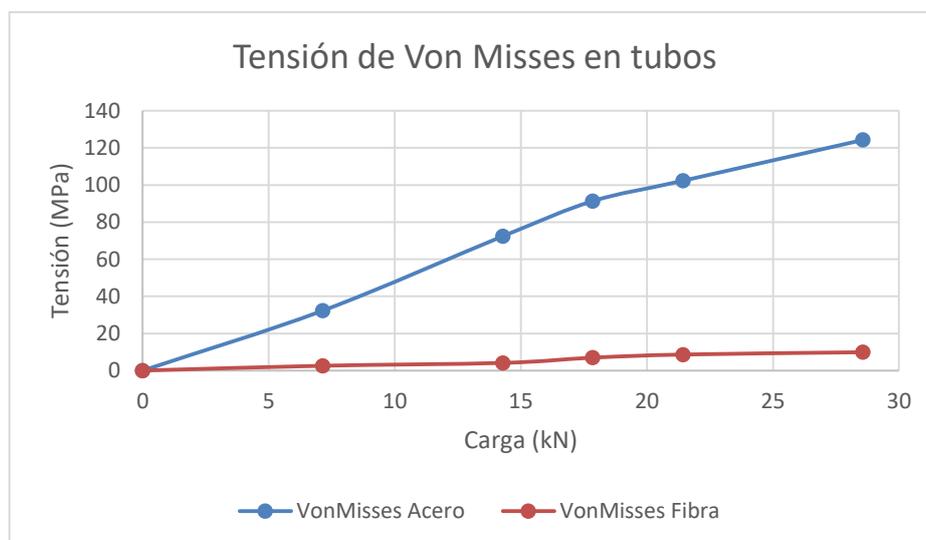


Fig. 3.35. Comparativa de tensiones producidas en los tubos durante el proceso de carga.

Como se puede observar en la figura 3.34, las tracciones producidas en la cara inferior del bloque de hormigón (las máximas), se reducen en gran parte al cambiar de material, esto es debido a la deformación que absorbe el nuevo material, ya que de esta forma no transmite tanta carga de contacto al bloque. Con este nuevo material, el bloque no se compromete estructuralmente de ningún modo, sin embargo su asentamiento es bastante mayor por lo que hay que tener en cuenta los factores y tomar decisiones entorno a ello.

Finalmente, en la figura 3.35, se puede comprobar como el material es permisivo en la deformación, ya que las tensiones máximas a lo largo del tubo son mínimas en comparación con las del acero, por lo tanto puede soportarla. Se necesitaría, no obstante un análisis más profundo para valorar si existe rotura o el material soporta ese grado de deformación, ya que RAMSERIES no nos ofrece respuestas muy profundas de rotura, y por lo tanto en un ensayo podría llegar a fracturarse el tubo en la zona roja de la figura 3.32.

También, si interesa cambiar de material, debería ensayarse la longitud del tubo, ya que todo parece indicar que se puede reducir y así disminuir el coste. No obstante con esta solución quedaría descartada la reutilización del *Piloedre* ya que las deformaciones son mucho mayores que en el acero.

Capítulo 4. Conclusiones y futuras revisiones

El estudio realizado, ha surgido de la necesidad de dar respuestas a comportamientos no experimentados del elemento de cimentación novedoso *Piloedre*. El primer objetivo del estudio, era claro y definido, crear un modelo tridimensional en un software de cálculo computacional, para dar respuestas sobre el comportamiento del producto analizado, el *Piloedre*.

La geometría ha sido modelizada a la perfección con la herramienta GiD de preproceso. Por su lado el modelo ha sido analizado mediante un 'solver' de cálculo de elementos finitos- una de las herramientas más potentes en la actualidad para la simulación de problemas ingenieriles y físicos-, RAMSERIES. El modelo ha permitido calibrar correctamente la geometría del producto, las propiedades de cada material, los diferentes casos de cargas y esfuerzos y las respuestas obtenidas, con ensayos realizados por sus desarrolladores. La única limitación en la creación del modelo ha venido de la mano del terreno, ya que este 'solver' es una potentísima herramienta de cálculo estructural, pero que no realiza análisis de interacción suelo-estructura, por lo que no se han podido modelizar todas estas interacciones, que son una de las pequeñas partes que intervienen en el éxito estructural del *Piloedre*. Estas limitaciones han condicionado los análisis posteriores, suprimiendo algunos muy interesantes como el estudio del comportamiento en grupo de varios *Piloedres*.

La segunda parte del estudio, venía definida por los desarrolladores de este producto, ya que se ha pretendido dar respuesta a diferentes situaciones que se pueden dar y se han propuesto para analizar, y que no se han estudiado en profundidad con ensayos reales, ya sea por su dificultad de representación en un ensayo, o por ser simples hipótesis que podrían conducir a mejoras en el producto, y que los desarrolladores valoraban estudiar en un futuro.

Las situaciones se han dividido en grupos para su estudio en función de su temática: morfología y diseño, instalación y uso, terreno, esfuerzos, durabilidad y materiales. El objetivo de dar respuesta a todas ellas se ha conseguido. No obstante, todos los resultados obtenidos son orientativos para el desarrollador, ya que debido a la complejidad de simular fielmente la realidad, incluyendo algunas limitaciones como la de la representación del terreno, se deberá verificar estos resultados con ensayos reales. El objetivo, sin embargo, era poder proporcionar a sus responsables orientaciones sobre lo que es interesante ensayar y lo que se confirma como problemático o menospreciable.

Después de analizar todas las situaciones propuestas, se han obtenido una serie de conclusiones que se exponen a continuación, y que se deben valorar como orientativas para ensayar y no como decisión final:

- Existen dos problemas en el *Piloedre* que los desarrolladores quieren reducir. Son el descantillamiento del hormigón en la zona de salida del tubo por su cara inferior, y la deformación remanente en los tubos de acero que imposibilitan su reutilización. El primero es debido a las tracciones generadas en esta cara, que se han comprobado y resultan ser elevadas en muchas situaciones, por lo que se produciría este efecto. El descantillamiento queda reducido o desaparece utilizando una cimentación adicional, en terrenos duros y utilizando otro material como la fibra de vidrio. Por su parte la deformación en tubos de acero es ocasionada por las grandes tensiones, generadas en ciertos puntos, y que se ha visualizado una relajación aumentando el espesor del tubo, en terrenos duros o con cimentación adicional.
- En los ensayos a flexión y esfuerzos laterales, no se dispone de ensayos con los que comparar y calibrar, sin embargo se ha verificado un comportamiento mucho peor que a compresión con grandes desplazamientos/hundimientos que se deben tener en cuenta en futuros ensayos. Se ha comprobado que con tubos más largos bajo esfuerzos a flexión aumenta la deformación de estos, pero se reduce enormemente el desplazamiento del bloque.
- En cuanto a la durabilidad del *Piloedre*, se ha concluido que la oxidación no llega a afectar significativamente el rendimiento, hasta niveles cercanos al 50% de la reducción de la sección efectiva de los tubos.
- Los desarrolladores estaban interesados en ver qué tipo de efecto tendría añadir una cimentación superficial tradicional de forma adicional, y los resultados indican que es un soporte que aporta grandes beneficios en cuanto a reducción de hundimientos y de

tensiones y tracciones del bloque. Elemento de interés para situaciones que exijan un mayor rendimiento, pero que reduce ventajas del producto como la facilidad de instalación y reutilización.

- En referencia con la imposibilidad de penetrar totalmente de uno de los tubos, solo se aprecia un aumento de tracciones (y por consiguiente descantillamiento o fisuras en la cara inferior del bloque), pero no afecta significativamente a hundimientos o tensiones en tubos.
- Aumentar la inercia de los tubos de acero, aumentando su espesor, produce beneficios en cuanto a hundimientos y deformación de éstos, pero aumenta las tracciones del bloque, por lo que se debe valorar cual es la prioridad para decidir si incrementar el espesor.

Finalmente, se han producido dos comportamientos que generan incertidumbre en dos situaciones concretas. Estas situaciones se deben ensayar para ver si el modelo está en lo correcto o no ha sido correcta la simulación. En primer lugar, la variación de longitud de tubos ofrece un resultado no intuitivo, y es que reduciéndola se disminuye el hundimiento y se llega a un comportamiento más equilibrado de tensiones en tubos y tracciones en bloque, mientras que aumentándola se obtiene un hundimiento mayor y peor respuesta estructural. En segundo lugar, la utilización de un material como la fibra de vidrio debe ensayarse, ya que todos los resultados han sido mejoras respecto a los tubos de acero, sin embargo existe una mayor deformación que puede ocasionar la rotura de este material.

Una de las partes más importante de este estudio, en el ámbito académico, ha sido comprender el proceso de simulación y los elementos que lo componen, como el proceso iterativo del método de elementos finitos, las fases para llevar a cabo esta simulación y, no menos importante, los diferentes problemas surgidos, la manera de entenderlos y tratar con ellos, siendo conscientes de la alta complejidad de una simulación de un producto ya testado en la realidad.

En conclusión, se han obtenido resultados muy interesantes y coherentes con la realidad, que se pueden interpretar orientativamente para la mejora del producto *Piloedre*.

En el ámbito de futuras revisiones o investigaciones, sería interesante reforzar todos estos resultados con un software de análisis geotécnico que permita interpretar el suelo como un elemento más, y no como una simple restricción, para poder verificar las interacciones entre la cimentación y el terreno, y poder también analizar comportamientos en grupo de varios

Piloedres. También sería interesante realizar un análisis que permita señalar un óptimo en función de un parámetro, y encontrar valores como el espesor de tubo ideal, o la longitud, ya que con el 'solver' utilizado es necesario realizar un mallado y posterior cálculo cada vez que se varía lo más mínimo una propiedad.

Capítulo 5. Bibliografía

- 1 CIMNE, Coll, A., Ribó, R., Pasenau, M, Escolano, E., Perez, J.Suit., Melendo, A., Monros, A., Gárate, J. (2016). Manual de Usuario, GiD.
- 2 COMPASSIS (2007). Tutorial de usuario de RAMSERIES.
- 3 PILOEDRE, Departamento Técnico de Piloedre (2015). Ficha Técnica del Piloedre.
- 4 PILOEDRE.COM, (2015). LA SOLUCIÓN DE CIMENTACIÓN PARA ESTRUCTURAS LIGERAS, <http://piloedre.es/>.
- 5 Gobierno de España, Ministerio de Fomento (2008). Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08).
- 6 Jiménez Montoya, Pedro (2010). Hormigón Armado (15 edición).
- 7 American Petroleum Institute (2011). Especificación API 5CT (9ª Edición).
- 8 Reed L. Mosher and William P. Dawkins (2000). Theoretical Manual for Pile Foundations (*Manual teórico para cimentación de pilotes*). Computer-Aided Structural Engineering Project.
- 9 Alarcón, E., Álvarez Cabal, R. y Gómez Lera, S. (1986) Cálculo Matricial de Estructuras, Ed. Reverté.
- 10 Hinton, E. y Owen, D.R. (1979) An Introduction to Finite Element Computations (*Introducción a las computaciones con elementos finitos*)
- 11 TURNER, P. (1994) "Numerical Analysis" (*Análisis numérico*). Ed. Macmillan Press Ltd.
- 12 Mohr, J.G.; Rowe, W.P. (1978). Fiberglass (*Fibra de Vidrio*).
- 13 Jiménez Salas, J. A. et al. (1992) Geotecnia y Cimientos. (2da Edición). Ed. Rueda.
- 14 Potts, D. y Zdravkovic, L. (1999) Finite Element Analysis in Geotechnical Engineering (*Análisis de Elementos Finitos en Ingeniería Geotécnica*). Telford Publishing.