



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Cálculo, diseño y optimización de la estructura
portante sustentadora en una instalación de cable
esquí

Calculation, design and optimization of the support
structure in a ski cable installation

Autor/es

Jorge Miguel Aranda Rodríguez

Director/es

Emilio Larrode Pellicer
Alejandro Escalada de la Hoz

Cálculo, diseño y optimización de la estructura portante sustentadora en una instalación de cable esquí

Resumen

Este proyecto aborda el cálculo y diseño de la estructura portante sustentadora en una instalación de cable esquí. El objetivo también es establecer la configuración óptima a efectos de amplitud de zona practicable de esquí acuático y minimización de tensiones en los cables sustentadores.

El proyecto incluye el cálculo de las pilonas con sus respectivas zapatas y anclajes, el dimensionamiento tanto de los tirantes como de los cables portante y carril, además del cálculo del contrapeso necesario para dar la tensión necesaria a los mismos.

En primer lugar, se han analizado las distintas posibilidades de posicionamiento de pilonas para minimizar tensiones. Tras el análisis de todas las propuestas se ha elegido una distribución de 5 pilonas con la que se minimizan las tensiones resultantes.

Una vez conocido el layout final, se ha dimensionado el cable adecuado a la instalación y se ha calculado el contrapeso necesario para dar tensión al mismo. El diámetro del cable elegido es 10mm, con una carga de rotura de 65,9 kN, suficiente para garantizar un coeficiente de seguridad de acuerdo a la normativa.

Seguidamente, se han analizado las distintas cargas que afectan a la estructura y se han aplicado a las pilonas diseñadas. A partir de los datos obtenidos, se han situado los tirantes para proporcionar soporte a las distintas pilonas. La incorporación de tirantes ha permitido liberar a las pilonas de gran parte de la carga que soportaban. Tras la instalación de estos, se ha verificado que tanto el dimensionamiento de los cables y barras como el material elegido eran correctos en base a las tensiones obtenidas. El material elegido para las barras de las pilonas es acero S355, el cual posee un alto límite de elasticidad y elevada carga de rotura, una de las características indispensables para esta aplicación.

Finalmente se han diseñado las distintas zapatas. El diseño de estas se ha basado en la aplicación de la normativa que aparece en el EHE-08. La cimentación se ha llevado a cabo con hormigón armado HA-50. Las barras de la armadura son de diámetro 16 y 20mm de acero soldable 500S. Tras el diseño se ha realizado el correspondiente análisis y se ha verificado que los resultados no superaran las tensiones fijadas de acuerdo al tipo de suelo simulado.

ÍNDICE GENERAL

1. MEMORIA.....	10
1. Objeto.....	11
2. Alcance.....	11
3. Antecedentes.....	13
4. Normativa aplicable.....	15
5. Condiciones de partida del problema.....	16
5.1 Presentación de las alternativas de layout.....	16
5.2 Modelo propuesto para minimizar tensiones.....	17
5.3 Comparación y justificación de la solución adoptada.....	18
6. Dimensionado y análisis del cable carril-tractor y del contrapeso.....	20
6.1 Selección de cable y tensión necesaria.....	20
6.2 Cálculo del contrapeso.....	21
7. Diseño, análisis y optimización de pilonas	23
7.1 Presentación de las pilonas.....	23
7.2 Material de las barras.....	26
7.3 Cargas en las pilonas.....	26
7.3.1 Cálculo aproximado de las fuerzas de los cables sobre las pilonas.....	28
7.3.2 Traslación de fuerzas al centro de cada polea (Cálculo exacto).....	32
7.4 Orientación de pilonas.....	34
8. Diseño de tirantes.....	36
8.1 Modelización de cables por barras.....	36
8.2 Procedimiento de atirantado de pilonas.....	38
9. Efecto de la combinación ELU a pilonas y comportamiento frente a carga. Resultados.....	41
9.1 Efecto de la sobrecarga de esquiadores.....	41
9.2 Tensiones en las barras.....	42

9.3 Desplazamientos de los nudos.....	44
10. Cimentación de las pilonas y diseño de anclajes.....	46
10.1 Aplicación de la norma EHE-08.....	46
10.2 Elección del material.....	48
10.3 Elección de armadura.....	48
10.4 Dimensionado de zapatas.....	49
10.5 Anclajes.....	53
11. Verificación. Dimensionado de cables (tirantes, cable de la estructura y cable del contrapeso)	54
12. Conclusión.....	56
13. Futura continuación del proyecto.....	58
14. Referencias bibliográficas.....	60
2. ANEXOS.....	63
Anexo 1: Características de los Layout.....	64
1.1 Geometría de los distintos layout.....	64
1.2 Reacciones de los distintos layout	65
Anexo 2: Simulación, calculo analítico y elección del cable portante y tractor.....	75
2.1 Cálculo de la sección a introducir en Robot Structural Analysis	75
2.2 Tensión necesaria resultante de la simulación y del cálculo analítico.....	76
2.3 Características del cable elegido para la instalación.	78
Anexo 3: Lista de barras.....	79
Anexo 4: Análisis de cargas en la estructura.....	94
Anexo 5: Atirantado y comportamiento de pilonas frente a cargas.....	100
Anexo 6: Tensiones de las barras de las pilonas: Tablas.....	127
Anexo 7: Axiles máximos en los tirantes	137
Anexo 8: Desplazamiento de los nudos de las pilonas para la combinación de cargas en estado ELS.....	143
Anexo 9: Notas de cálculo de la cimentación.....	167

Anexo 10. Notas de cálculo de los anclajes.....	206
Anexo 11: Actas de reunión.....	230
3. PLANOS.....	232
1. Planos generales de pilonas.....	233
1.1 Plano general pila motora.....	233
1.2 Plano general pila típica.....	234
1.3 Plano general pila del contrapeso.....	235
2. Planos de cimentación.....	236
2.1 Cimentación pila 1(motora).....	236
2.2 Cimentación pila 2.....	237
2.3 Cimentación pila 3.....	238
2.4 Cimentación pila 4.....	239
2.5 Cimentación pila 5.....	240
2.6 Cimentacion tirantes.....	241
2.7 Anclajes.....	242

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 0. Cronograma del proyecto.....	12
Figura 1. Posibles layout para la instalación.....	13
Figura 2. Layout cuadrado.....	16
Figura 3. Layout rectangular.....	16
Figura 4. Layout pentagonal.....	16
Figura 5. Layout OCP.....	16
Figura 6. Layout propuesto.....	16
Figura 7. Layout hexagonal.....	17
Figura 8. Layout adaptado.....	17
Figura 9. Modelo matemático Layout.....	17
Figura 10. Dimensiones del Layout propuesto.....	18

Figura 11. Grafico comparador de tensiones resultantes de los Layouts.....	19
Figura 12. Cable transportador.....	20
Figura 13. Simulación del cable en Robot.....	21
Figura 14. Fotografía del contrapeso.....	21
Figura 15. Cálculo del contrapeso.....	22
Figura 16. Layout final de la instalación.....	23
Figura 17. Pilona motora.....	23
Figura 18. Pilona típica.....	24
Figura 19. Pilona del contrapeso.....	24
Figura 20. Barras a las cuales se les ha aplicado un cambio de sección.....	25
Figura 21. Tensiones máximas en las barras antes y después del redimensionado.....	25
Figura 22. Cargas producidas por el esquiador.....	27
Figura 23. Estados limites últimos. Situaciones de verificación.....	28
Figura 24. Aproximación antes de trasladar fuerza en polea tractora.....	29
Figura 25: Tensiones en el esquema Layout optimizado.....	29
Figura 26: Reacciones de estructura tensada calculadas mediante software.....	31
Figura 27. Reacciones y flecha natural (antes de introducir contrapeso)	31
Figura 28. Posición del centro de las poleas sobre sus propios nudos.	32
Figura 29. Orientación de las pilonas según tensión del cable.	34
Figura 30. Mala orientación de pilona.....	35
Figura 31. Buena orientación de la pilona.....	35
Figura 32. Elemento traccionado.....	37
Figura 33. Verificación que tirantes únicamente trabajan a axil.....	37
Figura 34. Reacciones superiores pilona 2 para calcular tirantes.....	38
Figura 35. Vista superior del atirantado de pilonas. Método.....	38
Figura 36. Explicación sobre el ángulo vertical de los tirantes.....	39
Figura 37. Coordenadas punto C.....	39

Figura 38. Pilona sin tirantes.....	40
Figura 39. Reacciones con tirantes.....	40
Figura 40. Deformación con tirantes.	40
Figura 41. Juego de la pilona tras implementar esquiadores.	41
Figura 42. Apoyo elegido para permitir juego del mástil horizontal.....	41
Figura 43. Representación gráfica del apoyo.....	42
Figura 44. Tensiones máximas de las barras de la pilona 2.	42
Figura 45. Tensiones en la zapata de la pilona motora.....	50
Figura 46. Tensiones pilona 2.....	51
Figura 47. Tensiones Pilona 3.....	51
Figura 48. Tensiones pilona 4	51
Figura 49. Tensión pilona 5.....	52
Figura 50. Tensión zapata tirantes.....	52
Figura 51. Vistas de la zapata y armadura de las pilonas.....	52
Figura 52. Vista 3D del anclaje.....	53
Figura 53. Fuerza máxima en los tirantes de las pilonas.....	54
Figura 54. Localización de alternativas propuestas.....	59
Figura A1-1. Dimensiones cuadrado.....	64
Figura A1-2. Dimensiones pentágono.....	64
Figura A1-3. Dimensiones hexágono.....	64
Figura A1-4. Dimensiones optimizado.....	64
Figura A1-5. Dimensiones OCP.....	65
Figura A1-6. Gráfico comparación de tensiones resultantes de los Layouts.....	74
Figura A2-1. Propiedades cable en Robot.....	75
Figura A2-2. Resultados de la simulación del cable.....	76
Figura A2-3. Magnitudes para el cálculo de la flecha de un cable.....	76
Figura A2-4. Método traslación de fuerzas.....	77

Figura A2-5. Características del cable elegido.....	78
Figura A3-1. Perfil 21x2.3.....	92
Figura A3-2. Perfil 48x2.9.....	92
Figura A3-3. Perfil 26x2.3.....	93
Figura A3-4. Perfil 48X4.....	94
Figura A3-5. Perfil 26x3.2.....	94
Figura A4-1. Información proporcionada por Rixen sobre fuerzas de esquiadores.....	95
Figura A4-2. Distribución esquiadores por tramos.....	97
Figura A4-3. Mapa con zonas para calcular velocidad de viento.....	97
Figura A4-4. Coeficiente de fuerza para celosías con barras circulares.....	98
Figura A5-1. Reacciones superiores pila 2 para calcular tirantes.....	100
Figura A5-2. Vista superior del atirantado de la pila 2. Método.....	101
Figura A5-3. Explicación sobre el ángulo vertical de los tirantes.....	102
Figura A5-4. Coordenadas punto C.....	102
Figura A5-5. Coordenadas punto D.....	102
Figura A5-6. Pila 2 sin tirantes.....	103
Figura A5-7. Reacciones de la pila 2 con tirantes.....	103
Figura A5-8. Deformación de la pila 2 con tirantes.....	104
Figura A5-9. Juego de la pila 2 tras implementar esquiadores.....	104
Figura A5-10. Apoyo elegido para permitir el juego del mástil horizontal.....	105
Figura A5-11. Representación gráfica del apoyo.....	105
Figura A5-12. Tensiones máximas de las barras de la pila 2.....	106
Figura A5-13. Reacciones superiores pila 3 para calcular tirantes.....	107
Figura A5-14. Vista superior del atirantado de la pila 3. Método.....	108
Figura A5-15. Pila 3 sin tirantes.....	108
Figura A5-16. Reacciones de la pila 3 con tirantes.....	109
Figura A5-17. Deformación de la pila 3 con tirantes.....	109

Figura A5-18. Juego de la pila 3 tras implementar esquiadores.....	110
Figura A5-19. Definición de apoyo.....	110
Figura A5-20. Representación gráfica del apoyo pila 3.....	111
Figura A5-21. Tensiones máximas de las barras de la pila 3. Extremos globales.....	111
Figura A5-22. Reacciones superiores pila 5 para calcular tirantes.....	112
Figura A5-23. Coordenadas puntos C y D.....	113
Figura A5-24. Pila 5 sin tirantes.....	113
Figura A5-25. Reacciones de la pila 5 con tirantes.....	114
Figura A5-26. Deformación de la pila 5 con tirantes.....	114
Figura A5-27. Juego de la pila 5 tras implementar esquiadores.....	115
Figura A5-28. Apoyo elegido para permitir el juego del mástil horizontal.....	115
Figura A5-29. Representación gráfica del apoyo Pila 5.....	116
Figura A5-30. Tensiones máximas de las barras de la pila 5. Extremos globales.....	116
Figura A5-31. Reacciones superiores pila 4 para calcular tirantes.....	117
Figura A5-32. Vista superior del atirantado de la pila 4.	118
Figura A5-33. Pila 4 sin tirantes.....	118
Figura A5-34. Reacciones de la pila 4 con tirantes.....	119
Figura A5-35. Deformación de la pila 4 con tirantes.....	119
Figura A5-36. Juego de la pila 4 tras implementar esquiadores.....	120
Figura A5-37. Tensiones máximas de las barras de la pila 4.....	120
Figura A5-38. Reacciones superiores pila 1 para calcular tirantes.....	121
Figura A5-39. Vista superior del atirantado de la pila 2. Método.....	122
Figura A5-40. Pila 1 sin tirantes.....	122
Figura A5-41. Reacciones de la pila 1 con tirantes.....	123
Figura A5-42. Deformación de la pila 5 con tirantes.....	123
Figura A5-43. Juego de la pila motora tras implementar esquiadores.....	124
Figura A5-44. Tensiones máximas de las barras de la pila 2.....	124

Figura A5-45 Resultados con TRON 48X2,9.....	125
Figura A5-46 Resultados con TRON 48X4.....	126
Figura A9-1. Dimensiones de la zapata.....	167

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Comparación de la longitud de lados de los distintos layout.....	19
Tabla 2. Propiedades del acero utilizado.....	26
Tabla 3. Acciones finales debidas a tensión de cables en las pilonas.....	27
Tabla 4. Tensiones de un cable sobre cada pila.....	34
Tabla 5. Orientación de las pilonas.....	34
Tabla 6. Tensiones máximas de cada pila.....	43
Tabla 7. Desplazamientos máximos de los nudos.....	45
Tabla 8. Desplazamientos máximos en z.....	45
Tabla 9. Recubrimiento mínimo.....	47
Tabla 10. Valores de resistencia mínima y dosificación de acuerdo a la norma EHE-08.....	48
Tabla 11. Características del acero de las barras corrugadas de la armadura.....	49
Tabla 12. Reacciones de las pilonas para el cálculo de cimentación.....	59
Tabla 13. Presión admisible del suelo.....	50
Tabla 14. Dimensionamiento final de los elementos de la estructura.....	57
Tabla 15. Alternativas propuestas para construcción de la instalación.....	58
Tabla A1-1. Reacciones layout cuadrado.....	72
Tabla A1-2. Reacciones layout pentagonal.....	72
Tabla A1-3. Reacciones layout OCP.....	72
Tabla A1-4. Reacciones layout hexagonal.....	73
Tabla A1-5. Reacciones layout optimizado.....	73
Tabla A3-1. Características barras pila motora.....	84
Tabla A3-2. Características barras pila típica.....	89
Tabla A3-3. Características barras pila del contrapeso.....	92

Tabla A3-4. Características de las secciones elegidas.....	92
Tabla A3-5. Características del acero elegido.....	93
Tabla A4-1. Tabla para la determinación del coeficiente de exposición.....	98
Tabla A5-1 Propiedades del acero utilizado.....	106
Tabla A6-1. Tensiones barras pila 1.....	128
Tabla A6-2. Tensiones barra pila 2.....	130
Tabla A6-3. Tensiones barras pila 3.....	132
Tabla A6-4. Tensiones barras pila 4.....	134
Tabla A6-5. Tensiones barras pila 5.....	136
Tabla A7-1. Axiles máximos tirantes pila 1.....	138
Tabla A7-2. Axiles máximos tirantes pila 2.....	139
Tabla A7-3. Axiles máximos tirantes pila 3.....	139
Tabla A7-4. Axiles máximos tirantes pila 4.....	140
Tabla A7-5. Axiles máximos tirantes pila 5.....	141
Tabla A7-6. Valores máximos en tirantes.....	141
Tabla A7-7. Fabricante tirantes cables estructurales.....	142
Tabla A7-8. Reacciones en los nudos de los tirantes.....	142
Tabla A8-1. Desplazamientos nudos pila 1.....	147
Tabla A8-2. Desplazamientos nudos pila 2.....	152
Tabla A8-3. Desplazamientos nudos pila 3.....	157
Tabla A8-4. Desplazamientos nudos pila 4.....	160
Tabla A8-5. Desplazamientos nudos pila.....	166

1. MEMORIA

1. Objeto

Este proyecto nace como propuesta de D. Alejandro Escalada Lahoz, Ingeniero Industrial a D. Emilio Larrodé Pellicer, catedrático del Departamento de Ingeniería mecánica de la Universidad de Zaragoza.

Este trabajo se encuentra dentro del contexto de un proyecto más amplio que consiste en la construcción completa de un cable-esquí. El objeto de esta parte es el cálculo y diseño de la estructura portante en una instalación de cable-esquí.

El cable-esquí es una instalación que permite la práctica del wakeboard y del esquí náutico sobre una superficie de agua, mediante un sistema de cable horizontal parecido a los arrastres utilizados en el esquí de montaña.

2. Alcance

El alcance del proyecto ha sido reducido para limitar la extensión. Muchos puntos que quedan fuera del alcance son imprescindibles por requerimientos técnicos, o por exigencia de la administración según la normativa vigente para el diseño, construcción y puesta en marcha de la instalación.

- Queda dentro del alcance del proyecto:

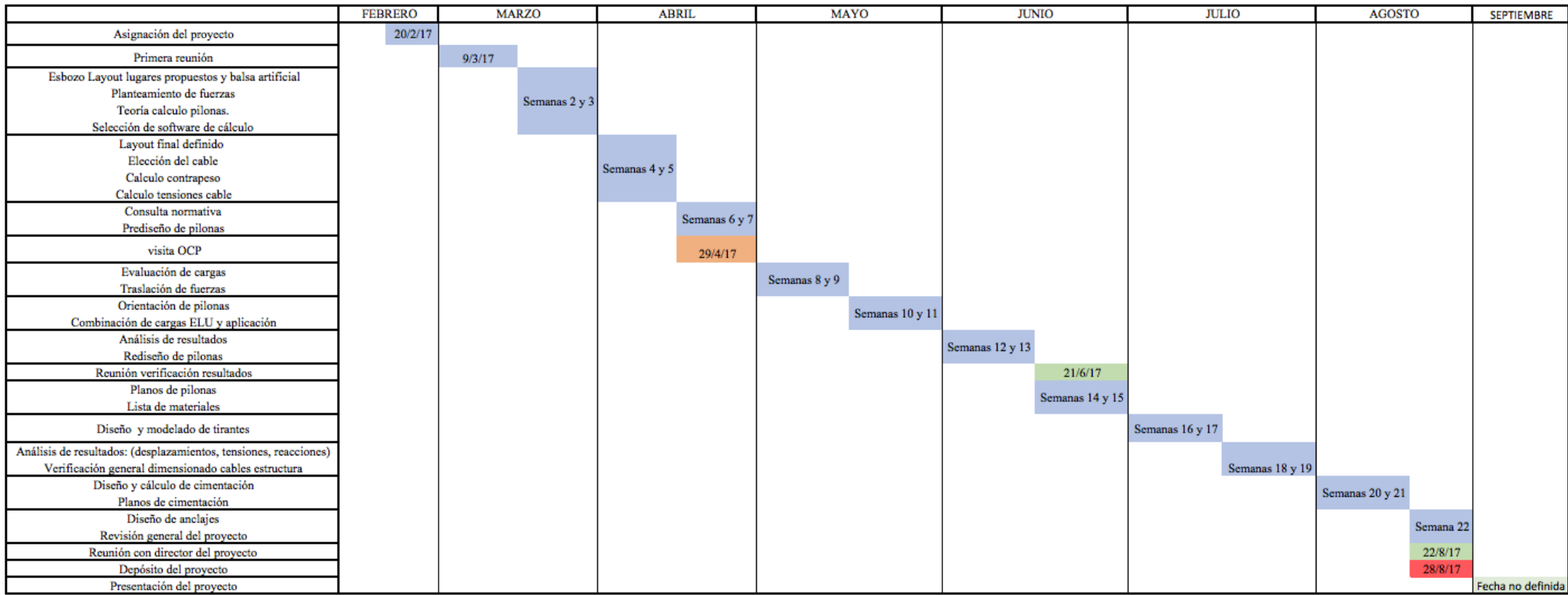
El cálculo y diseño de la estructura sustentadora en una instalación de cable esquí. Se pretende establecer la configuración óptima a efectos de amplitud de zona practicable de esquí acuático y minimización de tensiones en los cables sustentadores, incluyendo el cálculo de las pilonas con sus respectivas zapatas y anclajes, y el contrapeso necesario para dar la tensión necesaria al mismo, así como los tensores o tirantes.

- Estudio de configuración óptima de acuerdo a la zona preestablecida.
- Trayectoria del cable y dimensiones principales de la instalación
- Estructura del cable esquí y auxiliares:
 - o Diseño de pilonas y análisis frente a cargas
 - o Selección de cables
 - o Diseño de tirantes, contrapeso y cimentaciones si fuera necesario

- Queda fuera del alcance del proyecto:

- Estudios geológicos, geotécnicos y geofísicos necesarios para tener conocimiento de los terrenos a ocupar, estudio climatológico...
- Manual de uso y mantenimiento.
- Estudio de viabilidad económica de la instalación.
- Análisis de seguridad y Plan de evacuación de viajeros.
- Estudio de impacto ambiental
- Diseño mecánico de elementos auxiliares que no entran en el alcance del proyecto: poleas, carros, pinzas, porta poleas, sistema de arrastre, sistema de acople, desacople...
- Cálculo de adherencia en las poleas, al formar parte de otro proyecto.

En el siguiente cronograma se detallan las distintas tareas que se han ido realizando durante este proyecto. Se han descrito las tareas según el orden de realización.



Las fechas indican el comienzo de cada fase del proyecto

Figura 0. Cronograma del proyecto

3. Antecedentes

Tras varios años practicando este deporte y viendo la escasa oferta en nuestra comunidad, se decide estudiar el proyecto consistente en desarrollo de una instalación con sistema propio, que permita disfrutar a los practicantes de deportes acuáticos como el Wakeboard y el ski-acuático sin el uso de barco.

Mientras que en países como Alemania hay más de 250 instalaciones, en España tan sólo disponemos de 4 (Benidorm, Marbella, Madrid y Barcelona), habiendo uno más en Portugal.

Este planteamiento nace con la intención de llevar a cabo el cálculo y desarrollo de la instalación de un sistema de arrastre por cable en una ubicación determinada de Aragón.

Layout de la instalación.

El layout adoptará una disposición de 4, 5 ó 6 torres con el objetivo de la búsqueda óptima de adaptación a la geometría y aprovechamiento de los espacios en la superficie de agua donde va a ser instalado.

Inicialmente se habían valorado diferentes localizaciones con el fin de tener un Layout para el que se calcularán cada uno de los sistemas componentes. Entre otras se propusieron las siguientes ubicaciones en Zaragoza:

1. Depósitos de Casablanca
2. Lago de Arco Sur
3. Parque Lineal PlaZa
4. Galachos Juslibol
5. Zona Expo
6. Construcción de una balsa artificial

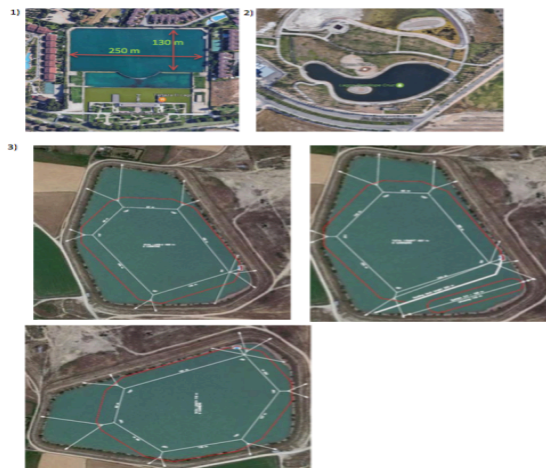


Figura 1. Posibles layout para la instalación

Finalmente, por requerimientos de espacio, el espacio elegido será la construcción de una balsa artificial de momento en una ubicación desconocida

Características generales del proyecto.

Un sistema de cable-ski wakeboard consiste en:

- 4 a 6 torres, que se pueden configurar en cualquier curso de agua o en un lago artificial en el cuadrilátero, pentágono o en forma de hexágono. La torre del motor contiene la unidad y el equipo para el acoplamiento y desacoplamiento de los riders
- Un par de cables, a los que los transportistas están unidos a una distancia de 75 a 80m uno del otro, en el que las cuerdas de los esquiadores están acoplados y desacoplados.
- Una zona de salida, que es el centro de la acción en un parque por cable, con la plataforma de operación y arranque en rampa, así como una zona de terraza adyacente para los riders y visitantes.

Datos técnicos:

- Metros de circuito perimetral de entre 350 y 1600m
- De 4 a 16 transportadores dependiendo de la longitud de pista
- Ángulo de salida de 90°
- Velocidad 0-58 km/h normalmente 30km/h
- Motor de accionamiento 22-45 kW
- Superficie mínima de lago: 90x160 m, la profundidad mínima del agua de 1,20m.

A continuación, se describen los trabajos y hechos acontecidos previos al proyecto, que han servido para el estudio y selección de las diferentes alternativas.

- Pliego de condiciones Slide & Fun Cables
- Parámetros técnicos Slide & Fun Cables

4. Normativa aplicable

Para la realización de este proyecto se ha aplicado el Código Técnico de la Edificación (CTE) y la distinta normativa recogida en este capítulo.

El Código Técnico de la Edificación (CTE) es el marco normativo que establece las exigencias que deben cumplir los edificios en relación con los requisitos básicos de seguridad y habitabilidad establecidos en la Ley 38/1999 de 5 de noviembre, de Ordenación de la Edificación (LOE).

-Documento Básico de Seguridad Estructural (DB-SE): establece reglas y procedimientos que permitan cumplir las exigencias básicas de seguridad estructural. El conjunto de normativas en las que se descompone el DB-SE aplicadas en este proyecto son:

- DB-SE-AE (Acciones en la Edificación): El campo de aplicación de este DB es el de la determinación de las acciones (permanentes, variables y accidentales) sobre las construcciones, para verificar el cumplimiento de los requisitos de seguridad estructural y aptitud de servicio, establecidos en el DB-SE.
- DB-SE-A (Acero): Este DB se destina a verificar la seguridad estructural de los elementos metálicos realizados con acero en edificación. No se contemplan, por tanto, aspectos propios de otros campos de la construcción (puentes, silos, chimeneas, antenas, tanques, etc.). Tampoco se tratan aspectos relativos a elementos que, por su carácter específico, requieren consideraciones especiales.
- DB-SE-C (Cimientos): El ámbito de aplicación de este DB-C es el de la seguridad estructural, capacidad portante y aptitud al servicio, de los elementos de cimentación y, en su caso, de contención de todo tipo de edificios, en relación con el terreno, independientemente de lo que afecta al elemento propiamente dicho, que se regula en los Documentos Básicos relativos a la seguridad estructural de los diferentes materiales o la instrucción EHE.

-UNE-EN 1991-2-6. Eurocódigo 1: Bases de proyecto y acciones en estructuras

-UNE-EN 1991-1-4. Eurocódigo 1: Acciones en estructuras. Parte 1-4: Acciones generales, acciones de viento.

-UNE-EN 1993. Eurocódigo 3: Proyecto de estructuras de acero.

-EHE-08. Instrucción de Hormigón Estructural. Real Decreto 1247/2008, de 18 de Julio

-UNE-EN 12927-2:2005: Coeficiente de seguridad en cables

-NBE-AE-88 (Apartado 8.9. Reconocimiento del terreno)

-Eurocode 3: EN 1993-1-8:2005/AC:2009 + CEB Design Guide: Design of fastenings in concrete

5. Condiciones de partida del problema

5.1 Presentación de las alternativas de Layout

Se presentan las distintas posibilidades contempladas para realizar el layout según el número de pilonas. De las distintas configuraciones mostradas, se realizará el análisis para una longitud total de 1000 metros de las configuraciones cuadrada, la configuración vista en el Olympic Cable Park en Barcelona (OCP) y la propuesta en este proyecto como solución de optimización.

- **Instalación de 4 pilonas:** Pudiendo ser cuadrada o rectangular:

Cuadrada

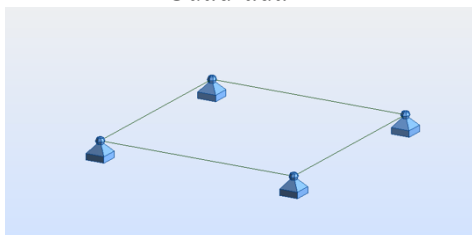


Figura 2. Layout cuadrado

Rectangular

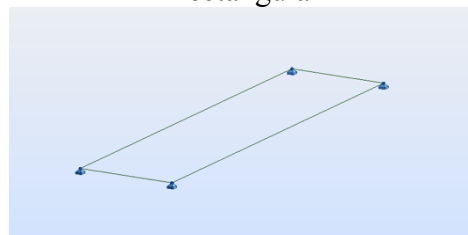


Figura 3. Layout rectangular

- **Instalación de 5 pilonas:** Pudiendo ser un pentágono regular, una distribución como en el caso OCP visto en Barcelona, o una propuesta realizada intentando optimizar la distribución de tensiones:

Pentágono regular

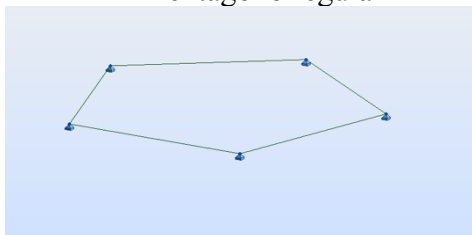


Figura 4. Layout pentagonal

Distribución "OCP"

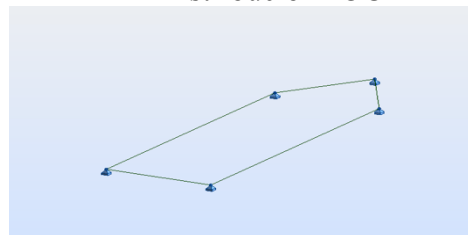


Figura 5. Layout OCP

Propuesta de optimización

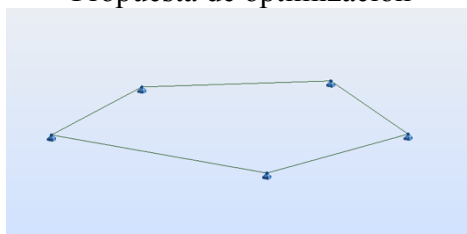


Figura 6. Layout propuesto

- **Instalación de 6 pilonas:** Pudiendo ser hexagonal regular o la ajustada al depósito de Casablanca que no se considerará ya que no será la ubicación final:

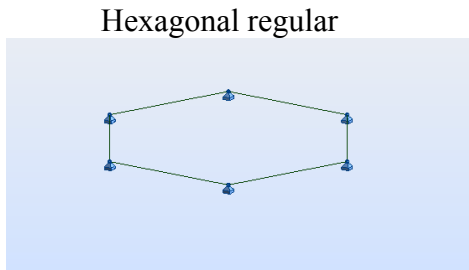


Figura 7. Layout hexagonal

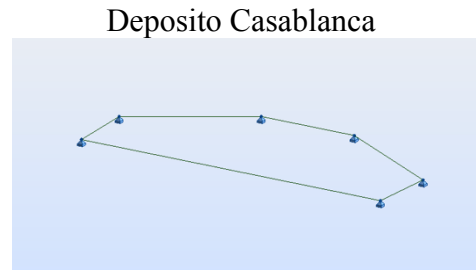


Figura 8. Layout adaptado

5.2 Modelo propuesto para minimizar tensiones

Una vez presentados los distintos Layout, se explicará en que consiste el modelo propuesto.

Si se quiere minimizar tensiones, el Layout deberá ser lo más regular posible. En un pentágono regular, los ángulos interiores son de 108° , en favor de mantener el máximo número de ángulos iguales a 108° , a excepción del de salida (90°), el procedimiento que se ha llevado a cabo es el siguiente:

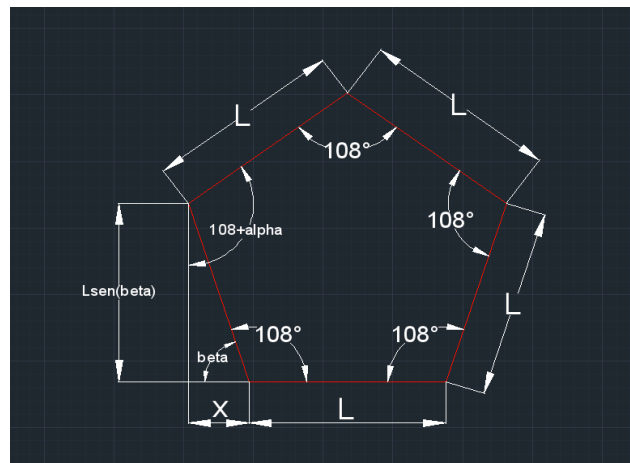


Figura 9. Modelo matemático Layout

Mantener el ángulo de salida 90° , y por geometría se realizan las mínimas modificaciones posibles de manera que el polígono resultante conserve al máximo la apariencia de un pentágono regular.

Mediante las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned}\beta &= 180 - 108 = 72^\circ \\ 90 + \alpha + \beta &= 180^\circ \\ \frac{L^I}{L} &= \sin(\beta) \rightarrow L^I = 0,951L \\ \frac{x}{L} &= \sin(\alpha) \rightarrow x = L \sin(\alpha) = 0,309L\end{aligned}$$

obtenemos las dimensiones que definen el layout propuesto para la longitud perimetral deseada, en este caso 1000m.

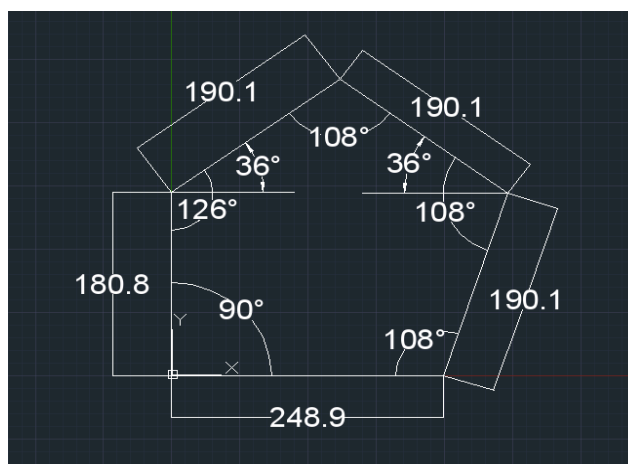


Figura 10. Dimensiones del Layout propuesto

Si se desea consultar información adicional acerca de las dimensiones del resto de Layout ver (anexo 1, apartado 1.1: Geometría de los distintos Layout).

5.3 Comparación y justificación de la solución adoptada

Como se ha mencionado anteriormente, la comparación se realizará únicamente para los layout que cumplan los requisitos de las instalaciones de cable-ski. El ángulo de salida debe ser 90°, como fue mencionado en los datos técnicos del pliego de condiciones previo al proyecto. Además, en la configuración de 4 pilonas se comparará solamente la distribución cuadrada ya que será una geometría más eficiente a nivel tensional que la rectangular.

Debido a estas restricciones, nos centraremos en las distribuciones cuadrada, la del OCP y la propuesta en este proyecto. Si se desea consultar información acerca de las reacciones del resto de modelos consultar (anexo 1, apartado 1.2: Reacciones de los distintos Layout)

Para realizar una comparación entre los distintos layouts, primero se ha fijado la longitud total que tendrá el cable para todos los casos mostrados, en este caso 1000m.

En la elección final del layout se valorarán dos criterios:

- Técnico
- A nivel de usuario

Atendiendo al criterio técnico:

Se han calculado las reacciones en los apoyos tras instalar un cable tenso entre ellos, con un peso unitario cualquiera (6,085 N/m), simplemente para comparar las distintas geometrías.

En el siguiente gráfico se muestran las tensiones resultantes para cada pila de los layouts a comparar.

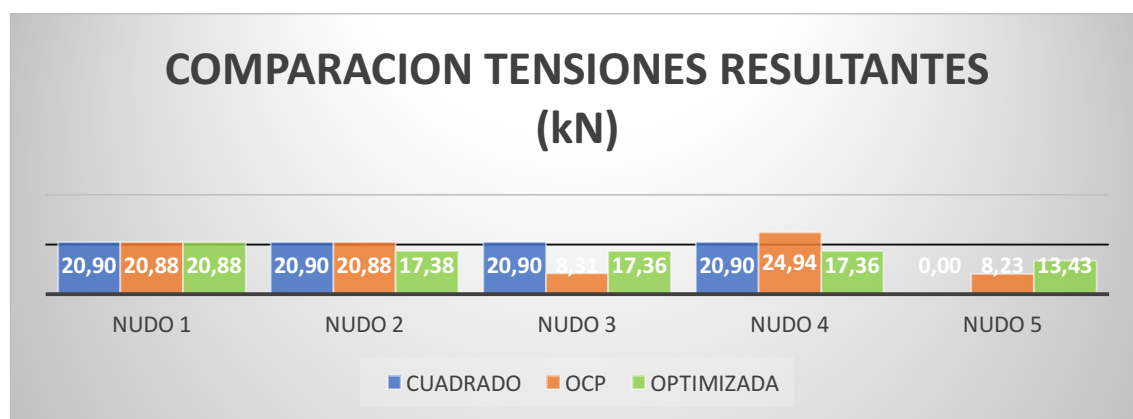


Figura 11. Gráfico comparador de tensiones resultantes de los Layouts

El mayor valor de tensión resultante aparece en la pila 4 del Layout OCP, por otro lado, la distribución más uniforme es para el layout cuadrado, sin embargo, la que mantiene la mayor regularidad a valores inferiores es la propuesta de optimización. (se asemeja más que la del OCP a una distribución pentagonal regular). Hay que llegar a un compromiso entre la longitud continua de esquí y la distribución de tensiones entre las pilas y esto se logra mejor con las propuestas de 5 pilas. En este proyecto finalmente se ha decidido realizar un cableski de **5 pilas**.

Si nos centramos en el criterio de valoración a nivel de usuario, se comparará la longitud de los lados, cuanto más largos mejor para el esquiador. En este caso si comparamos longitudes de los lados para una $L_{total}=1000m$, teniendo en cuenta que el lado de salida es el más valorado: (Normativa, $L_{max}=350m$, $L_{min}=25m$, L_{min} último lado= $50m$)

VALORACIONES:

- $<100m$ **malo**
- $100-150m$ **regular**
- $150-250m$ **bueno**
- >250 **excelente**
- Los lados que solo disten 5m de la siguiente categoría: puntuación **intermedia**

LADOS	1	2	3	4	5
OCP	330	110,3	110,3	330	118
OPTIMIZADA	248,85*	190,11	190,11	190,11	180,8

Tabla 1. Comparación de la longitud de lados de los distintos layout

A continuación, se puntúa cada valoración:

Excelente:7; Bueno:5 Regular:3; Malo:1; Si es intermedio* (Puntuacion+0,5) se situará entre las dos categorías. Además, según los esquiadores el primer lado es el más valorado, por lo tanto, se le asignará un coeficiente de 1,5.

- **Puntuación OCP**= $7*1,5+3+3+7+3=26,5$ puntos
- **Puntuación propuesta OPTIMIZADA**= $5,5*1,5+5+5+5+5=28,25$ puntos

Con la distribución optimizada se obtienen mejoras respecto a la distribución de OCP.

6. Dimensionado y análisis del cable carril-tractor y del contrapeso

6.1 Selección de cable y tensión necesaria

El cable utilizado en este tipo de aplicaciones es de diámetro 10mm. (sección=0,79cm²) Consultando en Rixen, líder en construcción de cables, se ha obtenido información del tipo de cable que utilizan. Se trata de un cable Seale 6 x 19 +1 DIN 3058:

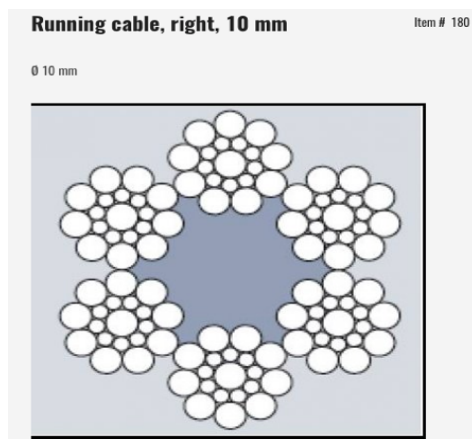


Figura 12. Cable tractor [43]

Para este proyecto, se ha elegido un cable 6 x 7 CW, ya que cuenta con unas características ligeramente superiores al utilizado por Rixen, lo que nos permite aumentar el coeficiente de seguridad a un valor que se adapta a la normativa vigente sobre cables portantes en España. Como aspectos importantes destaca su carga de rotura de 65,9 kN o su peso de 0,37 kg/m (3,63 N/m). El resto de características aparecen en el anexo 2, apartado 2.3: Características del cable elegido para la instalación

A continuación, una vez sabidas las características del cable, se simulará en el software un cable de 1000 metros entre 2 apoyos para ver que tensión se obtiene del análisis de ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS.

En el programa, se deberá introducir una sección cuyo peso unitario coincida con el cable seleccionado del catálogo. Si introducimos la sección correspondiente al cable de diámetro 10mm (0,79 cm²), el peso unitario es superior al del catálogo, por lo tanto, calculando la sección a introducir para obtener un peso de 0,37 kg/m obtenemos debe ser 0,47 cm² en lugar de los 0,79 cm² que correspondería.

Si se desea ver el cálculo detallado para determinar la sección a introducir en el software se recomienda dirigirse al (anexo 2, apartado 2.1: Cálculo de la sección a introducir en Robot Structural Analysis).

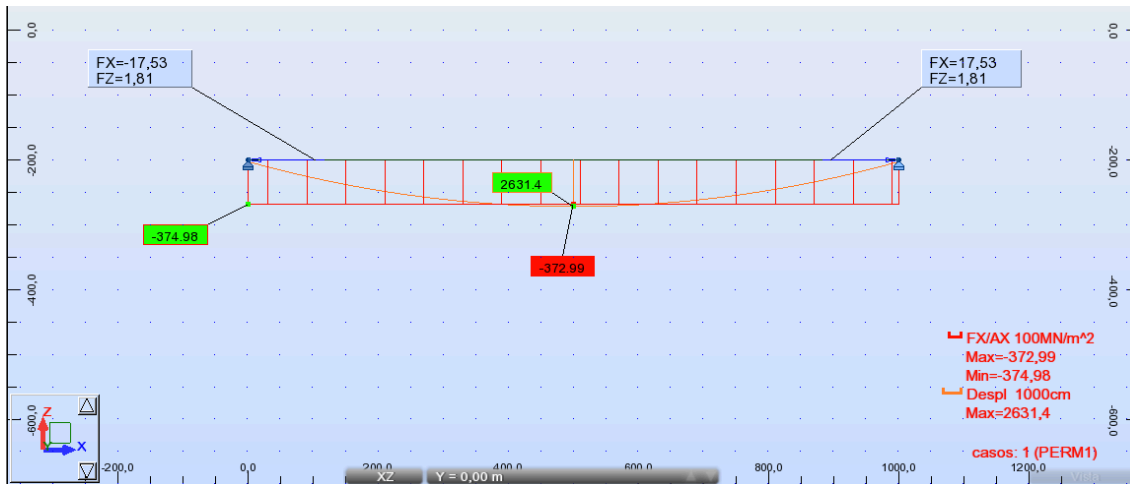


Figura 13. Simulación del cable en Robot

Como vemos la tensión horizontal en los extremos es de 17,53 kN mientras que la vertical es de 1,81 kN. La flecha natural es de 2631,4 cm. Si se realizan los cálculos a mano se obtiene un resultado similar. Para consultar más detalladamente el cálculo analítico de la tensión necesaria para tensar el cable ver (anexo2, apartado 2.2 Tensión necesaria resultante de la simulación y del cálculo analítico).

6.2 Cálculo del contrapeso

Para el cálculo del contrapeso, se usan los valores de tensión de la simulación de Robot (Figura 8-2) para los 1000m de cable con la sección calculada anteriormente, de esta manera, se obtiene un valor de tensión horizontal de 17,53 kN. Como se tienen 2 cables (superior e inferior), la tensión total a tener en cuenta para el cálculo del contrapeso deberá ser 35,06 kN.

En la siguiente figura se muestra el modelo de contrapeso que se podrá instalar en el cable esquí de este proyecto.



Figura 14. Fotografía del contrapeso

El cálculo analítico para encontrar el contrapeso adecuado aparece en la siguiente imagen:

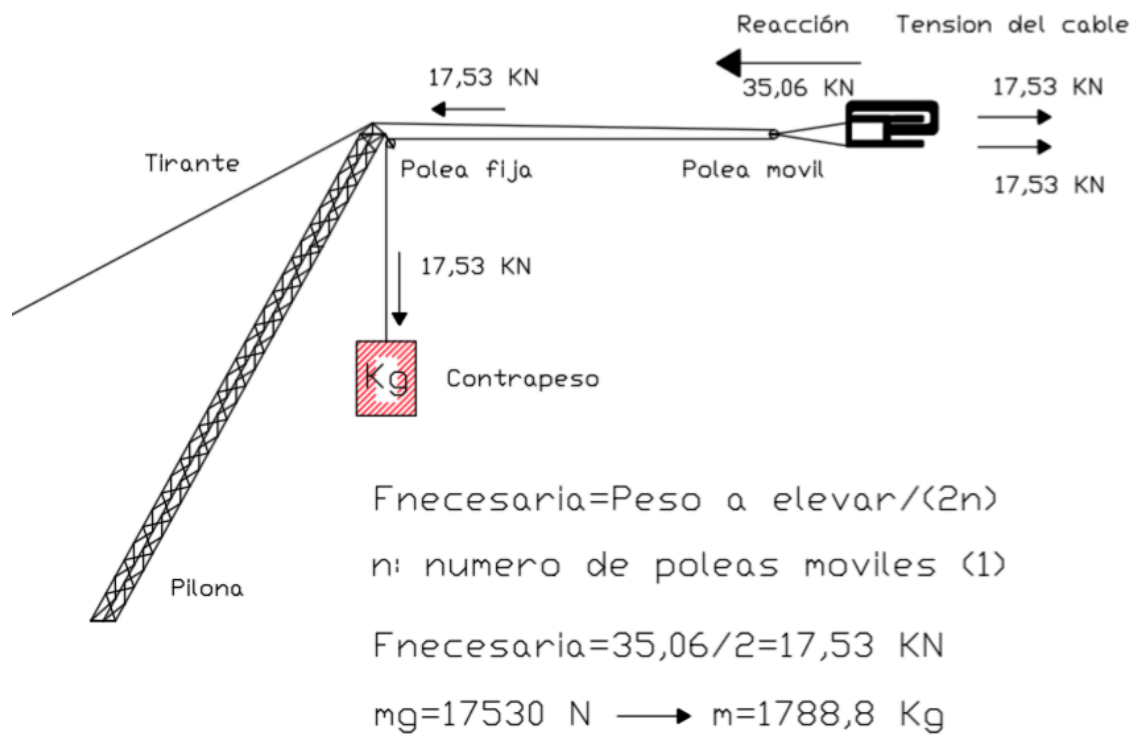


Figura 15. Cálculo del contrapeso [12] [21] [22]

7. Diseño, análisis y optimización de pilonas

7.1 Presentación de las pilonas

La estructura base del cablesqui consta de 5 pilonas. Las pilonas típicas y la motora presentan una celosía triangular orientada horizontalmente unida a una celosía triangular vertical inclinada 61° . La pila restante, la cual será la que lleve colgada el contrapeso para dar la tensión necesaria al cable no presenta ningún voladizo horizontal, es simplemente la celosía triangular inclinada 61° . El diseño y dimensionamiento se ha realizado en base a la visita a la instalación del OCP y a la referencia bibliográfica consultada sobre dimensionamiento de celosía [40].

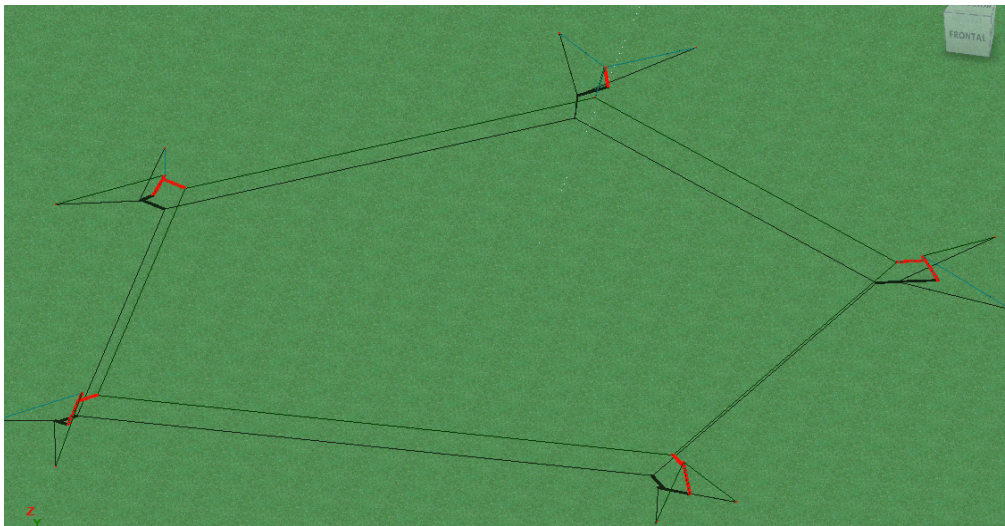


Figura 16. Layout final de la instalación.

En las siguientes figuras se presentan las pilonas que han sido diseñadas

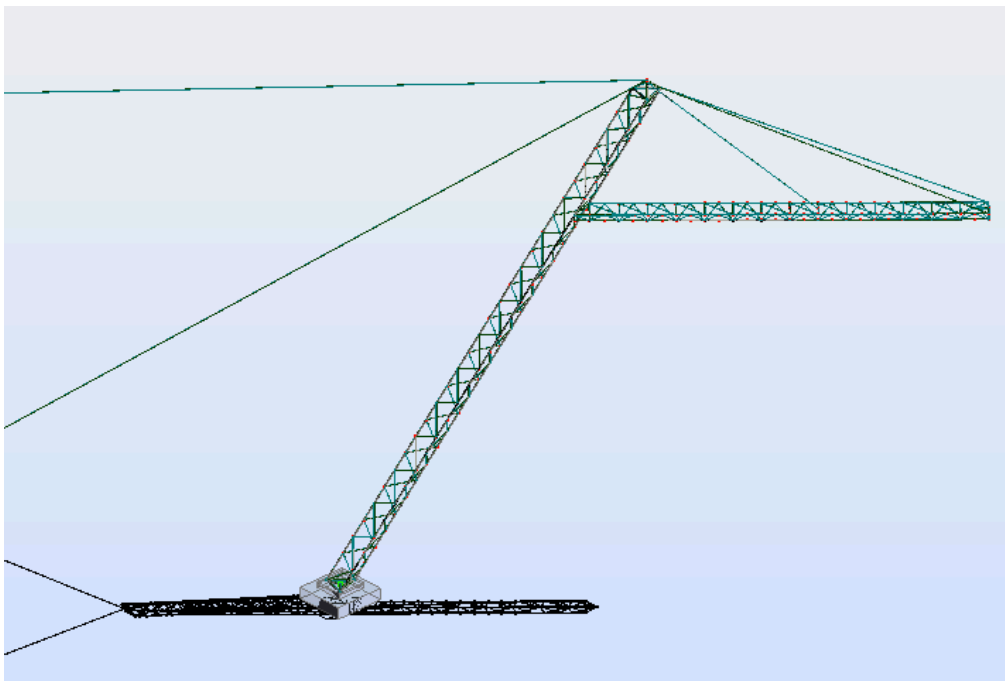


Figura 17. Pilona motora

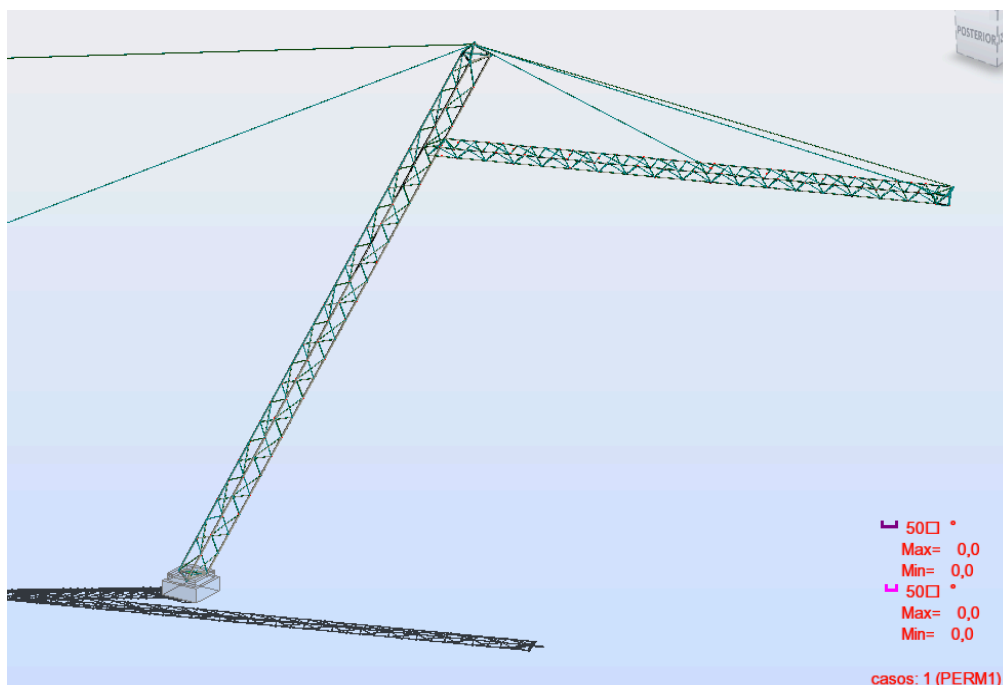


Figura 18. Pilona típica

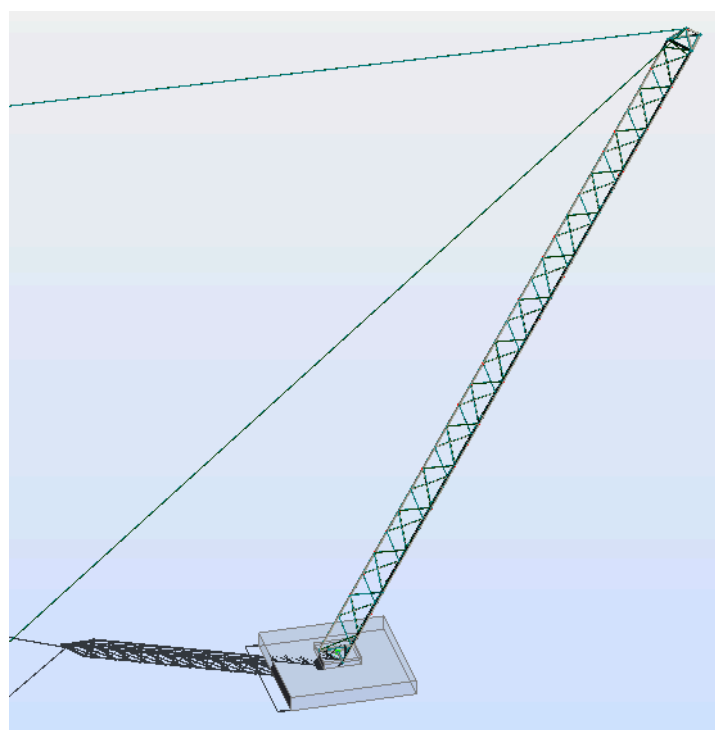


Figura 19. Pilona del contrapeso

En lo referente a las barras, al realizar el prediseño de las pilonas, se decidió fijar para las barras principales de la celosía vertical una sección TRON 48X2,9 como primera aproximación antes de calcular las tensiones de las barras. Tras realizar los cálculos, se observó que la tensión en las barras era demasiado alta para esa sección en alguna de las pilonas, por lo tanto, se decidió en vista de los resultados modificar el espesor de la sección y emplear una sección TRON 48X4. La otra modificación de importancia fue implantada en la pila motora, las 3 barras principales del mástil horizontal cuya sección

inicial era TRON 26X2,3 fueron cambiadas por otra sección del mismo diámetro, pero distinto espesor TRON 26X3,2. Al realizar estos dos cambios, las tensiones de todas las barras para el estado límite último (ELU) resultaron ser menores al límite elástico del material elegido, en este caso Acero S355.

A continuación, se presentarán en la siguiente imagen marcadas en rojo las barras cuya sección fue modificada para que las tensiones fueran admisibles.

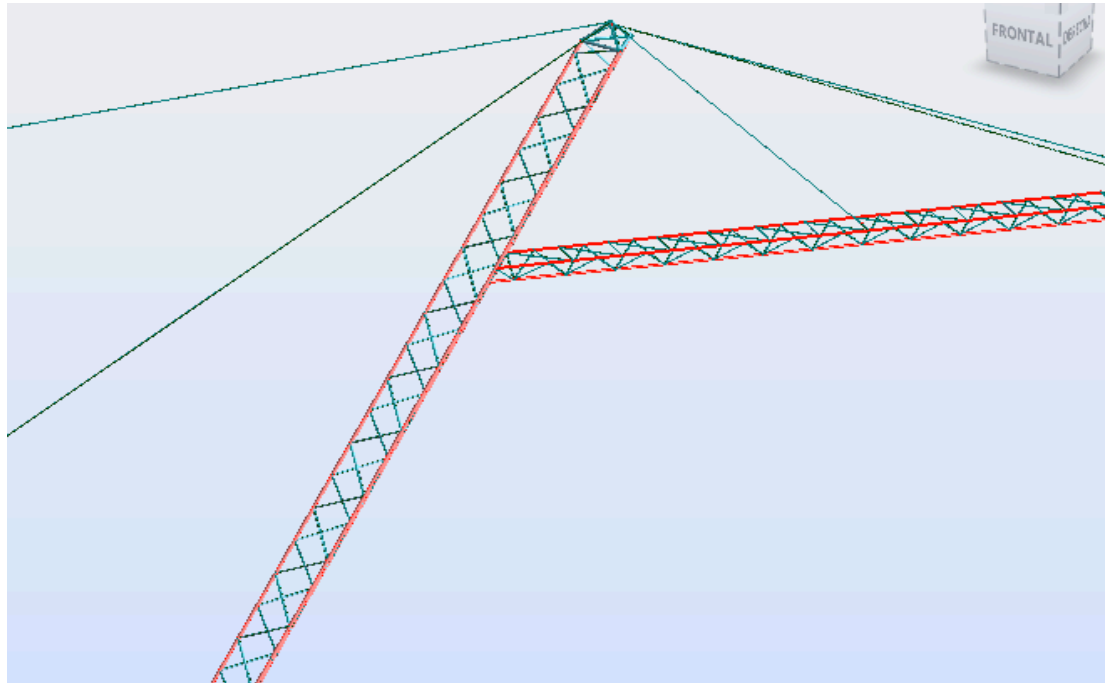


Figura 20. Barras a las cuales se les ha aplicado un cambio de sección

Tras el redimensionado, las tensiones de las barras se redujeron y gracias a ello entran en el rango admisible.

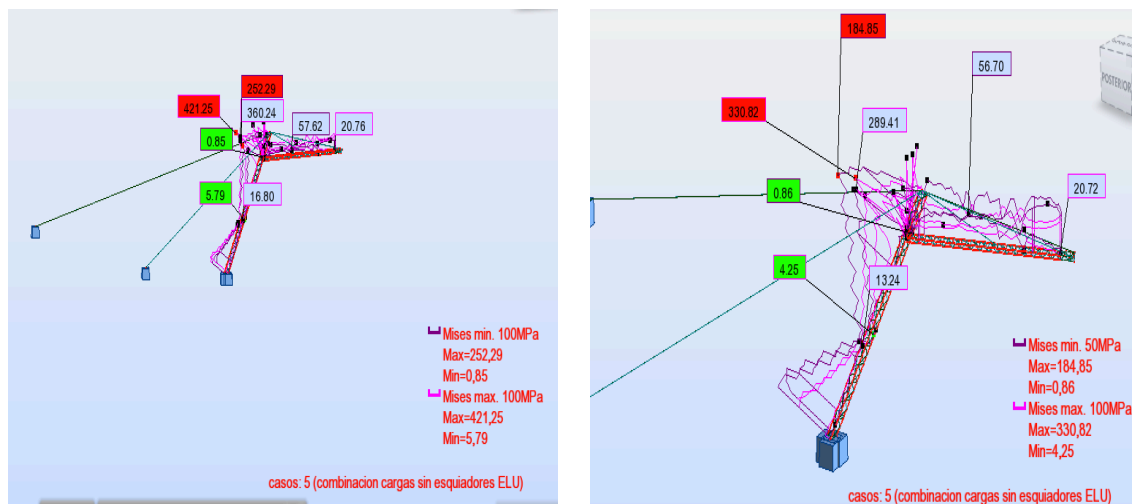


Figura 21. Tensiones máximas en las barras antes y después del redimensionado

7.2 Material de las barras

El material de las barras es acero S355 cuyas propiedades son las recogidas en la siguiente tabla:

ACERO	f_y (N/mm ²)			f_u (N/mm ²)
	$t \leq 16$	$16 < t \leq 40$	$40 < t \leq 63$	$3 < t \leq 100$
S235	235	225	215	360
S275	275	265	255	410
S355	355	345	355	470
S450	450	430	410	550

Tabla 2. Propiedades del acero utilizado [32]

Al ser los espesores de los perfiles mayores de 16mm, ya que el menor de todos es 23mm mientras que el mayor de todos es 40mm, usaremos la segunda columna de espesores para determinar el límite elástico. La última columna de la tabla refleja el límite de rotura, por lo tanto, según la tabla:

Límite elástico=345 MPa.

Carga de rotura=470 MPa.

Al acero de las pilonas se le aplicará un tratamiento de galvanizado contra la corrosión.

7.3 Cargas en las pilonas

En este proyecto se tienen en cuenta las siguientes cargas:

-Acciones permanentes:

- **Peso Propio:** Cuyo valor dependerá del tipo de pila, pudiéndose diferenciar la pila motora (Peso Total=403,6 kg), la pila típica (Peso Total=405,87 kg), y la pila del contrapeso (Peso Total=306,06 kg). Para más información acerca del peso y las barras de las pilas ver (Anexo 3: Lista de barras)
- **Peso polea + portapolea:** El valor es el mismo para todas las pilas típicas (49,6 kg la polea y 20 kg el portapolea que suman un total de 682 N) mientras que para la pila motora el peso de la polea es de 30 kg y no hay portapoleas por lo tanto la carga será de 294 N).
- **Tensión de los cables:** Es la carga debida a la tensión de los cables adyacentes sobre cada pila, su cálculo será expuesto en el siguiente apartado. (7.3.1 Fuerzas de los cables sobre las pilas) La fuerza resultante sobre cada pila es la siguiente:

	Pilona 1	Pilona 2	Pilona 3	Pilona 4	Pilona 5
Resultante (kN)	49,62	41,26	41,26	41,24	31,86
Ángulo (°)	46,1	127,7	199,6	271,5	334,8

Tabla 3. Acciones finales debidas a tensión de cables en las pilonas

El ángulo se toma respecto al eje x positivo, y se refiere únicamente en el plano x-y ya que las componentes verticales (en \bar{z}) son muy pequeñas comparadas con las componentes en \bar{x} e \bar{y}

- **Peso del motor:** Solamente se aplicará a la pila motora. El peso del motor es aproximadamente 300 kg.
- **Peso del contrapeso y carga del cable tirante:** Solamente se aplicará a la pila del contrapeso.

– Acciones variables:

- **Sobrecarga de Uso:** Es la carga debida a los esquiadores, ya sea por el peso propio o por las tensiones creadas al realizar acrobacias. De acuerdo con la información proporcionada por la empresa RIXEN CABLEWAYS, para un cable de unos 310m de largo la fuerza horizontal media de los esquiadores será de 500 N, por lo tanto, usaremos este valor como carga producida por los esquiadores. En cuanto a la fuerza vertical, hay una variación a lo largo del recorrido, depende en gran medida de la distancia a la pila, el valor máximo es de 388,5 N mientras que el valor mínimo es de 351,1 N. Para tomar el peor de los casos se supondrá una fuerza de 388,5 N.

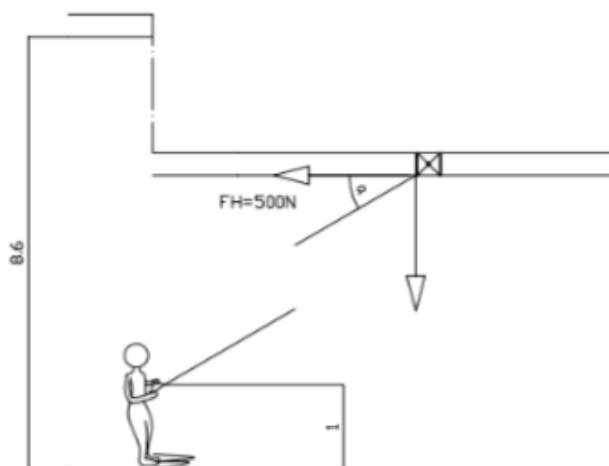


Figura 22. Cargas producidas por el esquiador

- **Viento:** Ya que la ubicación definitiva es desconocida, no se puede determinar la carga de viento a aplicar, por lo tanto, quedaría pendiente si se deseara realizar el proyecto. No obstante, si se ha calculado la carga que debería aplicarse si la instalación se ubicara en Aragón. Aplicando la normativa correspondiente se ha obtenido que se deberá aplicar una carga de viento de $1,46 \text{ kN/m}^2$.

Para la combinación de cargas se ha establecido el Estado Límite Último (ELU) ya que es el estado más desfavorable posible y el que se utiliza para comprobar la capacidad portante. El software Robot Structural Analysis establece automáticamente los coeficientes de ponderación de acuerdo a la normativa para cada una de las cargas de la combinación ya sean permanentes o variables. (1,35 para las permanentes y 1,5 para las variables). En lo referente a las deformaciones, se calcularán para el Estado Límite de Servicio (ELS) que establece la aptitud al uso de la instalación.

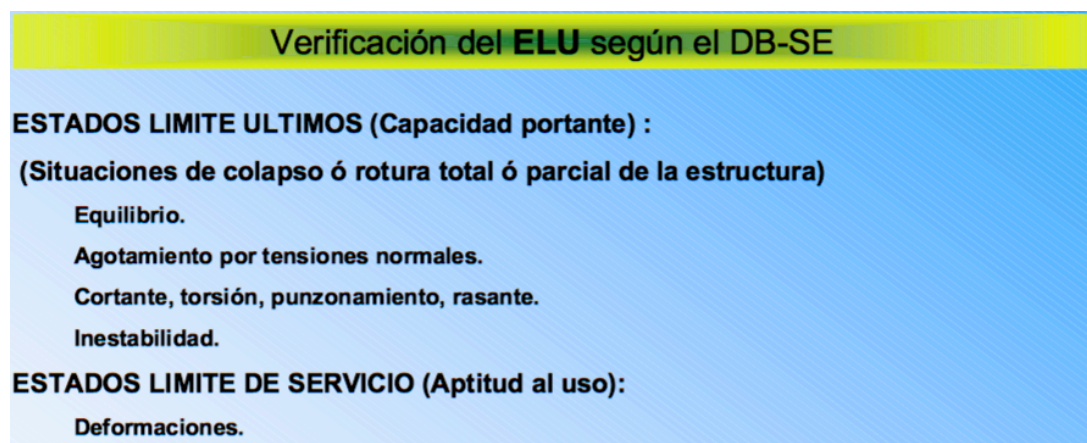


Figura 23. Estados limites últimos. Situaciones de verificación [35]

Si se desea más información acerca de los resultados de las cargas, consultar el anexo 4: Análisis de cargas en la estructura

7.3.1 Cálculo aproximado de las fuerzas de los cables sobre las pilonas

Para obtener la fuerza debida a la tensión de los cables, primero se ha supuesto que el contacto de los cables se produce en el Punto de aproximación (ver figura 8-4.) y no en los puntos de contacto reales de la polea con el cable según el ángulo de abrace (Puntos A y B de la figura). Este punto es la prolongación de los cables que se muestra en la figura (línea discontinua). Una vez hallada la fuerza en el punto de aproximación esta será trasladada al centro de la polea O. Esto se hará teniendo en cuenta los diámetros de cada polea (Diámetro polea tractora=878 mm; Diámetro resto poleas=1302 mm). [31]

Se calculan las tensiones que producirán los cables sobre las pilonas con la tensión calculada por el contrapeso.

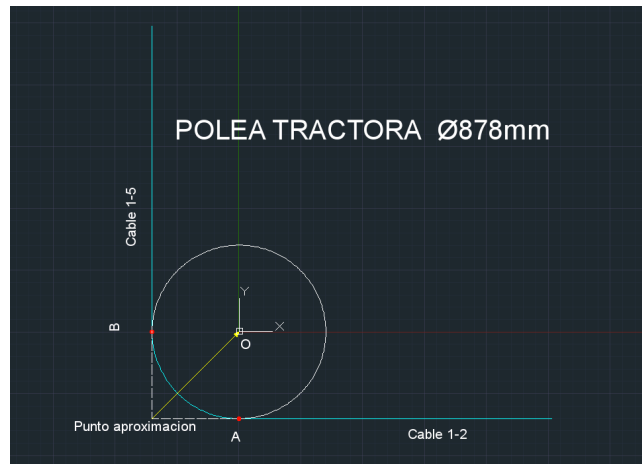


Figura 24. Aproximación antes de trasladar fuerza en polea tractora

A continuación, se detallan los cálculos que se han realizado para obtener las tensiones de los cables. Solo se realizan cálculos para uno de los cables, el otro será análogo.

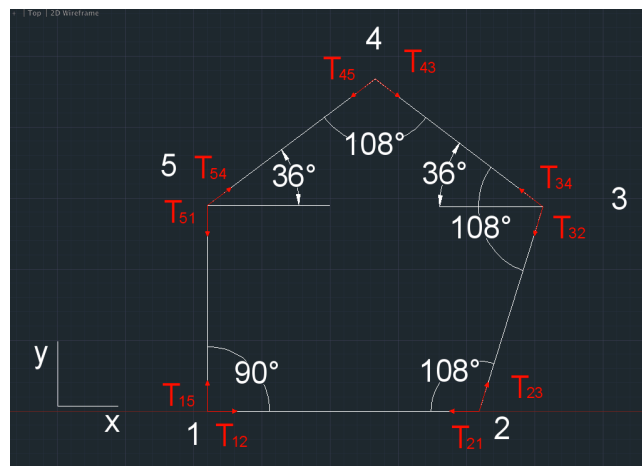


Figura 25: Tensiones en el esquema Layout optimizado

Si analizamos el esquema, empezando por el nudo superior (NUDO 4), tenemos las tensiones T_{43} y T_{45} . Sabemos que la tensión que crea el contrapeso en el cable (lo dividiremos por tramos) es de 17,53 kN. Por lo tanto, si descomponemos las tensiones en componentes x e y (los cálculos de las componentes en z las haremos directamente con el programa ROBOT STRUCTURAL ya que nos dará un resultado más preciso sobre el peso de cable que soporta cada apoyo) tendremos:

NUDO 4

$$T_{43x} = 17,53 \times \sin(54) = 14,18 \text{ kN}$$

$$T_{43y} = -17,53 \times \cos(54) = -10,30 \text{ kN}$$

$$T_{45x} = -17,53 \times \sin(54) = -14,18 \text{ kN}$$

$$T_{45y} = -17,53 \times \cos(54) = -10,30 \text{ kN}$$

Por lo tanto, tenemos que la resultante del nudo 4 en el plano xy es:

$$T_{4x} = 0 \text{ kN}$$

$$T_{4y} = -20,6 \text{ kN}$$

NUDO 1

$$T_{12x} = 17,53 \text{ kN}$$

$$T_{12y} = 0 \text{ kN}$$

$$T_{15x} = 0 \text{ kN}$$

$$T_{15y} = 17,53 \text{ kN}$$

Por lo tanto, tenemos que la resultante del nudo 1 en el plano xy es:

$$T_{1x} = 17,53 \text{ kN}$$

$$T_{1y} = 17,53 \text{ kN}$$

NUDO 2

$$T_{21x} = -17,53 \text{ kN}$$

$$T_{21y} = 0 \text{ kN}$$

$$T_{23x} = 17,53 \times \cos(72) = 5,42 \text{ kN}$$

$$T_{23y} = 17,53 \times \sin(72) = 16,67 \text{ kN}$$

Por lo tanto, tenemos que la resultante del nudo 2 en el plano xy es:

$$T_{2x} = -12,11 \text{ kN}$$

$$T_{2y} = 16,67 \text{ kN}$$

NUDO 3

$$T_{32x} = -17,53 \times \cos(72) = -5,42 \text{ kN}$$

$$T_{32y} = -17,53 \times \sin(72) = -16,67 \text{ kN}$$

$$T_{34x} = -17,53 \times \sin(54) = -14,18 \text{ kN}$$

$$T_{34y} = 17,53 \times \cos(54) = 10,30 \text{ kN}$$

Por lo tanto, tenemos que la resultante del nudo 3 en el plano xy es:

$$T_{3x} = -19,6 \text{ kN}$$

$$T_{3y} = -6,37 \text{ kN}$$

NUDO 5

$$T_{51x} = 0 \text{ kN}$$

$$T_{51y} = -17,53 \times \cos(0) = -17,53 \text{ kN}$$

$$T_{54x} = 17,53 \times \sin(54) = 14,18 \text{ kN}$$

$$T_{54y} = 17,53 \times \cos(54) = 10,30 \text{ kN}$$

Por lo tanto, tenemos que la resultante del nudo 5 en el plano xy es:

$$T_{5x} = 14,18 \text{ kN}$$

$$T_{5y} = -7,23 \text{ kN}$$

Ahora mediante el software ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS comprobamos que los resultados sean correctos. Simulamos el cable entre los distintos apoyos situados en las coordenadas precisas y comprobamos que los resultados sean los mismos.

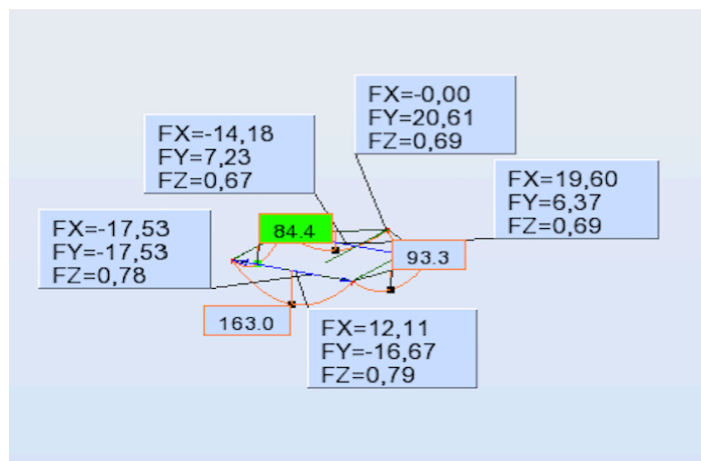


Figura 26: Reacciones de estructura tensada calculadas mediante software.

Como era de esperar, coinciden los valores absolutos (el signo es contrario porque el software calcula reacciones no las fuerzas producidas por los cables en las poleas) de las fuerzas en x e y. Las componentes en z las incluiremos para trasladar las fuerzas al centro de cada polea.

Además, podemos verificar que la flecha se ha reducido considerablemente en los distintos tramos del cable al aplicar la tensión del contrapeso. En la siguiente imagen se muestran las reacciones y la flecha de varios tramos antes de introducir el contrapeso (flecha natural):

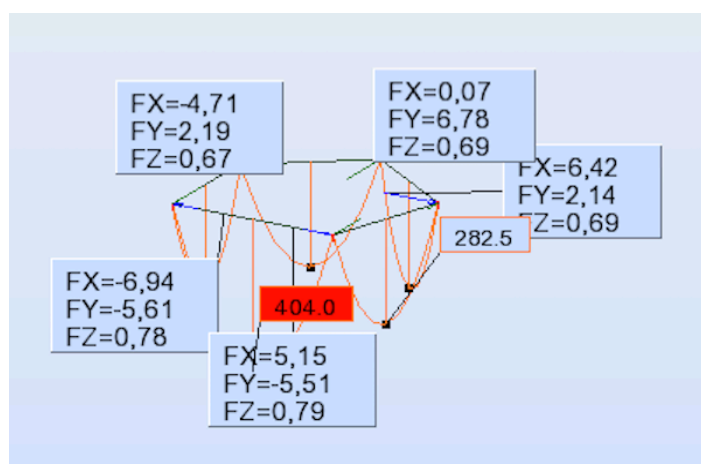


Figura 27. Reacciones y flecha natural (antes de introducir contrapeso)

La flecha del tramo más largo (248,9 metros) se ha reducido de 4,04 metros a 1,63 metros. Como consecuencia de aplicar este tensado, vemos que las reacciones también se han modificado.

7.3.2 Traslación de fuerzas al centro de cada polea (Cálculo exacto)

Una vez conocidas las fuerzas en cada nodo, hay que trasladarlas todas al centro de cada polea, de esta manera, conseguiremos conocer el efecto que provocarían estas cargas en cada pila, ya que las fuerzas en los nodos simplemente eran una primera aproximación para facilitar el cálculo.

Para una polea i cualquiera tendremos:

$$\bar{F}^{O_i} = \bar{F}^A - \overline{O_1 A} \wedge \bar{F}^A$$

Siendo O_i el centro de la polea i y C el punto en el que está aplicada la fuerza, en este caso el nudo desde el que hay que trasladar las fuerzas.

En AUTOCAD se ha dibujado la forma del Layout con las distintas poleas para conocer el vector de posición de cada nodo respecto del centro de su respectiva polea. (Unidades en mm, no está a escala, solamente se utiliza para conocer la posición de cada centro respecto a su nudo)

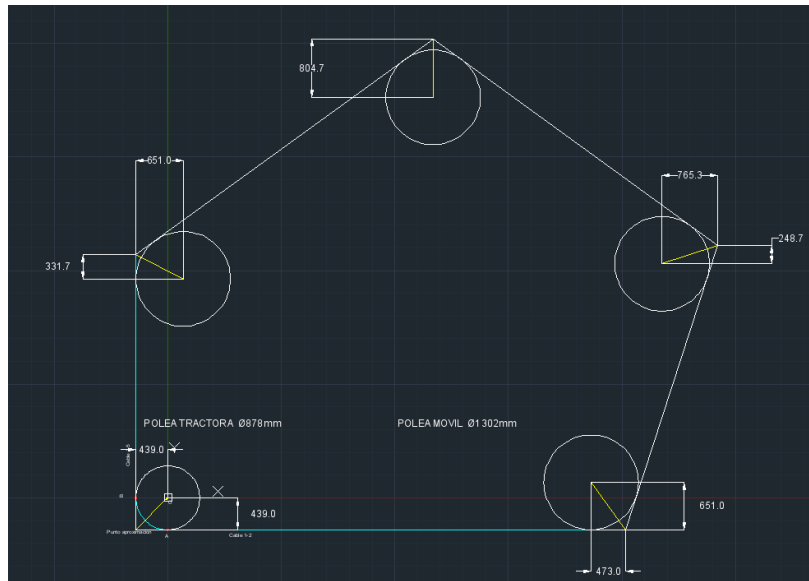


Figura 28. Posición del centro de las poleas sobre sus propios nudos.

Con este procedimiento se conocen los vectores $\overline{O_i A_i}$ que resultan ser:

$$\begin{aligned} \overline{O_1 A_1} &= \begin{pmatrix} -0,439 \\ -0,439 \\ 0 \end{pmatrix} & \overline{O_2 A_2} &= \begin{pmatrix} 0,473 \\ -0,651 \\ 0 \end{pmatrix} & \overline{O_3 A_3} &= \begin{pmatrix} 0,765 \\ 0,249 \\ 0 \end{pmatrix} \\ \overline{O_4 A_4} &= \begin{pmatrix} 0 \\ 0,805 \\ 0 \end{pmatrix} & \overline{O_5 A_5} &= \begin{pmatrix} -0,651 \\ 0,332 \\ 0 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Para la polea 1 (polea tractora) tendremos:

$$\bar{F}^{O1} = \bar{F}^A - \overline{O_1 A} \wedge \bar{F}^A$$

Sustituyendo los valores:

$$\bar{F}^{01} = \begin{pmatrix} +17,53 \\ +17,53 \\ -0,78 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} -0,439 \\ -0,439 \\ 0 \end{pmatrix} \wedge \begin{pmatrix} +17,53 \\ +17,53 \\ -0,78 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} +17,19 \\ +17,87 \\ -0,78 \end{pmatrix}$$

Para la polea 2 tendremos:

$$\bar{F}^{02} = \bar{F}^A - \overline{O_2A} \wedge \bar{F}^A$$

Sustituyendo los valores:

$$\bar{F}^{02} = \begin{pmatrix} -12,11 \\ +16,67 \\ -0,79 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0,473 \\ -0,651 \\ 0 \end{pmatrix} \wedge \begin{pmatrix} -12,11 \\ +16,67 \\ -0,79 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -12,62 \\ +16,30 \\ -0,79 \end{pmatrix}$$

Para la polea 3 tendremos:

$$\bar{F}^{03} = \bar{F}^A - \overline{O_3A} \wedge \bar{F}^A$$

Sustituyendo los valores:

$$\bar{F}^{03} = \begin{pmatrix} -19,60 \\ -6,37 \\ -0,69 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0,765 \\ 0,249 \\ 0 \end{pmatrix} \wedge \begin{pmatrix} -19,60 \\ -6,37 \\ -0,69 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -19,43 \\ -6,90 \\ -0,69 \end{pmatrix}$$

Para la polea 4 tendremos:

$$\bar{F}^{04} = \bar{F}^A - \overline{O_4A} \wedge \bar{F}^A$$

Sustituyendo los valores:

$$\bar{F}^{04} = \begin{pmatrix} 0 \\ -20,6 \\ -0,69 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 \\ 0,805 \\ 0 \end{pmatrix} \wedge \begin{pmatrix} 0 \\ -20,6 \\ -0,69 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} +0,55 \\ -20,6 \\ -0,69 \end{pmatrix}$$

Para la polea 5 tendremos:

$$\bar{F}^{05} = \bar{F}^A - \overline{O_5A} \wedge \bar{F}^A$$

Sustituyendo los valores:

$$\bar{F}^{05} = \begin{pmatrix} 14,18 \\ -7,23 \\ -0,67 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} -0,651 \\ +0,332 \\ 0 \end{pmatrix} \wedge \begin{pmatrix} 14,18 \\ -7,23 \\ -0,67 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} +14,40 \\ -6,79 \\ -0,67 \end{pmatrix}$$

Por lo tanto, las pilonas estarán sometidas a las siguientes fuerzas debidas a la tensión de cada cable:

(kN)	P1	P2	P3	P4	P5
F _x	17,19	-12,62	-19,43	0,55	14,4
F _y	17,87	16,30	-6,9	-20,6	-6,79
F _z	-0,78	-0,79	-0,69	-0,69	-0,67
Resultante	24,81	20,63	20,63	20,62	15,93

Tabla 4. Tensiones de un cable sobre cada pilona

Al ser dos cables (superior e inferior) el valor de la fuerza a aplicar a cada pilona será el doble del mostrado en esta tabla.

7.4 Orientación de las pilonas

La orientación de pilonas se realiza de acuerdo a la resultante de fuerzas en el plano xy:

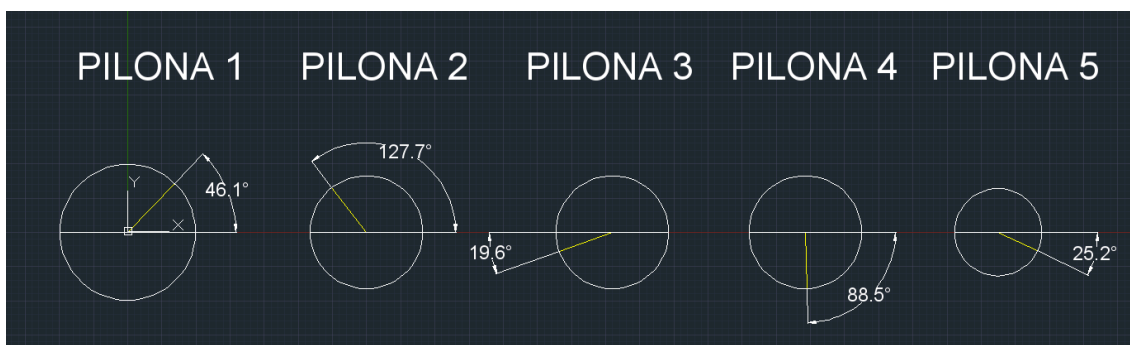


Figura 29. Orientación de las pilonas según tensión del cable.

Como se puede ver en la imagen, la orientación de las pilonas es la siguiente:

	P1	P2	P3	P4	P5
Orientación (°)	46,1	127,7	199,6	271,5	334,8

Tabla 5. Orientación de las pilonas

En las siguientes imágenes se comparan los efectos que puede causar una mala orientación de las pilonas frente a una buena ante las mismas cargas.

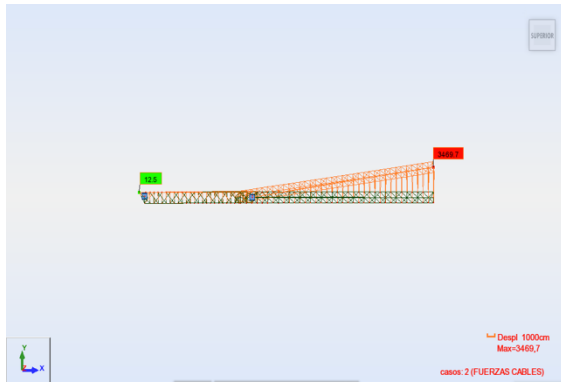


Figura 30. Mala orientación de pylona

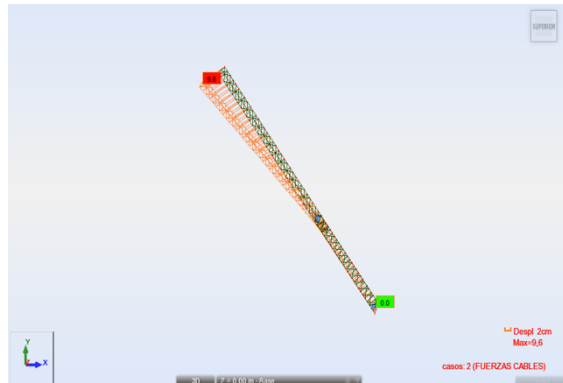


Figura 31. Buena orientación de la pylona

En las imágenes se puede comprobar que con una correcta orientación (en este caso 128°) se consigue que la deformación en la pylona sea mínima, mientras que una orientación aleatoria (0°) provocará un colapso de la estructura.

8. Diseño de Tirantes

8.1 Modelización de cables por barras

Los programas de análisis de elementos finitos suelen tener ciertas limitaciones cuando tratan elementos de tipo cable, por lo tanto, es relativamente complicado modelizar cables metálicos, ya que es difícil modelar un elemento dentro de un modelo que no puede trabajar a compresión. Una de las peculiaridades que se deben tener en cuenta es que los cables no deben quedar destensados, ya que sino el programa nos daría un error por divergencia no lineal. Resumiendo, siempre deben trabajar a tracción.

Se pueden modelar cables de distintos modos, pero a la hora del cálculo y análisis es difícil generar una interacción entre los distintos elementos.

Por ese motivo, se ha utilizado el elemento barra para modelizar tanto cables como barras de la pylona, pero como ya se ha comentado los cables deben ir tensados de tal manera, que otorguen estabilidad global a la estructura.

Para ello, en la mayoría de programas se ha de utilizar el siguiente procedimiento:

- Tensar los cables mediante un gradiente de temperatura.

El procedimiento se basa en dos ecuaciones básicas:

$$\varepsilon = \alpha \cdot T$$

$$\sigma = \varepsilon \cdot E$$

Juntando ambas se obtiene una relación directa entre el gradiente de temperatura y la tensión, donde antes se tenía gradiente de temperaturas y deformaciones.

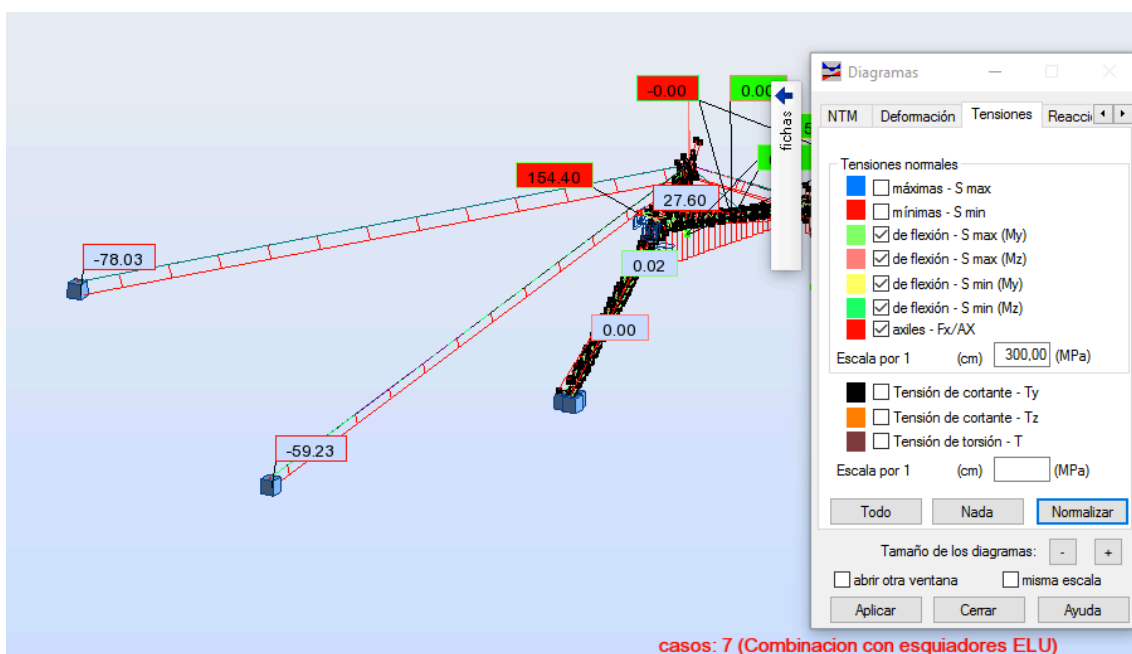
$$\sigma = \alpha \cdot E \cdot \Delta T$$

Para obtener lo deseado, se debe anular E, de tal manera que el haga lo que se desea. Por lo tanto, cuando éste pida la constante de dilatación térmica se introducirá 1/E, dado que el módulo de Young de un cable de acero es 210 GPa, el coeficiente de dilatación térmica será $4,76 \cdot 10^{-6}$.

Para comenzar a efectuar los cálculos sobre la pylona atirantada, se debe fijar una tensión inicial de los cables que atirantan la estructura, esta tensión debe ser la necesaria para que en ninguna de las hipótesis de cálculo los cables queden destensados.

En el software que se ha utilizado en este proyecto (ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS), no ha sido necesario realizar este procedimiento, ya que existe la

Una vez visto el proceso para generar un elemento traccionado, comprobamos que realmente este elemento únicamente trabaja a axil. En la siguiente figura queda verificado que los dos tirantes únicamente trabajan a tracción ya que al haber marcado todos los tipos de tensión posibles únicamente nos devuelve el diagrama de axil.



37

8.2 Procedimiento de atirantado de pilonas

En este apartado se expondrá el proceso que se ha seguido para atirantar las pilonas. Servirá a modo de ejemplo el atirantado de la pila 2, para el resto de pilonas el procedimiento es análogo. Si se desea ver el atirantado del resto de pilonas se recomienda consultar el anexo 5: Atirantado y comportamiento de pilonas frente a cargas.

Una vez aplicadas las cargas en la pila y realizada la combinación de las cargas permanentes (peso propio, tensión de cables y peso de polea y portapolea) se procede a situar los tirantes. En el estado límite ÚLTIMO (ELU), se calculan las reacciones del nudo superior, esto nos permitirá conocer la posición que deben adoptar los tirantes.

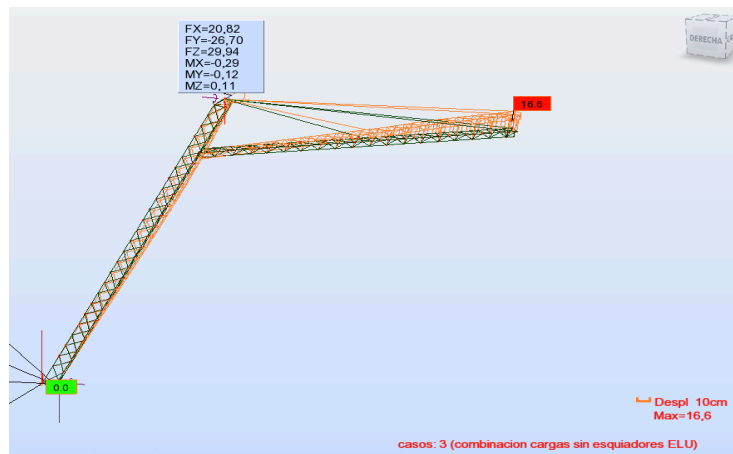


Figura 34. Reacciones superiores pila 2 para calcular tirantes

En este caso $F_x=20,82$, $F_y=-26,70$, las coordenadas del nudo superior son:

$$x=1,54; y=7,63; z=11,93$$

En AutoCAD, se obtendrá la dirección que define la línea de acción de la fuerza resultante, la cual será la bisectriz de las proyecciones horizontales de los tirantes.

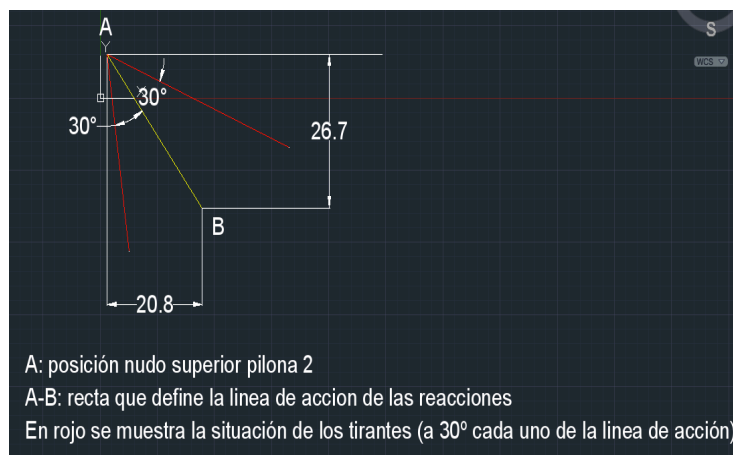


Figura 35. Vista superior del atirantado de pilonas. Método

Una vez obtenida la vista en z de los tirantes, se debe definir la longitud que deseamos que tengan estos tirantes. Se elige una longitud de entre 30 y 40m.

Ya que la base de la pila se halla sumergida en agua, la altura de los anclajes de los tirantes respecto al nudo superior de la pila al cual se unen es menor a los 11,93 metros señalados antes. Para los cálculos se decide una altura que permita un ángulo de inclinación del tirante de unos 15° aproximadamente respecto a la horizontal.

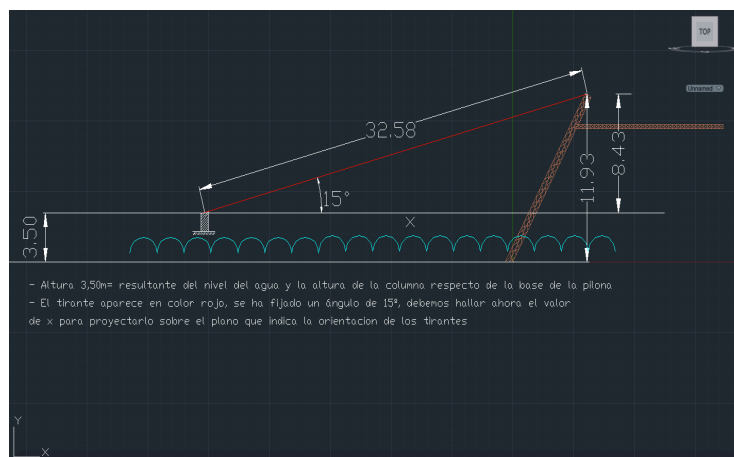


Figura 36. Explicación sobre el ángulo vertical de los tirantes

Mediante AutoCAD, fijando previamente un ángulo de tirante sobre la horizontal de 15° y una altura entre el anclaje y la base de la pila de 3,5m y aplicando la siguiente fórmula trigonométrica

$$\tan 15 = \frac{8,43}{x}$$

siendo x la proyección horizontal del tirante, se ha obtenido que el valor de x será de 31,46m. La longitud del cable será de 32,58 metros.

El siguiente paso es aplicar esta longitud de la proyección horizontal sobre la figura 35. Realizando esto, podremos obtener las coordenadas en x e y de los 2 nodos de los anclajes. La coordenada z será la ya mencionada (3,5m).

COORDENADAS C: 5,92; -23,52;3,50

COORDENADAS D: 30,69; -4,21;3,50

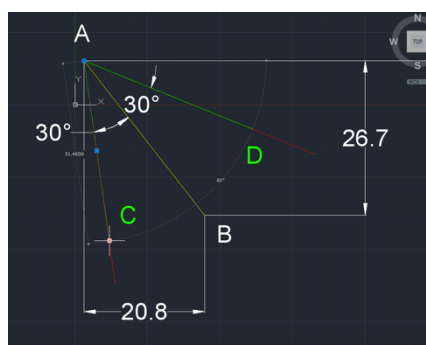


Figura 37. Coordenadas punto C

Antes de acoplar los tirantes, simulamos la combinación de cargas sobre la piona para obtener las reacciones en la base y de esta manera poder compararlas posteriormente, una vez aplicados los tirantes, de esta manera se podrá comprobar si los tirantes han surtido el efecto deseado. Los valores de estas reacciones son los que aparecen en la siguiente imagen:

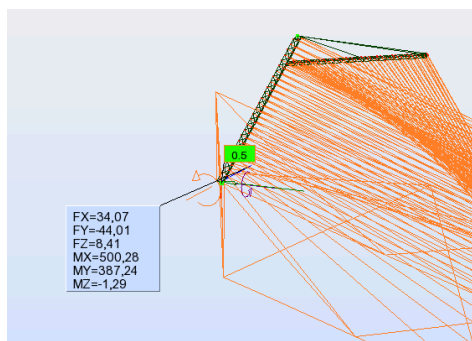


Figura 38. Piona sin tirantes

Como se puede observar, la deformación de la estructura es muy grande, esto es debido a que ya no hay ningún apoyo superior por lo tanto la estructura colapsa. En la siguiente imagen se muestran las reacciones una vez acoplados los tirantes, y se puede ver que las reacciones de las pionas son mucho menores con los tirantes. Además, se puede ver que la deformación de la estructura es mínima una vez instalados estos.

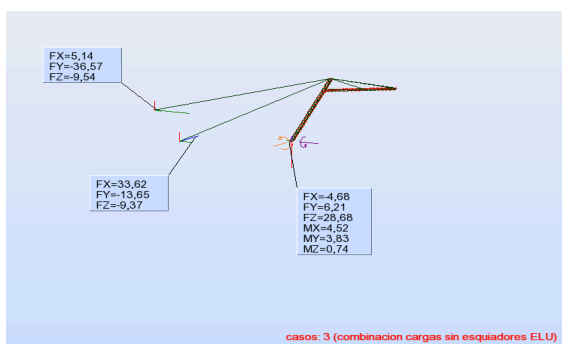


Figura 39. Reacciones con tirantes

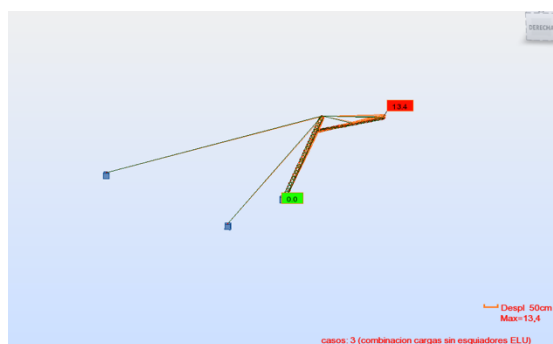


Figura 40. Deformación con tirantes.

Las cargas máximas que soportan los tirantes (axiles) vienen recogidas en el anexo 7: Axiles máximos en los tirantes. La verificación del dimensionamiento de los cables tirantes de la estructura aparece en el capítulo 11 (verificación y dimensionado de cables).

9. Efecto de la combinación ELU a pilonas y comportamiento frente a carga. Resultados

9.1 Efecto de la sobrecarga esquiadores

Una vez atirantada la pila, el siguiente paso es incluir en la combinación de cargas la sobrecarga que producen los esquiadores. Esta carga nos permitirá obtener el juego que deberá tener la pila. De nuevo, nos serviremos de la pila 2 para continuar el análisis tal y como se hizo con el atirantado, si se desea ver para el resto de pilonas se podrá encontrar en el Anexo 5: Atirantado y comportamiento de pilonas frente a cargas.

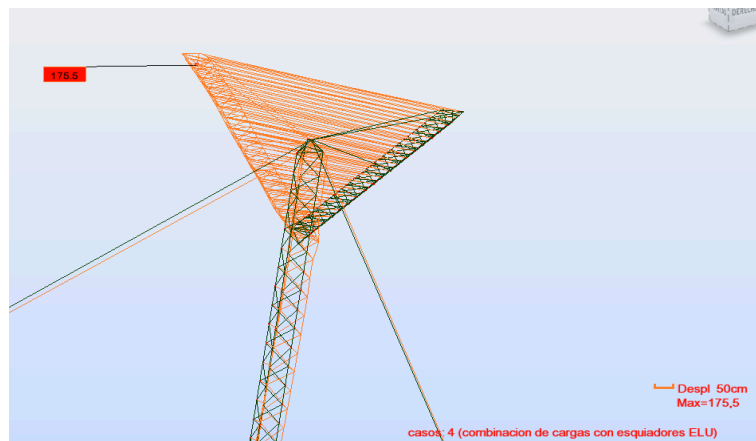


Figura 41. Juego de la pila tras implementar esquiadores.

Como vemos, la carga de esquiadores, provocaría un desplazamiento muy grande de los distintos nudos del voladizo en el plano horizontal, por lo tanto, en la unión del mástil vertical con el horizontal se deberá instalar una unión que permita el giro del mástil horizontal respecto al eje z de manera que las tensiones sobre la estructura se reduzcan y no se produzcan deformaciones inadmisibles en las barras.

Esto se consigue introduciendo en los 3 nudos de unión una articulación que permita el giro libre del mástil horizontal, y que simplemente impida el desplazamiento de los nudos de unión.

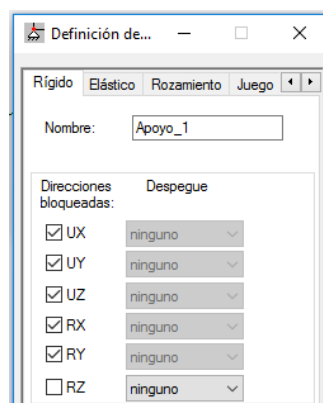


Figura 42. Apoyo elegido para permitir juego del mástil horizontal

Como se puede comprobar, al realizar esta modificación, el juego que deberá realizar el mástil horizontal se reduce notablemente, además, las distintas barras estarán sometidas a una tensión inferior. En la siguiente imagen se muestra la representación en ROBOT de estos apoyos definidos previamente.

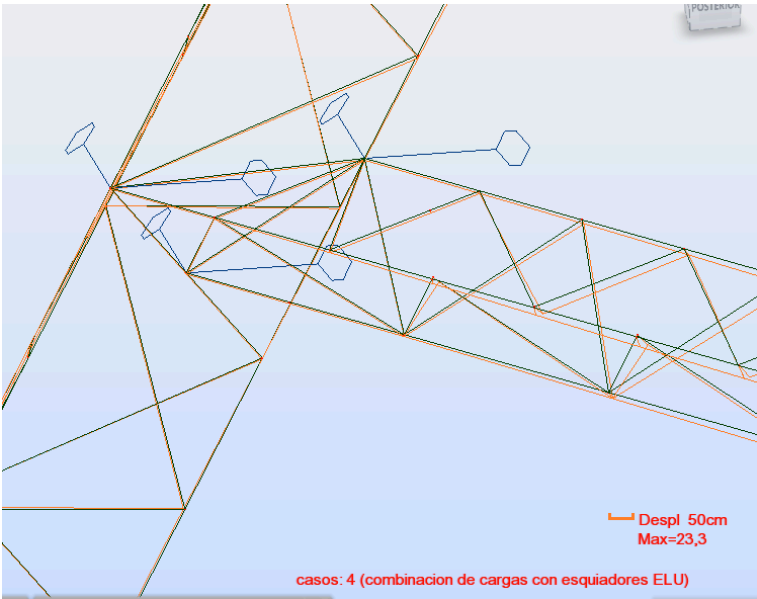


Figura 43. Representación gráfica del apoyo

9.2 Tensiones en las barras

Se realiza un análisis detallado de tensiones de todas las barras de la estructura. Estas tensiones se van a estudiar solamente para el ESTADO LIMITE ÚLTIMO con esquiadores (el más desfavorable).

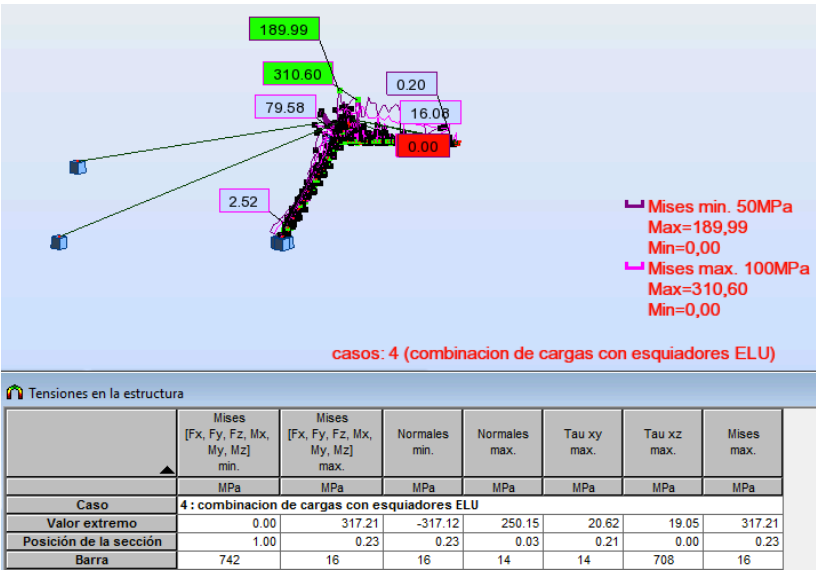


Figura 44. Tensiones máximas de las barras de la pila 2.

Se adjuntan las siguientes tablas en la que se incluyen los extremos globales de tensiones máximas como de desplazamientos de los nudos. En el anexo 6: Tensiones de las barras de las pilonas: Tablas aparecen los valores de tensión de todas las barras de la estructura completa.)

En lo que se refiere a tensiones, el máximo se encuentra en la pila 5, con un valor de 321,37 MPa, este valor es menor que el límite elástico (345MPa) por lo que se consideran correctos tanto el material como la sección elegidas, si se deseara un mayor coeficiente de seguridad se habría de cambiar la sección de las barras con las que no se estuviese conforme. Si se desea consultar las tensiones de todas las barras de la estructura consultar el anexo (“tensiones de barras”)

PILONA 1	Mises [Fx, Fy, Fz, Mx, My, Mz] min.	Mises [Fx, Fy, Fz, Mx, My, Mz] max.
	MPa	MPa
Caso	7 : Combinacion con esquiadores ELU	
Valor extremo	0.00	316.03
Posición de la sección	0.00	1.00
Barra	532	556
PILONA 2	Mises [Fx, Fy, Fz, Mx, My, Mz] min.	Mises [Fx, Fy, Fz, Mx, My, Mz] max.
	MPa	MPa
Caso	4 : combinacion de cargas con esquiadores ELU	
Valor extremo	0.00	317.21
Posición de la sección	1.00	0.23
Barra	742	16
PILONA 3	Mises [Fx, Fy, Fz, Mx, My, Mz] min.	Mises [Fx, Fy, Fz, Mx, My, Mz] max.
	MPa	MPa
Caso	6 : combinacion cargas con esquiadores ELU	
Valor extremo	0.00	202.43
Posición de la sección	1.00	0.84
Barra	537	473
PILONA 4	Mises [Fx, Fy, Fz, Mx, My, Mz] min.	Mises [Fx, Fy, Fz, Mx, My, Mz] max.
	MPa	MPa
Caso	7 : Combinacion cargas con esquiadores ELU	
Valor extremo	0.00	135.78
Posición de la sección	0.50	0.00
Barra	487	91
PILONA 5	Mises [Fx, Fy, Fz, Mx, My, Mz] min.	Mises [Fx, Fy, Fz, Mx, My, Mz] max.
	MPa	MPa
Caso	6 : combinacion cargas con esquiadores ELU	
Valor extremo	0.00	321.37
Posición de la sección	1.00	0.03
Barra	547	5

Tabla 6. Tensiones máximas de cada pila

9.3 Desplazamientos de los nudos

Según la normativa consultada (Código técnico de edificación, seguridad estructural DB-SE-A (Acero) y el EUROCÓDIGO 3), la flecha máxima admisible de una estructura de acero en celosía es $L/300$. Siendo L la longitud máxima entre apoyos.

A excepción de la pila motora que posee unas dimensiones distintas, la longitud mínima de los mástiles del resto de pilonas (vertical y horizontal) es de 13,31 metros. En la pila motora la longitud de los mástiles es 14,50 metros el mástil vertical y 7,72 metros el mástil horizontal.

Con esta información obtenemos el desplazamiento máximo vertical admisible de los nudos:

- 4,83 cm para la pila motora (mástil vertical) y 2,58 cm (mástil horizontal)
- 4,44 cm en el caso del resto de pilonas (mástil vertical y horizontal presentan una longitud muy similar)

En las siguientes tablas se muestran los mayores desplazamientos de las pilonas, nos centraremos en los verticales (U_z) ya que los horizontales no causan ningún problema debido a la unión entre los mástiles vertical y horizontal.

	UX (cm)	UY (cm)	UZ (cm)	RX (Rad)	RY (Rad)	RZ (Rad)
PILONA 1						
MAX	60,9	6,3	4	0	0,003	0
Nudo	119	20	156	3	78	3
Caso	8	8	8	8	8	8
MIN	-0,1	-49,5	-4,3	-0,032	-0,039	-0,09
Nudo	44	156	115	19	242	12
Caso	8	8	8	8	8	8

	UX (cm)	UY (cm)	UZ (cm)	RX (Rad)	RY (Rad)	RZ (Rad)
PILONA 2						
MAX	0,2	4,7	4,3	0	0,039	0,128
Nudo	440	418	469	427	524	469
Caso	6	6	6	6	6	6
MIN	-86,8	-62,4	-3,5	-0,037	-0,001	0
Nudo	531	469	418	464	438	1
Caso	6	6	6	6	6	6

	UX (cm)	UY (cm)	UZ (cm)	RX (Rad)	RY (Rad)	RZ (Rad)
PILONA 3						
MAX	0	39	2,2	0,029	0,014	0,003
Nudo	44	376	318	376	145	378
Caso	7 (C)	7 (C)	7 (C)	7 (C)	7 (C)	7 (C)
MIN	-20,2	-2	-2,5	0	-0,005	-0,087
Nudo	377	73	115	3	378	376
Caso	7 (C)	7 (C)	7 (C)	7 (C)	7 (C)	7 (C)

	UX (cm)	UY (cm)	UZ (cm)	RX (Rad)	RY (Rad)	RZ (Rad)
PILONA 4						
MAX	0,3	0	0	0,003	0	0,001
Nudo	327	1	31	98	310	310
Caso	8	8	8	8	8	8
MIN	0	-3,1	-2	0	0	0
Nudo	58	331	327	1	81	1
Caso	8	8	8	8	8	8

	UX (cm)	UY (cm)	UZ (cm)	RX (Rad)	RY (Rad)	RZ (Rad)
MAX	56,4	107,6	2,7	0,05	0,004	0,131
Nudo	376	378	378	54	44	378
Caso	7	7	7	7	7	7
MIN	-0,2	-1,9	-3,4	-0,001	-0,028	0
Nudo	60	102	142	78	173	3
Caso	7	7	7	7	7	7

Tabla 7. Desplazamientos máximos de los nudos

De la tabla anterior extraemos nuestros datos de interés, como se puede ver en ninguna de las pilonas se supera el valor máximo permitido.

	P1	P2	P3	P4	P5
Uz (cm)	4,3	4,3	2,5	2,0	4,1

Tabla 8. Desplazamientos máximos en z

Si se desean consultar los valores de desplazamiento de los demás nudos se deberá consultar el Anexo 8: Desplazamiento de los nudos de las pilonas para la combinación de cargas en estado ELS

10. Cimentación de las pilonas y diseño de anclajes

10.1 Aplicación de la norma EHE-08

En este apartado, se tratará la elección de tipo de hormigón para la construcción de la estructura, junto con la armadura complementaria de acuerdo a la norma EHE-08.

Para llevar a cabo el diseño de la cimentación, una vez se tienen los valores obtenidos de los cálculos analíticos mediante el software ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS, se consultan en la Instrucción de Hormigón Estructural aquellos artículos que sean importantes para el desarrollo de este proyecto.

En relación a la clase de exposición ambiental con respecto, tanto a la corrosión de las armaduras, como a otros procesos de degradación del material, podemos encuadrar nuestra estructura en: CLASE marina, SUBCLASE sumergida (IIIb), existe corrosión por cloruros en las armaduras de acero. En cuanto a otros procesos de deterioro distintos a la corrosión, podemos decir que existe una exposición de CLASE química agresiva SUBCLASE media (Qb), por ataque químico, al ser una estructura subacuática, en permanente contacto con agua. Esos elementos químicos provocan alteraciones en el hormigón [41].

Para los valores característicos de las acciones permanentes, se tomarán valores de la densidad del hormigón de 2500 kg/m^3 (Hormigón armado). Presenta una f_{ck} superior a 50 N/mm^2 . No se instalará pretensado ya que no es necesario debido a que la armadura pasiva que utilizaremos cumple con las solicitaciones, por lo tanto, se ignoran todos los apartados que hagan referencia al pretensado del hormigón.

A continuación, se detallan los artículos de los que se ha obtenido una mayor información útil a la hora de diseñar y seleccionar el material adecuado para la cimentación y la armadura:

- Artículo 15: como coeficiente de seguridad parcial del hormigón para Estados Límite Último, se ha elegido $\gamma = 1,50$ para el hormigón y $\gamma = 1,35$ para el acero, ambos para situaciones persistentes y transitorias del proyecto (tabla 17). Sin distintivos de calidad, tanto del hormigón como del acero, es imposible reducir este coeficiente, para garantizar la seguridad de las personas y del medio ambiente.
- Artículo 32: de los posibles diámetros propuestos en la instrucción de barras corrugadas de acero, se eligen barras de 16 y 32 mm de diámetro, como se explicará en el apartado 5.2. El tipo de acero elegido es un acero soldable 500 S, cuyas características están descritas en la tabla del apartado 10.2 (“Elección del material”)

- Artículo 37: para la durabilidad del hormigón y de las armaduras, es necesario una calidad adecuada del hormigón y la existencia de un parámetro fundamental para evitar la corrosión en el acero de la armadura como es el recubrimiento mínimo. Éste debe cumplirse para cualquier punto de la armadura pasiva, y viene definido por la fórmula:

$$r_{nom} = r_{min} + \Delta r$$

Así, obtenemos un recubrimiento nominal de 50 mm (40+10), al tener un recubrimiento mínimo especificado en la Tabla 37.2.4.1.b del EHE-08 y un margen de recubrimiento de 10 mm. (37.2.4 “Recubrimientos”)

Tabla 37.2.4.1.b
Recubrimiento mínimo (mm) para las clases generales de exposición III y IV

Hormigón	Cemento	Vida útil de proyecto (t_p) (años)	Clase general de exposición			
			IIIa	IIIb	IIIc	IV
Armado	CEM III/A, CEM III/B, CEM IV, CEM II/B-S, B-P, B-V, A-D u hormigón con adición de microsilice superior al 6% o de cenizas volantes superior al 20%	50	25	30	35	35
		100	30	35	40	40
	Resto de cementos utilizables	50	45	40	*	*
		100	65	*	*	*
Pretensado	CEM II/A-D o bien con adición de humo de sílice superior al 6%	50	30	35	40	40
		100	35	40	45	45
	Resto de cementos utilizables, según el Artículo 26º	50	65	45	*	*
		100	*	*	*	*

Tabla 9. recubrimiento mínimo [EHE-08. Art 37.]

Para conseguir una durabilidad adecuada del hormigón se deben cumplir los requisitos siguientes:

- a) Requisitos generales, según el tipo de exposición:
 - Máxima relación agua/cemento: 0,5. (Tabla 37.3.2.a EHE-08)
 - Mínimo contenido de cemento: 350 kg/m³. (Tabla 37.3.2.a EHE-08)
- b) Requisitos adicionales:
 - Utilización de un cemento resistente a los sulfatos al estar en contacto con el agua del mar.
 - Utilización de un cemento resistente al agua de mar: el cemento de esta estructura, al estar en contacto continuo con mareas y agua del mar, deberá tener una

característica adicional de resistencia. El ataque que sufre el hormigón por la acción del agua de mar es debido fundamentalmente a la acción combinada de los iones sulfato y magnesio. La presencia de los iones cloruro, con independencia del efecto que producen sobre las armaduras, reduce notablemente la acción de los sulfatos.

10.2 Elección de material

Tabla 373.2.a
Máxima relación agua/cemento y mínimo contenido de cemento

Parámetro de dosificación	Tipo de hormigón	Clase de exposición									
		I	IIa	IIb	IIIa	IIIb	IIIc	IV	Os	Ob	Oc
Máxima relación a/c	Masa	0,65	—	—	—	—	—	—	0,50	0,50	0,45
	Armado	0,65	0,60	0,55	0,50	0,50	0,45	0,50	0,50	0,50	0,45
	Pretensado	0,60	0,60	0,55	0,45	0,45	0,45	0,45	0,50	0,45	0,45
Mínimo contenido de cemento (kg/m ³)	Masa	200	—	—	—	—	—	—	275	300	325
	Armado	250	275	300	300	325	350	325	325	350	350
	Pretensado	275	300	300	300	325	350	325	325	350	350

Tabla 373.2.b
Resistencias mínimas recomendadas en función de los requisitos de durabilidad (*)

Parámetro de dosificación	Tipo de hormigón	Clase de exposición									
		I	IIa	IIb	IIIa	IIIb	IIIc	IV	Os	Ob	Oc
Resistencia mínima (N/mm ²)	Masa	20	—	—	—	—	—	—	30	30	35
	Armado	25	25	30	30	30	35	30	30	30	35
	Pretensado	25	25	30	30	35	35	35	30	35	35

(*) Estos valores reflejan las resistencias que pueden esperarse con carácter general cuando se emplean áridos de buena calidad y se respetan las especificaciones estrictas de durabilidad incluida meramente orientativa, al objeto de fomentar la deseable coherencia entre las especificaciones de durabilidad y las especificaciones de resistencia. En este sentido, se recuerda que en algunas pueden cumplir estrictamente las especificaciones definidos para ellos en esta Instrucción, puede ser complicado obtener estos valores.

Tabla 10. Valores de resistencia mínima y dosificación [EHE-08. Art 37.]

En base al artículo 39 del EHE-08 (características del hormigón) y teniendo en cuenta la clase de exposición ambiental a la que se verá sometida la cimentación, la tipificación del hormigón a utilizar será HA – 50/B/14/IIIb, donde:

- HA indica hormigón armado.
- 50 indica la resistencia característica especificada, en N/mm².
- B es la letra inicial del tipo de consistencia (Blanda).
- 14 es el tamaño máximo del árido en milímetros
- IIIb es la designación del ambiente marino sumergido.

10.3 Elección de la armadura

De los posibles diámetros propuestos en la Instrucción de barras corrugadas de acero, se eligen barras de 12 y 16 mm de diámetro. El tipo de acero elegido es un acero soldable 500 S, cuyas características están descritas en la tabla 11. (Artículo 32)

Tipo de acero		Acero soldable		Acero soldable con características especiales de ductilidad	
Designación		B 400 S	B 500 S	B 400 SD	B 500 SD
Límite elástico, f_y (N/mm ²) ⁽¹⁾		≥ 400	≥ 500	≥ 400	≥ 500
Carga unitaria de rotura, f_u (N/mm ²) ⁽¹⁾		≥ 440	≥ 550	≥ 480	≥ 575
Alargamiento de rotura, $\epsilon_{u,5}$ (%)		≥ 14	≥ 12	≥ 20	≥ 16
Alargamiento total bajo carga máxima, $\epsilon_{máx}$ (%)	Acero suministrado en barra	≥ 5,0	≥ 5,0	≥ 7,5	≥ 7,5
	Acero suministrado en rollo ⁽³⁾	≥ 7,5	≥ 7,5	≥ 10,0	≥ 10,0
Relación f_u/f_y ⁽²⁾		≥ 1,05	≥ 1,05	$1,20 \leq f_u/f_y \leq 1,35$	$1,15 \leq f_u/f_y \leq 1,35$
Relación $f_{y,real}/f_{y,nominal}$		—	—	≤ 1,20	≤ 1,25

Tabla 11. Características del acero de las barras corrugadas de la armadura [EHE-08. Art 32.]

10.4 Dimensionado de zapatas

Las zapatas de las pilonas tendrán diferentes dimensiones dependiendo del estado tensional al que estén sometidas. Introduciendo en Robot Structural unas dimensiones de partida para el predimensionado el programa te calculara las dimensiones óptimas de la zapata. En la siguiente tabla aparecen las reacciones de cada una de las pilonas, dependiendo del valor de estos esfuerzos la zapata tendrá una dimensión u otra.

Reacciones/pilonas	P1	P2	P3	P4	P5
Fx	3,51	-4,68	-6,91	0,64	7,11
Fy	3,86	6,21	-2,33	-25,31	-3,46
Fz	35,89	28,68	28,29	49,06	25,19
Mx	5,94	4,52	-1,99	-2,03	-1,6
My	-6,98	3,83	5,75	-0,15	-3,31
Mz	-3,13	0,74	-0,55	-0,06	-0,39
Fequivalente (kN)	36,27	29,72	29,21	55,21	26,40
Mequivalente (kNm)	9,69	5,97	6,11	2,04	3,70

Tabla 12. Reacciones de las pilonas para el cálculo de cimentación

Tal y como se ve en la tabla, la pila motora y la del contrapeso son las que están sometidas a unos mayores estados de carga.

Para el diseño de las zapatas de los tirantes, se consultará la Tabla A7-8 (Anexo 7: Axiles máximos en los tirantes) en la que se encuentran las reacciones todos ellos. En la tabla se escogerá el tirante sometido a un mayor esfuerzo para dimensionar las zapatas. Esta zapata se usará para la cimentación del resto de tirantes.

Como la ubicación del proyecto no es conocida, no se sabe la tipología del suelo que nos encontraremos, según se ha consultado, cerca de lagos o pantanos de Aragón la tipología del suelo está formada por arcillas o areniscas, por lo tanto, fijándonos en la siguiente tabla se ha fijado un valor de presión máxima admisible del suelo de 0,5 MPa como valor

orientativo. Además, se fija un coeficiente de seguridad de 1,5 al punzonamiento o cizallamiento.

Terreno	Tipos y condiciones	Presión admisible [Mpa]	Observaciones
Rocas	Rocas ígneas y metamórficas sanas ⁽¹⁾ (Granito, diorita, basalto, gneis)	10	Para los valores apuntados se supone que la cimentación se sitúa sobre roca no meteorizada
	Rocas metamórficas foliadas sanas ^{(1), (2)} (Esquistos, pizarras)	3	
	Rocas sedimentarias sanas ⁽¹⁾ ⁽²⁾ Pizarras cementadas, limolitas, areniscas, calizas sin karstificar, conglomerados cementados	1 a 4	
	Rocas arcillosas sanas ^{(2), (4)}	0,5 a 1	
	Rocas diaclasadas de cualquier tipo con espaciamiento de discontinuidades superior a 0,30m, excepto rocas arcillosas	1	
	Calizas, areniscas y rocas pizarrosas con pequeño espaciamiento de los planos de estratificación ⁽¹⁾	-	
	Rocas muy diaclasadas o meteorizadas ⁽¹⁾	-	
Suelos granulares (% finos inferior al 35% en peso)	Gravas y mezclas de arena y grava, muy densas	>0,6	Para anchos de cimentación (B) mayor o igual a 1 m y nivel freático situado a una profundidad mayor al ancho de la cimentación (B) por debajo de ésta
	Gravas y mezclas de grava y arena, medianamente densas a densas	0,2 a 0,6	
	Gravas y mezclas de arena y grava, sueltas	<0,2	
	Arena muy densa	>0,3	
	Arena medianamente densa	0,1 a 0,3	
	Arena suelta	<0,1	
Suelos finos (% de finos superior al 35% en peso)	Arcillas duras	0,3 a 0,6	Los suelos finos normalmente consolidados y ligeramente sobreconsolidados en los que sean de esperar asentamientos de consolidación serán objeto de un estudio especial. Los suelos arcillosos potencialmente expansivos serán objeto de un estudio especial
	Arcillas muy firmes	0,15 a 0,3	
	Arcillas firmes	0,075 a 0,15	
	Arcillas y limos blandos	<0,075	
	Arcillas y limos muy blandos		

Tabla 13. Presión admisible del suelo [44]

Tras analizarla con el software, entre otros resultados se obtienen los distintos perfiles de tensiones en los que se puede verificar que en ningún punto supera el límite anteriormente fijado en 0,5 MPa.

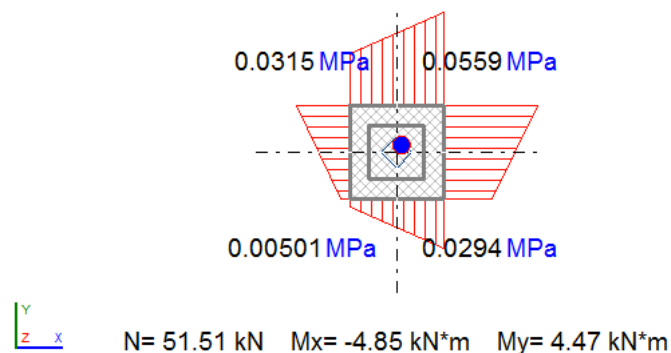


Figura 45. Tensiones en la zapata de la pila motora

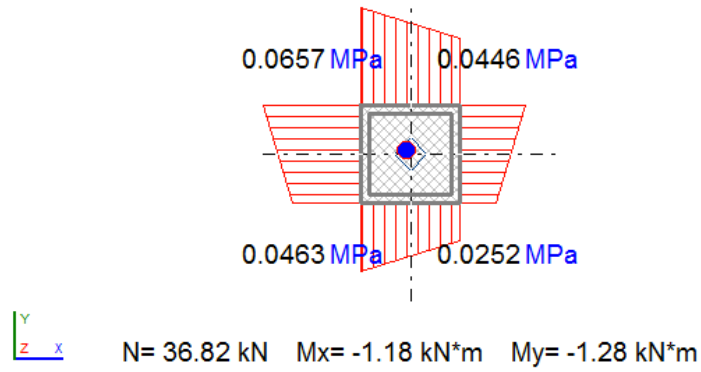


Figura 46. Tensiones pilona 2.

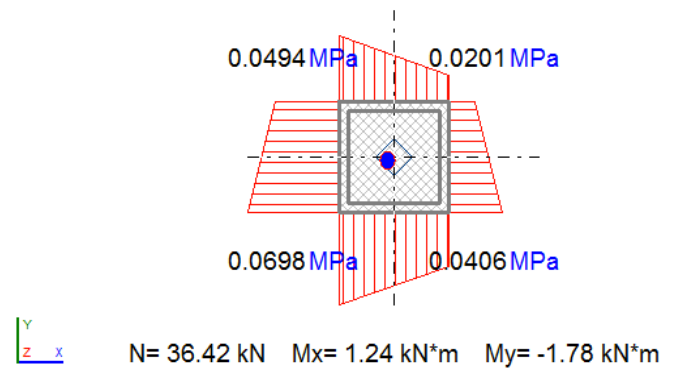


Figura 47. Tensiones Pilona 3

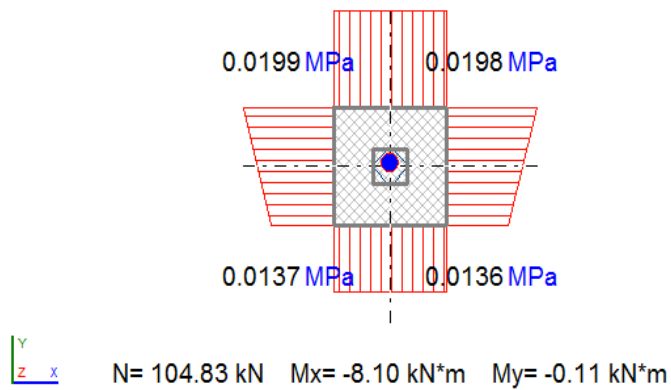


Figura 48. Tensiones pilona 4

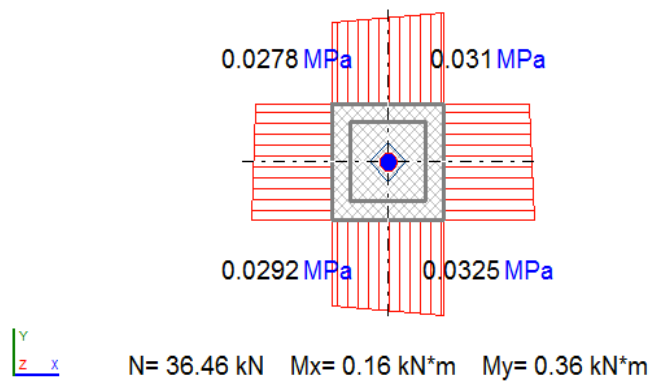


Figura 49. Tensión pila 5

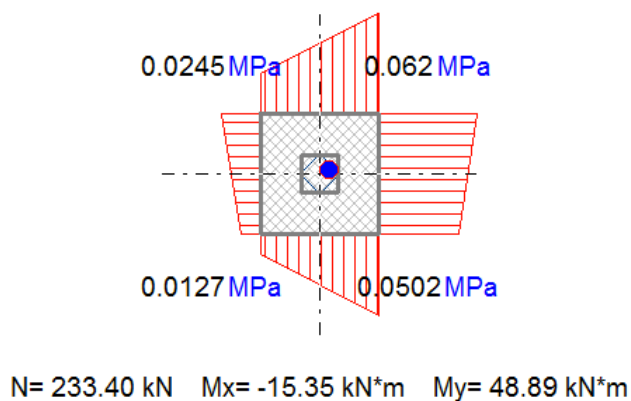


Figura 50. Tensión zapata tirantes

Se muestra asimismo una imagen de la zapata y la armadura en 3D y de su vista en planta. Para más información acerca de la cimentación y la armadura consultar el anexo 9: Notas de cálculo de la cimentación)

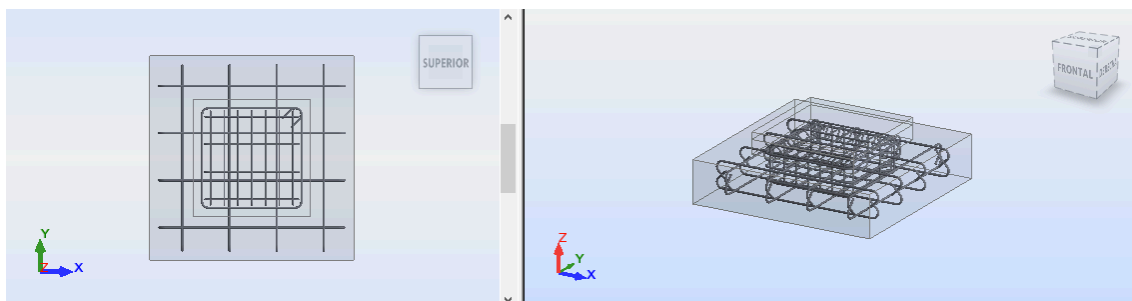


Figura 51. Vistas de la zapata y armadura de las pilonas

10.5 Anclajes

Para la instalación de los anclajes, se ha escogido la pila con mayor carga en los apoyos (caso más desfavorable) que resulta ser la pila motora, y en base a ello, se han diseñado y analizado en esta pila de manera que cumpliesen con la normativa [26]. Una vez se ha verificado que el anclaje es correcto en los 3 apoyos de la pila, se ha aplicado este anclaje al resto de pilas restantes. Consta de una pletina de 150x120 mm. Con un espesor de 5mm. Se han instalado 3 filas y 3 columnas de tornillos de diámetro M20-B y clase 4,6. La norma a seguir para el diseño de los anclajes ha sido la Eurocode 3: EN 1993-1-8:2005/AC:2009 + CEB Design Guide: Design of fastenings in concrete.

En el anexo 10 (Notas de cálculo de los anclajes) aparecen los detalles constructivos y la verificación de los anclajes de acuerdo a la norma mencionada.

En la siguiente imagen se muestra el anclaje utilizado:

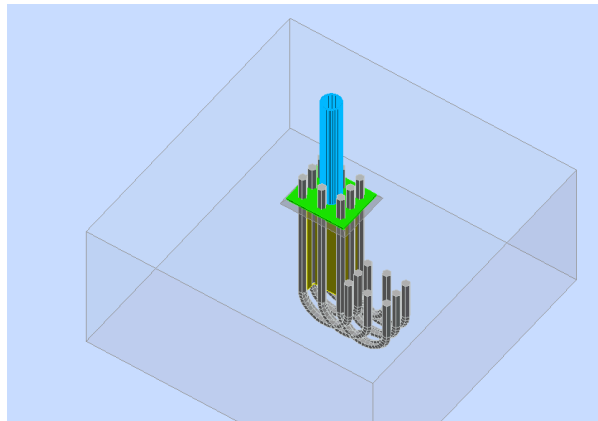


Figura 52. Vista 3D del anclaje

11. Verificación. Dimensionado de cables (tirantes, cable de la estructura y cable del contrapeso)

En esta sección, se comprobará si las secciones seleccionadas en los distintos cables de la estructura son correctas. En el cablesqui podemos distinguir 3 cables con distintas funciones:

- Portante y tractor
- Tirantes internos y externos de la pila
- Cable del contrapeso

En este apartado, se analizarán todos y se verificará si las tensiones a las que están sometidos son adecuadas para su utilización o si por el contrario es necesario realizar un cambio de sección.

Cada uno de estos tipos de cable poseen un coeficiente de seguridad distinto, por lo tanto, para cada uno de ellos se ha fijado el valor según los criterios de Miravete, A y otros (1998) basados en otras instalaciones de transporte por cable ya que para los cablesqui en España todavía no existe una normativa implantada.

Cables tirantes: FS=3-5

La fuerza máxima en los tirantes de todas las pilas es de 43,49 kN y corresponde a la pila motora.

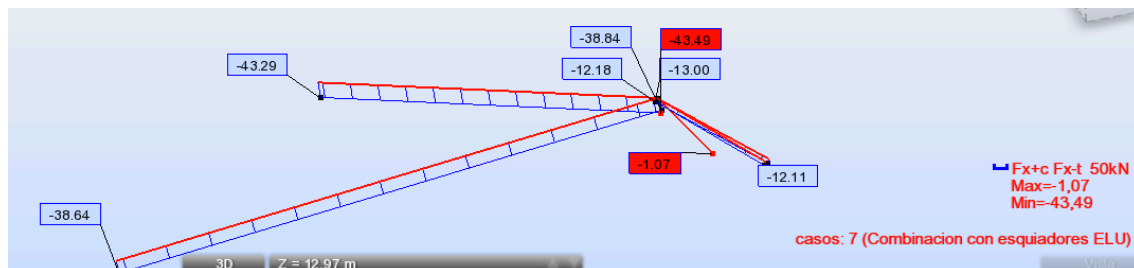


Figura 53. Fuerza máxima y mínima en los tirantes de las pilas

La carga de rotura del cable seleccionado es de 210 kN. El factor de seguridad es de 4,83, por lo tanto, cumple con lo exigido.

Cable tractor: FS=3,5-5

Cable carril: FS=3,5-5

Al ser la tensión máxima del cable 17,53 kN, si aplicamos el coeficiente de seguridad de 3,5, la carga de rotura mínima del cable deberá ser 61,36 kN, por lo tanto, el cable elegido cumple con las exigencias ya que su carga de rotura mínima es de 65,9 kN. En caso de querer aumentar se podría elegir un grado superior (mayor calidad del acero) o elegir un cable distinto lo que obligaría a rehacer todos los cálculos.

Cable que sostiene el contrapeso: FS=8

El contrapeso tiene una masa de 1788,77 kg (17,53kN). Para el cable que sujeta el contrapeso, al ser exigido un factor de seguridad de 8, la carga de rotura mínima debe ser de 140,23 kN. El cable elegido para esta función será el mismo que el que se ha utilizado para el atirantado de las pilonas. Un cable de 16mm de diámetro con una carga de rotura de 210,92 kN. Se trata de un cable 1x19 de acero inoxidable AISI316. Si se desea información más específica acerca del cable, consultar el anexo (“tensiones tirantes”).

12. Conclusión

En este proyecto se ha diseñado la estructura de un cable esquí. En primer lugar, se buscó la geometría óptima atendiendo a los criterios de experiencia de usuario y minimización de tensiones.

Tras la elección de la distribución, se diseñaron el cable, el contrapeso necesario para dar tensión a este, y las pilonas. (en base a la visita realizada al OCP y a documentos sobre el dimensionamiento de celosías) [40]. A lo largo del proyecto, se ha tenido que redimensionar alguna de las barras que estaban sometidas a tensiones muy altas. De acuerdo a esto, también se ha elegido un material cuyo límite elástico era lo suficientemente elevado.

Estas pilonas fueron orientadas de acuerdo a la fuerza resultante que actuaba sobre ellas y, posteriormente, atirantadas tanto internamente (cables que unen el mástil horizontal con el punto superior de la pila) como externamente (cables que contrarrestan las fuerzas aplicadas sobre la pila y permiten aliviar tensiones del empotramiento) buscando siempre la inclinación y apertura que diesen un mejor resultado.

Una vez atirantadas se aplicaron las cargas y combinaciones sobre ellas. Se analizaron los resultados (tensiones de barras, axiles de tirantes, desplazamiento de nudos...) y se aplicaron las medidas necesarias para que cumplieran con la normativa de estructuras de acero. A partir de los datos obtenidos, se verificó que los cables que cumplieran con el factor de seguridad que aparece en la normativa.

Cuando se obtuvieron los resultados deseados, se inició el cálculo de las zapatas de las pilonas y los anclajes, así como la cimentación de los apoyos inferiores de los tirantes.

Para el cálculo y diseño de las zapatas, se hizo uso del EHE-08. De acuerdo a las condiciones necesarias de cimentación y la clase de ambiente en el que se encuentran las zapatas, permite la elección del material necesario para la cimentación.

Tras todo el procedimiento llevado a cabo en este proyecto, se incluye una tabla resumen con las dimensiones finales de todos los elementos calculados (cables, zapatas, anclajes, contrapeso, barras de las pilonas, material...) con las medidas y dimensionamiento de elementos de la estructura, cantidad de hormigón y acero necesario para las zapatas.

Elemento	Longitud Total (m)	Diámetro (mm)	Tipo	Carga mínima de rotura (kN)
Cable portante y tractor	2x1000	10	GP 67 CW	65,9
Cables tirantes	447,5	16	1x19 Acero inoxidable AISI 316	210,92

Elemento	Masa (kg)	Material	Densidad kg/m ³
Contrapeso	17888	Hormigón HA-25	2400

Elemento	SX (cm ²)	SY (cm ²)	SZ (cm ²)	IX (cm ⁴)	IY (cm ⁴)	IZ (cm ⁴)	Material
TRON 21x2.3	1,37	0,69	0,69	1,26	0,63	0,63	S-355
TRON 26x2.3	1,78	0,89	0,89	2,71	1,36	1,36	S-355
TRON 48x2.9*	4,14	2,07	2,07	21,4	10,7	10,7	S-355
TRON 48x4	5,57	2,78	2,78	27,54	13,77	13,77	S-355
TRON 26x3.2*	2,38	1,19	1,19	3,4	1,7	1,7	

Elemento	Material	Cantidad de hormigón (m ³)	Barras corrugadas diámetro 12	Barras corrugadas diámetro 16	Cantidad acero barras armadura (kg)	Material Barras corrugadas
Zapata 1	HA-50	0,563	11	19	67,9	B-500S
Zapata 2	HA-50	0,299	11	15	51,1	B-500S
Zapata 3	HA-50	0,299	11	15	51,1	B-500S
Zapata 4	HA-50	1,93	11	35	165,2	B-500S
Zapata 5	HA-50	0,419	11	15	54,9	B-500S
Zapata tirantes (x10)	HA-50	6,36	0	52	218	B-500S

Elemento	Dim pletina (mm)	Nº pernos	Nº ganchos	Material
Anclaje (x25)	120x150x10	8	8	S-355

Elemento	Tipo	Límite elástico (Mpa)	Carga de rotura (Mpa)
Material barras estructuras	Acero (S-355)	345	470

Tabla 14. Dimensionamiento final de los elementos de la estructura

13. Futura continuación del proyecto

Para la ejecución del proyecto queda pendiente:

En primer lugar, la elección de la localización de la instalación. Se había acordado que fuera una balsa artificial, si así fuera debería estar próxima a zonas cursos de agua o embalses, sino el proyecto sería inviable económicamente por el precio que conlleva el bombeo o transporte de agua.

El volumen de agua necesario aproximado para rellenar el embalse sería de 0,3 hm³. (350mx380mx2m). Aparte de la alimentación continua regular debida a la evaporación.

Si se cambiase de opinión, y se quisiera hacer en una ubicación natural (lagos o embalses), los embalses existentes en el entorno de Zaragoza son los que aparecen en la siguiente lista:

Pantano	Provincia	Capacidad (hm3)	Embalsada (hm3)	Variación
CASPE II	Zaragoza	82	30	-1
EL VAL	Zaragoza	24	12	-1
LA LOTETA	Zaragoza	104	6	0
LA TRANQUERA	Zaragoza	84	11	-3
LAS TORCAS	Zaragoza	7	1	0
MAIDEVERA	Zaragoza	20	6	-1
MEQUINENZA	Zaragoza	1534	807	-54
MONEVA	Zaragoza	8	1	0
SAN BARTOLOME	Zaragoza	6	1	0

Tabla 15. Alternativas propuestas para construcción de la instalación

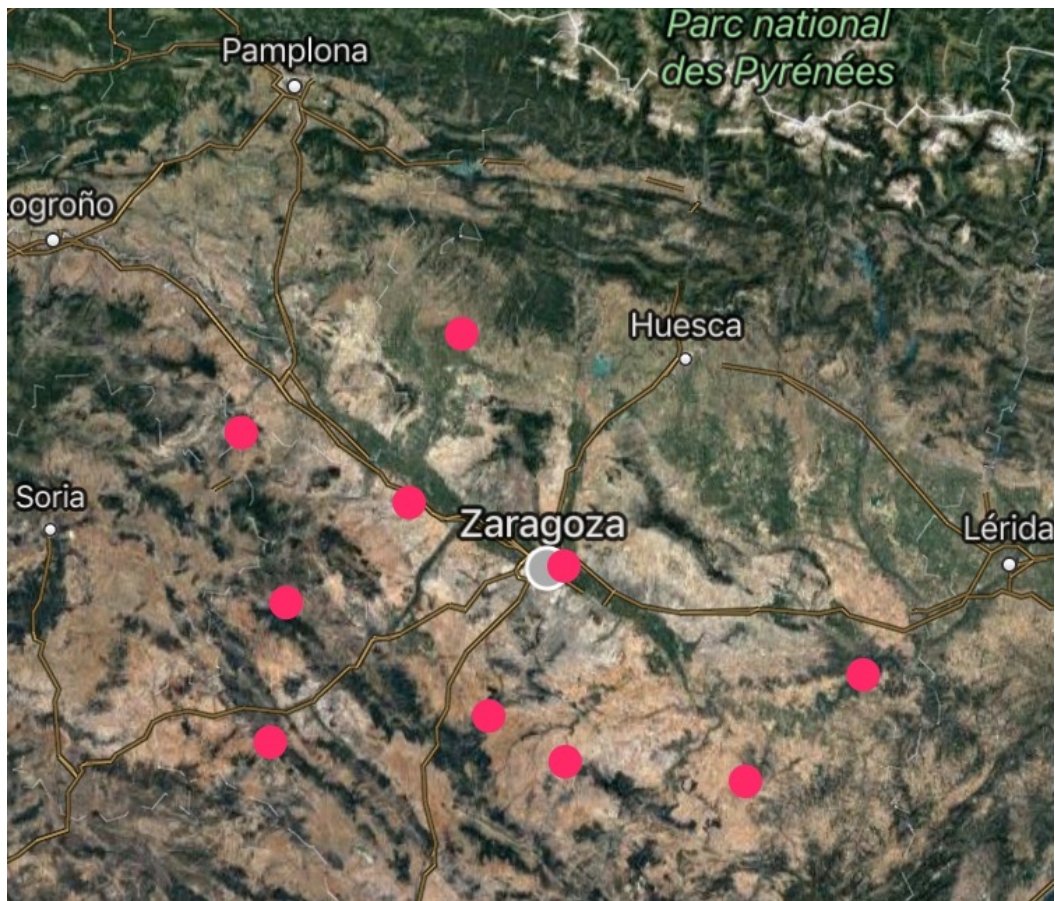


Figura 54. Localización de alternativas propuestas

Otra línea de mejora en la que se podría investigar sería, por ejemplo, la utilización de nuevos materiales cuyas características mecánicas permitan a las pilonas absorber mayores tensiones sin deformarse, de esta manera al tener el cable más tenso, los esquiadores podrían realizar mayores acrobacias. De la misma forma, sería interesante que permitiesen que tanto el peso como el coste de la estructura disminuyesen.

Por otra parte, si se desease llevar a cabo el proyecto se debería estudiar la viabilidad económica y presupuesto del proyecto, teniendo en cuenta los materiales necesarios para su construcción, mediciones, presupuestos parciales y totales.

14. Referencias bibliográficas

- [1] Orro Arcay, A, Novales Ordax, M, Rodríguez Bugarín, Miguel. (2003). *Transporte por cable*. Ed. Tórculo Artes Gráficas, A Coruña.
- [2] Miravete, A, Larrode, E, Castejón, L y Cuartero, J. (1998). *Los transportes en la ingeniería industrial*. Parte B. Grúas. España: Reverte. Coeficientes de seguridad
- [3] Edo Hernandez, Jose A. El cable-ski. *Nuevo sistema para la práctica del esquí náutico*. (1982). Instituto nacional de educación física.
- [4] Mejía Vargas, Andrés Felipe. (2011). *Diseño y construcción de un sistema de transporte de carga por medio de cables para topografía de gran pendiente*. Medellín.
- [5] Dipl.-Ing. Mark Löhr, *ADAMS SIMULATION FOR ROPEWAY TECHNOLOGY*. Institute for Material Handling, Material Flow, Logistics (fml) Univ. Prof. Dr.-Ing. W. A. Günthner Technical University of Munich.
- [6] Goicolea Ruigómez, J. M. (2012). *Cálculo de cables*. Universidad Politécnica de Madrid, Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid.
- [7] Montoya, J, Pinto Vega, Francisco. (2010). *CIMENTACIONES*. Mérida.
- [8] <http://estructuras.eia.edu.co/estructurasI/cables/cables.htm>
- [9] *ResearchGate*. (s.f.). Obtenido de https://www.researchgate.net/profile/Alejandro_Lopez_Llanusa/publication/277709202_Monografia_Metodologia_de_calculo_para_torres_Atirantada/links/5570710808aee1e75879f0.pdf
- [10] https://www.ica.es/contenidos/publicaciones/anales_get.php?id=1536
- [11] Autodesk. Obtenido de <https://knowledge.autodesk.com/support/robot-structural-analysis-products/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2017/ENU/RSAPRO-UsersGuide/files/GUID-DCDD6D6E-D1BA-4535-9A21-AA28C9277CF7-htm.html#mtc-spanish>
- [12] <https://www.rixen-cableways.com/es/el-inversor/productos/ski-acuatico-y-wakeboard-del-inventor-y-de-la-marca-mundial/rixen-master/2-pylon-system>
- [13] <http://www.cablewake-systems.com/en/products-and-services/cable-wake-park/>
- [14] <http://wakestation.com/pentasi-fsc/>

- [15] <http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es/index.php/informesdelaconstruccion/article/view/3832/4334>
- [16] <http://www.udb.edu.sv/udb/archivo/guia/electrica-ingenieria/disenio-de-lineas-de-transmision/2017/i/guia-5.pdf>
- [17] <http://www.altacableski.nl>
- [18] <http://wakestation.com/system/>
- [19] *Upcommons*. (s.f.). Obtenido de <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/2623/34496-2.pdf?sequence=2>
- [20] <https://www.rixen-cableways.com/shop/en/Full-Size-Cables/Transport-cable/>
- [21] <http://ladrillikos.wdfiles.com/local--files/ladrillikos/A.A.%203.1.%20Poleas.pdf>
- [22] <https://eudotec.wordpress.com/2013/02/11/calculos-con-polea-fijas-y-moviles/>
- [23] http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/nayive/mr10_web/TemaI_archivos/clase2.pdf
- [24] Wikipedia. (s.f.), Obtenido de https://es.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9todo_de_los_estados_l%C3%A9sticos
- [25] ftp://ceres.udc.es/ITS_Caminos/Optativas/Hormigon_Armado_PretensadoII/GENERAL/MBT/HAP2_0809_MBT_1.pdf
- [26] <http://academica-e.unavarra.es/bitstream/handle/2454/5910/577855.pdf?sequence=3>
- [27] <http://www.gerardoabajo.com/es/9-manuales-de-uso-y-mantenimiento/7-uso-y-mantenimiento-de-cables-de-acero-normas-generales-de-uso>
- [28] http://www.bezabala.es/descargas/2cables_acero.pdf
- [29] <https://www.fomento.gob.es/NR/rdonlyres/B7AE915D-9A95-4B73-950F-74E6D8FD6BD4/37459/CAPITULOIVborde.pdf>
- [30] <https://www.codigotecnico.org>
- [31] http://rixenus.com/?page_id=89
- [32] https://previa.uclm.es/area/ing_rural/Trans_const/Aceros.PDF

- [33] <http://torrojaingenieria.es/Publicaciones/410-CTE-Acero-Cordoba.pdf>
- [34] <http://prontuarios.info/materiales/acero>
- [35] <http://www.aparejadoresmadrid.es/archivos/ponencias/25/Seguridad%20estructural-SE.pdf>
- [36] <https://prezi.com/yxglx5lrscs1/calculos-tecnicos-metodologia-de-diseno-y-comparacion-de-la/>
- [37] <https://www.cablesestructurales.com/wp-content/uploads/2015/05/Tirantes-de-Cable.pdf>
- [38] <https://www.cablesestructurales.com/wp-content/uploads/2015/01/Catalogo-%20Cables%20inoxidables.pdf>
- [39] https://previa.uclm.es/area/ing_rural/Normativa.htm
- [40] <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/30631/predimensionado%20de%20una%20celos%C3%ADa.pdf>
- [41] <https://www.iit.comillas.edu/pfc/resumenes/51933e1d32df4.pdf>
- [42] <http://www.uhu.es/javier.pajon/apuntes/zapatas.pdf>
- [43] <https://www.rixen-cableways.com/shop/en/Full-Size-Cables/Cables-and-Accessories/Running-cable-left-10-mm.html>
- [44] https://previa.uclm.es/area/ing_rural/Trans_const/CimentacionesCTE.pdf
- [45] <https://www.easycalculation.com/engineering/electrical/cable-length-cable-span.php>
- [46] http://api.iphglobal.com/uploads/MEDIOS_151215_ESP.pdf

