



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUOLA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIERÍA
INDUSTRIAL VALENCIA

Curso Académico:

RESUMEN

Se trata de la estructura de una atracción acuática situada en Aquarama, el parque acuático de Benicàssim (Castellón). La estructura está soportada por 7 pilares que elevan el tobogán hasta alcanzar una caída de 12 metros de altura con dos pendientes distintas y una curva de 90º a izquierdas que las enlaza. El recorrido de la atracción se realizará a través de un tubo cuya primera parte será de pendiente pronunciada, una segunda parte formada por una curva donde el tobogán irá perdiendo pendiente hasta llegar a su última parte, que constará de una parte horizontal para que los usuarios pierdan velocidad antes de caer a la piscina. El acceso de dicha atracción será mediante la subida a la elevación del terreno por escaleras dispuestas por el propio parque acuático.

Las normas utilizadas para la creación de esta atracción serán:

1. UNE EN 13814:2006: Maquinaria y estructuras para parques y ferias de atracciones. Seguridad. (Para la normativa correspondiente a la seguridad de los toboganes)
2. UNE EN 1090: 2011: Ejecución de estructuras de acero y aluminio. (Para la normativa correspondiente a la estructura que soporta el tobogán)
3. EN 287-1: Cualificación de soldadores. Soldeo por fusión. Parte 1: Aceros (Para la conexión entre la estructura metálica y la estructura de fibra de vidrio)
4. Código Técnico de la Edificación y sus documentos básicos (DB-SE, DB-AE, DB-SE A, DB-SE C). (Para la normativa de las placas de anclaje y de las cimentaciones)
5. Eurocódigo 1.4: Acciones en Estructuras. Acciones de Viento. (Ya que los perfiles tubulares no se encuentran en el CTE)
6. EAE Instrucción de Acero Estructural. (Para el cálculo de la estructura metálica)
7. EHE-08 Instrucción de Hormigón Estructural. (Para el cálculo de la cimentación)

Índice de la memoria

Índice de la memoria	2
Índice de Tablas	4
Índice de Figuras	7
Índice de Gráficas	8
1. INTRODUCCIÓN.....	1
Antecedentes.....	1
1.1 Objetivo del proyecto	1
1.2 Justificación del proyecto.....	1
1.3 Motivaciones del proyecto.....	1
Estado del arte	2
1.4 Toboganes. Evolución histórica	2
1.5 Aspectos técnicos importantes en un tobogán acuático	3
1.6 Diseño elegido para el tobogán acuático de estudio.....	4
1.7 Ubicación del proyecto	4
2. LOS MATERIALES: FIBRA DE VIDRIO Y ACERO	5
2.1 Introducción	5
2.2 Los materiales compuestos.....	5
2.3 Materias primas.....	6
2.4 Fibra de vidrio.....	7
2.5 Matriz.....	9
2.6 Acero: Los pilares.....	12
3. CÁLCULO ESTRUCTURAL.....	14
3.1 Acciones	14
3.2 Discretización de la estructura	60
3.3 Aplicación de las cargas en SAP.....	60
3.4 Combinaciones de cargas.....	63
3.5 Comprobaciones.....	64
3.5.1 Estados Límite de Servicio	64
3.5.1.1 Criterio de Apariencia.....	64
3.5.1.2 Criterio de Integridad	66
3.5.2 Estados Límite Últimos.....	69
3.5.2.1 Estado Límite Último de Resistencia para los pilares.....	69
3.5.2.2 Estado Límite Último de Resistencia para el tubo	70

3.5.2.3 Estado Límite Último de Pandeo.....	72
3.5.3 Cimentación	79
3.5.3.1 Estado Límite Último de Vuelco.....	79
3.5.3.2 Estado Límite Último de Deslizamiento	83
3.5.3.3 Estado Límite Último de Hundimiento	85
3.5.4 Placa de Anclaje	86
3.5.4.1 Apoyo de la placa	86
3.5.4.2 Modelo mecánico	87
3.5.4.3 Estado Límite Último de Agotamiento del Apoyo.....	88
3.5.4.4 Estado Límite Último de Agotamiento de la placa a flexión.....	89
3.5.4.5 Estado Límite Último de Agotamiento de los pernos	90
3.5.4.6 Estado Límite Último de Anclaje de los pernos	91
4. CONCLUSIONES.....	93
5. PRESUPUESTO	94
6. BIBLIOGRAFÍA.....	102
7. SOFTWARE UTILIZADO	102
8. PLANOS.....	103

Índice de Tablas

Tabla 1. Tipos de vidrio	8
Tabla 2. Propiedades de vidrios (Fuente: Molines (2015))	9
Tabla 3. Tipos de matrices (Fuente: Molines (2015))	10
Tabla 4. Propiedades de los termoestables (Fuente: Molines (2015))	10
Tabla 5. Propiedades de la fibra de vidrio (Fuente: Molines (2015)).....	11
Tabla 6. Propiedades del acero S75SJR.....	12
Tabla 7. Perfiles tubulares.....	13
Tabla 8. Valores característicos de las Sobrecargas de Uso (Fuente: CTE DB SE-AE)	14
Tabla 9. Categorías del terreno y parámetros del terreno (Fuente: Eurocódigo 1, tabla 4.1, pág.27).....	17
Tabla 10. . Valores del factor de rugosidad para cada tramo de tobogán	19
Tabla 11. Valores de velocidad media del viento sobre cada tramo de tobogán	20
Tabla 12. Valores del factor de exposición $C_e(z)$ para cada tramo de tobogán	23
Tabla 13. Valores de la presión $q_p(z)$ que corresponde a la velocidad de pico para cada tramo del tobogán	24
Tabla 14. Valores de la velocidad de pico del viento $v(z_e)$ para cada tramo de tobogán.....	26
Tabla 15. Valores del número de Reynolds Re para cada tramo de tobogán	27
Tabla 16. Valores típicos de la distribución de presiones en cilindros circulares para diferentes rangos del número de Reynolds (Fuente: Eurocódigo 1, tabla 7.12, pág.77)	28
Tabla 17. Valores de $C_{p,0}$ para los números de Reynolds límite.....	29
Tabla 18. Valores de los parámetros importantes para cada tramo de tobogán.....	30
Tabla 19. Valores de $C_{p,0}$ para los tramos 1-5	31
Tabla 20. Valores de $C_{p,0}$ para los tramos 6-10.....	32
Tabla 21. Valores de $C_{p,0}$ para los tramos 11-15	32
Tabla 22. Valores de $C_{p,0}$ para los tramos 16-20	33
Tabla 23. Valores de $C_{p,0}$ para los tramos 21-26	34
Tabla 24. Cargas de viento sobre la estructura dependiendo del ángulo de incidencia	35
Tabla 25. Cargas de viento sobre la estructura dependiendo del ángulo de incidencia	36
Tabla 26. Cargas de viento sobre la estructura dependiendo del ángulo de incidencia	37
Tabla 27. Cargas de viento sobre la estructura dependiendo del ángulo de incidencia.....	38
Tabla 28. Cargas de viento sobre la estructura dependiendo del ángulo de incidencia	39
Tabla 29. Cargas de viento sobre la estructura dependiendo del ángulo de incidencia	40
Tabla 30. Cargas de viento sobre la estructura dependiendo del ángulo de incidencia	41
Tabla 31. . Cargas de viento sobre la estructura dependiendo del ángulo de incidencia.....	42
Tabla 32. Cargas de viento sobre la estructura dependiendo del ángulo de incidencia	42
Tabla 33. Cargas de viento sobre la estructura dependiendo del ángulo de incidencia	43
Tabla 34. Cargas de viento sobre la estructura dependiendo del ángulo de incidencia	44
Tabla 35. Cargas de viento sobre la estructura dependiendo del ángulo de incidencia	45
Tabla 36. Cargas de viento sobre la estructura dependiendo del ángulo de incidencia	46
Tabla 37. Cargas de viento sobre la estructura dependiendo del ángulo de incidencia	47
Tabla 38. Cargas de viento sobre la estructura dependiendo del ángulo de incidencia	48
Tabla 39. Cargas de viento sobre la estructura dependiendo del ángulo de incidencia	49
Tabla 40. Cargas de viento sobre la estructura dependiendo del ángulo de incidencia	50
Tabla 41. Cargas de viento sobre la estructura dependiendo del ángulo de incidencia	51
Tabla 42. Cargas de viento sobre la estructura dependiendo del ángulo de incidencia	52

Tabla 43. Cargas de viento sobre la estructura dependiendo del ángulo de incidencia	53
Tabla 44. Cargas de viento sobre la estructura dependiendo del ángulo de incidencia	54
Tabla 45. Cargas de viento sobre la estructura dependiendo del ángulo de incidencia	55
Tabla 46. Cargas de viento sobre la estructura dependiendo del ángulo de incidencia	56
Tabla 47. Cargas de viento sobre la estructura dependiendo del ángulo de incidencia	57
Tabla 48. Cargas de viento sobre la estructura dependiendo del ángulo de incidencia	58
Tabla 49. Cargas de viento sobre la estructura dependiendo del ángulo de incidencia	59
Tabla 50. Propiedades de la fibra de vidrio (Fuente: Molines (2015)).....	60
Tabla 51. Desplazamientos relativos de cada punto.	65
Tabla 52. Comprobación del Estado Límite de Servicio de Apariencia	66
Tabla 53. Tabla de desplazamientos relativos ELS Integridad.....	67
Tabla 54. Comprobación Estado Límite de Servicio de Integridad	68
Tabla 55. Clase de la sección de acero (Fuente: CTE, Figura 5.1, pag.307)	69
Tabla 56. Comprobación ELU Resistencia pilares no verticales.....	70
Tabla 57. Comprobación ELU Resistencia pilares no verticales.....	70
Tabla 58. Valores característicos para la sección de acero dependiendo de su clase (Fuente: CTE, tabla 6.12, pag.339).....	73
Tabla 59. Curva del coeficiente de imperfección elástica según el tipo de perfil utilizado (Fuente: CTE, tabla 6.12, pag.325).....	74
Tabla 60. Coeficiente de imperfección elástica según la curva de pandeo (Fuente: Apuntes de Tecnología de la Construcción).....	75
Tabla 61. Coeficientes de interacción según clase para el cálculo del ELU de Pandeo (Fuente: CTE, tabla 6.13, pag.340).....	76
Tabla 62. Coeficientes del momento equivalente (Fuente: CTE, tabla 6.14, pag.341)	77
Tabla 63. Comprobación esbeltez reducida pilares no verticales perfil O323,9	77
Tabla 64. Comprobación esbeltez reducida pilar vertical	78
Tabla 65. Comprobación esbeltez reducida pilares no verticales O355,6	78
Tabla 66. Comprobación coeficiente de pandeo pilar vertical.....	78
Tabla 67. Comprobación coeficiente de pandeo pilares no verticales	78
Tabla 68. Comprobación ELU pandeo	78
Tabla 69. Coeficientes de seguridad parciales (Fuente: CTE DB-C.....	80
Tabla 70. Zapata pilares singulares.....	81
Tabla 71. Zapata pilares dobles	81
Tabla 72. Zapata pilar vertical	81
Tabla 73. Zapata base tobogán.....	81
Tabla 74. Reacciones en zapata pilares singulares	81
Tabla 75. Reacciones en zapata pilares dobles.....	81
Tabla 76. Reacciones en zapata pilar vertical.....	82
Tabla 77. Reacciones en zapata base del tobogán	82
Tabla 78. Esfuerzos en la zapata pilares singulares	82
Tabla 79. Esfuerzos en la zapata pilares dobles	82
Tabla 80. Esfuerzos en la zapata pilar vertical.....	82
Tabla 81. Esfuerzos en la zapata base del tobogán	82
Tabla 82. Comprobación del ELU de Vuelco plano ZX zapata pilares singulares.....	82
Tabla 83. Comprobación del ELU de Vuelco plano ZY zapata pilares singulares.....	82
Tabla 84. Comprobación del ELU de Vuelco plano ZX zapata pilares dobles.....	83
Tabla 85. Comprobación del ELU de Vuelco plano ZY zapata pilares dobles	83

Tabla 86. Comprobación del ELU de Vuelco plano ZX zapata pilar vertical	83
Tabla 87. Comprobación del ELU de Vuelco plano ZY zapata pilar vertical	83
Tabla 88. Comprobación del ELU de Vuelco plano ZX base tobogán.....	83
Tabla 89. Comprobación del ELU de Vuelco plano ZY base tobogán.....	83
Tabla 90. Ángulo de rozamiento interno en función del terreno (Fuente CTE-DB-SE-C Tabla 4.1 página 28).....	84
Tabla 91. Comprobación del ELU de Deslizamiento zapatas pilares singulares	84
Tabla 92. Comprobación del ELU de Deslizamiento zapatas pilares dobles	84
Tabla 93. Comprobación del ELU de Deslizamiento zapata pilar vertical	84
Tabla 94. Comprobación del ELU de Deslizamiento zapata base tobogán	84
Tabla 95. Comprobación del ELU de Hundimiento zapata pilares singulares	85
Tabla 96. Comprobación del ELU de Hundimiento zapata pilares dobles	86
Tabla 97. Comprobación del ELU de Hundimiento zapata pilar vertical.....	86
Tabla 98. Comprobación del ELU de Hundimiento zapata base tobogán	86
Tabla 99. Comprobación del modelo de trabajo de la placa de anclaje	88
Tabla 100. Determinación del parámetro m (Fuente: EHE, tabla 66.5.1.2.a)	91
Tabla 101. Determinación del factor de reducción β (Fuente: EHE, tabla 69.5.1.2)	92

Índice de Figuras

Figura 1. Tobogán en una pirámide (Fuente: maravillas-del-mundo.com consultada a 02/09/20)	2
Figura 2. Toboganes de Aquarama (Fuente: elmundo.es consultada a 02/09/20)	3
Figura 3. Tobogán tubular (Fuente: elmundo.es consultada a 05/04/20)	4
Figura 4. Esquema de fabricación de un material compuesto (Fuente: Molines (2015))	6
Figura 5. Esquema de fabricación y usos de la fibra de vidrio (Fuente: Molines (2015))	7
Figura 6. Segmentos para la introducción de cargas	15
Figura 7. Mapa de isotacas de la velocidad básica del viento (Fuente: Anexo nacional del Eurocódigo 1, pág 161)	16
Figura 8. Primer Modelo del tobogán realizado por el método de elementos finitos	60
Figura 9. Ejes para la dirección del viento	61
Figura 10. Propiedades de la fibra de vidrio	62
Figura 11. Segmento del tobogán con cargas aplicadas sobre la parte superior del cilindro	63
Figura 12. Modelo del tobogán con los puntos críticos para los ELS seleccionados	65
Figura 13. Tensiones en el tubo con 3 pilares verticales	70
Figura 14. Concentración de tensiones en la zona superior del tobogán con 3 pilares verticales	70
Figuras 15. Imágenes del tobogán rectificado con nuevos apoyos	71
Figura 16. Tensiones en el tubo con el tobogán rectificado con los nuevos apoyos	71
Figura 17. Tensiones en el codo del tubo con el tobogán rectificado	72

Índice de Gráficas

Gráfica 1. Tensión/deformación de materiales a tracción (Fuente: Trabajo de investigación de J.M. Molines)	7
Gráfica 2. Coeficientes de exposición Cez para C0z=1 (Fuente: Eurocódigo 1, figura 4.2, pág 30)	22
Gráfica 3. Distribución de la presión en cilindros circulares para diferentes rangos del número de Reynolds (Fuente: Eurocódigo 1, figura 7.27, pág.76)	28

1. INTRODUCCIÓN

Antecedentes

1.1 Objetivo del proyecto

El objeto del presente proyecto es el diseño y del cálculo estructural de una atracción acuática, más concretamente un tobogán autosoportado de 20 metros de altura, situada dentro del parque acuático Aquarama (Benicàssim). La geometría de nuestra atracción será cilíndrica. Hemos decidido adoptar este tipo de geometría debido a las propiedades estructurales que ofrece.

Para realizar el cálculo hemos tenido en cuenta la normativa vigente para este tipo de estructuras. El proyecto incluye también el presupuesto y los planos necesarios para la total definición del mismo.

1.2 Justificación del proyecto

La ejecución del Trabajo Final de Grado necesita parte de los conocimientos adquiridos a lo largo de nuestra carrera (Ingeniería en Tecnologías Industriales).

En especial, la realización de este proyecto nos ha hecho trabajar con los conocimientos aprendidos en diferentes asignaturas relacionadas con el ámbito de la construcción, entre las cuales están Elasticidad y Resistencia de los Materiales, Estructuras y Tecnología de la Construcción. También hemos podido hacer la elaboración del presupuesto gracias a la asignatura de Proyectos y la confección de los planos la hemos podido realizar gracias a asignaturas como Expresión Gráfica e Ingeniería Gráfica.

Gracias a la implementación del software SAP2000 pudimos implementar la geometría de la estructura del tobogán y calcular su resistencia.

Finalmente, el proyecto se completa con el presupuesto y los planos necesarios para la total definición de nuestro tobogán que se han sido facilitados mediante el programa AutoCAD de Autodesk.

1.3 Motivaciones del proyecto

Debido a la mejora tecnológica a lo largo de las últimas décadas en la mayoría de los trabajos que se conciben hoy en día, los trabajadores empezaron a disponer de más tiempo de ocio. Con el aumento del ocio nacieron los parques acuáticos y desde entonces no se ha dejado de innovar ni de invertir en sus mejoras, sobre todo en sus principales atracciones, los toboganes.

Los parques acuáticos constan de diferentes tipos de atracciones. La mayoría suelen ser toboganes de distintas formas y tamaños, desde toboganes con muchas curvas y poca pendiente para los más pequeños hasta distintos toboganes con mucha pendiente y pocas curvas en su trayecto para los más atrevidos.

A pesar de la gran cantidad de toboganes que hay, cada uno ofrece una experiencia distinta, es por ello por lo que la innovación dentro de este sector nunca ha parado. Es por esta razón por la que los parques acuáticos van invirtiendo en añadir más atracciones a su colección.

Además, cada vez que se añaden más atracciones a un mismo parque, se está consiguiendo que las filas que se forman para subir a una de estas atracciones se subdividan entre las ya existentes y la nueva, con lo que se consigue que bajen los tiempos de espera.

Estado del arte

1.4 Toboganes. Evolución histórica

Los toboganes son, hoy en día, un elemento indispensable en todo parque infantil, pero hay que saber, que no siempre se habían utilizado para el ocio. De hecho, en sus orígenes empezaron siendo una herramienta para el trabajo.

Nos podemos remontar al imperio egipcio o al romano para observar cómo usaban estas dos civilizaciones las rampas que nosotros hoy en día conocemos como toboganes. Los primeros toboganes, contruidos con piedra o madera, servían para que los obreros se pudieran desplazar con facilidad desde las partes más altas de las diferentes construcciones que realizaban a las más bajas.

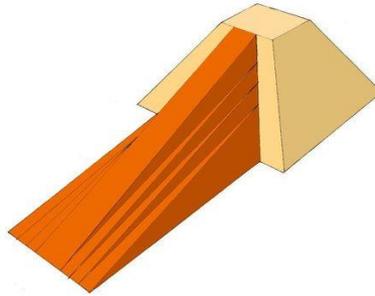


Figura 1. Tobogán en una pirámide (Fuente: maravillas-del-mundo.com consultada a 02/09/20)

Además, estas civilizaciones también utilizaban los toboganes para desplazar agua de un lugar a otro como podemos observar con los acueductos, inmensos toboganes que desplazan el agua desde un punto más alto fuera de la población hasta la propia población situada en una zona de menor altitud. Estos toboganes serían la base que se usaría para posteriormente crear toboganes acuáticos para el ocio.

Pasó mucho tiempo desde la implementación de aquellos toboganes antiguos hasta los toboganes de ocio que conocemos hoy en día. Sería Herbert Selner, un inventor estadounidense, el que viera la oportunidad de negocio en el deslizarse por una rampa con agua. Este inventor colocó una construcción de madera para desembocar en un lago, esto fue el inicio del tobogán como forma de diversión.

La evolución de esta atracción ha sido muy grande y actualmente se construyen toboganes de diferentes materiales como el metal o el plástico. Su forma también ha variado, pues podemos encontrar toboganes abiertos o cubiertos, rectos o en curva y de una o varias pendientes.



Figura 2. Toboganes de Aquarama (Fuente: elmundo.es consultada a 02/09/20)

1.5 Aspectos técnicos importantes en un tobogán acuático

Para diseñar un tobogán acuático hay una serie de aspectos que hay que considerar en el cálculo de una instalación de estas características.

- **Huella del tobogán:** La huella del tobogán es la superficie de terreno que necesita el mismo para su instalación. Dependiendo de cada tobogán, se necesitará mayor o menor cantidad de terreno.
- **Terreno donde se sitúa:** El terreno donde situaremos el tobogán variará dependiendo de la zona. Se intentarán aprovechar las colinas de fácil acceso para que sea necesario una menor estructura a la hora de situar las partes más altas del tobogán y su acceso.
- **Carga máxima soportable:** Los toboganes acuáticos se construyen con la función de que la gente disfrute lanzándose por ellos, pero hay que tener en cuenta el peso máximo de una persona que estos toboganes pueden aceptar para evitar posibles accidentes.
- **Limitaciones relacionadas con el entorno:** También se deberán tener en cuenta las condiciones de viento, lluvia, etc. durante las cuales no debe utilizarse dicho tobogán.

1.6 Diseño elegido para el tobogán acuático de estudio

En este proyecto vamos a implementar un tobogán con estructura tubular con tres pendientes distintas en su recorrido.



Figura 3. Tobogán tubular (Fuente: elmundo.es consultada a 05/04/20)

Hemos decidido escoger esta geometría por no ser excesivamente complicada, pero a su vez es original respecto a lo que un trabajo final de grado de estas características suele ofrecer. Podemos observar que, en la mayoría de los parques acuáticos, por no decir todos, hay algún tobogán en forma de tubo, pero esto no significa que todos los toboganes en forma de tubo sean iguales. Podemos tener tubos altos con varias pendientes, pequeños con solo una, rectos, con curvas... y todas las combinaciones que podamos imaginar. Es por esta razón por la que escoger esta geometría no es para nada algo trivial.

1.7 Ubicación del proyecto

Ya que nuestro proyecto se va a ejecutar para la implementación de un nuevo tobogán en Aquarama (Benicàssim), utilizaremos una de las estructuras que ya presenta el parque para que sirva de parte de enganche con la parte superior de nuestro tobogán y su caída al agua la situaremos en una piscina ya existente.

2. LOS MATERIALES: FIBRA DE VIDRIO Y ACERO

2.1 Introducción

En el siglo presente hemos adquirido el conocimiento del uso de los materiales compuestos, abriendo así un abanico enorme a la hora de confeccionar formas para las distintas estructuras gracias a sus características técnicas y el aumento de su uso en las últimas décadas.

La confección de un material formado por la combinación de varios materiales que por separado tendrían propiedades peores que su mezcla, es lo que entendemos como material compuesto.

Hoy en día, los países más industrializados investigan y estudian la evolución de los materiales para mejorarlos a diario. España ha sido uno de los países que se ha unido al grupo ya que el uso del material ha crecido durante los últimos años.

Podemos asegurar que en el pasado ya existían los materiales compuestos. De hecho, la fibra de vidrio ya fue referenciada en la Academia de Ciencias de París en 1713 durante el transcurso de una conferencia impartida por René Reanmur. Más tarde, en el 1893 Edward Libbey produjo una serie de artículos a base de fibra de vidrio que presentó en la Exposición Universal de Chicago. Estos artículos pasaron totalmente desapercibidos por la mala calidad de la fibra.

Sin embargo, no fue hasta 1931 cuando se consiguió producir las primeras fibras aptas para el tejido de estas, alcanzando una óptima resistencia mecánica en 1938. A partir de todas las investigaciones realizadas hasta la fecha, posteriormente surgieron las primeras matrices orgánicas.

A pesar de que los depósitos a presión fabricados a partir del enrollamiento prolongado de fibras de vidrio fue la primera aplicación estructural de dichas fibras, puntualizaremos que los materiales compuestos han tenido muchísimas aplicaciones como en bicicletas, remos, raquetas de tenis y pádel y carrocerías de automóviles entre otros. Básicamente, su utilidad se reduce a cualquier ámbito donde la ligereza, resistencia y flexibilidad tengan un papel fundamental.

En la actualidad, la fibra de vidrio se utiliza sobre todo en la aeronáutica y en la construcción de automóviles. No obstante, su uso en el sector de las estructuras otorga una visión alentadora en el futuro.

En los últimos años, se ha investigado mucho acerca de los polímeros reforzados con fibra de vidrio, esto ha producido su auge, y por tanto su utilización frecuente en la industria. En este trabajo nos centraremos en la utilización de la fibra de vidrio como materia prima para fabricar. Gracias a sus características nombradas anteriormente, la fibra de vidrio nos permitirá realizar nuestro tobogán acuático situado en Aquarama (Benicàssim) de manera que su peso se reduzca en gran manera sin desprestigiar la resistencia y estabilidad de este.

2.2 Los materiales compuestos

La producción de materiales compuestos se basa en la búsqueda de materiales con mejores propiedades de los que se pueden encontrar de forma natural. Así, se pueden construir diferentes estructuras que no se podrían tener al alcance con otros materiales distintos ya que no podrían soportar las mismas cargas o serían excesivamente pesados.

Con el estudio de los materiales, se ha llegado a la conclusión de que todos los materiales compuestos deben tener un elemento fibroso resistente y rígido y una matriz que le da su forma geométrica final que normalmente es la encargada de transmitir los esfuerzos entre las distintas fibras que conforman el material compuesto.

Dentro de los materiales compuestos podemos ver diferentes clases dependiendo de las matrices utilizadas para la confección de estos:

- Materiales compuestos de matriz orgánica: Formados de fibras de boro, aramida, carbono, vidrio etc. Con matrices termoestables y termoplásticas.
- Materiales compuestos de matriz cerámica: Compuestos de fibras como el carbono, cerámicas y metálicas y con matrices cerámicas como puede ser el carburo de silicio.
- Materiales compuestos de matriz metálica: Formados con fibras cerámicas, tungsteno, boro, carbono... y con matrices de titanio, cobre, plata, aluminio etc.

Dentro de todos los grupos de materiales compuestos, los más usados son los conformados con matriz orgánica, además de los que teóricamente tienen un futuro más próspero.

2.3 Materias primas

Como se ha dicho anteriormente, dependiendo de los componentes, se pueden constituir diferentes materiales compuestos.

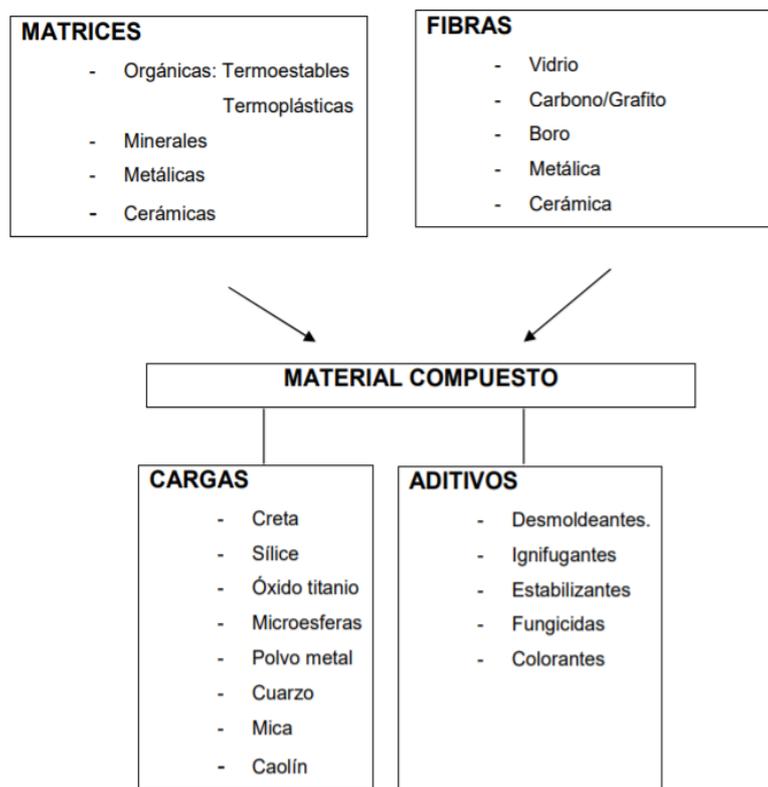
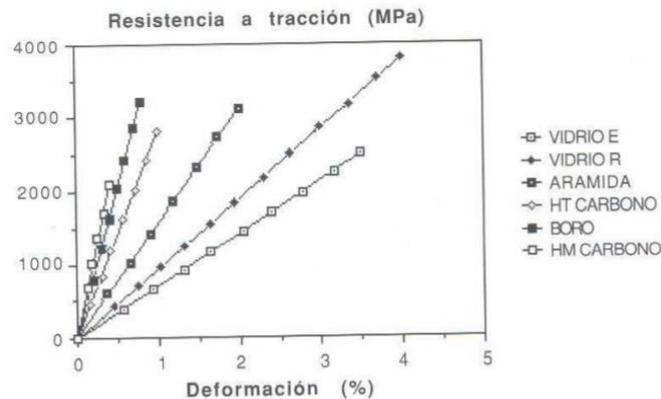


Figura 4. Esquema de fabricación de un material compuesto (Fuente: Molines (2015))

Como se muestra en la figura inferior, podemos asegurar que la resistencia a tracción de las fibras de los materiales compuestos es excelente.



Gráfica 1. Tensión/deformación de materiales a tracción (Fuente: Molines (2015))

Es por este motivo por el que vamos a optar por la fibra de vidrio para la confección de nuestro proyecto en el cual analizaremos la viabilidad de este material para su fabricación.

2.4 Fibra de vidrio

La fibra de vidrio es uno de los materiales más usados dentro de la industria de los materiales compuestos. Suele estar compuesto por numerosos filamentos cerámicos basados en el dióxido de silicio obtenidos mediante fusión de la mezcla de sus materias primas y posteriormente sometidas a estiramiento.

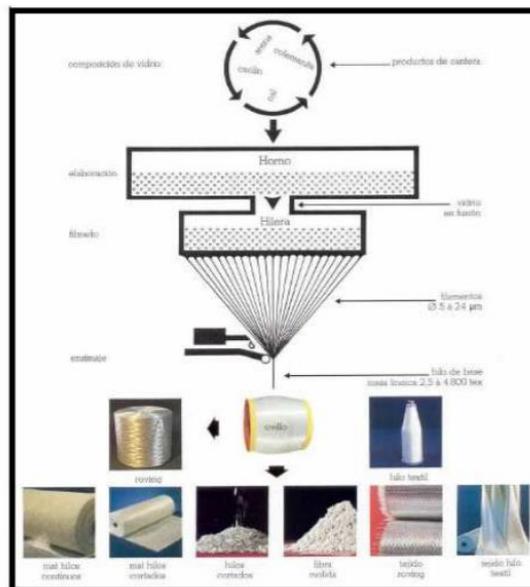


Figura 5. Esquema de fabricación y usos de la fibra de vidrio (Fuente: Molines (2015))

Cualquier vidrio sometido a altas temperaturas se puede convertir en fibra de vidrio. Sin embargo, es importante resaltar el hecho de que dependiendo de la composición del vidrio las fibras adquirirán unas propiedades determinadas.

Gran parte de los vidrios con base de silicio utilizados en la industria constan de al menos un silicato alcalino como podría ser el silicato de sodio y un silicato alcalinotérreo como pudiera ser el silicato de calcio. Esto,

sucede porque normalmente el óxido de sodio se utiliza como fundente ya que disminuye la temperatura de fusión y la viscosidad de la sílice. Por otro lado, se debe introducir el silicato de calcio en la variable para compensar el defecto de resistencia química que produce el silicato de sodio.

Reafirmando lo comentado en párrafos anteriores, podemos decir que existen muchos tipos de fibra de vidrio con distintas utilidades.

Por ejemplo, el Vidrio E es el utilizado en prácticamente todas las aplicaciones industriales relacionadas con temas eléctricos ya que además de tener unas propiedades eléctricas excelentes, es muy resistente a los ácidos y tiene un coste muy económico.

Por otro lado, las fibras R o S se utilizan en sectores como el de la aviación o la armamentística ya que tienen alta resistencia a la fatiga, temperatura y humedad además de que, como podemos observar en la tabla anterior de tensiones/deformaciones tienen un módulo elástico superior al resto de materiales y menor deformación que la del vidrio E.

También, aunque en menor medida se usan otros vidrios como puedan ser el C, ya que tiene alta resistencia a la corrosión y sus propiedades mecánicas son aceptables.

A parte de los nombrados en los tres párrafos anteriores, existen multitud de diferentes fibras como la AR, X, D, ERC... con sus distintas propiedades y características.

Clase	Composición	Características
E	Vidrio alumino-borosilicato	Elevada conductividad eléctrica
E-CR	Vidrio alumino-cálcico	Elevada conductividad eléctrica y alta resistencia a la corrosión por ácidos
C	Vidrio sódico-cálcico y óxido de boro	Alta resistencia a productos químicos y corrosión por ácidos
D	Vidrio borosilicato	Elevada constante dieléctrica
R	Vidrio aluminosilicato	Alta resistencia mecánica
S	Vidrio aluminosilicato y magnesio	Alta resistente a la tracción
AR	Composición variada	Alta resistencia a álcalis

Tabla 1. Tipos de vidrio

	E- glass	S-glass	C-glass	AR-glass
Resistencia a tracción, GPa	3,45	4,3	3,03	2,5
Módulo de Elasticidad, Gpa	72,4	86,9	69,0	70,0
Deformación de ruptura %	4,8	5,0	4,8	3,6
Coefficiente de Poisson	0,2	0,22	---	---
Densidad (g/cm³)	2,54	2,49	2,49	2,78
CTE longitudinal (10⁻⁶/°C)	10,0	10,0	4,5	---
Constante dieléctrica	6,3	5,1	---	---

Tabla 2. Propiedades de vidrios (Fuente: Molines (2015))

2.5 Matriz

La matriz de un material compuesto tiene varias funciones. La más importante de ellas es el hecho de transferir y distribuir los esfuerzos entre unas fibras y otras. Además, impide que las grietas ocasionadas en las fibras debido a exigencias mecánicas o reacciones químicas con el exterior se propaguen a otras fibras ocasionando un fallo desastroso gracias a su plasticidad. Hay que entender que para que se rompa el material totalmente deberán romperse varias fibras adyacentes de forma que el material no pueda soportar las cargas aplicadas sobre él.

La unión entre la matriz y las fibras es muy importante, por lo que ha de ser sólida para evitar al máximo el desprendimiento de fibras, ya que la resistencia a tracción del compuesto depende básicamente de la eficacia de la unión. Es por ello que una unión óptima será vital para la buena distribución de las cargas sobre las fibras.

Podemos distinguir claramente entre tres grupos dentro de las matrices.

Termoplásticos		
Polipropileno (PPS)	Poliamida (PA)	Polisulfuro fenileno
	Policarbonato (PC)	Polisulfonas (PSU)
	Poliésteres saturados (PET- PBT)	Polieteretercetona (PEEK)
	Poliacetales (POM)	Polímeros fluorados
Termoendurecibles estables		
Fenoplastos (PF)	Poliésteres insaturados (UP)	Poliamidas (PI)
	Poliepóxidos (EP)	Poliesterilpirioinas (PSP)
Elásticos		
	Poliuretanos (PU)	Siliconas (SI)

Tabla 3. Tipos de matrices (Fuente: Molines (2015))

Entre ellos hay varias diferencias:

Los termoplásticos, los más utilizados, son macromoléculas unidas libremente sin entrelazarse con pequeñas fuerzas que permiten que el material se funda al aportar calor pudiendo moldearlo para que mantenga su forma una vez enfriado.

Los termoestables son macromoléculas entrelazadas formando una red de malla cerrada que ocasiona grandes fuerzas de unión. Si se calientan se rompen antes de plastificar.

Mientras, los elastómeros son plásticos con macromoléculas que se ordenan en forma de red de malla con pocos enlaces. Esta disposición da a estos plásticos una gran elasticidad de forma que recuperan su forma y dimensiones una vez se deja de aplicar fuerza sobre ellos.

Centrándonos en nuestro trabajo, dentro del grupo de los termoestables se encuentra la matriz que utilizaremos como nexo entre las fibras de vidrio que formarán el material compuesto designado para la creación de nuestro tobogán acuático.

Dentro del grupo de termoestables, hay diferentes materiales cuyas propiedades se muestran en la siguiente tabla:

	Poliéster	Epoxi	Viniléster
Resistencia a tracción, Mpa	20-100	55-130	70-80
Módulo de Elasticidad, Gpa	1-6	2,5-4,1	3,0-3,5
Deformación de ruptura %	2,1-4,1	1-9	3,5-5,5
Coefficiente de Poisson	---	0,2-0,33	---
Densidad (g/cm ³)	1,0-1,45	1,1-1,3	1,1-1,3
CTE longitudinal (10 ⁻⁶ /°C)	55-100	45-90	21-73
Constante dieléctrica	5-12	1-5	5,4-10,3

Tabla 4. Propiedades de los termoestables (Fuente: Molines (2015))

Viendo las diferentes características de los grupos más comunes dentro de los termoestables observamos que las resinas viniléster tienen mejores propiedades que las demás. Aunque sea más cara que las demás por su reciente descubrimiento, es la que se usará en el proyecto. Por tanto, las características del material que se ha utilizado en el tobogán son las siguientes:

Valores mínimos PRF a base de tejido a 90°	
Límite de rotura (daN/cm ²) Dirección 1 y 2	4.500
Límite elástico (daN/cm ²) Dirección 1 y 2	2.500
Módulo de elasticidad (daN/cm ²) Dirección 1 y 2	200.000

Tabla 5. Propiedades de la fibra de vidrio (Fuente: Molines (2015))

2.6 Acero: Los pilares

Además del tubo del tobogán, nuestro proyecto consta de siete pilares para soportar la estructura del tubo cumpliendo la seguridad estructural del conjunto. El material que hemos utilizado para la construcción de estos es el acero, en concreto el acero estructural S275JR y sus características las mostramos en la siguiente tabla.

PROPIEDADES DEL ACERO S275JR	
Módulo de Elasticidad (E)	210000 N/mm ²
Módulo de Rigidez (G)	81000 N/mm ²
Coefficiente de Poisson (γ)	0,3
Coefficiente de Dilatación Térmica (α)	1,2*10 ⁻⁵ (°C) ⁻¹
Densidad (ρ)	7850 kg/m ³
Límite Elástico (f_y)	275 N/mm ²

Tabla 6. Propiedades del acero S275JR

Una vez tenemos las propiedades del acero empleado, tenemos que hablar del perfil utilizado en los pilares, para ello hemos utilizado el siguiente perfil tubular marcado en la tabla.

DIÁMETRO EXTERIOR ESPECÍFICO	ESPESOR ESPECÍFICO	MASA LINEAL	ÁREA DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL	MOMENTO DE INERCIA	RADIO DE GIRO	MÓDULO ELÁSTICO	MÓDULO PLÁSTICO	MOMENTO DE INERCIA DETORSIÓN	MÓDULO DETORSIÓN	SUPERFICIE LATERAL POR UNIDAD DE LARGO	LARGO NOMINAL POR TONELADA	ÁREA SUPERFICIE EXTERIOR POR METRO
D	T	M	A	I	i	W_e	W_p	I_t	C_t	A_s	m	A_{sv}
mm	mm	kg/m	cm ²	cm ⁴	cm	cm ³	cm ³	cm ⁴	cm ²	m ² /m		m ²
273	5	33,0	42,1	3.781	9,48	277	359	7.562	554	0,858	30,3	204
273	6	39,5	50,3	4.487	9,44	329	428	8.974	657	0,858	25,3	170
273	6,3	41,4	52,8	4.696	9,43	344	448	9.392	688	0,858	24,1	162
273	7	45,9	58,5	5.177	9,41	379	495	10.355	759	0,858	21,8	147
273	8	52,3	66,6	5.852	9,37	429	562	11.703	857	0,858	19,1	129
273	10	64,9	82,6	7.154	9,31	524	692	14.308	1.048	0,858	15,4	104
273	12,5	80,3	102	8.697	9,22	637	849	17.395	1.274	0,858	12,5	83,8
273,1	5	33,1	42,1	3.785	9,48	277	359	7.570	554	0,858	30,2	204
273,1	6	39,5	50,3	4.492	9,45	329	428	8.984	658	0,858	25,3	170
273,1	6,3	41,5	52,8	4.701	9,44	344	449	9.402	689	0,858	24,1	162
273,1	7	45,9	58,5	5.183	9,41	380	496	10.366	759	0,858	21,8	147
273,1	8	52,3	66,6	5.858	9,38	429	562	11.717	858	0,858	19,1	129
273,1	10	64,9	82,7	7.162	9,31	525	693	14.324	1.049	0,858	15,4	104
273,1	12,5	80,3	102	8.707	9,22	638	850	17.415	1.275	0,858	12,4	83,8
323,9	4	31,6	40,2	5.143	11,3	318	409	10.286	635	1,02	31,7	253
323,9	5	39,3	50,1	6.369	11,3	393	509	12.739	787	1,02	25,4	203
323,9	6	47,0	59,9	7.572	11,2	468	606	15.145	935	1,02	21,3	170
323,9	6,3	49,3	62,9	7.929	11,2	490	636	15.858	979	1,02	20,3	162
323,9	7	54,7	69,7	8.753	11,2	540	703	17.505	1.081	1,02	18,3	146
323,9	8	62,3	79,4	9.910	11,2	612	799	19.820	1.224	1,02	16,0	128
323,9	10	77,4	98,6	12.158	11,1	751	986	24.317	1.501	1,02	12,9	103
323,9	12,5	96,0	122	14.847	11,0	917	1.213	29.693	1.833	1,02	10,4	83,2
323,9	14,2	108	138	16.599	11,0	1.025	1.363	33.198	2.050	1,02	9,22	73,7
323,9	16	121	155	18.390	10,9	1.136	1.518	36.780	2.271	1,02	8,23	65,7
339,7	5	41,3	52,6	7.364	11,8	434	560	14.727	867	1,07	24,2	203
339,7	6	49,4	62,9	8.758	11,8	516	668	17.517	1.031	1,07	20,3	170
339,7	6,3	51,8	66,0	9.172	11,8	540	700	18.344	1.080	1,07	19,3	162
339,7	7	57,4	73,2	10.128	11,8	596	775	20.255	1.193	1,07	17,4	146
339,7	8	65,4	83,4	11.472	11,7	675	880	22.944	1.351	1,07	15,3	128
339,7	10	81,3	104	14.087	11,7	829	1.087	28.174	1.659	1,07	12,3	103
355,6	5	43,2	55,1	8.464	12,4	476	615	16.927	952	1,12	23,1	203
355,6	6	51,7	65,9	10.071	12,4	566	733	20.141	1.133	1,12	19,3	170
355,6	6,3	54,3	69,1	10.547	12,4	593	769	21.094	1.186	1,12	18,4	162
355,6	7	60,2	76,7	11.650	12,3	655	851	23.299	1.310	1,12	16,6	146
355,6	8	68,6	87,4	13.201	12,3	742	967	26.403	1.485	1,12	14,6	128
355,6	10	85,2	109	16.223	12,2	912	1.195	32.447	1.825	1,12	11,7	103
355,6	12,5	106	135	19.852	12,1	1.117	1.472	39.704	2.233	1,12	9,45	82,9
355,6	14,2	120	152	22.227	12,1	1.250	1.656	44.455	2.500	1,12	8,36	73,4
355,6	16	134	171	24.663	12,0	1.387	1.847	49.326	2.774	1,12	7,46	65,4

Tabla 7. Perfiles tubulares

Este perfil ha sido utilizado ya que necesitábamos un módulo elástico muy alto para cumplir las condiciones de pandeo y los perfiles en I y en H no cumplen estas características.

3. CÁLCULO ESTRUCTURAL

3.1 Acciones

Cargas permanentes (G):

Siguiendo las instrucciones del CTE DB SE-AE el equipamiento fijo y los elementos de la propia estructura conforman el Peso Propio. En el caso de nuestro estudio, se considerará como Peso Propio la estructura del mismo.

Las cargas producidas por el peso propio, las aplica directamente el software SAP2000 con el que calcularemos las deformaciones y tensiones que sufrirá nuestra estructura.

Los pesos propios establecidos para la implementación del tobogán serán 7850 kg/m^3 en el caso de los pilares de acero y 1100 kg/m^3 en el caso del tubo de fibra de vidrio (datos obtenidos de MatWeb Material Property Data).

Sobrecarga de uso (Q):

Como se encuentra en el CTE DB SE-AE, la sobrecarga de uso es el peso de todo lo que puede gravitar sobre el edificio por razón de su uso. Por ello, se suele representar el efecto de esta como una carga distribuida aplicada uniformemente.

En el caso de nuestro tobogán, se ha considerado que hay dos cargas diferentes que actuarán como sobrecarga de uso. Por un lado, tenemos la consideración de cualquier elemento relacionado para el mantenimiento del tobogán, de manera que, se ha insertado una carga uniforme en la parte superior de todo el tobogán.

Categoría de uso		Subcategorías de uso		Carga uniforme [kN/m ²]	Carga concentrada [kN]
A	Zonas residenciales	A1	Viviendas y zonas de habitaciones en, hospitales y hoteles	2	2
		A2	Trasteros	3	2
B	Zonas administrativas			2	2
C	Zonas de acceso al público (con la excepción de las superficies pertenecientes a las categorías A, B, y D)	C1	Zonas con mesas y sillas	3	4
		C2	Zonas con asientos fijos	4	4
		C3	Zonas sin obstáculos que impidan el libre movimiento de las personas como vestíbulos de edificios públicos, administrativos, hoteles; salas de exposición en museos; etc.	5	4
		C4	Zonas destinadas a gimnasio u actividades físicas	5	7
		C5	Zonas de aglomeración (salas de conciertos, estadios, etc)	5	4
D	Zonas comerciales	D1	Locales comerciales	5	4
		D2	Supermercados, hipermercados o grandes superficies	5	7
E	Zonas de tráfico y de aparcamiento para vehículos ligeros (peso total < 30 kN)			2	20 ⁽¹⁾
F	Cubiertas transitables accesibles sólo privadamente ⁽²⁾			1	2
G	Cubiertas accesibles únicamente para conservación ⁽³⁾	G1	Cubiertas con inclinación inferior a 20°	1 ⁽⁴⁾	2
		G2	Cubiertas con inclinación superior a 40°	0	2

Tabla 8. Valores característicos de las Sobrecargas de Uso (Fuente: CTE DB SE-AE)

Como a la hora del mantenimiento de la estructura, esta solo será accesible para el personal correspondiente, se adoptará un valor de 1 kN/m^2 .

Por otro lado, tenemos en la norma UNE-EN 13814 relacionada con los parques de atracciones, una sobrecarga de uso relacionada con el agua y los usuarios de los toboganes que se aplicará en la parte baja del cilindro del tobogán y será igual a 2 kN/m^2 .

Carga de Viento:

Los cálculos relacionados con las cargas ocasionadas por el viento se han realizado teniendo en cuenta las indicaciones del "Eurocódigo 1: Acciones en estructuras", concretamente la "Parte 1-4: Acciones generales".

La carga que ejerce el viento sobre este tipo de estructuras es muy significativa y su cálculo por consiguiente vital para el diseño y funcionamiento de las mismas.

A partir de la velocidad básica del viento podemos calcular los valores característicos de las cargas del viento aplicadas sobre la estructura gracias a las indicaciones del Eurocódigo 1. Estas indicaciones constan de un conjunto simplificado de fuerzas equivalentes a los efectos extremos del viento turbulento.

En este apartado, vamos a observar cómo se ha realizado el cálculo de las cargas del viento sobre nuestra estructura en cuestión. El cálculo consta de la realización de este teniendo en cuenta el fundamento teórico y su posterior aplicación en nuestro tobogán.

Ya que todos los cálculos realizados para la carga del viento vienen de la aplicación del Eurocódigo 1, la única variación entre las diferentes partes del tobogán dependerá de la altura. Por lo tanto, hemos dividido el tobogán en 26 tramos de $0'5 \text{ m}$ de altura cada uno para realizar el cálculo de las acciones generadas sobre el tobogán.

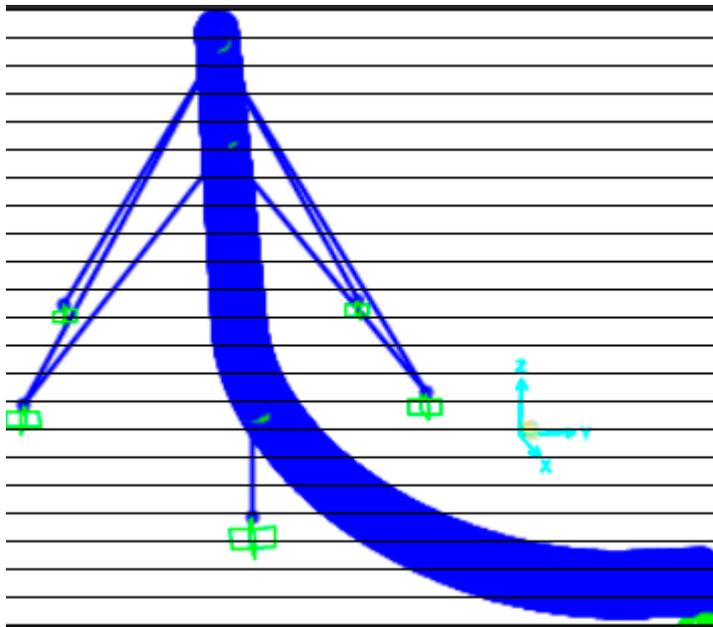


Figura 6. Segmentos para la introducción de cargas

Para empezar con el cálculo de las acciones necesitamos calcular la Velocidad Media del viento (V_m), esto lo podemos realizar basándonos en el punto 4.3 y el punto 4.3.1 del Eurocódigo 1. Con lo que nos queda:

$$V_m = C_r(z) \cdot C_0(z) \cdot V_b \quad (3.1)$$

donde

V_b es la velocidad básica del viento

$C_r(z)$ es el factor de rugosidad

$C_0(z)$ es el coeficiente topográfico

$$V_b = C_{dir} \cdot C_{season} \cdot V_{b,0} \quad (3.2)$$

donde

$V_{b,0}$ es la velocidad básica fundamental del viento

C_{dir} es el factor direccional

C_{season} es el factor estacional

$V_{b,0} = 26\text{m/s}$, ya que el tobogán está situado en Benicàssim y según la Figura AN.1 del Anexo Nacional del Eurocódigo 1 pertenece a la zona A.

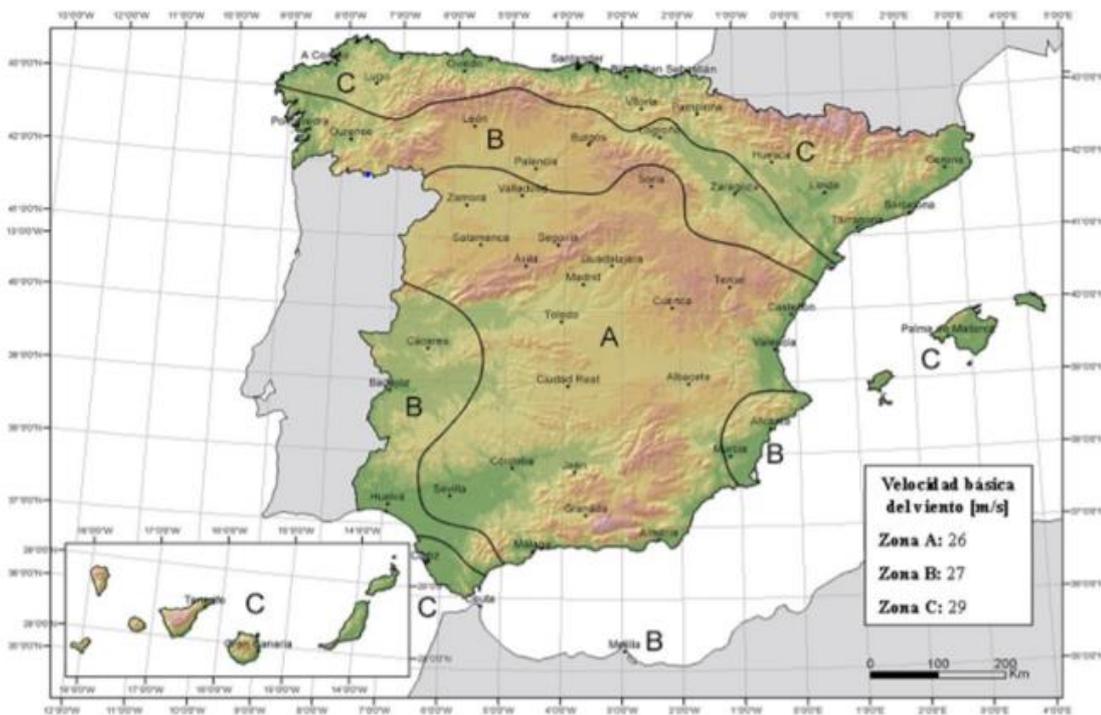


Figura 7. Mapa de isotacas de la velocidad básica del viento (Fuente: Anexo nacional del Eurocódigo 1, pág 161)

$C_{dir} = 1$, este valor viene recomendado por el Eurocódigo 1 en el punto 4.2 en la nota 2(pag.25).

$C_{season}=1$, valor recomendado por el Eurocódigo 1 en el punto 4.2 en la nota 3 (pag.26).

Por lo que la velocidad básica del viento nos resulta:

$$V_b = 1 \cdot 1 \cdot 26 = 26 \text{ m/s} \quad (3.3)$$

Con la velocidad básica del viento ya calculada, nos queda saber el valor de los coeficientes restantes ($C_r(z)$ y $C_0(z)$) para así poder obtener la velocidad media en cada segmento.

$C_0(z)=1$, se recomienda en el punto 4.3.1; nota 1 del Eurocódigo 1.

Este apartado nombra que si se tiene en cuenta la orografía en el cálculo de la velocidad básica del viento se establece $C_0(z)=1$. Como hemos visto en el cálculo de la velocidad básica fundamental del viento, en nuestro procedimiento sí que la teníamos en cuenta y por tanto podemos estimar para el coeficiente topográfico un valor de 1.

En cambio, para el factor de velocidad no hemos podido recoger como valor 1, hemos tenido que calcular este valor según las recomendaciones del Eurocódigo 1, el cual se basa en perfiles logarítmicos de velocidades y se calcula de la siguiente manera:

$$C_r(z) = k_r \cdot \ln(z/z_0) \quad \text{para } z_{\min} \leq z \leq z_{\max} \quad (3.4)$$

$$C_r(z) = C_r(z_{\min}) \quad \text{para } z \leq z_{\min} \quad (3.5)$$

donde

z_0 es la longitud de rugosidad

k_r es el factor del terreno que se calcula:

$$k_r = 0,19 \cdot (z_0/z_{0,II})^{0,07} \quad (3.6)$$

donde

z_{\max} Se toma igual a 200 metros

z_{\min} Es la altura mínima que queda determinada en la tabla 4.1 del Eurocódigo 1 en función de la categoría del terreno y los parámetros de este.

Categoría de terreno		z_0 m	z_{\min} m
0	Mar abierto o zona costera expuesta al mar abierto	0,003	1
I	Lagos o áreas planas y horizontales con vegetación despreciable y sin obstáculos	0,01	1
II	Áreas con vegetación baja, como hierba, y obstáculos aislados (árboles, edificaciones) con separaciones de al menos 20 veces la altura de los obstáculos	0,05	2
III	Áreas con una cobertura de vegetación uniforme o edificaciones o con obstáculos aislados con una separación máxima de 20 veces la altura de los obstáculos (villas, terreno suburbano, bosques permanentes)	0,3	5
IV	Áreas en las que al menos un 15% de la superficie está cubierta por edificios cuya altura media supera los 15 m	1,0	10

NOTA Las categorías de terrenos se ilustran en el capítulo A.1.

Tabla 9. Categorías del terreno y parámetros del terreno (Fuente: Eurocódigo 1, tabla 4.1, pág.27)

Nuestro proyecto se sitúa en una zona que ocupa la Categoría II, por lo que los valores resultantes son:

$z_0 = 0,05\text{m}$

$z_{\min} = 2\text{m}$

$z_{0,II} = 0,05\text{m}$, valor recomendado por el Eurocódigo 1 en el punto 4.3.2 (pág 27).

Por lo tanto, sustituyendo en la ecuación quedaría:

$$k_r = 0,19 (0,05/0,05)^{0,07} = 0,19 \quad (3.7)$$

Y, por ello, en cada segmento el factor de rugosidad resulta:

Tramos	z(m)	$C_r(z)$
1	0,5	0,7008871
2	1	0,7008871
3	1,5	0,7008871
4	2	0,7008871
5	2,5	0,74328437
6	3	0,77792547
7	3,5	0,8072141
8	4	0,83258506
9	4,5	0,85496384
10	5	0,87498234
11	5,5	0,89309127
12	6	0,90962343
13	6,5	0,92483155
14	7	0,93891206
15	7,5	0,95202071
16	8	0,96428302
17	8,5	0,9758017
18	9	0,9866618
19	9,5	0,99693457
20	10	1,0066803
21	10,5	1,01595043
22	11	1,02478923
23	11,5	1,03323507
24	12	1,0413214
25	12,5	1,04907757
26	13	1,05652951

Tabla 10. . Valores del factor de rugosidad para cada tramo de tobogán

Con los coeficientes anteriores definidos, ya se puede calcular la velocidad media para cada tramo, con lo que esta quedaría:

Tramos	$V_m(z)$
1	18,2230645
2	18,2230645
3	18,2230645
4	18,2230645
5	19,3253936
6	20,2260621
7	20,9875665
8	21,6472116
9	22,2290598
10	22,7495407
11	23,220373
12	23,6502092
13	24,0456202
14	24,4117136
15	24,7525384
16	25,0713586
17	25,3708443
18	25,6532068
19	25,9202989
20	26,1736878
21	26,4147112
22	26,6445201
23	26,8641118
24	27,0743563
25	27,2760169
26	27,4697673

Tabla 11. Valores de velocidad media del viento sobre cada tramo de tobogán

A continuación, una vez calculada la velocidad media del viento, continuaremos con las indicaciones establecidas en el Eurocódigo 1 punto 4.5 (pág 30) para calcular el parámetro de la presión correspondiente a la velocidad de pico $q_p(z)$:

$$q_p(z) = q_b \cdot C_e(z) \quad (3.8)$$

siendo

$C_e(z)$ el factor de exposición

q_b la presión correspondiente a la velocidad media del viento, calculándose de la siguiente forma:

$$q_b = 1/2 \cdot \rho \cdot v_b^2 \quad (3.9)$$

donde

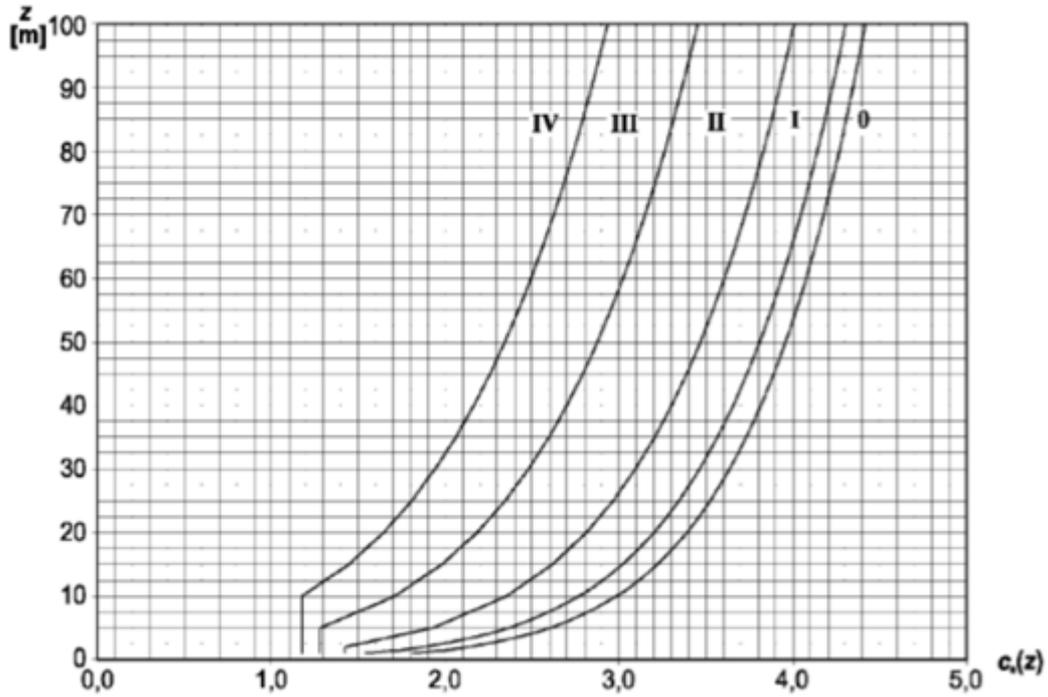
ρ es la densidad del aire. Toma el valor de $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$ que viene recomendado en el Anexo Nacional del Eurocódigo 1.

Como ya tenemos todas las variables con valores determinados, podemos calcular el valor correspondiente a la presión producida por el viento a su velocidad media de referencia, dando como resultado:

$$q_b = 1/2 \cdot 1,25 \cdot 26^2 = 422,5 \text{ kg/m} \cdot \text{s}^2 \quad (3.10)$$

A continuación, después de obtener el valor de la presión correspondiente a la velocidad media de referencia del viento, necesitamos determinar el factor de exposición para realizar el cálculo de $q_p(z)$ que depende de la altura respecto del suelo del tramo que se estudia.

En el Eurocódigo 1, aparece la figura 4.2 (pág 30), la cual relaciona este parámetro con la categoría del terreno y la altura del objeto estudiado sobre el mismo. Esta tabla solamente puede utilizarse si $C_0(z)=1$ que es el valor que tenemos en nuestro caso. Por tanto, podemos encontrar los valores de $C_e(z)$ en la gráfica:



Gráfica 2. Coeficientes de exposición C_{ez} para $C_{0z}=1$ (Fuente: Eurocódigo 1, figura 4.2, pág 30)

Obtenemos $C_e(z)$ para cada segmento:

Tramos	$C_e(z)$
1	1,2
2	1,2
3	1,2
4	1,2
5	1,55
6	1,75
7	1,9
8	2
9	2,1
10	2,15
11	2,18
12	2,21
13	2,23
14	2,25
15	2,27
16	2,29
17	2,31
18	2,33
19	2,35
20	2,37
21	2,38
22	2,39
23	2,4
24	2,41
25	2,42
26	2,43

Tabla 12. Valores del factor de exposición $C_e(z)$ para cada tramo de tobogán

Y, por tanto, podemos calcular ya la expresión para el cálculo de q_p , relacionando el coeficiente de exposición y la presión correspondiente a la velocidad media de referencia del viento:

Tramos	$q_p(z)$
1	507
2	507
3	507
4	507
5	654,875
6	739,375
7	802,75
8	845
9	887,25
10	908,375
11	921,05
12	933,725
13	942,175
14	950,625
15	959,075
16	967,525
17	975,975
18	984,425
19	992,875
20	1001,325
21	1005,55
22	1009,775
23	1014
24	1018,225
25	1022,45
26	1026,675

Tabla 13. Valores de la presión $q_p(z)$ que corresponde a la velocidad de pico para cada tramo del tobogán

Sabiendo ya la presión correspondiente a la velocidad de pico, empezamos el cálculo de la presión del viento sobre nuestro tobogán. Para ello el Eurocódigo 1 nos presta una ecuación en el punto 5.2 (pág 31) que nos permite el cálculo de esta:

$$w_e = q_p(z_e) \cdot C_{pe} \quad (3.11)$$

siendo

z_e la altura de referencia para la presión externa, es decir, la altura máxima sobre el terreno de la sección considerada.

C_{pe} el coeficiente de presión debido a la presión exterior

$q_p(z_e)$ la presión debida a la velocidad de pico del viento (ya conocida)

Como podemos observar, el Eurocódigo 1 diferencia entre distintos tipos de estructuras. Nosotros, podemos aplicar el punto 7.1 ya que nuestro estudio se basa en un tobogán con geometría cilíndrica. En este punto se recoge la información que nos indica que la presión de las secciones depende del número de Reynolds, Re que viene determinado con la siguiente expresión:

$$Re = b \cdot v(z_e) / \nu \quad (3.12)$$

siendo

b el diámetro

ν la viscosidad cinemática del aire cuyo valor se establece en el Eurocódigo como $15 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

$v(z_e)$ la velocidad de pico del viento que se calcula:

$$v(z_e) = \sqrt{\frac{2 \cdot q_p(z_e)}{\rho}} \quad (3.13)$$

Debemos remarcar que en nuestra estructura $z_e=z$, por tanto, los valores de $q_p(z_e)=q_p(z)$ y por consiguiente los valores de la velocidad de pico para cada tramo son:

Tramos	$v(z_e)$
1	28,481573
2	28,481573
3	28,481573
4	28,481573
5	32,369739
6	34,394767
7	35,8385268
8	36,7695526
9	37,6775795
10	38,1234836
11	38,38854
12	38,6517787
13	38,8262798
14	39
15	39,1729499
16	39,3451395
17	39,5165788
18	39,6872776
19	39,8572453
20	40,0264912
21	40,1108464
22	40,1950246
23	40,2790268
24	40,3628542
25	40,4465079
26	40,5299889

Tabla 14. Valores de la velocidad de pico del viento $v(z_e)$ para cada tramo de tobogán

Ahora, con $v(z_e)$ ya conocida, podemos proceder al cálculo del número de Reynolds para cada segmento, el cual quedaría:

Tramos	Re
1	1898771,53
2	1898771,53
3	1898771,53
4	1898771,53
5	2157982,6
6	2292984,47
7	2389235,12
8	2451303,51
9	2511838,64
10	2541565,57
11	2559236
12	2576785,25
13	2588418,65
14	2600000
15	2611529,99
16	2623009,3
17	2634438,59
18	2645818,5
19	2657149,68
20	2668432,75
21	2674056,43
22	2679668,3
23	2685268,45
24	2690856,95
25	2696433,86
26	2701999,26

Tabla 15. Valores del número de Reynolds Re para cada tramo de tobogán

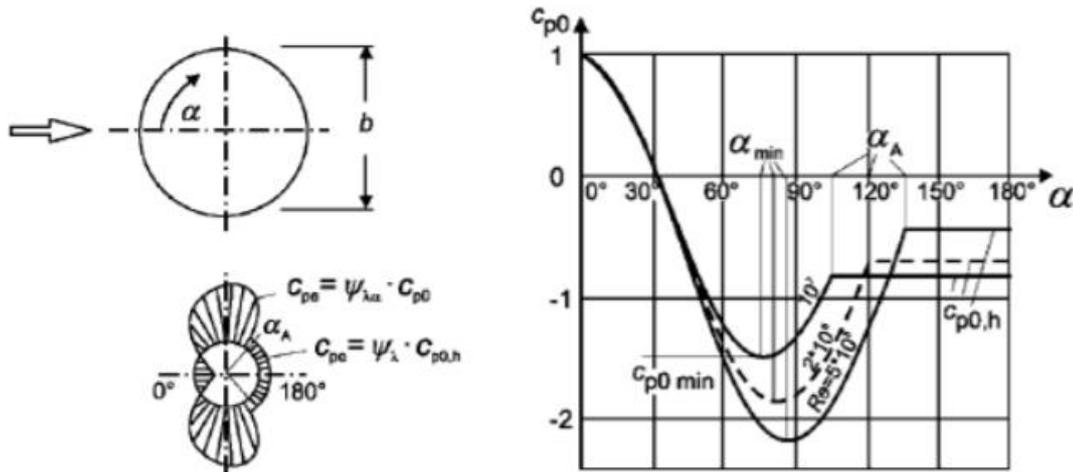
A continuación, y siguiendo las indicaciones del Eurocódigo 1 debemos calcular el coeficiente de presión externa usando:

$$C_{pe} = C_{p,0} \cdot \psi_{\lambda\alpha} \tag{3.14}$$

donde

$\psi_{\lambda\alpha}$ es el factor del efecto de cola

$C_{p,0}$ es un valor dado en la figura 7.27 del Eurocódigo 1:



Gráfica 3. Distribución de la presión en cilindros circulares para diferentes rangos del número de Reynolds (Fuente: Eurocódigo 1, figura 7.27, pág.76)

Podemos interpolar linealmente para determinar el número de Reynolds. En la siguiente tabla, ofrecida por el Eurocódigo 1, se ofrecen los valores típicos para tres rangos del número de Reynolds.

Re	α_{min}	$C_{p0,min}$	α_A	$C_{p0,h}$
$5 \cdot 10^5$	85	-2,2	135	-0,4
$2 \cdot 10^6$	80	-1,9	120	-0,7
10^7	75	-1,5	105	-0,8

donde

- α_{min} es la posición de la presión mínima, en [°]
- $C_{p0,min}$ es el valor del coeficiente de presión mínimo
- α_A es la posición del punto en el que se separa el flujo, en [°]
- $C_{p0,h}$ es el coeficiente de presión base

Tabla 16. Valores típicos de la distribución de presiones en cilindros circulares para diferentes rangos del número de Reynolds (Fuente: Eurocódigo 1, tabla 7.12, pág.77)

Tras interpolar con los valores anteriores, podemos ir a la gráfica superior para obtener los valores de $C_{p,0}$ para cada tramo en función del ángulo de incidencia α . Nuestros valores para el número de Reynolds se moverán entre 10^7 y $2 \cdot 10^6$.

A la hora de aplicar las fuerzas en el tobogán, se harán tramos de un rango de 10° para así poder discretizar los valores y calcularlos sin alejarse de la realidad. Con lo que para estos valores el coeficiente $C_{p,0}$ quedaría para cada 10° de la siguiente manera:

$C_{p,0}$	$2 \cdot 10^6$	10^7
0°	1	1
10°	0,75	0,75
20°	0,4	0,4
30°	0	0
40°	-0,4	-0,4
50°	-0,8	-0,8
60°	-1,45	-1,25
70°	-1,7	-1,4
80°	-1,9	-1,4
90°	-1,8	-1,35
100°	-1,6	-0,95
110°	-1,35	-0,8
120°	-0,7	-0,8
130°	-0,7	-0,8
140°	-0,7	-0,8
150°	-0,7	-0,8
160°	-0,7	-0,8
170°	-0,7	-0,8
180°	-0,7	-0,8

Tabla 17. Valores de $C_{p,0}$ para los números de Reynolds límite

Con los valores límite máximos y mínimos de $C_{p,0}$ anteriores, mediante la interpolación lineal calcularemos el valor de $C_{p,0}$ en cada tramo para cada ángulo. Para ello, primero mostraremos los datos de los parámetros significativos de cada tramo.

Tramos	Re	α_{\min}	$C_{p,0\min}$	α_A	$C_{p,0,h}$
1	1898771,53	79,93125	-1,9055	120,189803	-0,69873464
2	1898771,53	79,93125	-1,9055	120,189803	-0,69873464
3	1898771,53	79,93125	-1,9055	120,189803	-0,69873464
4	1898771,53	79,93125	-1,9055	120,189803	-0,69873464
5	2157982,6	80,03125	-1,8975	119,703783	-0,70197478
6	2292984,47	80,075	-1,894	119,450654	-0,70366231
7	2389235,12	80,140625	-1,88875	119,270184	-0,70486544
8	2451303,51	80,203125	-1,88375	119,153806	-0,70564129
9	2511838,64	80,226875	-1,88185	119,040303	-0,70639798
10	2541565,57	80,243125	-1,88055	118,984565	-0,70676957
11	2559236	80,2625	-1,879	118,951433	-0,70699045
12	2576785,25	80,28125	-1,8775	118,918528	-0,70720982
13	2588418,65	80,30375	-1,8757	118,896715	-0,70735523
14	2600000	80,32	-1,8744	118,875	-0,7075
15	2611529,99	80,34	-1,8728	118,853381	-0,70764412
16	2623009,3	80,356875	-1,87145	118,831858	-0,70778762
17	2634438,59	80,3675	-1,8706	118,810428	-0,70793048
18	2645818,5	80,375	-1,87	118,78909	-0,70807273
19	2657149,68	80,385	-1,8692	118,767844	-0,70821437
20	2668432,75	80,393125	-1,86855	118,746689	-0,70835541
21	2674056,43	80,404375	-1,86855	118,736144	-0,70842571
22	2679668,3	80,428125	-1,86575	118,725622	-0,70849585
23	2685268,45	80,435	-1,8652	118,715122	-0,70856586
24	2690856,95	80,445625	-1,86435	118,704643	-0,70863571
25	2696433,86	80,46125	-1,8631	118,694187	-0,70870542
26	2701999,26	80,479375	-1,86165	118,683751	-0,70877499

Tabla 18. Valores de los parámetros importantes para cada tramo de tobogán

Con lo que los $C_{p,0}$ resultarían:

Angulo	Tramo1	Tramo2	Tramo3	Tramo4	Tramo5
0	1	1	1	1	1
10	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
20	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
30	0	0	0	0	0
40	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4
50	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8
60	-1,46	-1,46	-1,46	-1,46	-1,4495
70	-1,72	-1,72	-1,72	-1,72	-1,6995
80	-1,9055	-1,9055	-1,9055	-1,9055	-1,8975
90	-1,61	-1,61	-1,61	-1,61	-1,6
100	-1,355	-1,355	-1,355	-1,355	-1,3495
110	-0,7	-0,7	-0,71	-0,71	-0,71
120	-0,69873464	-0,69873464	-0,69873464	-0,69873464	-0,70197478
130	-0,69873464	-0,69873464	-0,69873464	-0,69873464	-0,70197478
140	-0,69873464	-0,69873464	-0,69873464	-0,69873464	-0,70197478
150	-0,69873464	-0,69873464	-0,69873464	-0,69873464	-0,70197478
160	-0,69873464	-0,69873464	-0,69873464	-0,69873464	-0,70197478
170	-0,69873464	-0,69873464	-0,69873464	-0,69873464	-0,70197478
180	-0,69873464	-0,69873464	-0,69873464	-0,69873464	-0,70197478

Tabla 19. Valores de $C_{p,0}$ para los tramos 1-5

Angulo	Tramo6	Tramo7	Tramo8	Tramo9	Tramo10
0	1	1	1	1	1
10	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
20	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
30	0	0	0	0	0
40	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4
50	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8
60	-1,449	-1,4485	-1,448	-1,4475	-1,447
70	-1,699	-1,6985	-1,698	-1,6975	-1,697
80	-1,894	-1,88875	-1,88375	-1,88185	-1,88055
90	-1,599	-1,598	-1,597	-1,596	-1,595
100	-1,349	-1,3485	-1,348	-1,3475	-1,347
110	-0,71	-0,71	-0,71	-0,71	-0,71
120	-0,70366231	-0,70486544	-0,70564129	-0,70639798	-0,70676957
130	-0,70366231	-0,70486544	-0,70564129	-0,70639798	-0,70676957
140	-0,70366231	-0,70486544	-0,70564129	-0,70639798	-0,70676957
150	-0,70366231	-0,70486544	-0,70564129	-0,70639798	-0,70676957
160	-0,70366231	-0,70486544	-0,70564129	-0,70639798	-0,70676957
170	-0,70366231	-0,70486544	-0,70564129	-0,70639798	-0,70676957
180	-0,70366231	-0,70486544	-0,70564129	-0,70639798	-0,70676957

Tabla 20. Valores de $C_{p,0}$ para los tramos 6-10

Angulo	Tramo11	Tramo12	Tramo13	Tramo14	Tramo15
0	1	1	1	1	1
10	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
20	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
30	0	0	0	0	0
40	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4
50	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8
60	-1,4465	-1,446	-1,4455	-1,445	-1,4445
70	-1,6965	-1,696	-1,6955	-1,695	-1,6945
80	-1,879	-1,8775	-1,8757	-1,8744	-1,8728
90	-1,594	-1,593	-1,592	-1,591	-1,59
100	-1,3465	-1,346	-1,3455	-1,345	-1,3445
110	-0,71	-0,71	-0,71	-0,71	-0,71
120	-0,70699045	-0,70720982	-0,70735523	-0,7075	-0,70764412
130	-0,70699045	-0,70720982	-0,70735523	-0,7075	-0,70764412
140	-0,70699045	-0,70720982	-0,70735523	-0,7075	-0,70764412
150	-0,70699045	-0,70720982	-0,70735523	-0,7075	-0,70764412
160	-0,70699045	-0,70720982	-0,70735523	-0,7075	-0,70764412
170	-0,70699045	-0,70720982	-0,70735523	-0,7075	-0,70764412
180	-0,70699045	-0,70720982	-0,70735523	-0,7075	-0,70764412

Tabla 21. Valores de $C_{p,0}$ para los tramos 11-15

Angulo	Tramo16	Tramo17	Tramo18	Tramo19	Tramo20
0	1	1	1	1	1
10	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
20	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
30	0	0	0	0	0
40	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4
50	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8
60	-1,444	-1,4435	-1,443	-1,4425	-1,442
70	-1,694	-1,6935	-1,693	-1,6925	-1,692
80	-1,87145	-1,8706	-1,87	-1,8692	-1,86855
90	-1,589	-1,588	-1,587	-1,586	-1,585
100	-1,344	-1,3435	-1,343	-1,3425	-1,342
110	-0,71	-0,71	-0,71	-0,71	-0,71
120	-0,70778762	-0,70793048	-0,70807273	-0,70821437	-0,70835541
130	-0,70778762	-0,70793048	-0,70807273	-0,70821437	-0,70835541
140	-0,70778762	-0,70793048	-0,70807273	-0,70821437	-0,70835541
150	-0,70778762	-0,70793048	-0,70807273	-0,70821437	-0,70835541
160	-0,70778762	-0,70793048	-0,70807273	-0,70821437	-0,70835541
170	-0,70778762	-0,70793048	-0,70807273	-0,70821437	-0,70835541
180	-0,70778762	-0,70793048	-0,70807273	-0,70821437	-0,70835541

Tabla 22. Valores de $C_{p,0}$ para los tramos 16-20

Angulo	Tramo21	Tramo22	Tramo23	Tramo24	Tramo25	Tramo26
0	1	1	1	1	1	1
10	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
20	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
30	0	0	0	0	0	0
40	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4
50	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8
60	-1,4415	-1,441	-1,4405	-1,44	-1,4395	-1,439
70	-1,6915	-1,691	-1,6905	-1,69	-1,6895	-1,689
80	-1,86855	-1,86575	-1,8652	-1,86435	-1,8631	-1,86165
90	-1,584	-1,583	-1,582	-1,581	-1,58	-1,579
100	-1,3415	-1,341	-1,3405	-1,34	-1,3395	-1,339
110	-0,71	-0,71	-0,71	-0,71	-0,71	-0,71
120	-0,70842571	-0,70849585	-0,70856586	-0,70863571	-0,70870542	-0,70877499
130	-0,70842571	-0,70849585	-0,70856586	-0,70863571	-0,70870542	-0,70877499
140	-0,70842571	-0,70849585	-0,70856586	-0,70863571	-0,70870542	-0,70877499
150	-0,70842571	-0,70849585	-0,70856586	-0,70863571	-0,70870542	-0,70877499
160	-0,70842571	-0,70849585	-0,70856586	-0,70863571	-0,70870542	-0,70877499
170	-0,70842571	-0,70849585	-0,70856586	-0,70863571	-0,70870542	-0,70877499
180	-0,70842571	-0,70849585	-0,70856586	-0,70863571	-0,70870542	-0,70877499

Tabla 23. Valores de $C_{p,0}$ para los tramos 21-26

Por último, teniendo todos los datos de $C_{p,0}$ podemos determinar las presiones ejercidas por el viento sobre nuestra estructura y por consiguiente ya tendremos los valores de las cargas (w_e expresado en kg/m^2) expresados en las siguientes tablas resumen para cada segmento que introduciremos en el SAP2000 para el cálculo de las deformaciones del tobogán.

Tramo1	C_{pe}	q_p	w_e
0º	1	507	507
10º	0,75	507	380,25
20º	0,4	507	202,8
30º	0	507	0
40º	-0,4	507	-202,8
50º	-0,8	507	-405,6
60º	-1,46	507	-740,22
70º	-1,72	507	-872,04
80º	-1,9055	507	-966,0885
90º	-1,61	507	-816,27
100º	-1,355	507	-686,985
110º	-0,7	507	-354,9
120º	-0,69873464	507	-354,258465
130º	-0,69873464	507	-354,258465
140º	-0,69873464	507	-354,258465
150º	-0,69873464	507	-354,258465
160º	-0,69873464	507	-354,258465
170º	-0,69873464	507	-354,258465
180º	-0,69873464	507	-354,258465

Tabla 24. Cargas de viento sobre la estructura dependiendo del ángulo de incidencia

Tramo2	C_{pe}	q_p	w_e
0º	1	507	507
10º	0,75	507	380,25
20º	0,4	507	202,8
30º	0	507	0
40º	-0,4	507	-202,8
50º	-0,8	507	-405,6
60º	-1,46	507	-740,22
70º	-1,72	507	-872,04
80º	-1,9055	507	-966,0885
90º	-1,61	507	-816,27
100º	-1,355	507	-686,985
110º	-0,7	507	-354,9
120º	-0,69873464	507	-354,258465
130º	-0,69873464	507	-354,258465
140º	-0,69873464	507	-354,258465
150º	-0,69873464	507	-354,258465
160º	-0,69873464	507	-354,258465
170º	-0,69873464	507	-354,258465
180º	-0,69873464	507	-354,258465

Tabla 25. Cargas de viento sobre la estructura dependiendo del ángulo de incidencia

Tramo3	C_{pe}	q_p	w_e
0º	1	507	507
10º	0,75	507	380,25
20º	0,4	507	202,8
30º	0	507	0
40º	-0,4	507	-202,8
50º	-0,8	507	-405,6
60º	-1,46	507	-740,22
70º	-1,72	507	-872,04
80º	-1,9055	507	-966,0885
90º	-1,61	507	-816,27
100º	-1,355	507	-686,985
110º	-0,71	507	-359,97
120º	-0,69873464	507	-354,258465
130º	-0,69873464	507	-354,258465
140º	-0,69873464	507	-354,258465
150º	-0,69873464	507	-354,258465
160º	-0,69873464	507	-354,258465
170º	-0,69873464	507	-354,258465
180º	-0,69873464	507	-354,258465

Tabla 26. Cargas de viento sobre la estructura dependiendo del ángulo de incidencia

Tramo4	C_{pe}	q_p	w_e
0º	1	507	507
10º	0,75	507	380,25
20º	0,4	507	202,8
30º	0	507	0
40º	-0,4	507	-202,8
50º	-0,8	507	-405,6
60º	-1,46	507	-740,22
70º	-1,72	507	-872,04
80º	-1,9055	507	-966,0885
90º	-1,61	507	-816,27
100º	-1,355	507	-686,985
110º	-0,71	507	-359,97
120º	-0,69873464	507	-354,258465
130º	-0,69873464	507	-354,258465
140º	-0,69873464	507	-354,258465
150º	-0,69873464	507	-354,258465
160º	-0,69873464	507	-354,258465
170º	-0,69873464	507	-354,258465
180º	-0,69873464	507	-354,258465

Tabla 27. Cargas de viento sobre la estructura dependiendo del ángulo de incidencia

Tramo5	C_{pe}	q_p	w_e
0º	1	654,875	654,875
10º	0,75	654,875	491,15625
20º	0,4	654,875	261,95
30º	0	654,875	0
40º	-0,4	654,875	-261,95
50º	-0,8	654,875	-523,9
60º	-1,4495	654,875	-949,241313
70º	-1,6995	654,875	-1112,96006
80º	-1,8975	654,875	-1242,62531
90º	-1,6	654,875	-1047,8
100º	-1,3495	654,875	-883,753813
110º	-0,71	654,875	-464,96125
120º	-0,70197478	654,875	-459,705736
130º	-0,70197478	654,875	-459,705736
140º	-0,70197478	654,875	-459,705736
150º	-0,70197478	654,875	-459,705736
160º	-0,70197478	654,875	-459,705736
170º	-0,70197478	654,875	-459,705736
180º	-0,70197478	654,875	-459,705736

Tabla 28. Cargas de viento sobre la estructura dependiendo del ángulo de incidencia

Tramo6	C_{pe}	q_p	w_e
0º	1	739,375	739,375
10º	0,75	739,375	554,53125
20º	0,4	739,375	295,75
30º	0	739,375	0
40º	-0,4	739,375	-295,75
50º	-0,8	739,375	-591,5
60º	-1,449	739,375	-1071,35438
70º	-1,699	739,375	-1256,19813
80º	-1,894	739,375	-1400,37625
90º	-1,599	739,375	-1182,26063
100º	-1,349	739,375	-997,416875
110º	-0,71	739,375	-524,95625
120º	-0,70366231	739,375	-520,270317
130º	-0,70366231	739,375	-520,270317
140º	-0,70366231	739,375	-520,270317
150º	-0,70366231	739,375	-520,270317
160º	-0,70366231	739,375	-520,270317
170º	-0,70366231	739,375	-520,270317
180º	-0,70366231	739,375	-520,270317

Tabla 29. Cargas de viento sobre la estructura dependiendo del ángulo de incidencia

Tramo7	C_{pe}	q_p	w_e
0º	1	802,75	802,75
10º	0,75	802,75	602,0625
20º	0,4	802,75	321,1
30º	0	802,75	0
40º	-0,4	802,75	-321,1
50º	-0,8	802,75	-642,2
60º	-1,4485	802,75	-1162,78338
70º	-1,6985	802,75	-1363,47088
80º	-1,88875	802,75	-1516,19406
90º	-1,598	802,75	-1282,7945
100º	-1,3485	802,75	-1082,50838
110º	-0,71	802,75	-569,9525
120º	-0,70486544	802,75	-565,830731
130º	-0,70486544	802,75	-565,830731
140º	-0,70486544	802,75	-565,830731
150º	-0,70486544	802,75	-565,830731
160º	-0,70486544	802,75	-565,830731
170º	-0,70486544	802,75	-565,830731
180º	-0,70486544	802,75	-565,830731

Tabla 30. Cargas de viento sobre la estructura dependiendo del ángulo de incidencia

Tramo8	C_{pe}	q_p	w_e
0º	1	845	845
10º	0,75	845	633,75
20º	0,4	845	338
30º	0	845	0
40º	-0,4	845	-338
50º	-0,8	845	-676
60º	-1,448	845	-1223,56
70º	-1,698	845	-1434,81
80º	-1,88375	845	-1591,76875
90º	-1,597	845	-1349,465
100º	-1,348	845	-1139,06
110º	-0,71	845	-599,95
120º	-0,70564129	845	-596,266893
130º	-0,70564129	845	-596,266893
140º	-0,70564129	845	-596,266893
150º	-0,70564129	845	-596,266893
160º	-0,70564129	845	-596,266893
170º	-0,70564129	845	-596,266893
180º	-0,70564129	845	-596,266893

Tabla 31 . Cargas de viento sobre la estructura dependiendo del ángulo de incidencia

Tramo9	C_{pe}	q_p	w_e
0º	1	887,25	887,25
10º	0,75	887,25	665,4375
20º	0,4	887,25	354,9
30º	0	887,25	0
40º	-0,4	887,25	-354,9
50º	-0,8	887,25	-709,8
60º	-1,4475	887,25	-1284,29438
70º	-1,6975	887,25	-1506,10688
80º	-1,88185	887,25	-1669,67141
90º	-1,596	887,25	-1416,051
100º	-1,3475	887,25	-1195,56938
110º	-0,71	887,25	-629,9475
120º	-0,70639798	887,25	-626,75161
130º	-0,70639798	887,25	-626,75161
140º	-0,70639798	887,25	-626,75161
150º	-0,70639798	887,25	-626,75161
160º	-0,70639798	887,25	-626,75161
170º	-0,70639798	887,25	-626,75161
180º	-0,70639798	887,25	-626,75161

Tabla 32. Cargas de viento sobre la estructura dependiendo del ángulo de incidencia

Tramo10	C_{pe}	q_p	w_e
0º	1	908,375	908,375
10º	0,75	908,375	681,28125
20º	0,4	908,375	363,35
30º	0	908,375	0
40º	-0,4	908,375	-363,35
50º	-0,8	908,375	-726,7
60º	-1,447	908,375	-1314,41863
70º	-1,697	908,375	-1541,51238
80º	-1,88055	908,375	-1708,24461
90º	-1,595	908,375	-1448,85813
100º	-1,347	908,375	-1223,58113
110º	-0,71	908,375	-644,94625
120º	-0,70676957	908,375	-642,011808
130º	-0,70676957	908,375	-642,011808
140º	-0,70676957	908,375	-642,011808
150º	-0,70676957	908,375	-642,011808
160º	-0,70676957	908,375	-642,011808
170º	-0,70676957	908,375	-642,011808
180º	-0,70676957	908,375	-642,011808

Tabla 33. Cargas de viento sobre la estructura dependiendo del ángulo de incidencia

Tramo11	C_{pe}	q_p	w_e
0º	1	921,05	921,05
10º	0,75	921,05	690,7875
20º	0,4	921,05	368,42
30º	0	921,05	0
40º	-0,4	921,05	-368,42
50º	-0,8	921,05	-736,84
60º	-1,4465	921,05	-1332,29883
70º	-1,6965	921,05	-1562,56133
80º	-1,879	921,05	-1730,65295
90º	-1,594	921,05	-1468,1537
100º	-1,3465	921,05	-1240,19383
110º	-0,71	921,05	-653,9455
120º	-0,70699045	921,05	-651,173554
130º	-0,70699045	921,05	-651,173554
140º	-0,70699045	921,05	-651,173554
150º	-0,70699045	921,05	-651,173554
160º	-0,70699045	921,05	-651,173554
170º	-0,70699045	921,05	-651,173554
180º	-0,70699045	921,05	-651,173554

Tabla 34. Cargas de viento sobre la estructura dependiendo del ángulo de incidencia

Tramo12	C_{pe}	q_p	w_e
0º	1	933,725	933,725
10º	0,75	933,725	700,29375
20º	0,4	933,725	373,49
30º	0	933,725	0
40º	-0,4	933,725	-373,49
50º	-0,8	933,725	-746,98
60º	-1,446	933,725	-1350,16635
70º	-1,696	933,725	-1583,5976
80º	-1,8775	933,725	-1753,06869
90º	-1,593	933,725	-1487,42393
100º	-1,346	933,725	-1256,79385
110º	-0,71	933,725	-662,94475
120º	-0,70720982	933,725	-660,339485
130º	-0,70720982	933,725	-660,339485
140º	-0,70720982	933,725	-660,339485
150º	-0,70720982	933,725	-660,339485
160º	-0,70720982	933,725	-660,339485
170º	-0,70720982	933,725	-660,339485
180º	-0,70720982	933,725	-660,339485

Tabla 35. Cargas de viento sobre la estructura dependiendo del ángulo de incidencia

Tramo13	C_{pe}	q_p	w_e
0º	1	942,175	942,175
10º	0,75	942,175	706,63125
20º	0,4	942,175	376,87
30º	0	942,175	0
40º	-0,4	942,175	-376,87
50º	-0,8	942,175	-753,74
60º	-1,4455	942,175	-1361,91396
70º	-1,6955	942,175	-1597,45771
80º	-1,8757	942,175	-1767,23765
90º	-1,592	942,175	-1499,9426
100º	-1,3455	942,175	-1267,69646
110º	-0,71	942,175	-668,94425
120º	-0,70735523	942,175	-666,452417
130º	-0,70735523	942,175	-666,452417
140º	-0,70735523	942,175	-666,452417
150º	-0,70735523	942,175	-666,452417
160º	-0,70735523	942,175	-666,452417
170º	-0,70735523	942,175	-666,452417
180º	-0,70735523	942,175	-666,452417

Tabla 36. Cargas de viento sobre la estructura dependiendo del ángulo de incidencia

Tramo14	C_{pe}	q_p	w_e
0º	1	950,625	950,625
10º	0,75	950,625	712,96875
20º	0,4	950,625	380,25
30º	0	950,625	0
40º	-0,4	950,625	-380,25
50º	-0,8	950,625	-760,5
60º	-1,445	950,625	-1373,65313
70º	-1,695	950,625	-1611,30938
80º	-1,8744	950,625	-1781,8515
90º	-1,591	950,625	-1512,44438
100º	-1,345	950,625	-1278,59063
110º	-0,71	950,625	-674,94375
120º	-0,7075	950,625	-672,567188
130º	-0,7075	950,625	-672,567188
140º	-0,7075	950,625	-672,567188
150º	-0,7075	950,625	-672,567188
160º	-0,7075	950,625	-672,567188
170º	-0,7075	950,625	-672,567188
180º	-0,7075	950,625	-672,567188

Tabla 37. Cargas de viento sobre la estructura dependiendo del ángulo de incidencia

Tramo15	C_{pe}	q_p	w_e
0º	1	959,075	959,075
10º	0,75	959,075	719,30625
20º	0,4	959,075	383,63
30º	0	959,075	0
40º	-0,4	959,075	-383,63
50º	-0,8	959,075	-767,26
60º	-1,4445	959,075	-1385,38384
70º	-1,6945	959,075	-1625,15259
80º	-1,8728	959,075	-1796,15566
90º	-1,59	959,075	-1524,92925
100º	-1,3445	959,075	-1289,47634
110º	-0,71	959,075	-680,94325
120º	-0,70764412	959,075	-678,683789
130º	-0,70764412	959,075	-678,683789
140º	-0,70764412	959,075	-678,683789
150º	-0,70764412	959,075	-678,683789
160º	-0,70764412	959,075	-678,683789
170º	-0,70764412	959,075	-678,683789
180º	-0,70764412	959,075	-678,683789

Tabla 38. Cargas de viento sobre la estructura dependiendo del ángulo de incidencia

Tramo16	C_{pe}	q_p	w_e
0º	1	967,525	967,525
10º	0,75	967,525	725,64375
20º	0,4	967,525	387,01
30º	0	967,525	0
40º	-0,4	967,525	-387,01
50º	-0,8	967,525	-774,02
60º	-1,444	967,525	-1397,1061
70º	-1,694	967,525	-1638,98735
80º	-1,87145	967,525	-1810,67466
90º	-1,589	967,525	-1537,39723
100º	-1,344	967,525	-1300,3536
110º	-0,71	967,525	-686,94275
120º	-0,70778762	967,525	-684,802213
130º	-0,70778762	967,525	-684,802213
140º	-0,70778762	967,525	-684,802213
150º	-0,70778762	967,525	-684,802213
160º	-0,70778762	967,525	-684,802213
170º	-0,70778762	967,525	-684,802213
180º	-0,70778762	967,525	-684,802213

Tabla 39. Cargas de viento sobre la estructura dependiendo del ángulo de incidencia

Tramo17	C_{pe}	q_p	w_e
0º	1	975,975	975,975
10º	0,75	975,975	731,98125
20º	0,4	975,975	390,39
30º	0	975,975	0
40º	-0,4	975,975	-390,39
50º	-0,8	975,975	-780,78
60º	-1,4435	975,975	-1408,81991
70º	-1,6935	975,975	-1652,81366
80º	-1,8706	975,975	-1825,65884
90º	-1,588	975,975	-1549,8483
100º	-1,3435	975,975	-1311,22241
110º	-0,71	975,975	-692,94225
120º	-0,70793048	975,975	-690,922452
130º	-0,70793048	975,975	-690,922452
140º	-0,70793048	975,975	-690,922452
150º	-0,70793048	975,975	-690,922452
160º	-0,70793048	975,975	-690,922452
170º	-0,70793048	975,975	-690,922452
180º	-0,70793048	975,975	-690,922452

Tabla 40. Cargas de viento sobre la estructura dependiendo del ángulo de incidencia

Tramo18	C_{pe}	q_p	w_e
0º	1	984,425	984,425
10º	0,75	984,425	738,31875
20º	0,4	984,425	393,77
30º	0	984,425	0
40º	-0,4	984,425	-393,77
50º	-0,8	984,425	-787,54
60º	-1,443	984,425	-1420,52528
70º	-1,693	984,425	-1666,63153
80º	-1,87	984,425	-1840,87475
90º	-1,587	984,425	-1562,28248
100º	-1,343	984,425	-1322,08278
110º	-0,71	984,425	-698,94175
120º	-0,70807273	984,425	-697,044499
130º	-0,70807273	984,425	-697,044499
140º	-0,70807273	984,425	-697,044499
150º	-0,70807273	984,425	-697,044499
160º	-0,70807273	984,425	-697,044499
170º	-0,70807273	984,425	-697,044499
180º	-0,70807273	984,425	-697,044499

Tabla 41. Cargas de viento sobre la estructura dependiendo del ángulo de incidencia

Tramo19	C_{pe}	q_p	w_e
0º	1	992,875	992,875
10º	0,75	992,875	744,65625
20º	0,4	992,875	397,15
30º	0	992,875	0
40º	-0,4	992,875	-397,15
50º	-0,8	992,875	-794,3
60º	-1,4425	992,875	-1432,22219
70º	-1,6925	992,875	-1680,44094
80º	-1,8692	992,875	-1855,88195
90º	-1,586	992,875	-1574,69975
100º	-1,3425	992,875	-1332,93469
110º	-0,71	992,875	-704,94125
120º	-0,70821437	992,875	-703,168344
130º	-0,70821437	992,875	-703,168344
140º	-0,70821437	992,875	-703,168344
150º	-0,70821437	992,875	-703,168344
160º	-0,70821437	992,875	-703,168344
170º	-0,70821437	992,875	-703,168344
180º	-0,70821437	992,875	-703,168344

Tabla 42. Cargas de viento sobre la estructura dependiendo del ángulo de incidencia

Tramo20	C_{pe}	q_p	w_e
0º	1	1001,325	1001,325
10º	0,75	1001,325	750,99375
20º	0,4	1001,325	400,53
30º	0	1001,325	0
40º	-0,4	1001,325	-400,53
50º	-0,8	1001,325	-801,06
60º	-1,442	1001,325	-1443,91065
70º	-1,692	1001,325	-1694,2419
80º	-1,86855	1001,325	-1871,02583
90º	-1,585	1001,325	-1587,10013
100º	-1,342	1001,325	-1343,77815
110º	-0,71	1001,325	-710,94075
120º	-0,70835541	1001,325	-709,29398
130º	-0,70835541	1001,325	-709,29398
140º	-0,70835541	1001,325	-709,29398
150º	-0,70835541	1001,325	-709,29398
160º	-0,70835541	1001,325	-709,29398
170º	-0,70835541	1001,325	-709,29398
180º	-0,70835541	1001,325	-709,29398

Tabla 43. Cargas de viento sobre la estructura dependiendo del ángulo de incidencia

Tramo21	C_{pe}	q_p	w_e
0º	1	1005,55	1005,55
10º	0,75	1005,55	754,1625
20º	0,4	1005,55	402,22
30º	0	1005,55	0
40º	-0,4	1005,55	-402,22
50º	-0,8	1005,55	-804,44
60º	-1,4415	1005,55	-1449,50033
70º	-1,6915	1005,55	-1700,88783
80º	-1,86855	1005,55	-1878,92045
90º	-1,584	1005,55	-1592,7912
100º	-1,3415	1005,55	-1348,94533
110º	-0,71	1005,55	-713,9405
120º	-0,70842571	1005,55	-712,357468
130º	-0,70842571	1005,55	-712,357468
140º	-0,70842571	1005,55	-712,357468
150º	-0,70842571	1005,55	-712,357468
160º	-0,70842571	1005,55	-712,357468
170º	-0,70842571	1005,55	-712,357468
180º	-0,70842571	1005,55	-712,357468

Tabla 44. Cargas de viento sobre la estructura dependiendo del ángulo de incidencia

Tramo22	C_{pe}	q_p	w_e
0º	1	1009,775	1009,775
10º	0,75	1009,775	757,33125
20º	0,4	1009,775	403,91
30º	0	1009,775	0
40º	-0,4	1009,775	-403,91
50º	-0,8	1009,775	-807,82
60º	-1,441	1009,775	-1455,08578
70º	-1,691	1009,775	-1707,52953
80º	-1,86575	1009,775	-1883,98771
90º	-1,583	1009,775	-1598,47383
100º	-1,341	1009,775	-1354,10828
110º	-0,71	1009,775	-716,94025
120º	-0,70849585	1009,775	-715,421401
130º	-0,70849585	1009,775	-715,421401
140º	-0,70849585	1009,775	-715,421401
150º	-0,70849585	1009,775	-715,421401
160º	-0,70849585	1009,775	-715,421401
170º	-0,70849585	1009,775	-715,421401
180º	-0,70849585	1009,775	-715,421401

Tabla 45. Cargas de viento sobre la estructura dependiendo del ángulo de incidencia

Tramo23	C_{pe}	q_p	w_e
0º	1	1014	1014
10º	0,75	1014	760,5
20º	0,4	1014	405,6
30º	0	1014	0
40º	-0,4	1014	-405,6
50º	-0,8	1014	-811,2
60º	-1,4405	1014	-1460,667
70º	-1,6905	1014	-1714,167
80º	-1,8652	1014	-1891,3128
90º	-1,582	1014	-1604,148
100º	-1,3405	1014	-1359,267
110º	-0,71	1014	-719,94
120º	-0,70856586	1014	-718,485778
130º	-0,70856586	1014	-718,485778
140º	-0,70856586	1014	-718,485778
150º	-0,70856586	1014	-718,485778
160º	-0,70856586	1014	-718,485778
170º	-0,70856586	1014	-718,485778
180º	-0,70856586	1014	-718,485778

Tabla 46. Cargas de viento sobre la estructura dependiendo del ángulo de incidencia

Tramo24	C_{pe}	q_p	w_e
0º	1	1018,225	1018,225
10º	0,75	1018,225	763,66875
20º	0,4	1018,225	407,29
30º	0	1018,225	0
40º	-0,4	1018,225	-407,29
50º	-0,8	1018,225	-814,58
60º	-1,44	1018,225	-1466,244
70º	-1,69	1018,225	-1720,80025
80º	-1,86435	1018,225	-1898,32778
90º	-1,581	1018,225	-1609,81373
100º	-1,34	1018,225	-1364,4215
110º	-0,71	1018,225	-722,93975
120º	-0,70863571	1018,225	-721,550598
130º	-0,70863571	1018,225	-721,550598
140º	-0,70863571	1018,225	-721,550598
150º	-0,70863571	1018,225	-721,550598
160º	-0,70863571	1018,225	-721,550598
170º	-0,70863571	1018,225	-721,550598
180º	-0,70863571	1018,225	-721,550598

Tabla 47. Cargas de viento sobre la estructura dependiendo del ángulo de incidencia

Tramo25	C_{pe}	q_p	w_e
0º	1	1022,45	1022,45
10º	0,75	1022,45	766,8375
20º	0,4	1022,45	408,98
30º	0	1022,45	0
40º	-0,4	1022,45	-408,98
50º	-0,8	1022,45	-817,96
60º	-1,4395	1022,45	-1471,81678
70º	-1,6895	1022,45	-1727,42928
80º	-1,8631	1022,45	-1904,9266
90º	-1,58	1022,45	-1615,471
100º	-1,3395	1022,45	-1369,57178
110º	-0,71	1022,45	-725,9395
120º	-0,70870542	1022,45	-724,61586
130º	-0,70870542	1022,45	-724,61586
140º	-0,70870542	1022,45	-724,61586
150º	-0,70870542	1022,45	-724,61586
160º	-0,70870542	1022,45	-724,61586
170º	-0,70870542	1022,45	-724,61586
180º	-0,70870542	1022,45	-724,61586

Tabla 48. Cargas de viento sobre la estructura dependiendo del ángulo de incidencia

Tramo26	C_{pe}	q_p	w_e
0º	1	1026,675	1026,675
10º	0,75	1026,675	770,00625
20º	0,4	1026,675	410,67
30º	0	1026,675	0
40º	-0,4	1026,675	-410,67
50º	-0,8	1026,675	-821,34
60º	-1,439	1026,675	-1477,38533
70º	-1,689	1026,675	-1734,05408
80º	-1,86165	1026,675	-1911,30951
90º	-1,579	1026,675	-1621,11983
100º	-1,339	1026,675	-1374,71783
110º	-0,71	1026,675	-728,93925
120º	-0,70877499	1026,675	-727,681564
130º	-0,70877499	1026,675	-727,681564
140º	-0,70877499	1026,675	-727,681564
150º	-0,70877499	1026,675	-727,681564
160º	-0,70877499	1026,675	-727,681564
170º	-0,70877499	1026,675	-727,681564
180º	-0,70877499	1026,675	-727,681564

Tabla 49. Cargas de viento sobre la estructura dependiendo del ángulo de incidencia

Carga de Nieve:

Ya que la ubicación de nuestro proyecto va a ser Benicàssim, siguiendo las indicaciones del CTE, no se va a considerar ningún tipo de carga debido a la nieve porque es imposible que se acumule nieve en alguna parte de la estructura de forma natural.

3.2 Discretización de la estructura

Para el procedimiento del cálculo de la estructura, se ha utilizado el software SAP2000, un programa de cálculo de estructuras en el cual se realiza el cálculo mediante el método de elementos finitos. Por ello, para que el cálculo sea posible, se ha debido realizar una discretización de la estructura basándonos en este método.

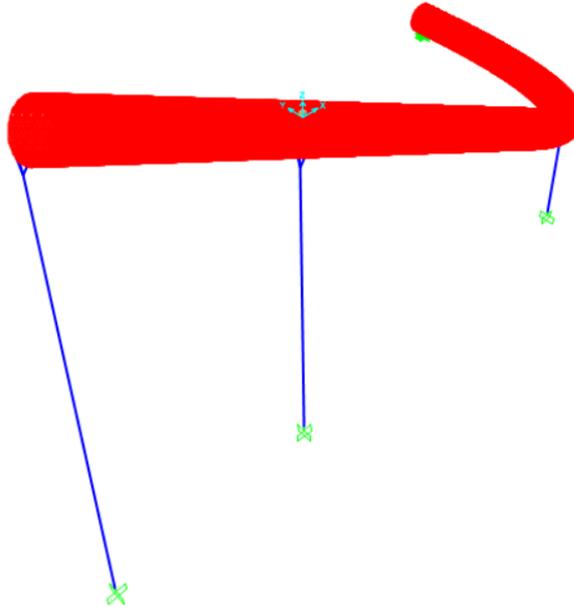


Figura 8. Primer Modelo del tobogán realizado por el método de elementos finitos

En el caso de nuestro tobogán, se ha optado por el material de la fibra de vidrio con estas características para la parte del tubo.

Valores mínimos PRF a base de tejido a 90°	
Límite de rotura (daN/cm ²) Dirección 1 y 2	4.500
Límite elástico (daN/cm ²) Dirección 1 y 2	2.500
Módulo de elasticidad (daN/cm ²) Dirección 1 y 2	200.000

Tabla 50. Propiedades de la fibra de vidrio (Fuente: Molines (2015))

Y como ya hemos dicho anteriormente, los pilares del tobogán son de acero S275JR con un perfil tubular $D_{ext}=355,6$ mm y $e= 12,5$ mm

3.3 Aplicación de las cargas en SAP

Una vez calculadas las cargas que deberá soportar nuestra estructura, hemos pasado a utilizar el programa SAP2000 para calcular las tensiones y deformaciones que estas cargas generarán en el tobogán.

El modelo utilizado en el software SAP2000 está basado en pequeñas superficies planas (llamadas shells) unidas unas a otras de manera que se asemeje lo máximo posible al cilindro que será el tobogán en el futuro (método de elementos finitos). Sobre dichos elementos se han introducido las cargas w_e calculadas anteriormente y las cargas relacionadas con la sobrecarga de uso.

Para aplicar las cargas relacionadas con el viento, se han escogido dos direcciones diferentes de viento, paralelas al suelo y perpendiculares entre ellas (una sobre el eje y y la otra sobre el $-x$ del modelo creado en SAP2000). De este modo las cargas w_e se han introducido dependiendo del ángulo que forma el vector del plano de cada pequeña área con la dirección del viento. De esta manera, a todas las pequeñas áreas se les ha introducido una carga que es función de su altura y su ángulo.

Para la dirección del viento 1, la paralela al eje del cilindro por la parte baja del tobogán (eje y), se ha considerado que el viento solo actúa sobre la parte superior del tubo. Es decir, hasta que el tobogán empieza a girar, ya que el viento de esta dirección actúa sobre el mismo eje que tiene la zona inferior del tobogán, resultando sus tensiones prácticamente nulas y por tanto despreciables. Mientras que para la dirección del viento 2, la perpendicular al eje del cilindro por la parte baja del tobogán (eje $-x$), se ha considerado que el viento actúa sobre todo el cilindro del tobogán, ya que en ningún momento el viento actúa paralelamente al eje del cilindro.

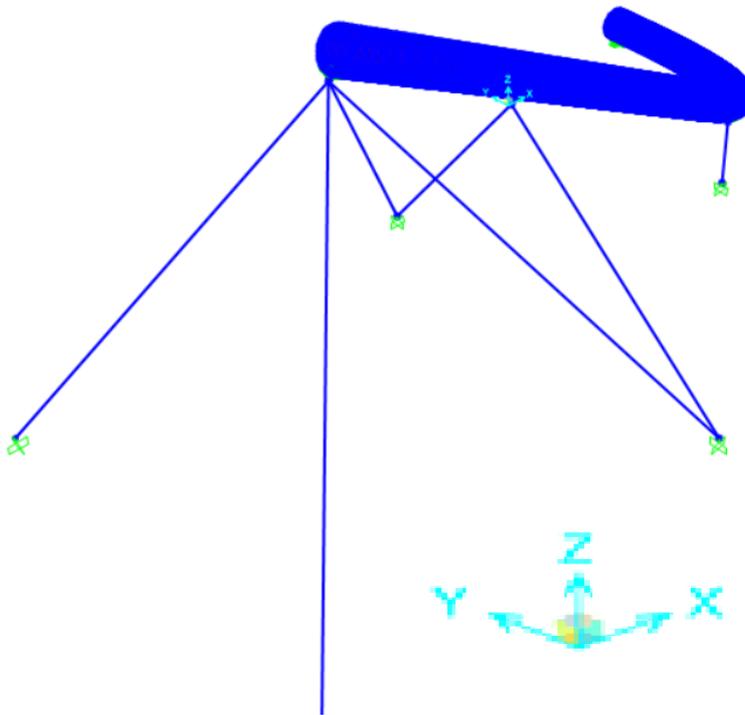


Figura 9. Ejes para la dirección del viento

Para reflejar el ámbito de afección de la sobrecarga de uso en el modelo, se ha optado por aplicar una carga repartida de 0.0102 kp/cm^2 en un área compuesta de 6 shells en la parte inferior del tubo en toda su longitud, tal y como se puede apreciar en la figura adjunta.

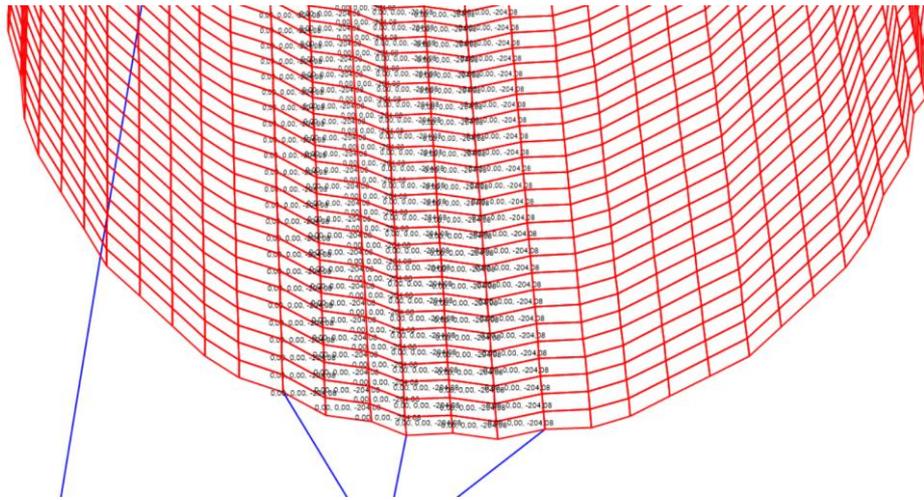


Figura 10. Propiedades de la fibra de vidrio

De la misma forma, en el caso de la sobrecarga de uso de mantenimiento, que principalmente afectará a la parte exterior del elemento, se aplicará sobre un área compuesta por 4 shells a lo largo de todo el tubo. En este último caso, a diferencia del anterior, el área de afección es menor, puesto que la afección o sollicitación que puede efectuar un operario sobre el tubo, siempre será inferior a la de la lámina de agua que discurre por su interior.

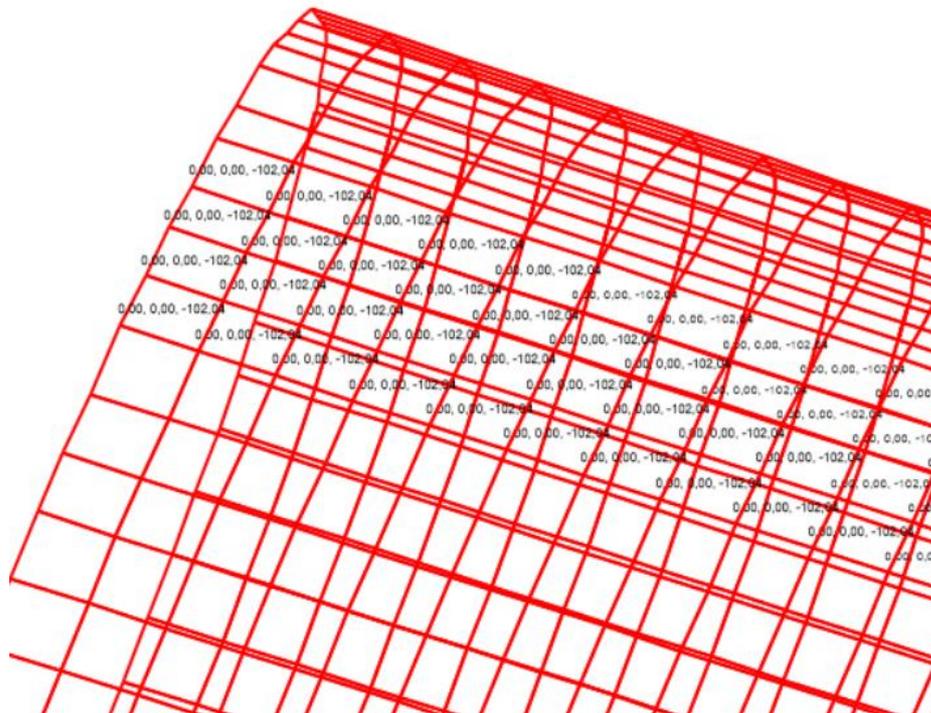


Figura 11. Segmento del tobogán con cargas aplicadas sobre la parte superior del cilindro

3.4 Combinaciones de cargas

Para el cálculo de la estructura se han determinado las siguientes combinaciones de las diferentes hipótesis básicas:

-Estado Límite Último (ELU)

1. $1,35 \cdot \text{Peso Propio}(G) + 1,5 \cdot \text{Sobrecarga de uso}(Q)$
2. $1,35 \cdot \text{Peso Propio}(G) + 1,5 \cdot \text{Viento 1}$
3. $1,35 \cdot \text{Peso Propio}(G) + 1,5 \cdot \text{Viento 2}$
4. $1,35 \cdot \text{Peso Propio}(G) + 1,5 \cdot \text{Sobrecarga de uso}(Q) + 1,5 \cdot 0,6 \cdot \text{Viento 1}$
5. $1,35 \cdot \text{Peso Propio}(G) + 1,5 \cdot \text{Sobrecarga de uso}(Q) + 1,5 \cdot 0,6 \cdot \text{Viento 2}$

-Estado Límite Servicio (ELS)

6. 1·Sobrecarga de uso(Q)

7. 1·Viento 1

8. 1·Viento 2

9. 1·Sobrecarga de uso(Q) + 0,6·Viento 1

10. 1·Sobrecarga de uso(Q) + 0,6·Viento 2

3.5 Comprobaciones

Siguiendo las instrucciones del Código Técnico de la Edificación, en este apartado hemos realizado las comprobaciones necesarias para garantizar la seguridad estructural de nuestro proyecto.

Por una parte, estudiaremos los Estados Límite Últimos y por otra parte los Estados Límite de Servicio. En el CTE, se definen los estados límite como: “Se denominan Estados Límite a aquellas situaciones para las que, de ser alcanzadas, puede considerarse que el edificio no cumple alguno de los requisitos estructurales para los que ha sido concebido.”

3.5.1 Estados Límite de Servicio

La definición de Estado Límite de Servicio que recoge el Código Técnico de la edificación es: “Estado más allá del que no se satisfacen los requisitos de servicio establecidos.”

Además de decirse que, “en el proyecto se debe justificar que, bajo valores representativos de las acciones, y en situaciones persistentes no se alcance el estado límite de servicio en cualquiera de las estructuras, viales o servicios que afecten a la zona del entorno de la excavación.”

En conclusión, como Estados Límite de Servicio consideraremos todas las deformaciones que afecten a la apariencia de la estructura o al funcionamiento de las instalaciones y los daños o el desgaste que pueda tener un efecto desfavorable en la apariencia y/o funcionalidad de la estructura.

3.5.1.1 Criterio de Apariencia

De acuerdo con el CTE: “para la comprobación del Criterio de Apariencia se admite que la estructura tiene suficiente rigidez lateral si ante cualquier combinación de acciones casi permanente, el desplome relativo local es menor que 1/250.”

La comprobación de este criterio se ha realizado sobre los puntos más alejados del suelo de cada pilar (puntos más desfavorables de la estructura). Tenemos varios pilares que convergen hacia el mismo punto, esto nos deja con 3 puntos para analizar.

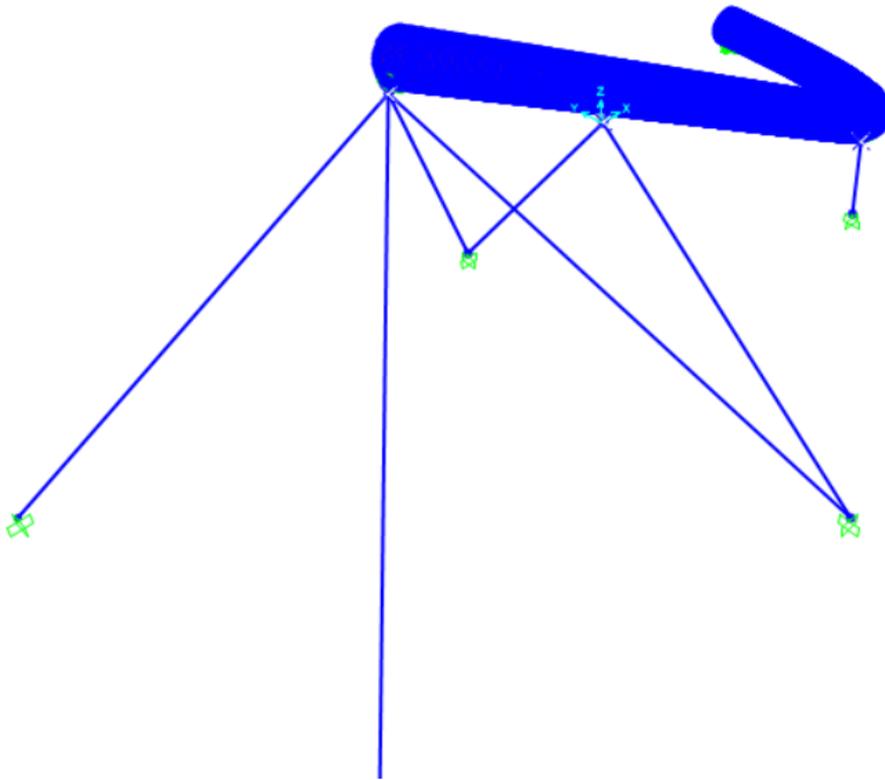


Figura 12. Modelo del tobogán con los puntos críticos para los ELS seleccionados

Los cálculos de esta comprobación han sido obtenidos a partir del software de cálculo estructural SAP2000. Para el cálculo se ha tenido en cuenta el desplazamiento relativo (δ_{rel}) más desfavorable.

A continuación, podemos observar el desplazamiento relativo para los nudos que estamos analizando.

Joint	OutputCase	CaseType	$\delta_{rel,x}$	$\delta_{rel,y}$	$\delta_{rel,z}$
36274	PP(APARIENCIA)	LinStatic	-1,1963E-05	-1,6303E-06	-6,6741E-05
36325	PP(APARIENCIA)	LinStatic	-6,5555E-05	2,1241E-06	-6,8944E-05
36374	PP(APARIENCIA)	LinStatic	1,5714E-05	9,256E-05	-1,0299E-05

Tabla 51. Desplazamientos relativos de cada punto.

Ahora, siguiendo las instrucciones del CTE, se realiza la comprobación del ELS de deformación para el Criterio de Apariencia.

$$fr = \delta_{rel,z} / L_{barra} \quad (3.15)$$

Los resultados de la comprobación del Criterio de Apariencia se muestran a continuación.

Joint	OutputCase	CaseType	L _{barra} (m)	fr	CUMPLE/NO CUMPLE
36274	PP(APARIENCIA)	LinStatic	14,51	-4,5997E-06	Cumple
36325	PP(APARIENCIA)	LinStatic	10,27	-6,7131E-06	Cumple
36374	PP(APARIENCIA)	LinStatic	2,48	3,7323E-05	Cumple

Tabla 52. Comprobación del Estado Límite de Servicio de Apariencia

Como se ha podido observar en las tablas anteriores, la estructura de nuestro tobogán cumple el ELS de Deformación de acuerdo con el Criterio de Apariencia.

3.5.1.2 Criterio de Integridad

Este criterio se basa en considerar la integridad de los elementos que conforman una estructura. Para ello, si una estructura soporta cualquier combinación de cargas de forma que:

$$\delta_{total} < 1/500 \text{ de la altura total del edificio}$$

$$\delta_{local} < 1/250 \text{ de la altura de la planta}$$

podemos afirmar que tiene rigidez lateral suficiente.

En nuestro caso, los pilares son únicos y no se tiene en consideración ninguna planta. Por tanto, solo debemos tener en cuenta la primera de las dos comprobaciones.

De esta forma, se ha optado por realizar la comprobación a partir de los movimientos obtenidos en el software de cálculo SAP2000.

Con los resultados de los movimientos en los tres ejes posibles, se ha sacado la resultante de dicho desplome relativo como el módulo del vector:

$$\delta_{rel} = \sqrt{\delta_{rel,x}^2 + \delta_{rel,y}^2 + \delta_{rel,z}^2} \quad (3.16)$$

Joint	OutputCase	CaseType	$\delta_{rel,x}$	$\delta_{rel,y}$	$\delta_{rel,z}$	$\delta_{rel,tot}$
36274	ELUGQ	Combination	-1,6574E-05	-6,0039E-06	-9,6875E-05	9,84659E-05
36274	ELUGVF	Combination	-0,00010906	0,00017409	-4,9581E-05	0,000211325
36274	ELUGVL	Combination	-0,00126577	1,4186E-05	-7,3098E-06	0,00126587
36274	ELUGQVF	Combination	-7,2319E-05	9,9769E-05	-7,2563E-05	0,000143001
36274	ELUGQVL	Combination	-0,00076635	3,8282E-06	-4,7201E-05	0,000767808
36274	ELSQVF	Combination	-3,7446E-05	6,798E-05	1,1692E-05	7,84867E-05
36274	ELSQVL	Combination	-0,00050013	4,0194E-06	2,86E-05	0,000500964
36274	ELSQ	Combination	-2,8279E-07	-2,5353E-06	-4,5163E-06	5,18695E-06
36274	ELSVF	Combination	-6,1938E-05	0,00011753	2,7013E-05	0,000135567
36274	ELSVL	Combination	-0,00083308	1,0925E-05	5,5194E-05	0,000834977
36325	ELSQVF	Combination	-0,00015181	0,00027783	-7,4902E-05	0,000325337
36325	ELUGQ	Combination	-0,00012866	9,1519E-06	-0,00014359	0,000193015
36325	ELUGVF	Combination	-0,00040108	0,00068696	-0,00019614	0,000819302
36325	ELUGVL	Combination	-0,00365946	0,00015746	-0,00103136	0,00380528
36325	ELUGQVL	Combination	-0,00227124	0,00010191	-0,00070656	0,002380785
36325	ELSQVL	Combination	-0,00145516	6,6027E-05	-0,00040899	0,001512985
36325	ELSQ	Combination	-2,6775E-05	4,1896E-06	-3,3675E-05	4,32259E-05
36325	ELSVF	Combination	-0,00020839	0,00045606	-6,8711E-05	0,000506103
36325	ELSVL	Combination	-0,00238064	0,00010306	-0,00062552	0,002463606
36325	ELUGQVF	Combination	-0,00031621	0,00041961	-0,00020543	0,000564147
36374	ELSVL	Combination	-0,00134627	0,00135675	-7,5628E-05	0,001912836
36374	ELUGQ	Combination	3,4176E-05	0,00031114	-3,1125E-05	0,000314554
36374	ELUGVF	Combination	0,00013443	0,00150013	5,2332E-06	0,001506146
36374	ELUGVL	Combination	-0,00199819	0,00216009	-0,00012735	0,002945328
36374	ELUGQVF	Combination	0,00010211	0,00113624	-1,9643E-05	0,001140989
36374	ELUGQVL	Combination	-0,00117747	0,00153222	-9,919E-05	0,00193493
36374	ELSQVF	Combination	5,3928E-05	0,00067419	-3,8261E-06	0,000676354
36374	ELSQVL	Combination	-0,00079912	0,00093817	-5,6858E-05	0,001233692
36374	ELSQ	Combination	8,6414E-06	0,00012412	-1,1481E-05	0,000124951
36374	ELSVF	Combination	7,5477E-05	0,00091678	1,2758E-05	0,00091997

Tabla 53. Tabla de desplazamientos relativos ELS Integridad

Y, por tanto, al igual que antes utilizando:

$$fr = \delta_{rel, z} / L_{barra} \quad (3.17)$$

Obtenemos:

Joint	OutputCase	CaseType	$\delta_{rel,tot}$	L_{barra} (m)	fr	CUMPLE/NO CUMPLE
36274	ELUGQ	Combination	9,8466E-05	14,51	6,78608E-06	Cumple
36274	ELUGVF	Combination	0,00021132	14,51	1,45641E-05	Cumple
36274	ELUGVL	Combination	0,00126587	14,51	8,72412E-05	Cumple
36274	ELUGQVF	Combination	0,000143	14,51	9,85533E-06	Cumple
36274	ELUGQVL	Combination	0,00076781	14,51	5,29158E-05	Cumple
36274	ELSQVF	Combination	7,8487E-05	14,51	5,40914E-06	Cumple
36274	ELSQVL	Combination	0,00050096	14,51	3,45254E-05	Cumple
36274	ELSQ	Combination	5,1869E-06	14,51	3,57474E-07	Cumple
36274	ELSVF	Combination	0,00013557	14,51	9,34298E-06	Cumple
36274	ELSVL	Combination	0,00083498	14,51	5,7545E-05	Cumple
36325	ELSQVF	Combination	0,00032534	10,27	3,16784E-05	Cumple
36325	ELUGQ	Combination	0,00019301	10,27	1,8794E-05	Cumple
36325	ELUGVF	Combination	0,0008193	10,27	7,97762E-05	Cumple
36325	ELUGVL	Combination	0,00380528	10,27	0,000370524	Cumple
36325	ELUGQVL	Combination	0,00238079	10,27	0,000231819	Cumple
36325	ELSQVL	Combination	0,00151298	10,27	0,000147321	Cumple
36325	ELSQ	Combination	4,3226E-05	10,27	4,20895E-06	Cumple
36325	ELSVF	Combination	0,0005061	10,27	4,92798E-05	Cumple
36325	ELSVL	Combination	0,00246361	10,27	0,000239884	Cumple
36325	ELUGQVF	Combination	0,00056415	10,27	5,49315E-05	Cumple
36374	ELSVL	Combination	0,00191284	2,48	0,000771305	Cumple
36374	ELUGQ	Combination	0,00031455	2,48	0,000126836	Cumple
36374	ELUGVF	Combination	0,00150615	2,48	0,000607317	Cumple
36374	ELUGVL	Combination	0,00294533	2,48	0,001187632	Cumple
36374	ELUGQVF	Combination	0,00114099	2,48	0,000460076	Cumple
36374	ELUGQVL	Combination	0,00193493	2,48	0,000780214	Cumple
36374	ELSQVF	Combination	0,00067635	2,48	0,000272723	Cumple
36374	ELSQVL	Combination	0,00123369	2,48	0,000497457	Cumple
36374	ELSQ	Combination	0,00012495	2,48	5,03834E-05	Cumple
36374	ELSVF	Combination	0,00091997	2,48	0,000370956	Cumple

Tabla 54. Comprobación Estado Límite de Servicio de Integridad

Por tanto, nuestra estructura también cumple el ELS de deformación por el Criterio de Integridad.

3.5.2 Estados Límite Últimos

El CTE nos define los Estados Límite Últimos como: “el estado asociado al colapso o a otra forma similar de fallo estructural.”

Además, también se dice de ellos que: “Los Estados Límite Últimos (ELU) son los que, de ser alcanzados, constituyen un riesgo para las personas. Pueden ser debidos a pérdida del equilibrio del edificio o a fallos por deformaciones excesivas.”

3.5.2.1 Estado Límite Último de Resistencia para los pilares

El Estado Límite Último de Resistencia nos sirve para determinar si nuestra estructura es lo suficientemente resistente frente a las combinaciones de acciones que le afectan.

Sabemos que para el Estado Límite Último de Resistencia tenemos una sección de Clase 3. Esto es debido que las comprobaciones están basadas en distribuciones elásticas de tensiones, por tanto, en la siguiente tabla del CTE se indica el tipo de sección.

Clase 1: Plástica	Permiten la formación de la rótula plástica con la capacidad de rotación suficiente para la redistribución de momentos.
Clase 2: Compacta	Permiten el desarrollo del momento plástico con una capacidad de rotación limitada.
Clase 3: Semicompacta o Elástica	En la fibra más comprimida se puede alcanzar el límite elástico del acero pero la abolladura impide el desarrollo del momento plástico
Clase 4: Esbelta	Los elementos total o parcialmente comprimidos de las secciones esbeltas se abollan antes de alcanzar el límite elástico en la fibra más comprimida.

Tabla 55. Clase de la sección de acero (Fuente: CTE, Figura 5.1, pag.307)

El valor de la resistencia de cálculo del acero S275JR para los ELU estudiados es:

$$f_y = \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{275}{1,05} = 261,9 \frac{N}{mm^2} \quad (3.18)$$

donde

f_y es el límite elástico del acero

γ_{M1} es el coeficiente de seguridad aplicado a los Estados Límite Últimos.

Para las comprobaciones se han separado los pilares en dos tipos diferentes de barras. Las que no son verticales se han analizado en conjunto por un lado y la que es vertical se ha analizado a parte de estas.

A continuación, a partir del programa SAP2000 se han obtenido los esfuerzos axiales, cortantes y momentos a los cuales están sometidos nuestros pilares en todo su recorrido.

Seguidamente, gracias al programa de cálculo Excel, se ha creado una tabla con los valores obtenidos para cada pilar para así sacar los valores críticos y poder dimensionarlos mediante el criterio de resistencia.

Para ello, primero se ha obtenido el valor del momento total mayor (módulo del momento en y más el momento en z), después, las tensiones tangenciales debidas a los cortantes y al momento torsor y, por último, se ha calculado la tensión equivalente de Von Misses para cada caso. Resultando las siguientes tablas:

MAX	σ_{eq}/f_{yd}	BARRA	Sección	CASO
1997,99668	0,76287146	198	0	ELUGVL

Tabla 56. Comprobación ELU Resistencia pilares no verticales

MAX	σ_{eq}/f_{yd}	BARRA	Sección	CASO
1663,59114	0,63518935	110	248,514211	ELUGVL

Tabla 57. Comprobación ELU Resistencia pilares no verticales

3.5.2.2 Estado Límite Último de Resistencia para el tubo

En este apartado se ha estudiado la resistencia del tubo de fibra de vidrio contra las acciones a las que se veía afectado. Para ello se ha usado el software de cálculo estructural SAP2000, en el que se calculaba a lo largo y ancho del tubo las tensiones que se ejercen sobre cada punto de este.

Inicialmente el tubo estaba soportado por tres pilares verticales como se muestra en la siguiente figura:

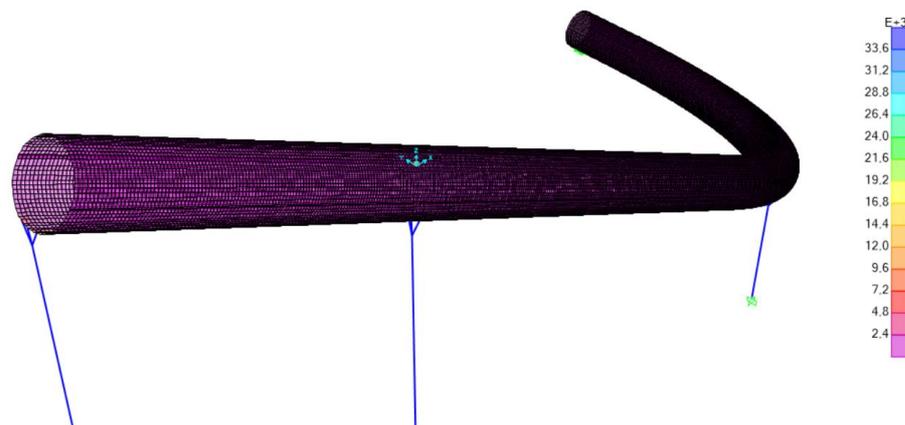


Figura 13. Tensiones en el tubo con 3 pilares verticales

Al tener esta disposición, como se ve en la figura 13, nos encontrábamos con unas concentraciones de tensiones excesivamente elevadas (del orden de 20000 kg/m²) en las zonas de conexión entre los pilares y el tubo, provocando la rotura de la fibra de vidrio (límite elástico 2500 kp/cm²).

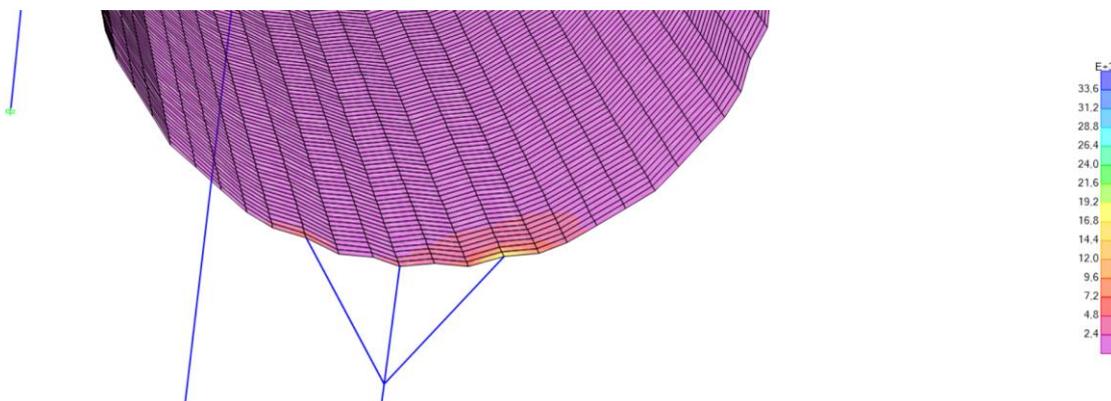
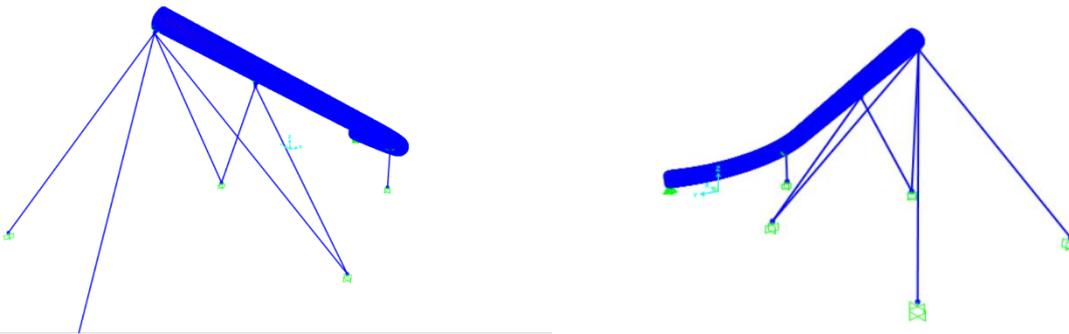


Figura 14. Concentración de tensiones en la zona superior del tobogán con 3 pilares verticales

Al presentarse dicho problema, decidimos hacer una serie de mejoras en el modelo que consistían en:

1. Se reforzó el material en las zonas críticas con anillos de acero
2. Se añadieron más barras para que el pilar se conectara por más puntos con el tubo, simulando así una unión entre dos áreas para que no fuese una unión puntual.
3. Debido a que la zona superior del pilar se movía mucho por las combinaciones de acciones, se decidió usar más de un pilar en cada apoyo del tubo, sustituyendo los pilares dispuestos inicialmente en posición vertical por varios pilares inclinados, todo ello con el objetivo de dotar a la estructura de mayor rigidez.



Figuras 15.
Imágenes del
tobogán rectificad
o con nuevos apoyos

De esta manera, sabiendo que el límite elástico de la fibra de vidrio es 2500 kp/cm^2 podemos observar mediante los datos del SAP2000 que la parte del tubo cumple a resistencia ya que no se supera en ningún momento su límite elástico.

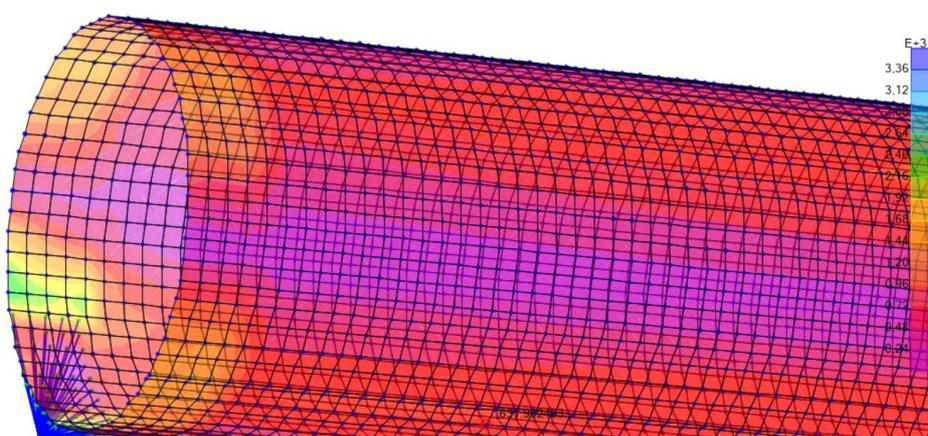


Figura 16. Tensiones en el tubo con el tobogán rectificad
o con los nuevos apoyos

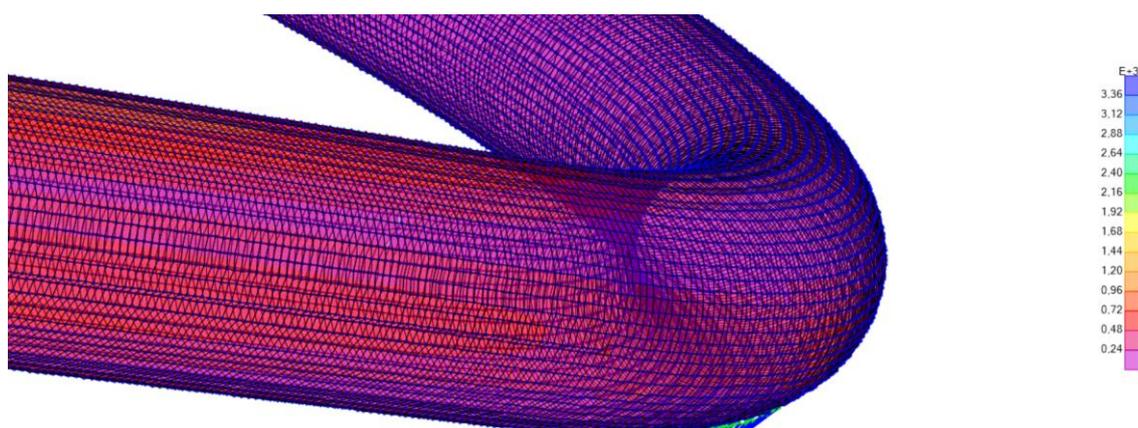


Figura 17. Tensiones en el codo del tubo con el tobogán rectificad

Así pues, con la nueva configuración de los pilares, se puede observar que no aparecen tensiones mayores a las admisibles en el tubo.

3.5.2.3 Estado Límite Último de Pandeo

En este punto se ha comprobado el ELU de Pandeo para el pilar más desfavorable de cada grupo (vertical, no verticales). Para ello se ha analizado el pandeo en el pilar 131 (más desfavorable del grupo no verticales) y para la barra 110 (barra vertical).

Como se indica en el apartado 6.3.4.2 del CTE donde se recogen las comprobaciones para elementos comprimidos y flectados, hemos realizado los cálculos del ELU de Pandeo teniendo en cuenta todas las especificaciones necesarias citadas a continuación.

Nuestro proyecto consta de una estructura metálica con barras de sección uniforme a las que se le aplican un axil constante y un momento flexor variable. Por tanto, siguiendo las indicaciones del CTE hemos tenido que comprobar:

“Para toda pieza:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot A' \cdot f_{yd}} + k_y \cdot \frac{c_{m,y} \cdot M_{y,Ed} \cdot e_{N,y} + N_{Ed}}{\chi_{LT} \cdot W_y \cdot f_{yd}} + \alpha_z \cdot k_z \cdot \frac{c_{m,z} \cdot M_{z,Ed} + e_{N,z} \cdot N_{Ed}}{W_z \cdot f_{yd}} \leq 1 \quad (3.19)$$

Además, en piezas no susceptibles de pandeo por torsión:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot A' \cdot f_{yd}} + \alpha_y \cdot k_y \cdot \frac{c_{m,y} \cdot M_{y,Ed} \cdot e_{N,y} + N_{Ed}}{W_y \cdot f_{yd}} + k_z \cdot \frac{c_{m,z} \cdot M_{z,Ed} + e_{N,z} \cdot N_{Ed}}{W_z \cdot f_{yd}} \leq 1 \quad (3.20)$$

Finalmente, para piezas que sean susceptibles de pandeo por torsión:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot A' \cdot f_{yd}} + k_{yLT} \cdot \frac{M_{y,Ed} \cdot e_{N,y} + N_{Ed}}{\chi_{LT} \cdot W_y \cdot f_{yd}} + k_z \cdot \frac{c_{m,z} \cdot M_{z,Ed} + e_{N,z} \cdot N_{Ed}}{W_z \cdot f_{yd}} \leq 1 \quad (3.21)$$

donde

N_{Ed} , $M_{y,Ed}$, $M_{z,Ed}$ son los valores de la fuerza axial y los momentos de cálculo de mayor valor absoluto del elemento estudiado, los valores de A' , W_y , W_z , α_y , α_z , $e_{N,y}$, $e_{N,z}$ están indicados a continuación (Tabla 34):

Al trabajar con una sección de Clase 3, en la tabla siguiente se tienen los valores característicos para este tipo de sección usados en la comprobación de pandeo señalados.

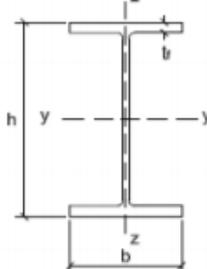
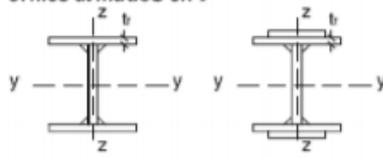
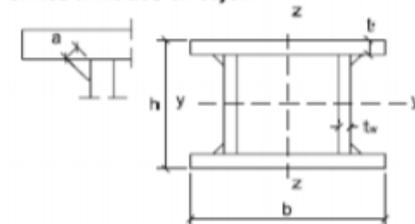
Curva de pandeo en función de la sección transversal						
Tipo de sección	Tipo de acero		S235	S355	S450	
	Eje de pandeo ⁽¹⁾		y	z	y	z
Perfiles laminados en I 	$h/b > 1,2$	$t \leq 40$ mm	a	b	a_0	a_0
		40 mm $< t \leq 100$ mm	b	c	a	a
	$h/b \leq 1,2$	$t \leq 100$ mm	b	c	a	a
		$t > 100$ mm	d	d	c	c
Perfiles armados en I 		$t \leq 40$ mm	b	c	b	c
		$t > 40$ mm	c	d	c	d
Agrupación de perfiles laminados soldados 			c	c	c	c
Tubos de chapa simples o agrupados 		laminados en caliente	a	a	a_0	a_0
		conformados en frío	c	c	c	c
Perfiles armados en cajón ⁽²⁾ 		soldadura gruesa: $a/t > 0,5$ $b/t < 30$ $h/t_w < 30$	c	c	c	c
		en otro caso	b	b	b	b

Tabla 59. Curva del coeficiente de imperfección elástica según el tipo de perfil utilizado (Fuente: CTE, tabla 6.12, pag.325)

Como el perfil utilizado es un perfil circular hueco que está conformado en frío, las curvas útiles son la c para el plano de pandeo y y también la a para el plano de pandeo z, con lo que tenemos unos valores de α :

Valores del coeficiente de pandeo (χ)					
Esbeltez reducida	Curva de pandeo				
	a_0	a	b	c	d
Coeficiente (α) de imperfección	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76

Tabla 60. Coeficiente de imperfección elástica según la curva de pandeo (Fuente: Apuntes de Tecnología de la Construcción)

donde:

$$\bar{\lambda}_y = \frac{\lambda_y}{\lambda_{lim}} \quad \bar{\lambda}_z = \frac{\lambda_z}{\lambda_{lim}} \quad (3.26) \quad \text{con} \quad \lambda_{lim} = \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E}{f_y}} \quad (3.27)$$

siendo:

$$\lambda_y = \frac{\beta_y \cdot L}{i_y} \quad (3.28)$$

$$\lambda_z = \frac{\beta_z \cdot L}{i_z} \quad (3.29)$$

λ_y, λ_z las esbelteces mecánicas para el plano de pandeo xz (flectando respecto del eje z) y para el plano de pandeo xy (flectando respecto del eje y).

L es la longitud entre apoyos del elemento al que se le realiza la comprobación de pandeo.

β_y, β_z dos coeficientes que son dependientes de las condiciones de apoyo que tenga el elemento, es decir, de las restricciones de los extremos de la pieza estudiada en cada plano de pandeo.

i_y, i_z son los radios de giro de la sección respecto a los ejes principales (respectivamente y, z).

χ_{LT} es el coeficiente de pandeo lateral, que como se está trabajando con una estructura que no es susceptible de pandeo lateral se adopta como valor recomendado $\chi_{LT} = 1$.

$e_{N,y}, e_{N,z}$ desplazamientos del centro de gravedad de la sección transversal efectiva con respecto a la posición del centro de gravedad de la sección transversal bruta."

λ_{lim} , es el valor de la esbeltez límite que para el acero S275JR resulta:

$$\lambda_{lim} = \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot 2100000}{2750}} = 86'8121 \quad (3.30)$$

Los coeficientes k_y , k_z , k_{yLT} se indican en la Tabla 37 mostrada a continuación:

Clase	Tipo de sección	k_y	k_z	k_{yLT}
1 y 2	I, H, abiertas	$1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{C,Rd}}$	$1 + (2 \cdot \bar{\lambda}_z - 0,6) \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{C,Rd}}$	el menor de
	Hueca delgada		$1 + (\bar{\lambda}_z - 0,2) \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{C,Rd}}$	$1 - \frac{0,1 \cdot \bar{\lambda}_z}{(c_{mLT} - 0,25)} \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{C,Rd}}$ $0,6 + \bar{\lambda}_z$
3 y 4	Todas	$1 + 0,6 \cdot \bar{\lambda}_y \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{C,Rd}}$	$1 + 0,6 \cdot \bar{\lambda}_z \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{C,Rd}}$	$1 - \frac{0,05 \cdot \bar{\lambda}_z}{(c_{mLT} - 0,25)} \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{C,Rd}}$

siendo

$\bar{\lambda}_y$ y $\bar{\lambda}_z$ valores de las esbelteces reducidas para los ejes $y - y$ y $z - z$, no mayores que 1,00.

$$N_{C,Rd} = A^* \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M1}}$$

Tabla 61. Coeficientes de interacción según clase para el cálculo del ELU de Pandeo (Fuente: CTE, tabla 6.13, pag.340)

Los factores de momento flector uniforme equivalente $c_{m,y}$, $c_{m,z}$, $c_{m,LT}$ se obtienen de la tabla siguiente:

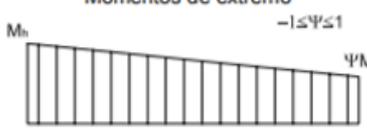
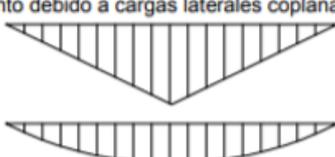
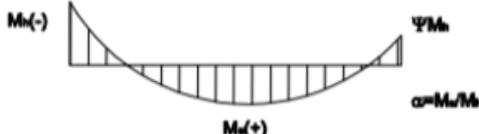
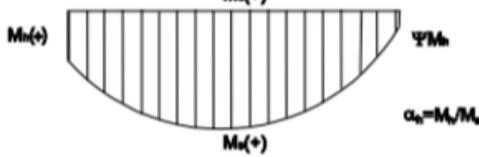
Tabla 6.10 Coeficientes del momento equivalente		
Factor de momento flector	Eje de flexión	Puntos arriostrados en dirección
$c_{m,y}$	y-y	z-z
$c_{m,z}$	z-z	y-y
$c_{m,LT}$	y-y	y-y
Diagrama de Flectores	Factor de momento uniforme equivalente $c_{m,i} = c_{m,j} (i=y)$ $c_{m,i} = c_{m,j} (i=z)$ $c_{m,i} = c_{m,j} (i=LT)$	
Momentos de extremo $-1 \leq \psi \leq 1$ 	$c_{m,i} = 0,6 + 0,4 \cdot \psi \geq 0,4$	
Momento debido a cargas laterales coplanarias 	$c_{m,i} = 0,9$ $c_{m,i} = 0,95$	
Momentos debidos a cargas laterales y momentos de extremos  $\alpha = M_1/M_2$  $\alpha_h = M_1/M_2$	$c_{m,i} = 0,1 - 0,8 \cdot \alpha \geq 0,4$ si $-1 \leq \alpha \leq 0$ $c_{m,i} = 0,2 + 0,8 \cdot \alpha \geq 0,4$ si $0 \leq \alpha \leq 1$ $c_{m,i} = 0,95 + 0,05 \cdot \alpha_h$ con $-1 \leq \alpha_h \leq 1$	

Tabla 62. Coeficientes del momento equivalente (Fuente: CTE, tabla 6.14, pag.341)

Después de explicar el procedimiento a realizar respecto a la comprobación del ELU de Pandeo, se muestra la tabla con los valores correspondientes para la primera aproximación de los perfiles tanto para las barras que se conectan con los puntos más altos del tobogán como del pilar aislado vertical:

PANDEO						
BARRA 198 O323,9 e8						
CÁLCULOS			PLANO Y/Z			
$\lambda_{lim.}$	β	L(cm)	$L_{eq.}(cm)$	λ_y	λ_{zy}	Comprob. $\lambda_{zy} < 1$
86,81212049	0,707	1431	1011,717	90,331875	1,04054451	NO CUMPLE

Tabla 63. Comprobación esbeltez reducida pilares no verticales perfil O323,9

PANDEO						
BARRA 110 O355,6 e12,5						
CÁLCULOS			PLANO Y/Z			
$\lambda_{lim.}$	β	L(cm)	$L_{eq.}(cm)$	λ_z	$\underline{\lambda_z}$	Comprob. $\lambda_z < 1$
86,81193264	2	248,51	497,02	41,0760331	0,47316114	CUMPLE

Tabla 64. Comprobación esbeltez reducida pilar vertical

Así pues, había que aumentar el perfil de la barra 198 de 323,9 a 355,6 mm de diámetro y de 8 a 12mm de espesor ya que este no cumplía la condición de esbeltez reducida.

PANDEO						
BARRA 198 O355,6 e12,5						
CÁLCULOS			PLANO Y			
$\lambda_{lim.}$	β	L(cm)	$L_{eq.}(cm)$	λ_z	$\underline{\lambda_z}$	Comprob. $\lambda_z < 1$
86,8119326	0,707	1431	1011,717	83,6129752	0,963150717	CUMPLE

Tabla 65. Comprobación esbeltez reducida pilares no verticales O355,6

Una vez las esbelteces reducidas quedan claras, se tenía que comprobar los coeficientes de pandeo para cada barra con lo que queda:

CONFORMADO EN CALIENTE curva a BARRA 110			
α	ϕ_y	χ_y	Comprob. $\chi_y < 1$
0,49	0,67886521	0,8578775	CUMPLE

Tabla 66. Comprobación coeficiente de pandeo pilar vertical

CONFORMADO EN CALIENTE curva a BARRA 198			
α	ϕ_y	χ_y	Comprob. $\chi_y < 1$
0,49	1,15080158	0,5615987	CUMPLE

Tabla 67. Comprobación coeficiente de pandeo pilares no verticales

Con lo que se comprueban las fórmulas (3.19) y (3.21) y vemos que la estructura cumple a pandeo:

PANDEO	FÓRMULA (3.19)	FÓRMULA (3.21)	<1
BARRA 110	0,171460199	0,173413106	CUMPLE
BARRA 198	0,046820006	0,046840267	CUMPLE

Tabla 68. Comprobación ELU pandeo

3.5.3 Cimentación

Se define como cimentación al conjunto de elementos de la estructura encargados de transmitir sus cargas al suelo. Ya que el suelo tiene propiedades peores que los pilares de la estructura, se debe dimensionar la cimentación de manera que los esfuerzos que transmita al terreno no superen la presión admisible de este. De esta manera el área de contacto entre la cimentación y el suelo deberá ser proporcionalmente mayor a la de los elementos soportados.

En la realización de este punto se utilizará el CTE SE-C, es decir, la parte del CTE dirigida hacia el cálculo de los cimientos.

Según el CTE: “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.”

Para el dimensionamiento de la cimentación, hemos usado el método de los Estados Límite, en este caso se tendrán en cuenta los ELU de Vuelco, de Deslizamiento y de Hundimiento.

El Código Técnico de la Edificación nos indica que deben considerarse como ELU los debidos a las siguientes causas:

“-Estados Límite Últimos: asociados con el colapso total o parcial del terreno o con el fallo estructural de la cimentación.

-Pérdida de la capacidad portante del terreno de apoyo de la cimentación por hundimiento, deslizamiento o vuelco.

-Pérdida de la estabilidad global del terreno en el entorno próximo a la cimentación.

-Pérdida de la capacidad resistente de la cimentación por fallo estructural.

-Fallos originados por efectos que dependen del tiempo (durabilidad del material de la cimentación, fatiga del terreno sometido a cargas variables repetidas).”

3.5.3.1 Estado Límite Último de Vuelco

En este punto hemos analizado la estabilidad y el equilibrio de la cimentación mediante la comprobación del ELU de Vuelco. Para que esta cumpla los requisitos necesarios, debe cumplirse que:

$$E_{d,dst} \leq E_{d,stb} \quad (3.31)$$

siendo

$E_{d,dst}$ el valor del efecto de las acciones estabilizadoras

$E_{d,stb}$ el valor del efecto de las acciones desestabilizadoras

Inicialmente, solo teníamos certeza de que el peso propio de la estructura produce una acción estabilizante, ya que el resto de las acciones pueden ofrecer un efecto estabilizante o desestabilizante dependiendo de donde se encuentren respecto a la posible arista de vuelco. Las acciones que intervienen en el vuelco son los momentos sobre la posible arista de giro. Por tanto, se debe comprobar que:

$$\gamma_{E,dst} \cdot M_{dst} \leq \gamma_{E,stb} \cdot M_{stb} \quad (3.32)$$

donde

$\gamma_{E,dst}$ es el coeficiente parcial para el efecto de las acciones desestabilizadoras

$\gamma_{E,stab}$ es el coeficiente parcial para el efecto de las acciones estabilizadoras

M_{dst} son los momentos en la arista de vuelco que producen desestabilidad

M_{stb} son los momentos en la arista de vuelco que producen estabilidad

Los coeficientes parciales para el efecto de las acciones estabilizadoras y desestabilizadoras se extraen de la siguiente tabla:

Situación de dimensionado	Tipo	Materiales		Acciones	
		γ_R	γ_M	γ_E	γ_F
	Hundimiento	3,0 ⁽¹⁾	1,0	1,0	1,0
	Deslizamiento	1,5 ⁽²⁾	1,0	1,0	1,0
	Vuelco ⁽²⁾				
	Acciones estabilizadoras	1,0	1,0	0,9 ⁽³⁾	1,0
	Acciones desestabilizadoras	1,0	1,0	1,8	1,0
	Estabilidad global	1,0	1,8	1,0	1,0
	Capacidad estructural	- ⁽⁴⁾	- ⁽⁴⁾	1,6 ⁽⁵⁾	1,0

Tabla 69. Coeficientes de seguridad parciales (Fuente: CTE DB-C)

Por tanto, para el caso que nos ocupa tenemos:

$$0,9 \cdot \left(\frac{a^2}{2} \cdot b \cdot h \cdot \gamma_h \right) \geq 1,8 \cdot (M_d^h + h \cdot V_d^h - N_d^h \cdot \left(\frac{a}{2} + e_g \right)) \quad (3.33)$$

siendo

a el ancho de la zapata

b el largo de la zapata

h el canto de la zapata (espesor)

γ_h es el peso específico del hormigón, que en este proyecto se utiliza un hormigón HA-25, es decir, $\gamma_h = 25 \text{ kN/m}^3$.

e_g es la excentricidad de las acciones resultantes

En nuestro caso hemos obtenido una zapata diferente para cada grupo de nuestros pilares (Dos iguales para los pilares inclinados singulares, dos iguales para los pilares inclinados dobles, una para el pilar vertical y una para la base del tobogán). Por ello, en nuestro caso analizaremos el apoyo más desfavorable de cada caso para dimensionar la zapata. En este sentido, las dimensiones de las zapatas se obtienen a través de las diversas comprobaciones recogidas en la normativa:

a(cm)	b(cm)	h(cm)
150	100	80

Tabla 70. Zapata pilares singulares

a(cm)	b(cm)	h(cm)
250	300	80

Tabla 71. Zapata pilares dobles

a(cm)	b(cm)	h(cm)
80	120	80

Tabla 72. Zapata pilar vertical

a(cm)	b(cm)	h(cm)
100	300	80

Tabla 73. Zapata base tobogán

Para la comprobación del ELU de Vuelco, es necesario calcular los esfuerzos en la base de la zapata. Por tanto, con la ayuda del software SAP2000 hemos obtenido las reacciones en el apoyo del pilar crítico para cada caso sobre el terreno (unidades en kg y cm):

Joint	OutputCase	CaseType	F1	F2	F3	M1	M2	M3
36285	PP+VF (cimentación)	Combination	796,3589658	-780,3736007	1949,448382	-66421,5538	-59861,5708	2748,496513

Tabla 74. Reacciones en zapata pilares singulares

Joint	OutputCase	CaseType	F1	F2	F3	M1	M2	M3
36293	PP+VF (cimentación)	Combination	-1146,393561	-5064,53714	7596,869635	-134001,586	95407,45257	4314,150636

Tabla 75. Reacciones en zapata pilares dobles

Joint	OutputCase	CaseType	F1	F2	F3	M1	M2	M3
36275	PP+VF (cimentación)	Combination	-110,057156	-108,6198704	-116,869381	69489,40725	-14226,22736	-7289,21985

Tabla 76. Reacciones en zapata pilar vertical

Joint	OutputCase	CaseType	F1	F2	F3	M1	M2	M3
Base	PP+VF (cimentación)	Combination	-515,742439	-1668,390674	1370,642972	0	0	0

Tabla 77. Reacciones en zapata base del tobogán

Como todos los pilares están completamente centrados en sus respectivas zapatas, solo se debían desplazar los esfuerzos desde donde estuvieran al punto central de la base de las zapatas, además de añadir el peso propio de las zapatas en el centro de gravedad de estas. Con lo que los esfuerzos en la base de la zapata quedarían de la siguiente manera:

Joint	Nt (kp)	Vtz	Vty	Mty	Mtz
36285	4949,448382	796,3589658	780,3736007	3847,146488	3991,6657

Tabla 78. Esfuerzos en la zapata pilares singulares

Joint	Nt (kp)	Vtz	Vty	Mty	Mtz
36293	22596,86963	1146,393561	5064,53714	3695,967709	271161,3849

Tabla 79. Esfuerzos en la zapata pilares dobles

Joint	Nt (kp)	Vtz	Vty	Mty	Mtz
36275	2036,869381	110,057156	108,6198704	23030,79984	60799,81762

Tabla 80. Esfuerzos en la zapata pilar vertical

Joint	Nt (kp)	Vtz	Vty	Mty	Mtz
Base	7370,642972	515,7424391	1668,390674	41259,39513	133471,2539

Tabla 81. Esfuerzos en la zapata base del tobogán

Con los esfuerzos en la base de la zapata ya obtenidos, hemos realizado la comprobación del ELU de Vuelco, con las siguientes tablas como resultados:

ELU-VUELCO (Plano ZX)		Md,stb >= Md,dst
ESTABILIZADORAS (Md,stb)	387963,180	Cumple
DESESTABILIZADORAS (Md,dst)	114675,691	

Tabla 82. Comprobación del ELU de Vuelco plano ZX zapata pilares singulares

ELU-VUELCO (Plano ZY)		Md,stb >= Md,dst
ESTABILIZADORAS (Md,stb)	166538,278	Cumple
DESESTABILIZADORAS (Md,dst)	119558,797	

Tabla 83. Comprobación del ELU de Vuelco plano ZY zapata pilares singulares

ELU-VUELCO (Plano ZX)		Md, stb >= Md, dst
ESTABILIZADORAS (Md, stb)	2459607,498	Cumple
DESESTABILIZADORAS (Md, dst)	171733,415	

Tabla 84. Comprobación del ELU de Vuelco plano ZX zapata pilares dobles

ELU-VUELCO (Plano ZY)		Md, stb >= Md, dst
ESTABILIZADORAS (Md, stb)	3415224,075	Cumple
DESESTABILIZADORAS (Md, dst)	241202,855	

Tabla 85. Comprobación del ELU de Vuelco plano ZY zapata pilares dobles

ELU-VUELCO (Plano ZX)		Md, stb >= Md, dst
ESTABILIZADORAS (Md, stb)	73327,298	Cumple
DESESTABILIZADORAS (Md, dst)	41455,440	

Tabla 86. Comprobación del ELU de Vuelco plano ZX zapata pilar vertical

ELU-VUELCO (Plano ZY)		Md, stb >= Md, dst
ESTABILIZADORAS (Md, stb)	109990,947	Cumple
DESESTABILIZADORAS (Md, dst)	109439,672	

Tabla 87. Comprobación del ELU de Vuelco plano ZY zapata pilar vertical

ELU-VUELCO (Plano ZX)		Md, stb >= Md, dst
ESTABILIZADORAS (Md, stb)	331678,934	Cumple
DESESTABILIZADORAS (Md, dst)	74266,911	

Tabla 88. Comprobación del ELU de Vuelco plano ZX base tobogán

ELU-VUELCO (Plano ZY)		Md, stb >= Md, dst
ESTABILIZADORAS (Md, stb)	995036,801	Cumple
DESESTABILIZADORAS (Md, dst)	240248,257	

Tabla 89. Comprobación del ELU de Vuelco plano ZY base tobogán

Como se comprueba en las tablas anteriores, la hipótesis del ELU de Vuelco se cumple en nuestra cimentación.

3.5.3.2 Estado Límite Último de Deslizamiento

Inicialmente, para comprobar que la resistencia del terreno es efectiva en nuestro proyecto, se debe llevar a cabo la comprobación del ELU de Deslizamiento.

Para esta hipótesis es necesario seguir las instrucciones del Código Técnico de la Edificación que nos indican que se debe comprobar la siguiente fórmula:

$$V_T \leq \frac{1}{\gamma_R} \cdot (N_T \cdot tg(\phi_d)) \quad (3.34)$$

siendo

V_T el cortante total en la base de la zapata

γ_R es el coeficiente parcial de resistencia, cuyo valor se puede observar en la tabla 60 del presente proyecto

N_T es el esfuerzo normal total en la base de la zapata

ϕ_d es el ángulo de rozamiento interno de cálculo entre cemento y terreno, este valor deriva del ángulo de rozamiento entre cemento y terreno ϕ , pero afectado de un coeficiente de minoración $\phi_d = 2/3 \cdot \phi$."

Como no se ha hecho un estudio geotérmico del suelo donde se va a colocar la cimentación, hemos escogido la situación más desfavorable, quedando el siguiente ángulo a partir de las indicaciones del CTE:

siendo

	Muy suelto	Suelto	Medio- denso	Denso	Muy denso
Ángulo de rozamiento interno del terreno	30°	32°	34° 36°	38° 40°	42°

Tabla 90. Ángulo de rozamiento interno en función del terreno (Fuente CTE-DB-SE-C Tabla 4.1 página 28)

$$\phi = 30^\circ, \phi_d = 2/3 \cdot 30 = 20^\circ \quad (3.35)$$

Por tanto, con la metodología pertinente descrita, podemos analizar el ELU de Deslizamiento con las siguientes tablas:

ELU-DESLIZAMIENTO		$R_d \geq E_d$
FUERZAS ANTIDESLIZANTES	1200,968	Cumple
FUERZAS DESLIZANTES(E_d)	1114,976	

Tabla 91. Comprobación del ELU de Deslizamiento zapatas pilares singulares

ELU-DESLIZAMIENTO		$R_d \geq E_d$
FUERZAS ANTIDESLIZANTES	5483,057	Cumple
FUERZAS DESLIZANTES(E_d)	5192,664	

Tabla 92. Comprobación del ELU de Deslizamiento zapatas pilares dobles

ELU-DESLIZAMIENTO		$R_d \geq E_d$
FUERZAS ANTIDESLIZANTES (R_d)	494,240	Cumple
FUERZAS DESLIZANTES(E_d)	154,631	

Tabla 93. Comprobación del ELU de Deslizamiento zapata pilar vertical

ELU-DESLIZAMIENTO		$R_d \geq E_d$
FUERZAS ANTIDESLIZANTES (R_d)	1788,463	Cumple
FUERZAS DESLIZANTES(E_d)	1746,287	

Tabla 94. Comprobación del ELU de Deslizamiento zapata base tobogán

3.5.3.3 Estado Límite Último de Hundimiento

Para que la resistencia de cualquier suelo cumpla efectivamente, debe cumplir tanto el ELU de Deslizamiento como el de Hundimiento.

Por tanto, como indica el CTE: “el hundimiento se alcanzará cuando la presión actuante (total bruta) sobre el terreno bajo la cimentación supere la resistencia característica del terreno frente a este modo de rotura.” La condición para evitar el ELU de Hundimiento se expresa como:

$$E_d \leq R_d \quad (3.36)$$

donde

E_d es el valor de cálculo del efecto de las acciones

R_d es el valor de cálculo de la resistencia del terreno

Por tanto, la verificación se queda como:

$$q_b \leq q_s \quad (3.37)$$

$$q_b = \sigma = \frac{N_T}{(a-2|e| \cdot b)} \leq \sigma_{adm} = q_s \quad (3.38)$$

siendo

a la dimensión total del apoyo

e la excentricidad del apoyo

N_t la resultante de fuerzas verticales, en el caso de nuestro pilar sería:

$$N_T = N + P_z \quad (3.39)$$

donde

N es el axil aportado por el pilar a la cimentación

P_z es el peso de la zapata el cual se puede calcular con la siguiente expresión:

$$P_z = \gamma_h \cdot h \cdot a \cdot b = 0,025 \cdot 50 \cdot 390 \cdot 390 = 19400,51 \text{ kg} \quad (3.40)$$

Con lo que nos queda:

$$N_T = 9,8 \cdot (7326,09 + 19400,51) = 261920 \text{ N} \quad (3.41)$$

Así pues, la comprobación del ELU de Hundimiento se comprueba en las siguientes tablas:

ELU-HUNDIMIENTO		$R_d \geq E_d$
Resistencia característica del terreno (R_d)	2,5	Cumple
Presión actuante total bruta (E_d)	0,356	

Tabla 95. Comprobación del ELU de Hundimiento zapata pilares singulares

ELU-HUNDIMIENTO		$R_d \geq E_d$
Resistencia característica del terreno (R_d)	2,5	Cumple
Presión actuante total bruta	0,375	

Tabla 96. Comprobación del ELU de Hundimiento zapata pilares dobles

ELU-HUNDIMIENTO		$R_d \geq E_d$
del terreno (R_d)	2,5	Cumple
(E_d)	0,709	

Tabla 97. Comprobación del ELU de Hundimiento zapata pilar vertical

ELU-HUNDIMIENTO		$R_d \geq E_d$
del terreno (R_d)	2,5	Cumple
(E_d)	0,417	

Tabla 98. Comprobación del ELU de Hundimiento zapata base tobogán

3.5.4 Placa de Anclaje

Las placas de anclaje sirven como punto de unión entre la cimentación y los pilares metálicos de la estructura.

En este apartado se describen las hipótesis necesarias a realizar para la comprobación de la placa de anclaje de cara a poder cumplir con sus funciones principales de forma positiva (la transmisión de esfuerzos entre los soportes y la cimentación y la capacidad de resistir dichos esfuerzos). Para la comprobación de las mismas, solamente tendremos en cuenta el pilar más desfavorable y se colocarán placas de anclaje iguales en el resto de pilares.

Como nos indica el CTE: “la comprobación de la unión de un elemento metálico a otro de hormigón, como son las placas de anclaje (basas de soportes), requiere verificar la existencia de resistencia suficiente frente a los esfuerzos transmitidos en la región de contacto, considerando, tanto la resistencia del hormigón de dicha región, como la de los elementos metálicos que materializan el contacto.”

Por consiguiente, debemos tener en cuenta el agotamiento de la placa y el de la sección de acero.

3.5.4.1 Apoyo de la placa

Entre la placa de apoyo y la cimentación siempre se sitúa una capa intermedia de mortero. Es por esto por lo que se calcula la resistencia de cálculo de la unión (f_{jd}) como:

$$f_{jd} = \beta_j \cdot k_j \cdot f_{cd} \quad (3.42)$$

siendo

β_j el coeficiente de la junta

k_j el factor de concentración, el cual tiene en cuenta la mejora de la resistencia por el efecto de confinamiento del hormigón bajo la placa.

f_{cd} la resistencia de cálculo del hormigón, que se determina mediante la siguiente ecuación:

Teniendo en cuenta el caso más desfavorable ($f_{jd} = f_{cd}$) resulta:

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{25}{1,5} = 16,667 \text{ N/mm}^2 \quad (3.43)$$

Dejando así claros los coeficientes de apoyo de la placa con el terreno.

3.5.4.2 Modelo mecánico

Las placas de anclaje han sido construidas con acero S275JR. 4 pernos B500SD dispuestos de forma simétrica y dos cartelas conforman el resto de los elementos que se usan para cumplir las especificaciones requeridas de la placa. Así pues, pasamos a dimensionar nuestras placas de anclaje de la siguiente forma:

$$a = 160 + a_p + 160 \quad (3.44)$$

$$b = 80 + b_p + 80 \quad (3.45)$$

$$d' = 60 \quad (3.46)$$

El perfil utilizado en nuestros pilares tenía un diámetro $\phi = 355,6$ mm. Por tanto, nuestra placa de anclaje queda con las siguientes medidas con números enteros para una conformación más sencilla de esta:

$$a = 680 \text{ mm}$$

$$b = 520 \text{ mm}$$

$$d' = 60 \text{ mm}$$

siendo

a el ancho de la placa de anclaje

b el largo de la placa de anclaje

d' la distancia de los pernos al borde de la placa de anclaje

A continuación, se debe calcular la superficie portante, que como define el CTE es: “la suma de la superficie de la sección de la pieza del soporte (en el caso estudiado la superficie del perfil utilizado para todos los pilares) que se suelda a la placa de base más la que aporta la anchura suplementaria de apoyo (c) alrededor del perímetro de la sección del soporte siempre y cuando ésta no exceda las dimensiones de la placa.”

Así pues, se determina la anchura suplementaria del apoyo según el CTE como:

$$c = e \cdot \left(\frac{f_{yd}}{3 \cdot f_{jd}} \right)^{0,5} \quad (3.47)$$

siendo

e el espesor de la placa de anclaje, se toma como 22mm para la primera estimación

f_{yd} la resistencia de cálculo de la placa de anclaje, que al ser acero S275JR se toma como:

$$f_{yd} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{275}{1.05} = 261,9 \text{ N/mm}^2 \quad (3.48)$$

Con lo que la anchura suplementaria resulta:

$$c = 22 \cdot \left(\frac{261.9}{3 \cdot 16.6667}\right)^{0.5} = 50,351 \text{ mm} \quad (3.49)$$

Al comprobar si hay solape, se observa que no hay ningún tipo de solapamiento en toda nuestra área eficaz ya que se cumple que $2 \cdot c \leq \varnothing_{int}$, por tanto, esta se calcula como:

$$A_p = \pi \cdot (R_{ext} + c)^2 - (R_{int} - c)^2 = 1168,74 \text{ cm}^2 \quad (3.50)$$

Por último, se comprueba el modelo mecánico para ver cómo trabaja la placa de anclaje:

$$e_d = \frac{M_{Ed}}{N_{Ed}} \leq \frac{W_p}{A_p} \quad (3.51)$$

donde

M_{Ed} es el momento de cálculo

N_{Ed} es el axil de cálculo

W_p es el módulo resistente elástico

Como nuestro proyecto trata de una estructura que está empotrada en el punto de contacto con el suelo, hay que comprobar cómo trabaja la placa de anclaje.

Comprobación:	N_{Ed}	M_{Ed}	A_p	W_p	M_{Ed}/N_{Ed}	W_p/A_p	$M_{Ed}/N_{Ed} \leq W_p/A_p$
Compresión							
Simple o Flexión							
Compuesta	7326,0945	162596,739	1168,74481	1117	22,1941908	0,95572617	Flexión Compuesta

Tabla 99. Comprobación del modelo de trabajo de la placa de anclaje

Por tanto, al ver la comprobación de la tabla anterior, sabemos que la placa trabaja a flexión compuesta y por consiguiente estamos en el modelo de cálculo II.

A continuación, con las instrucciones del CTE: hemos llegado a la conclusión de que "Para la realización correcta de la placa de anclaje se deben verificar los siguientes Estados Límite:

- ELU de Agotamiento del apoyo.
- ELU de Agotamiento de la placa a flexión.
- ELU de Agotamiento de los pernos.
- ELU de Anclaje de los pernos en el hormigón."

Como el proyecto estudia una estructura que desarrolla una carga de flexión compuesta sobre la placa de anclaje, es necesario comprobar todos y cada uno de los ELU citados anteriormente.

3.5.4.3 Estado Límite Último de Agotamiento del Apoyo

Para empezar, se debe comprobar el ELU de Agotamiento del Apoyo. Puesto que trabajamos con una placa a flexión compuesta, la hipótesis a comprobar es la siguiente:

$$y \leq a/4 \quad (3.52)$$

despejando y de:

$$M_{Ed} + N_{Ed} \cdot \frac{a}{2} - d' = b' \cdot y \cdot f_{jd} \cdot (a - d' - \frac{y}{2}) \quad (3.53)$$

donde

M_{Ed} es el momento producido sobre la placa de anclaje

N_{Ed} es el axil aplicado sobre la placa de anclaje

b' es el nuevo ancho de actuación de las acciones:

$$b' = 4c + 2e_c = 4 \cdot 50,35 + 2 \cdot 10 = 221,4 \text{ mm} \quad (3.54)$$

Con lo que nos queda $y = 50,37 \text{ mm}$ con lo que se cumple la hipótesis

$$y = 50,37 \leq 168,9 = a/4$$

Así pues, al cumplirse la condición de ductilidad, no se alcanza el ELU de Agotamiento del Apoyo y por consiguiente la placa cumple.

3.5.4.4 Estado Límite Último de Agotamiento de la placa a flexión

Para comprobar que la placa cumple, a parte de la condición de ductilidad, también se tiene que cumplir el ELU de Agotamiento a flexión.

Inicialmente se obtiene la tracción en los pernos (T_d) a partir del equilibrio de fuerzas verticales:

$$T_d = f_{jd} \cdot b' \cdot y - N_{Ed} = 178539,58 \text{ N} \quad (3.55)$$

Entonces, calculando el momento máximo que se produce en A y B, de la sección de la placa:

Como $y = 50,37 < 160 = v$ (vuelo),

$$M_{A,Ed} = f_{jd} \cdot b' \cdot y \cdot (v - y/2) = 25057480,53 \text{ N} \cdot \text{mm} \quad (3.56)$$

$$M_{B,Ed} = T_d \cdot (v - d') = 17853958 \text{ N} \cdot \text{mm} \quad (3.57)$$

Con lo que el momento a tener en cuenta es $M_{A,Ed}$ ya que es el de la sección más desfavorable de la placa. Para esta sección, el módulo elástico es:

$$W = \frac{I_G}{h_c + e_p + y_G} = \frac{298760650,5}{150 + 80 - 41,84} = 1587801,1 \text{ mm}^3 \quad (3.58)$$

siendo

I_G la inercia del conjunto de la placa y las cartelas

h_c la altura de las cartelas

e_p el espesor de la placa

y_G el centro de gravedad del conjunto respecto del de la placa de anclaje sin cartelas

Así pues, se comprueba la resistencia a flexión:

$$\frac{M_{max}}{f_{yd} \cdot W} = 0,06 < 1 \quad (3.59)$$

Con lo que se cumple la hipótesis y por tanto el ELU de Agotamiento de la placa a flexión.

3.5.4.5 Estado Límite Último de Agotamiento de los pernos

Después del dimensionado de la placa, se procede a dimensionar los pernos para el anclaje de esta a la cimentación.

Al disponer de un empotramiento, modelo de carga tipo II, hay que comprobar siguiendo las comprobaciones del CTE cuantos pernos hacen falta para el anclaje.

Para ello, hemos tenido que calcular la tensión a partir de la ecuación de compatibilidad de deformaciones:

$$\frac{\varepsilon_c}{x} = \frac{\varepsilon_s}{d-x} \quad (3.60)$$

siendo

$$x = \frac{y}{0,8} = 62,96 \text{ mm} \quad (3.61)$$

$$d = a - d' = 675,6 - 50 = 575,6 \text{ mm} \quad (3.62)$$

$$\varepsilon_c = 0,0035 \quad (3.63)$$

Por lo cual

$$\varepsilon_s = 0,035$$

A continuación, hemos comprobado si los pernos han plastificado:

$$\sigma_s = E \cdot \varepsilon_s = 0,035 \cdot 200000 = 7000 \text{ N/mm}^2 > 500/1,15 = 434,78 \text{ N/mm}^2 \quad (3.64)$$

Los pernos están plastificados por lo que hemos calculado la sección de acero necesaria para soportar el T_d a la tensión de plastificación.

$$\sigma_s = T_d / A_s \quad (3.65)$$

Por tanto, despejando el área, nos queda

$$A_s = 410,64 \text{ mm}^2$$

Comprobamos con el diámetro de 20 mm para ver el número de pernos necesarios:

$$n_p = 1 + \text{INT} (A_s / A_{rp}) = 2 < 4 \quad (3.66)$$

donde

n_p es el número de pernos necesario

A_s es el área solicitada

A_{rp} es el área unitaria de los pernos

Podemos afirmar que nuestra placa cumple el ELU de Agotamiento de los pernos.

3.5.4.6 Estado Límite Último de Anclaje de los pernos

El objetivo de este punto es determinar la longitud ($l_a = l_{b,net}$) que el perno debe tener embebida en el hormigón. Esta longitud deberá ser la suficiente para impedir la pérdida de adherencia antes de alcanzarse la sollicitación máxima del perno T_ϕ .

La longitud básica de anclaje (l_b), es la longitud necesaria para que la barra pueda agotarse antes de arrancarse.

Para la conexión entre la placa de anclaje y la cimentación en este proyecto, se ha optado por el uso de 4 pernos corrugados en prolongación recta. Para este caso concreto, la longitud básica de anclaje se obtiene de la siguiente manera:

$$l_b = \max\left(m \cdot \phi^2, \frac{f_{yk}}{20} \cdot \phi\right) \quad (3.67)$$

siendo

ϕ el diámetro de la barra

f_{yk} la resistencia característica del acero

m un coeficiente de unión que depende del hormigón utilizado en la cimentación y del acero de los pernos. Se calcula de acuerdo con lo establecido en la EHE a partir de la siguiente tabla:

f_{ck} (N/mm ²)	m	
	B 400 S (SD)	B 500 S (SD)
HA-25	1,2	1,5
HA-30	1,0	1,3
HA-35	0,9	1,2
HA-40	0,8	1,1

Tabla 100. Determinación del parámetro m (Fuente: EHE, tabla 66.5.1.2.a)

A continuación, con el valor del coeficiente $m = 1.5$ determinado, hemos podido calcular la longitud básica:

$$l_b = \max\left(1,5 \cdot 20^2; \frac{500}{20} \cdot 20\right) = \max(600; 500) = 600 \text{ mm}$$

Por último, se calcula la longitud de anclaje, que es igual a la longitud básica neta como se muestra en la EHE. Su cálculo es el siguiente:

$$l_a = l_{b,net} = l_b \cdot \beta \cdot \frac{A_s}{A_{s,real}} \quad (3.67)$$

siendo

A_s el área nominal resistente de los pernos a tracción

$A_{s,real}$ el área real resistente a tracción de los pernos a tracción

β el factor de reducción, cuyo valor encontramos en la siguiente tabla que viene recomendada por la EHE:

TIPO DE ANCLAJE	Tracción	Compresión
Prolongación recta	1,0	1,0
Patilla, gancho y gancho en U	0,7	1,0
Barra transversal soldada	0,7	0,7

Tabla 101. Determinación del factor de reducción β (Fuente: EHE, tabla 69.5.1.2)

Para que se garantice el cumplimiento del ELU de Anclaje de los Pernos la EHE nos proporciona unos valores mínimos para la longitud de anclaje. Con esto la longitud de anclaje queda:

$$l_a = l_{b,neto} = 600 \cdot 1 \cdot \frac{0,8 \cdot \pi \cdot 10^2}{410,64} = 367,22 \text{ mm} > \max \begin{cases} 10 \cdot \varnothing = 200 \text{ mm} \\ 150 \text{ mm} \\ \frac{l_b}{3} = 200 \text{ mm} \end{cases} \quad (3.68)$$

Tras el cálculo, podemos observar que la longitud de anclaje necesaria es mayor que cualquiera de los valores mínimos que nos proporciona la EHE. Por tanto, $l_a = 367,22 \text{ mm}$ con lo que nos queda una placa de anclaje con las siguientes especificaciones:

- Dimensiones de la placa $\neq 675,6.515,6.22 \text{ mm}$
- Dimensiones de los 4 pernos de anclaje: $\varnothing = 20 \text{ mm}$ y $l_a = 367,22 \text{ mm}$.
- Dimensiones de la cartela $\neq 675,6.150.10 \text{ mm}$

4. CONCLUSIONES

En este proyecto se ha diseñado y se ha realizado el cálculo estructural de una atracción acuática, concretamente un tobogán, para su colocación en Aquarama (Benicàssim).

Todo el diseño se ha realizado mediante el uso de la normativa vigente. Inicialmente, se fueron alternando diseños en el software AutoCAD hasta encontrar el ideal en forma y tamaño para nuestro proyecto.

Se ha tenido en cuenta la norma para el diseño de toboganes a la hora de elegir el diámetro del tubo de recorrido de la atracción. A partir de tener nuestro diseño en AutoCAD, se pudo llevar a cabo la introducción de la estructura en el programa de cálculo estructural SAP2000, donde se aplicarían todas las cargas pertinentes a la estructura.

Así, las cargas se aplicaron en cada elemento del tubo teniendo en cuenta el ángulo y la altura del mismo. Para ello, fue indispensable utilizar una discretización de la estructura en la que se dividía en tramos de 0,5 metros de altura con 10º en coordenadas cilíndricas a lo largo del tubo. Una vez terminada la aplicación de las cargas en cada elemento del tubo, se han introducido las diferentes combinaciones de cargas pertinentes a nuestros cálculos.

Seguidamente, se han comprobado las condiciones necesarias para garantizar la seguridad de las personas y la estética de la estructura (ELU y ELS de la estructura, de la cimentación y de la placa de anclaje), siguiendo las instrucciones de la normativa española vigente en cuanto a comprobaciones estructurales en España (CTE, EHE, EAE), con la ayuda del software Excel.

A continuación, se ha elaborado el cálculo del presupuesto del proyecto con el uso del programa Arquímedes de CYPE, cuyo precio asciende a 69.300,26 €.

Finalmente, para completar nuestro proyecto, se han hecho los planos pertinentes a la estructura, poniendo en detalle los aspectos técnicos más importantes como pueda ser la base, las cimentaciones o las placas de anclaje.

5. PRESUPUESTO

Num. Código	Ud	Denominación	Cantidad	Precio (€)	Total (€)
1.1 ADL010	m ²	Desbroce y limpieza del terreno, profundidad mínima de 25 cm, con medios manuales, retirada de los materiales excavados y carga a camión, sin incluir transporte a vertedero autorizado.	450,000	4,97	2.236,50
1.2 ADE010	m ³	Excavación en zanjas para cimentaciones en cualquier tipo de terreno, con medios mecánicos, retirada de los materiales excavados y carga a camión.	22,368	27,83	622,50
Total presupuesto parcial nº 1 MOVIMIENTO DE TIERRAS:					2.859,00

Num. Código	Ud	Denominación	Cantidad	Precio (€)	Total (€)
2.1 CSZ010	m ³	Zapata de cimentación de hormigón armado HA-25/B/20/IIa fabricado en central y vertido desde camión, acero UNE-EN 10080 B 500 S, cuantía 50 kg/m ³ .	22,368	142,34	3.183,86
2.2 CSZ015	m ³	Hormigón de limpieza HM-10/B/20/I fabricado en central y vertido desde camión.	2,946	79,34	233,74
2.3 EAS006b	Ud	Placa de anclaje de acero S275JR en perfil plano, de 680x520 mm y espesor 20 mm, i.i. con pernos de acero corrugado UNE-EN 10080 B 500 SD de 20 mm de diámetro y 36,5 cm de longitud total, atornillados con arandelas, tuerca y contratuerca.	6,000	379,37	2.276,22
2.4 EAZ010	kg	Acero laminado UNE-EN 10025 S275JR, en pieza simple de perfiles laminados en caliente de las series L, LD, T, redondo, cuadrado, rectangular y pletina, acabado con imprimación antioxidante, conformando elementos de empotramiento, apoyo y rigidización, trabajado en taller y fijado mediante soldadura, para refuerzo estructural colocado a una altura de hasta 3 m. Incluye: Limpieza y preparación del plano de apoyo. Replanteo y marcado de los ejes. Colocación y fijación provisional del elemento. Nivelación y aplomado. Ejecución de las uniones soldadas. Criterio de medición de proyecto: Peso nominal medido según documentación gráfica de Proyecto. Criterio de medición de obra: Se determinará, a partir del peso obtenido en báscula oficial de las unidades llegadas a obra, el peso de las unidades realmente ejecutadas según especificaciones de Proyecto. Criterio de valoración económica: El precio incluye las soldaduras, los cortes, los despuntes, las piezas especiales, los casquillos y los elementos auxiliares de montaje.	467,006	3,91	1.825,99
Total presupuesto parcial nº 2 CIMENTACIONES:					7.519,81

Num. Código	Ud	Denominación	Cantidad	Precio (€)	Total (€)
3.1 EAV010	kg	Perfiles redondos de acero S275JR laminados en caliente con uniones soldadas i.i parte proporcional de soldaduras y montaje.	8.508,090	2,50	21.270,23
3.2 C02	kg	Fabricación de tubo para la atracción mediante un polímero compuesto termoestable, compuesto por resinas viniléster y refuerzo de fibra de vidrio; i.i. uniones, lijados de las distintas piezas y montaje.	1.423,600	8,55	12.171,78
Total presupuesto parcial nº 3 ESTRUCTURA Y TUBO:					33.442,01

Num. Código	Ud	Denominación	Cantidad	Precio (€)	Total (€)
4.1 GTA010	m ³	Transporte de tierras con camión a vertedero específico, instalación de tratamiento de residuos de construcción y demolición externa a la obra o centro de valorización o eliminación de residuos, situado a una distancia máxima de 10 km.	1,000	5,44	5,44
4.2 GRA010	Ud	Transporte de residuos inertes metálicos producidos en obras de construcción y/o demolición, con contenedor de 7 m ³ , a vertedero específico, instalación de tratamiento de residuos de construcción y demolición externa a la obra o centro de valorización o eliminación de residuos.	1,000	212,07	212,07
4.3 GRA010b	Ud	Transporte de residuos inertes de hormigón producidos en obras de construcción y/o demolición, con contenedor de 1,5 m ³ , a vertedero específico, instalación de tratamiento de residuos de construcción y demolición externa a la obra o centro de valorización o eliminación de residuos.	1,000	65,25	65,25
Total presupuesto parcial nº 4 GESTIÓN DE RESIDUOS:					282,76

Num. Código	Ud	Denominación	Cantidad	Precio (€)	Total (€)
5.1 F01	Ud	Partida alzada en materia de seguridad y salud	1,000	435,62	435,62
		Total presupuesto parcial nº 5 SEGURIDAD Y SALUD:			435,62



Num. Código	Ud	Denominación	Cantidad	Precio (€)	Total (€)
6.1 C01	Ud	Partida alzada que incluye todos los trabajos de ingeniería incluidos en el proyecto: Estudio de viabilidad, Redacción de proyecto, Dirección de obra	1,000	2.600,00	2.600,00
Total presupuesto parcial nº 6 REDACCIÓN DE PROYECTO Y TRABAJO DE IN- GEN...					
2.600,00					

PRESUPUESTO

PP01. MOVIMIENTO DE TIERRAS	2.859,00 €
PP02. CIMENTACIONES	7.519,81 €
PP03. ESTRUCTURA Y TUBO	33.442,01 €
PP04. GESTIÓN DE RESIDUOS	282,76 €
PP05. SEGURIDAD Y SALUD	435,62 €
PP06. REDACCIÓN DE PROYECTO Y TRABAJO DE INGENIERÍA	2.600,00 €
TOTAL ACTUACIÓN	47.139,20 €
BENIFICIO INDUSTRIAL (13%)	6.128,10 €
GASTOS GENERALES (6%)	2.828,35 €
TOTAL PEM	56.095,65 €
IVA (21%)	11.780,09 €
TOTAL PEC	67.875,74 €
HONORARIOS PROFESIONALES	
Redacción de Proyecto	542,09 €
Dirección de obra	229,47 €
Coordinación de Seguridad y Salud	55,73 €
Tasación Parcela	350,00 €
Total	1.177,29 €
IVA (21%)	247,23 €
TOTAL HONORARIOS	1.424,52 €
TOTAL ACTUACIÓN	69.300,26 €

El presupuesto de ejecución por contrata asciende a la cantidad expresada de SESENTA Y NUEVE MIL TRESCIENTOS EUROS CON VEINTISÉIS CÉNTIMOS.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Código Técnico de la Edificación y sus documentos básicos (DB-SE, DB-AE, DB-SE A, DB-SE C).
- Eurocódigo 1.4: Acciones en Estructuras. Acciones de Viento.
 - Elasticidad y resistencia de materiales. Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de Mecánica de los Medios Continuos y Teoría de Estructuras. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia, ca. 2007.
 - Estructuras metálicas. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Madrid: Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, D.L. 1973.
- EAE Instrucción de Acero Estructural.
- EHE-08 Instrucción de Hormigón Estructural.
- Análisis, diseño y cálculo de una cruz sobre la Torre de Jesús en el templo expiatorio de La Sagrada Familia. J.M. Molines Cano (DEA 2015)
- MatWeb Material Property Data

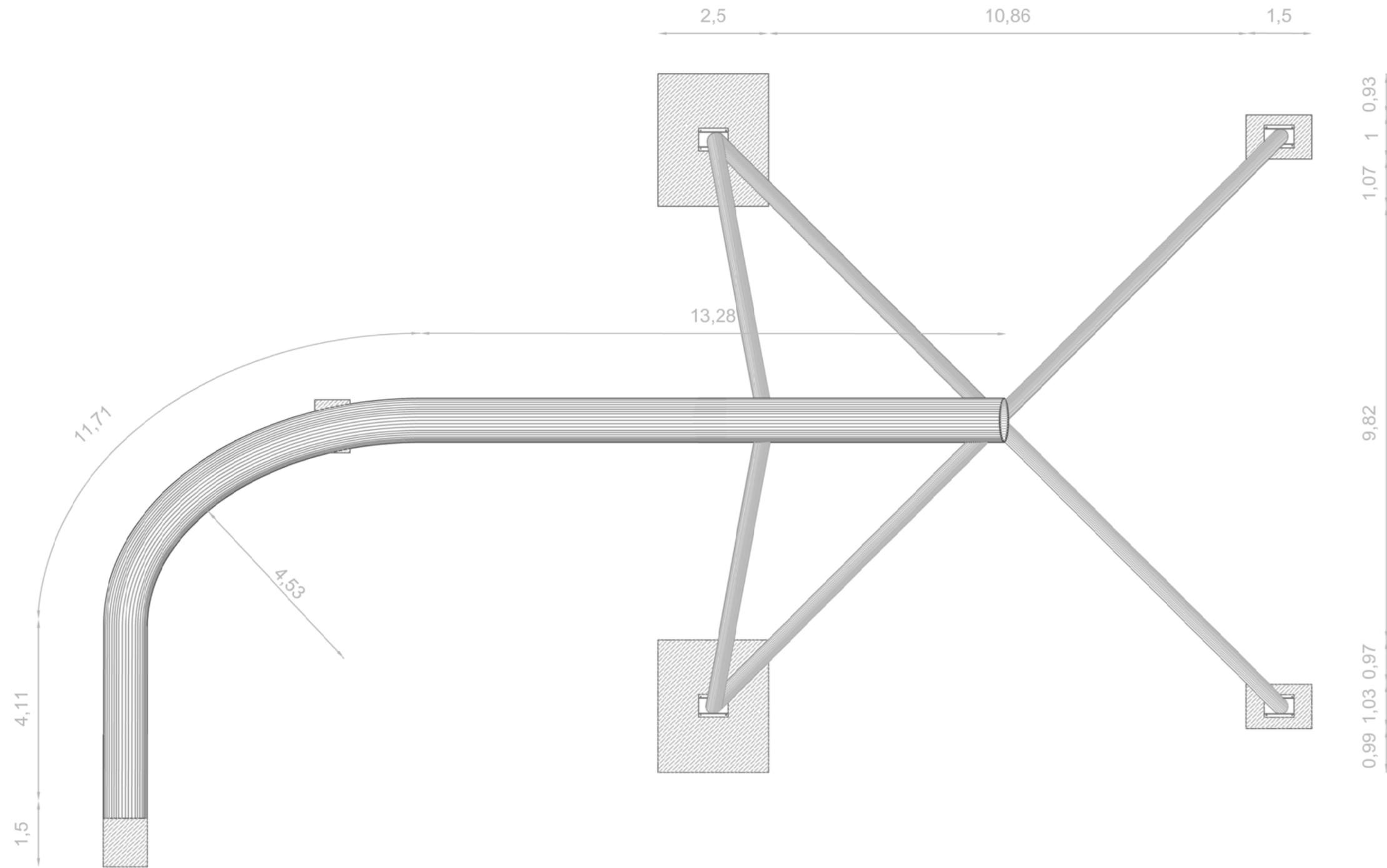
7. SOFTWARE UTILIZADO

- SAP2000 v16. CSI América.
- AutoCAD2021. Autodesk.
- Microsoft Office (Word, Excel, Powerpoint, Access).
- Arquímedes. CYPE.



8. PLANOS







TRABAJO FINAL DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INDUSTRIAL VALENCIA

Proyecto: PROYECTO DE UNA ESTRUCTURA PORTANTE PARA UNA ATRACCIÓN ACUÁTICA EN EL PARQUE DE ATRACCIONES AQUARAMA DE BENICÀSSIM

Plano: Alzado

Autor: Carlos Centelles Mangriñan

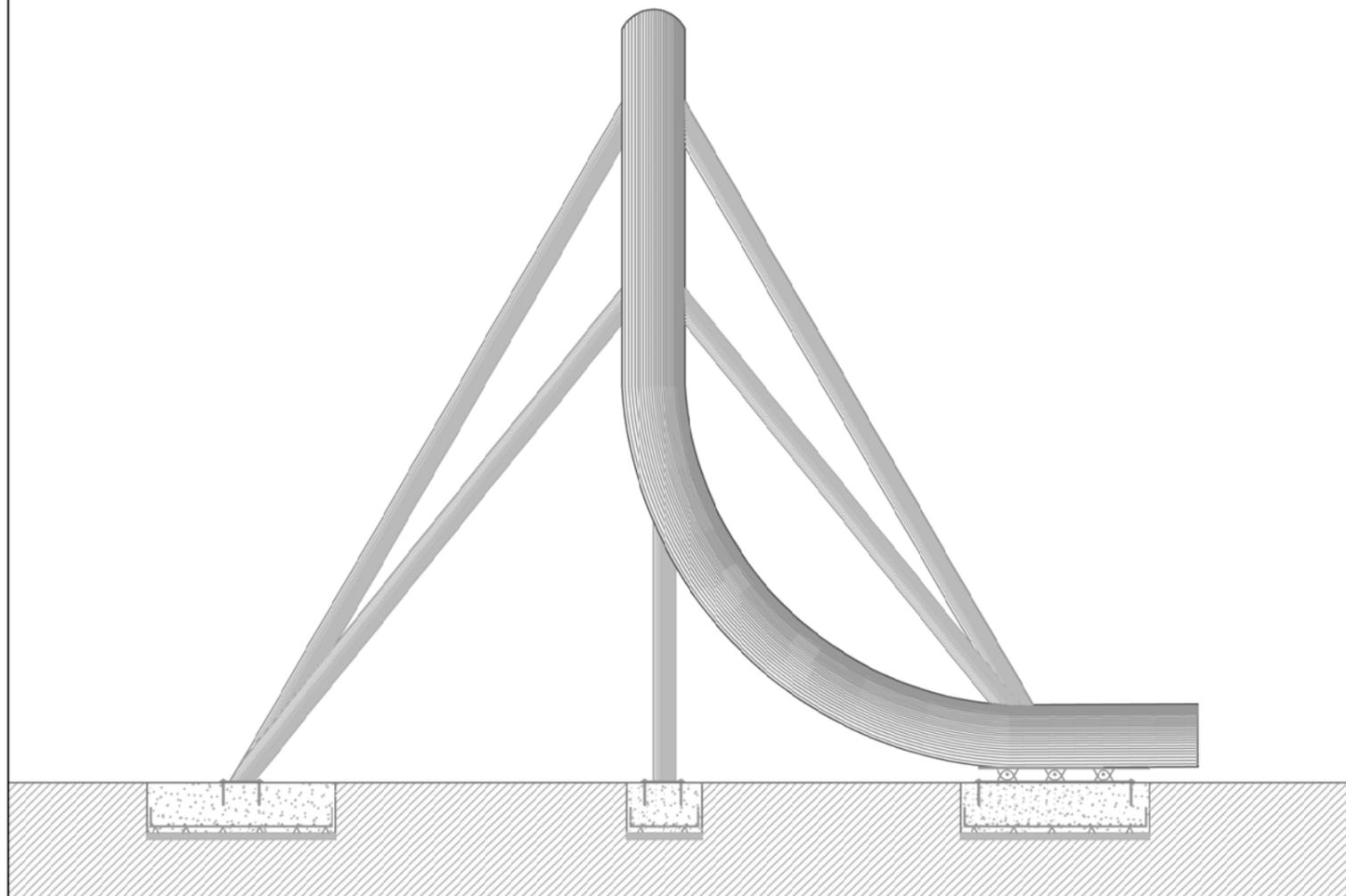
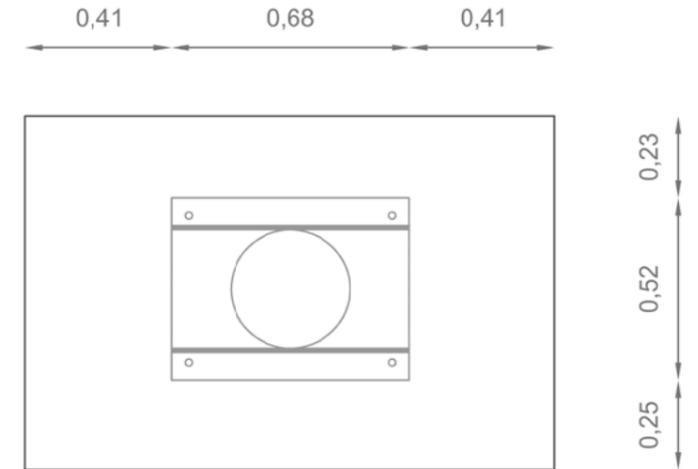
Fecha: Febrero 2021

Escala: 1:100

Nº Plano:

3

DETALLE 1

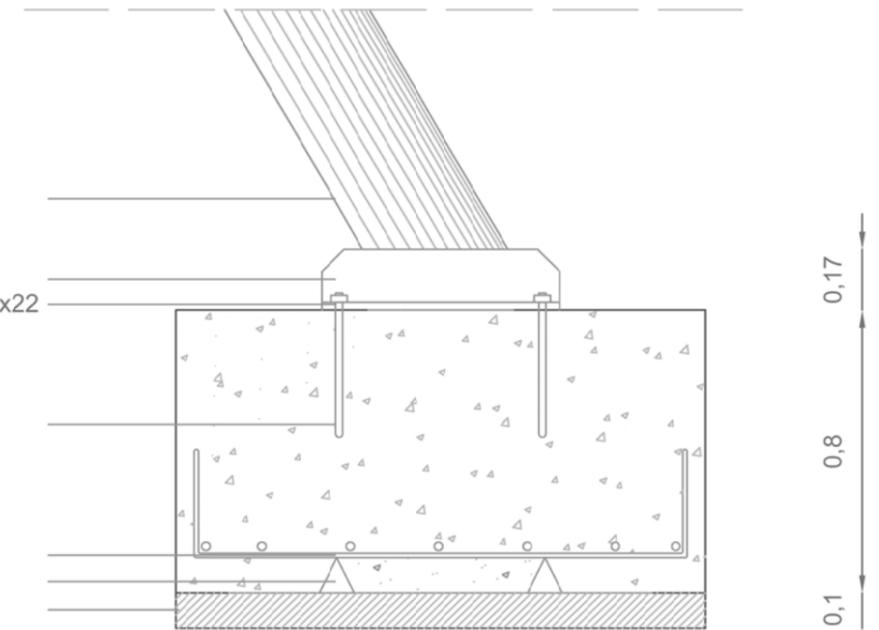


Perfil tubular 273x1,25

Cartela 680x150x10
Placa de anclaje 680x520x22

Pernos corrugados Ø 20

Armadura inferior Ø16
Separadores
Hormigón de limpieza



TRABAJO FINAL DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INDUSTRIAL VALENCIA

Proyecto: **PROYECTO DE UNA ESTRUCTURA PORTANTE PARA UNA ATRACCIÓN ACUÁTICA EN EL PARQUE DE ATRACCIONES AQUARAMA DE BENICÀSSIM**

Plano: **Perfil y Detalle**

Autor: **Carlos Centelles Mangriñan**

Fecha: **Febrero 2021**

Escala: **1:100**

Nº Plano:

4