



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

Diseño y cálculo estructural de un tramo de 75 metros de longitud de una montaña rusa situada en San Martín de la Vega, Madrid.

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

AUTOR/A: Llavador García, Javier

Tutor/a: Espinós Capilla, Ana

Cotutor/a: Lapuebla Ferri, Andrés

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023

AGRADECIMIENTOS

Quiero aprovechar la ocasión para agradecer todo el apoyo y guía a Ana y Andrés, mis tutores de TFG, que me han acompañado durante este último año en la elaboración de este trabajo y me han dado todas las facilidades posibles para su realización.

También agradecer a la casa Dlubal, por su concesión de licencias académicas para el diseño de la estructura, así como los distintos casos de carga.

Por último, agradecer a mi familia y amigos, que me han apoyado y animado a hacer este proyecto que se sale un poco de lo común, pero han apostado en todo momento por mi capacidad de llevarlo a cabo.

RESUMEN

El objetivo del presente Trabajo Final de Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales es el diseño y cálculo estructural de un tramo de 75 metros de longitud de una montaña rusa, situada en un parque de atracciones ubicado en la localidad de San Martín de la Vega, Madrid. La estructura que sustenta los raíles por los que circulará el vagón se resolverá mediante perfiles tubulares de acero. Se seleccionarán los perfiles estructurales óptimos para los casos de carga de proyecto. Se simularán las cargas de viento mediante un software específico de fluidomecánica computacional y se tendrán en cuenta las cargas de inercia provocadas por el movimiento del vagón. La cimentación sobre la que apoyará la estructura se ejecutará mediante zapatas aisladas, convenientemente relacionadas entre sí por medio de vigas de atado.

Palabras clave:

Montaña rusa; Parque de atracciones; Diseño y cálculo estructural; Estructura metálica; Perfil tubular hueco; Simulación por ordenador; Fluidomecánica computacional

RESUM

L'objectiu del present Treball Final de Grau d'Enginyeria en Tecnologies Industrials és el disseny i càlcul de l'estructura d'un tram de 75 metres de longitud d'una muntanya russa, situada en un parc d'atraccions ubicat en la localitat de San Martín de la Vega, Madrid. L'estructura que suporta els rails pels que circularà el vagó es resoldrà amb perfils tubulars d'acer. Es seleccionaran els perfils estructurals òptims per als casos de càrrega del projecte. Es simularan les càrregues de vent amb un software específic de fluidomecànica computacional i es tindran en compte les càrregues d'inèrcia provocades pel moviment del vagó. La cimentació sobre la que recolzarà l'estructura s'executarà amb sabates aïllades, convenientment relacionades entre elles per mig de bigues de lligat.

Paraules clau:

Muntanya russa; Parc d'atraccions; Disseny i càlcul estructural; Estructura metàl·lica; Simulació per ordinador; Perfil tubular; Fluidomecànica computacional.

ABSTRACT

The aim of this Bachelor Thesis for the Degree in Industrial Technology Engineering is the structural design of a section of a roller coaster of 75 meters length located in an amusement park placed in San Martín de la Vega, Madrid. The structure that supports the rails along which the wagon will ride will be solved by means of structural hollow sections. Optimal sections for the load cases considered in the project will be chosen. The wind loads will be simulated by means of a specific computational fluid dynamics software and the inertial loads caused by the wagon movement will be accounted for. The foundations that will support the structure will be designed by means of isolated concrete footings, conveniently connected through tie beams.

Keywords:

Roller coaster; Amusement park; Structural design; Steel structure; Structural hollow section; Computer simulation; Computational fluid dynamics

ÍNDICE

I. MEMORIA.....	10
1. ANTECEDENTES	11
1.1. OBJETO.....	11
1.2. ALCANCE	11
1.3. MOTIVACIÓN.....	11
1.4. ESTADO DEL ARTE.....	12
2. EMPLAZAMIENTO DEL EDIFICIO.....	17
2.1. DESCRIPCIÓN DEL EMPLAZAMIENTO.....	17
2.2. CARACTERÍSTICAS DE LA PARCELA.....	17
2.3. ESTUDIO GEOTÉCNICO.....	17
3. DISEÑO DE LA ATRACCIÓN.....	18
3.1. TIPOLOGÍA Y TEMÁTICA DE LA ATRACCIÓN	18
3.2. ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS.....	19
3.3. DISEÑO CONCEPTUAL Y CARACTERÍSTICAS.....	23
4. NORMATIVA DE REFERENCIA.....	27
5. SOLUCIÓN ESTRUCTURAL.....	28
6. RESUMEN DEL PRESUPUESTO.....	29
7. BIBLIOGRAFÍA	30
II. ANEXO DE CÁLCULO ESTRUCTURAL.....	32
1. MATERIALES	33
1.1. ACERO.....	33
1.2. HORMIGÓN	33
1.3. PERFILES DE ACERO UTILIZADOS	34
2. SOFTWARE EMPLEADO	35
3. ACCIONES SOBRE LA ESTRUCTURA	36
3.1. ACCIONES PERMANENTES.....	36
3.2. ACCIONES VARIABLES	36
4. ANÁLISIS DE FUERZAS INERCIALES DEL VEHÍCULO SOBRE LA ESTRUCTURA.....	45
4.1. FUERZAS SOBRE LA VAGONETA.....	45
4.2. RESUMEN DE CARGAS APLICADAS.....	51
4.3. SEGURIDAD DE LA TRAYECTORIA.....	51
5. DISEÑO DE LA ESTRUCTURA	53
5.1. MODELADO DE LA ESTRUCTURA DE LOS RAÍLES	53
5.2. MODELADO INICIAL DE LA ESTRUCTURA	55
6. COMBINACIÓN DE ACCIONES	57
6.1. CASOS DE CARGA.....	57
6.2. COMBINACIONES FUNDAMENTALES.....	58
7. COMPROBACIONES ESTRUCTURALES	60
7.1. VERIFICACIÓN DE LOS ESTADOS LÍMITE DE SERVICIO (ELS).....	60
7.2. SOLUCIÓN ALTERNATIVA ADOPTADA.....	62
7.3. VERIFICACIÓN DE LOS ESTADOS LÍMITE ÚLTIMOS (ELU).....	64
7.4. CONCLUSIONES.....	78
7.5. PLACA DE ANCLAJE	78
8. ELEMENTOS DE LA CIMENTACIÓN	86
8.1. ZAPATAS.....	86
III. MEDICIONES Y PRESUPUESTO	91
1. ACONDICIONAMIENTO DEL TERRENO.....	92
2. CIMENTACIONES.....	94
3. ESTRUCTURA	96
4. BASE DE LICITACIÓN.....	97
IV. PLANOS	98

1. ÍNDICE DE PLANOS:	99
1.1. SITUACIÓN.....	100
1.2. EMPLAZAMIENTO	101
1.3. VISTA ISOMÉTRICA DE LA ESTRUCTURA.....	102
1.4. CIMENTACIÓN	103
1.5. PLACAS DE ANCLAJE DE SOPORTES.....	104
1.6. PLACAS DE ANCLAJE DE TORNAPUNTAS	105
1.7. VISTAS Y ACOTACIÓN DE LA ESTRUCTURA.....	106
1.8. VISTA FRONTAL.....	107
1.9. UNIONES SOLDADAS.....	108

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Toboganes de hielo en la Rusia del siglo XVIII.....	12
Figura 2: Parc Beaujon, París años 1820	13
Figura 3: Montaña rusa Switchback Railway, en Coney Island.....	14
Figura 4: Matterhorn Bobsleds, en Disneyland	15
Figura 5: Ejemplo de las “acrobacias” en una montaña rusa moderna	15
Figura 6: Montaña rusa “Red Force Challenge the Wind”	16
Figura 7: Ubicación geográfica del proyecto (extracto del Plano 2)	17
Figura 8: Dibujo del superhéroe Aquaman.....	18
Figura 9: Ejemplo de pilares tubulares empleados en una montaña rusa	19
Figura 10: Raíles sobre estructura de soporte.....	19
Figura 11: Neumáticos de impulsión o compresión.....	21
Figura 12: Neumáticos de impulsión o compresión y frenos de aleta.....	21
Figura 13: Cadenas de elevación.....	22
Figura 14: Sistema del dispositivo antirretroceso.....	23
Figura 15: Zonas conceptuales de la montaña rusa.....	24
Figura 16: Representación gráfica de clotoide	25
Figura 17: Zonas diferenciadas sobre mapa del territorio español [6]	37
Figura 18: Perfil de velocidad de viento v (m/s) a lo largo de la altura (m) generado por RFEM y los datos introducidos para su generación.....	39
Figura 19: Direcciones de viento.....	40
Figura 20: Viento a 0°	41
Figura 21: Viento a 45°	42
Figura 22: Viento a 90°	43
Figura 23: Representación geométrica del vehículo propuesto [20].....	46
Figura 24: Puntos de la estructura en los que se va a calcular la velocidad del vehículo	47
Figura 25: Fuerza resultante en puntos "E" y "G"	49
Figura 26: Ejemplo de montaña rusa diseñada a partir de dos perfiles tubulares.....	53

Figura 27: Estructura de los raíles diseñados (con 3 perfiles tubulares).....	54
Figura 28: Ejemplo de montaña rusa diseñada a partir de cuatro perfiles tubulares (Cercha tipo Warren)	54
Figura 29: Elemento finito tipo viga.....	55
Figura 30: Modelo inicial	56
Figura 31: Máximo desplome en cabeza de soporte “fuera de servicio”	60
Figura 32: Máximo desplome en cabeza de soporte “en servicio”	61
Figura 33: Desplomes máximos y mínimos en el eje Y del modelo	61
Figura 34: Solución estructural final	62
Figura 35: Máximo desplome en cabeza de soporte “fuera de servicio”	63
Figura 36: Máximos desplomes en cabeza de soporte “en servicio”	63
Figura 37: Desplomes máximos y mínimos en el eje Y del modelo	64
Figura 38: Tensión equivalente de Von Mises en la situación más desfavorable.....	67
Figura 39: Soportes	68
Figura 40: Tornapuntas	69
Figura 41: Rigidizadores	69
Figura 42: Raíles.....	70
Figura 43: Barra 115	71
Figura 44: Barra 157	72
Figura 45: Barra 65	73
Figura 46: Barra 30	74
Figura 47: Esfuerzos en soporte más solicitado.....	75
Figura 48: Esfuerzos en tornapunta más solicitado	77
Figura 49: Dimensiones de placa de anclaje.....	80
Figura 50: Área portante de la placa.....	81
Figura 51: longitud de anclaje de pernos	84
Figura 52: Representación gráfica de la zapata diseñada	87

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Propiedades de los distintos tipos de acero, de [9]	33
Tabla 2: Perfiles empleados.....	34
Tabla 3: Perfil de velocidad de viento generado por RFEM	38
Tabla 4: Parámetros del modelo de simulación CFD definidos en RWIND	39
Tabla 5: Propiedades de los elementos del vehículo	46
Tabla 6: Fuerzas aplicadas en los distintos tramos de la estructura, de acuerdo con la Figura 24	51
Tabla 7: Casos de Carga considerados en el diseño	58
Tabla 8: Coeficientes parciales de seguridad del material, según [9]	66
Tabla 9: ELU Resistencia grupo soportes.....	70
Tabla 10: ELU Resistencia grupo tornapuntas	71
Tabla 11: ELU Resistencia grupo Rigidizadores.....	72
Tabla 12: ELU Resistencia grupo Raíles	73
Tabla 13: Términos a emplear, obtenida de [9].....	76
Tabla 14: Comprobación ELU agotamiento del apoyo en soportes.....	82
Tabla 15: Comprobación ELU agotamiento del apoyo en tornapuntas	82
Tabla 16: Comprobación ELU agotamiento de los pernos en soportes	83
Tabla 17: Comprobación ELU agotamiento de los pernos en tornapuntas	83
Tabla 18: Valores de m según el tipo de hormigón y de acero, para barras corrugadas	84
Tabla 19: Comprobación ELU anclaje de los pernos en soportes	85
Tabla 20: Comprobación ELU anclaje de los pernos en tornapuntas	85
Tabla 21: Coeficientes de seguridad parciales.....	88

I. MEMORIA

1. ANTECEDENTES

1.1. OBJETO

El objeto del siguiente Trabajo de Fin de Grado es el diseño y cálculo estructural de un tramo de 75 metros de longitud de una montaña rusa¹, ubicada en el municipio de San Martín de la Vega, Madrid. Para esto, se emplearán los conocimientos adquiridos en el Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales, que se imparte en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de la Universitat Politècnica de València.

1.2. ALCANCE

El presente proyecto pretende analizar y profundizar en los procedimientos y las metodologías de diseño estructural. De esta forma, se amplían los conocimientos sobre el comportamiento de estructuras, los programas para simulación por ordenador y todo aquello que engloba a las montañas rusas, ya que es un ámbito de aplicación poco extendido.

Se opta por diseñar únicamente un tramo de una montaña rusa. Esto es porque la cantidad de consideraciones y elementos que se deben tener en cuenta para realizar este estudio a la escala de una montaña rusa entera, se escapa de la extensión propuesta para un proyecto académico. Se realiza un predimensionado y se realizan las comprobaciones oportunas del tramo propuesto con sus respectivos soportes y elementos de estabilización, para hallar los perfiles óptimos.

Mediante el uso de diversos programas de elementos finitos, se simula la respuesta estructural frente a diversas cargas permanentes y variables, de forma que se cumpla la normativa vigente. Por otro lado, se diseñan las zapatas sobre las que apoyará la estructura, así como las vigas de atado.

Asimismo, se elabora el presupuesto detallado del proyecto y se trazan los planos necesarios para la correcta interpretación de la estructura, así como su puesta en obra.

Cabe destacar que queda fuera del alcance de este proyecto el análisis estructural frente a acciones accidentales tales como sismo, incendio, explosión o impacto.

1.3. MOTIVACIÓN

El autor del presente trabajo siente pasión por las montañas rusas y los parques temáticos desde su niñez. Ha visitado con frecuencia distintos parques de atracciones, así como parques acuáticos, en los cuales invierte una parte importante de su tiempo de ocio y entretenimiento.

A lo largo del Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales son muchas las ramas de la ingeniería las que se estudian. Sin embargo, los conocimientos adquiridos en todas y cada una de ellas pueden converger en el diseño de una estructura particular, como la de una montaña rusa. Es esto por lo que el autor decidió al inicio del grado que quería realizar un Trabajo de Fin de Grado que le permitiese indagar más en el diseño de una montaña rusa.

¹ Montaña rusa: Atracción de feria consistente en una vía férrea estrecha y en declive, con altibajos y revueltas, para deslizarse por ella en carritos [20].

En España no hay empresas encargadas del diseño y construcción de estructuras de este tipo, pues las empresas más relevantes se encuentran en países del norte de Europa o en Estados Unidos. Luego el autor no ha tenido facilidad para realizar unas prácticas en alguna empresa de esta índole. Es por ello que, para ir ganando experiencia en el tema, se decide realizar un TFG que pueda servir para buscar alternativas, conocer los distintos problemas que puede presentar y conocer de primera mano las normas aplicables al cálculo de una montaña rusa.

Además, con este Trabajo Final de Grado, el autor se centra en la rama del grado relacionada con la Tecnología de la Construcción y la Teoría de Estructuras, en vistas a una posible especialización en el Máster Universitario de Ingeniería Industrial.

1.4. ESTADO DEL ARTE

1.4.1. ANTECEDENTES HISTÓRICOS

En la Rusia del Siglo XVIII, se popularizó una forma de divertirse que consistía en deslizarse sobre trineos o carritos por circuitos de rampas de hielo construidas sobre estructuras de madera. Esta idea fue ganando fama y desarrollándose hasta convertirse en lo que se conoce hoy en día como montañas rusas [1].

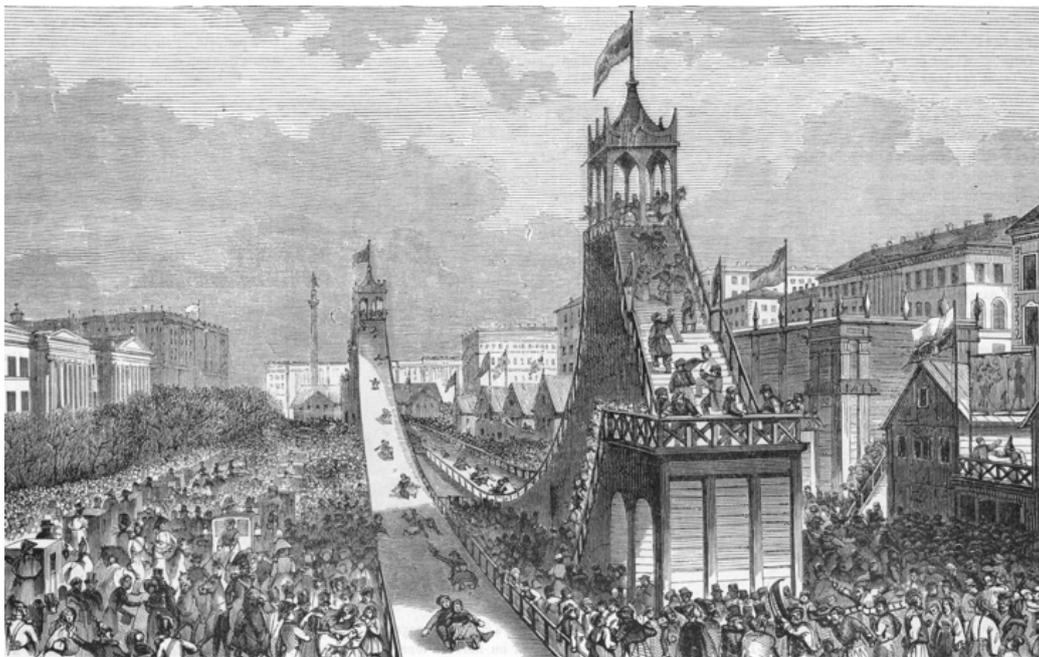


Figura 1: Toboganes de hielo en la Rusia del siglo XVIII²

En la segunda década del siglo XIX, un banquero francés llamado Nicolas Beaujon abrió el *Parc Beaujon* en los Campos Elíseos en París, introduciendo la primera montaña rusa con carritos que circulaban por unas vías. También en París, en 1846, se inauguró la primera montaña rusa que incorporaba un “loop” vertical³, que contaba con un diámetro de 4 metros.

² Fuente: <https://assets.atlasobscura.com>

³ “Loop” vertical: Consiste en una inversión vertical simple. El tren comienza a ascender hasta que queda invertido, continuando su giro y recuperando velocidad. Suele tener forma de clotoide para evitar altas fuerzas centrífugas en la base.



Figura 2: Parc Beaujon, París años 1820⁴

A finales del siglo XIX, la apertura de la que es considerada como la primera montaña rusa en Estados Unidos, tuvo lugar en Coney Island en Brooklyn, Nueva York, por LaMarcus Adna Thompson, y el nombre de dicha montaña rusa fue Switchback Railway. Esta se basaba en las tecnologías empleadas para la minería, pues su sistema consistía en una pista recta (sin curvas laterales) y con colinas y valles, de forma que, teniendo el inicio en un punto elevado y el final del trayecto a nivel del terreno el vehículo fuera capaz de llegar al final del trayecto, por conservación de la energía mecánica. Paralelamente, una pista idéntica estaba dispuesta al lado, de forma que cuando un vehículo llegaba al final de una pista, era elevado al principio de la otra. Thompson también introdujo en la industria los Recorridos Escénicos que contaban con túneles oscuros y escenarios pintados a lo largo del recorrido [2].

Durante estos años, por la gran cantidad de daños ocurridos, se cerró la mayoría de las atracciones que contaban con “loops” verticales.

⁴ Fuente: <https://www.kollerauktionen.ch>

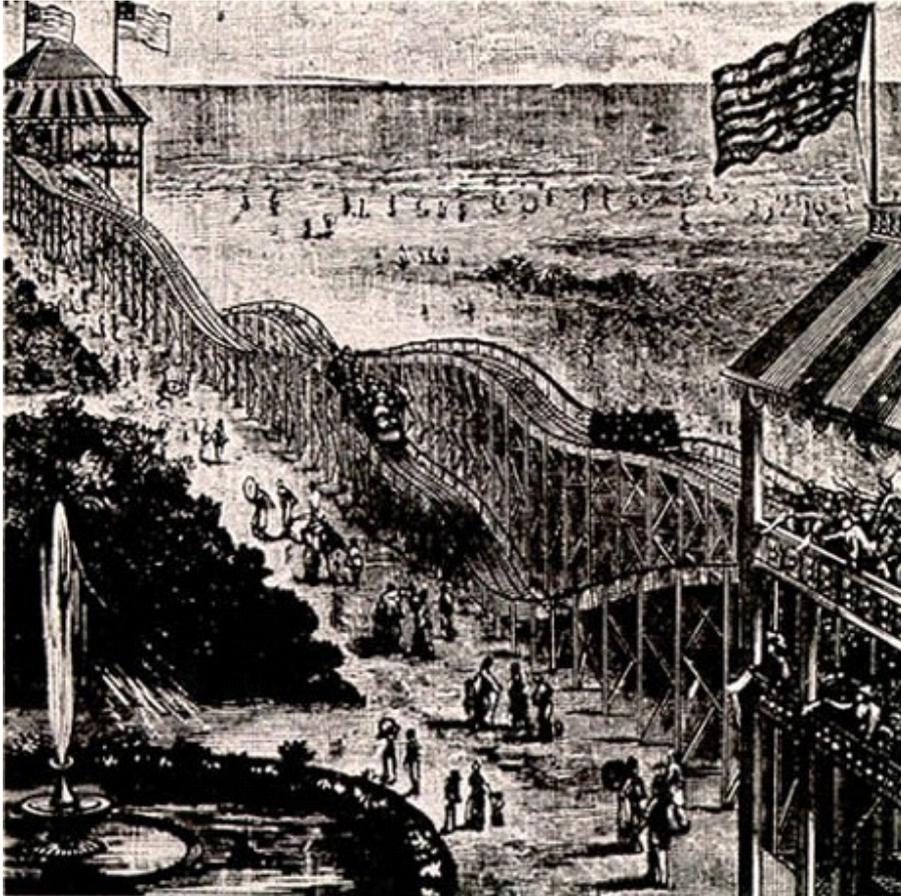


Figura 3: Montaña rusa Switchback Railway, en Coney Island⁵

En 1919, el ingeniero John Miller inventó el sistema que llevaría a dar un salto en el diseño de las montañas rusas, la *Underfriction Wheel*. Este sistema se basaba en las montañas rusas tradicionales, pero el vagón incluía una rueda adicional en la parte inferior de los raíles, de forma que este no pudiese separarse del raíl y permitía hacer descensos por pendientes más pronunciadas. Sin embargo, cabe destacar que hasta entonces se seguía construyendo las montañas rusas con madera, por lo que el diseño de estas seguía siendo una tarea compleja. Hoy en día, la gran mayoría de los vehículos en las montañas rusas presentan un sistema similar al planteado. De esta forma, se hace uso de dos ruedas auxiliares, una en la parte inferior y otra en el lateral, de forma que el vehículo no pueda salirse de los carriles.

En 1959, Disneyland *introdujo* la conocida como *Matterhorn Bobsleds*, la primera montaña rusa con perfiles tubulares de acero. Así, se cambió el concepto que se tenía hasta el momento de las montañas rusas, permitiendo introducir a los diseñadores elementos más complejos, como los tirabuzones.

⁵ Fuente: https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_the_roller_coaster



Figura 4: Matterhorn Bobsleds, en Disneyland⁶

Finalmente, en 1975 se construyó la primera montaña rusa que incorporaba un elemento invertido y en 1976 el “loop” vertical reapareció cuando abrió *the Great American Revolution* en el parque Magic Mountain de Valencia, California. Hoy en día, los “loops” verticales o los tirabuzones son elementos comunes que no pueden faltar en una montaña rusa moderna.



Figura 5: Ejemplo de las “acrobacias” en una montaña rusa moderna⁷

⁶ Fuente: <https://unsplash.com/es>

⁷ Fuente: <https://unsplash.com/es>

1.4.2. Actualidad

A día de hoy, las montañas rusas están divididas principalmente en dos grandes grupos, aquellas que son de madera y las de acero, aunque la gran mayoría de las de madera se podrían considerar como híbridas, pues están formadas por una estructura de madera, pero tienen partes de acero.

También se pueden categorizar según otros muchos criterios, como podrían ser el tipo de tren, las características del trayecto, la velocidad o aceleraciones máximas alcanzadas o la altura del mayor descenso del recorrido.

A nivel nacional, cabe destacar los parques temáticos *Parque Warner* de Madrid y *PortAventura Park* y *Ferrari Land*, ambos en el resort *PortAventura World*, en Tarragona. Esto es porque en estos parques están ubicadas las montañas rusas más altas, con mayor número de inversiones y más veloces del panorama nacional. En 2019, el resort *PortAventura World* recibió un total de 3,75 millones de visitantes y el *Parque Warner de Madrid* recibió más de 2,23 millones de visitantes, siendo los dos parques más visitados del país [3].

En el parque *Ferrari Land*, uno de los tres parques temáticos que conforman el resort de *PortAventura World*, se destaca la montaña rusa “Red Force Challenge the Wind”, la cual tiene los récords europeos de mayor velocidad (180 km/h) y mayor altura (112 m).



Figura 6: Montaña rusa “Red Force Challenge the Wind”⁸

⁸ Fuente: <https://www.portaventuraworld.com/>

2. EMPLAZAMIENTO DEL EDIFICIO

2.1. DESCRIPCIÓN DEL EMPLAZAMIENTO

El emplazamiento seleccionado para la montaña rusa objeto de este TFG se encuentra en la Comunidad de Madrid, concretamente en el municipio de San Martín de la Vega, en el que se halla el Parque Warner de Madrid. De este modo se propone la construcción de la atracción colindando con el terreno del parque por la parte oeste, tal y como muestra la Figura 7. De esta forma, se propone que el acceso a zona de la montaña rusa proyectada sea el paseo que queda entre las atracciones acuáticas *Río Bravo* y *Rápidos ACME*.

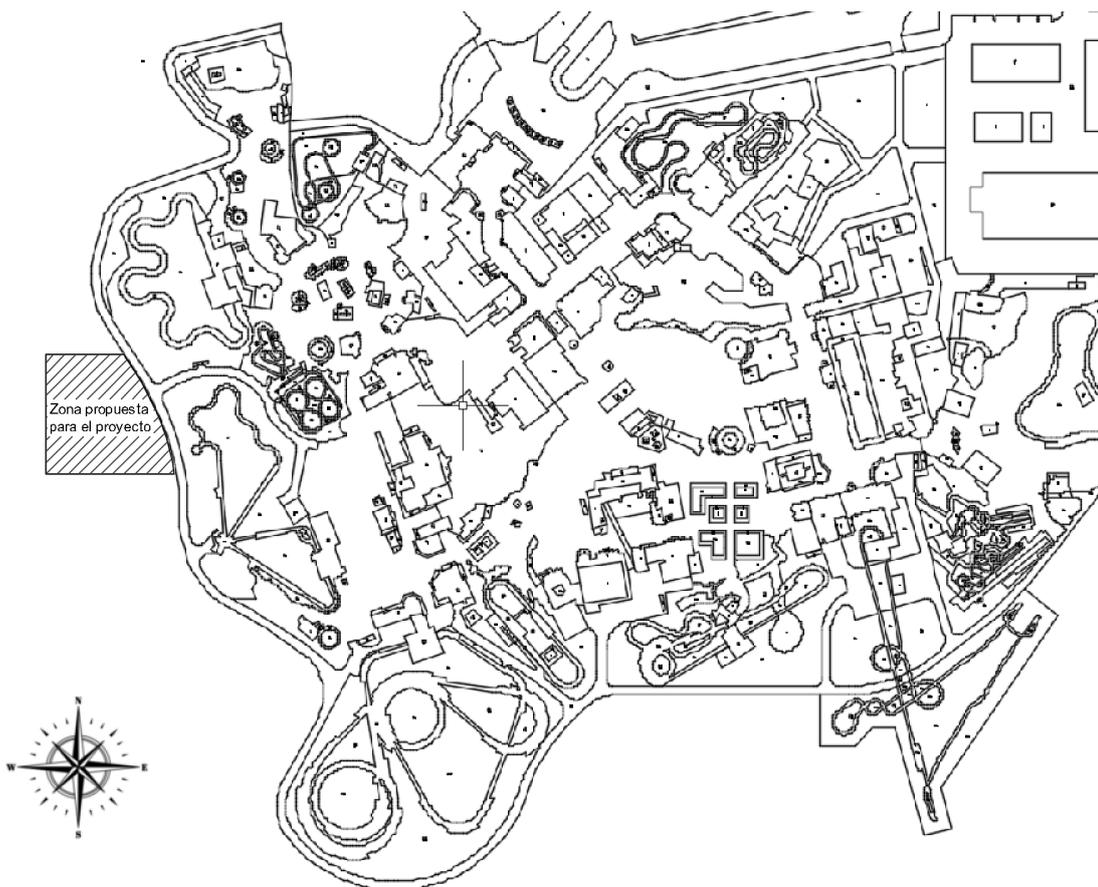


Figura 7: Ubicación geográfica del proyecto (extracto del Plano 2)

2.2. CARACTERÍSTICAS DE LA PARCELA

La parcela donde se ubica la montaña rusa tiene una superficie total de $1.498.178 \text{ m}^2$, con una superficie construida de 620.526 m^2 . La parcela tiene un amplio terreno sin construir en los lados sur y oeste del parque, por lo que se propone una ampliación del mismo por el lado oeste, tal y como se muestra en la Figura 7. El terreno previsto para la atracción cuenta con unos 1650 m^2 .

2.3. ESTUDIO GEOTÉCNICO

Previo a la realización de cualquier proyecto de edificación se debe realizar un estudio geotécnico. En este, se hallan las principales características del terreno sobre el que se va a

construir, como la tensión máxima admisible, por medio de pruebas y sondeos específicos. Aunque esto es preciso para poder calcular la cimentación de la estructura de la montaña rusa, resulta inviable obtenerlo. Por esto mismo, se toma un valor de referencia para la tensión máxima admisible de 0,2 MPa.

3. DISEÑO DE LA ATRACCIÓN

3.1. TIPOLOGÍA Y TEMÁTICA DE LA ATRACCIÓN

Tal y como se ha comentado, el acceso a la montaña rusa se realiza por el paseo que queda entre dos atracciones acuáticas del parque. Por otro lado, se aprovecha la temática empleada en otras de las atracciones del parque, basada en distintos superhéroes de DC Comics. De esta forma, el estilo de la montaña rusa se centra en un ambiente futurista relacionado con el superhéroe *Aquaman*, y se integra con las atracciones de agua que tiene alrededor.



Figura 8: Dibujo del superhéroe Aquaman⁹

Se utilizará como elemento constructivo principal acero estructural, ya que es el comúnmente empleado para la puesta en obra de edificios industriales, pues presenta las mejores características para construcciones en las que se van a soportar elevados esfuerzos, teniendo una buena relación resistencia/peso como material. Cabe destacar que la otra alternativa que más se emplea en el diseño de las montañas rusas, tal y como se ha nombrado previamente, sería la madera, pero no es objeto de este Trabajo de Fin de Grado.

Para el diseño de los pilares, así como de los raíles por los que circula el vagón en el que viajan los pasajeros, se han empleado perfiles tubulares de acero. Con estos perfiles se tiene una mayor libertad a la hora de diseñar la atracción y una mayor facilidad para la puesta en obra.

⁹ Fuente: <https://screenrant.com>



Figura 9: Ejemplo de pilares tubulares empleados en una montaña rusa¹⁰

3.2. ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS

Siguiendo lo dictado en [4], en las montañas rusas se tienen ciertos elementos que podrían describirse como los elementos básicos de funcionamiento y seguridad. Estos son los que siguen:

- a) Raíles: estructura sobre la que circula el vehículo, dirigiéndolo y restringiendo sus grados de libertad.



Figura 10: Raíles sobre estructura de soporte

¹⁰ Fuente: <https://unsplash.com>

- b) Estructura soporte: es aquella sobre la que apoyan los raíles. Será la encargada de absorber la mayor parte de los esfuerzos producidos por las distintas cargas estudiadas en el presente proyecto.
- c) Coche: vehículo en el que transportan los pasajeros de una montaña rusa. Normalmente en un coche viajará más de una persona, y un conjunto de coches es conocido como tren.
- d) Frenos: mecanismos utilizados para ralentizar o detener completamente el coche o tren que circula por la montaña rusa. Puede usarse como sistema de seguridad en el caso de un posible choque entre ellos o para detener la marcha antes de llegar a la estación (en la denominada “zona de frenado”). Existen diversos tipos, entre los que destacan los siguientes:

- Frenos de fricción: sistema basado en provocar el contacto directo entre unas pastillas de freno, normalmente revestidas con material cerámico y situadas en la vía, con la parte inferior del vehículo. De esta forma, se puede conseguir el frenado total. A día de hoy está en desuso, pues su desgaste y mantenimiento es mayor que en el resto de sistemas.
- Frenos de aleta: sistema ligeramente similar al anterior. El vehículo cuenta con una placa metálica en la parte inferior de este, conocida como aleta. De esta forma, cuando el vehículo circula por encima del lugar de frenado, unas pinzas situadas en la vía se cierran, comprimiendo la placa y deteniendo el vehículo. Actualmente es uno de los sistemas de frenado más común.
- Frenos magnéticos: es el sistema más innovador. Este presenta dos grandes ventajas frente al resto de sistemas, y es que no hay rozamiento. Su mantenimiento es mucho más económico (ya que es prácticamente nulo) respecto a los sistemas anteriores, y no es posible el fallo por causas ajenas, como podría ser por condiciones meteorológicas, suciedad, etc.

El sistema se basa en el uso de una o dos filas de imanes de neodimio, normalmente en la vía. En la parte inferior del vehículo se sitúa una aleta metálica, normalmente de cobre o de una aleación de cobre-aluminio. Así, cuando la aleta pasa entre los imanes, se generan corrientes de Foucault en la aleta, creando una fuerza magnética opuesta al movimiento de esta.

El inconveniente de este sistema es que la fuerza de frenado es directamente proporcional a la velocidad, por lo que no será posible el frenado total del vehículo. Esto hace que este sistema deba ser complementado con uno de los otros sistemas vistos, aunque con una velocidad reducida en primer lugar por el campo magnético, el desgaste del otro sistema de frenado es mucho menor.

- Neumáticos de impulsión o compresión: sistema polivalente útil tanto para la frenada como para la aceleración del vehículo. Mediante dos neumáticos enfrentados situados en la pista que giran en sentidos opuestos, se puede impulsar o frenar el vehículo al pasar este entre las dos ruedas.



Figura 11: Neumáticos de impulsión o compresión



Figura 12: Neumáticos de impulsión o compresión y frenos de aleta

- e) Sistema de elevación: es el encargado de elevar el vehículo desde un punto inicial hasta una altura superior. En muchas atracciones, es el sistema principal, ya que suele ser el primer elemento que se encuentra el vehículo en su recorrido y gran parte del diseño del recorrido depende de la altura alcanzada. Existen diversos tipos, entre los que se encuentran el sistema de elevación por medio de cadenas, eslingas, ruedas de fricción o por autopropulsión.



Figura 13: Cadenas de elevación

- f) Dispositivo antirretroceso: se trata de un dispositivo que, en el caso de fallo durante el ascenso de una colina, evita que el vehículo caiga descendiendo en sentido contrario al previsto.

Tal y como se explica en [4], se exige que para todos los coches o trenes que se muevan sobre rampas ascendentes por medio de cadenas, eslingas, ruedas de fricción o por autopropulsión se deben prever dispositivos de seguridad que impidan el retroceso, o frenos de accionamiento automático para evitar que esto ocurra.

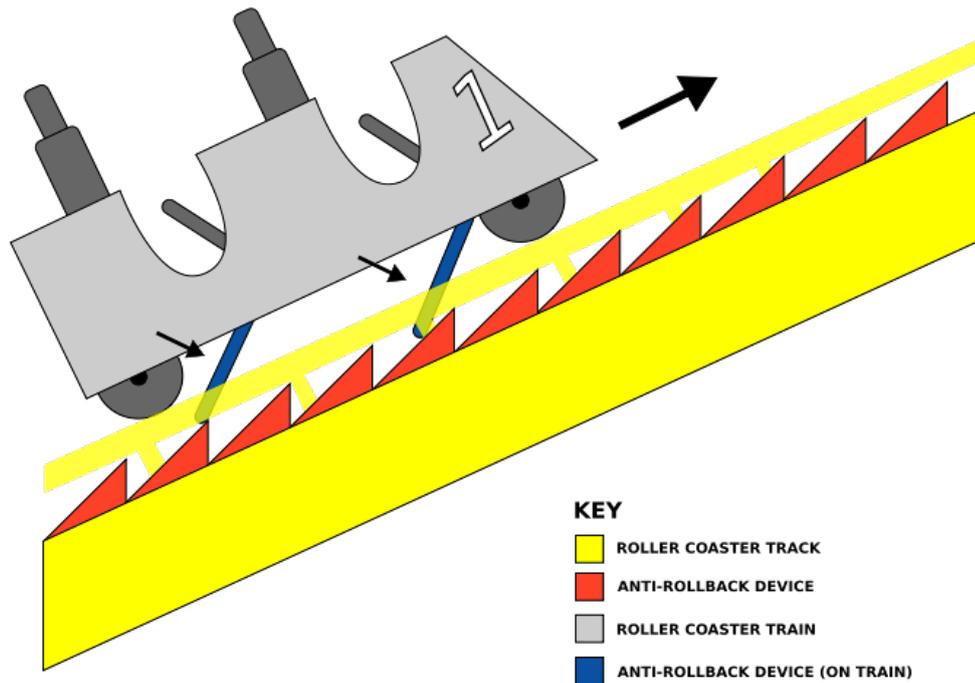


Figura 14: Sistema del dispositivo antirretroceso¹¹

- g) Equipamiento eléctrico y sistemas de control: todos aquellos elementos manuales, eléctricos, electrónicos, hidráulicos, neumáticos y mecánicos que mantienen el buen funcionamiento y seguridad de la montaña rusa, desde el sensor hasta el dispositivo actuante inclusive. Todos los procesos que deben cumplirse están detallados en [4].
- h) Cimentaciones: se hace uso de placas de anclaje de acero para realizar la unión entre la estructura soporte de la montaña rusa y el terreno. De igual forma, para absorber las reacciones de las bases de los soportes, las placas de anclaje se sitúan sobre zapatas de hormigón armado, con su correspondiente recubrimiento de hormigón de limpieza y con armadura superior e inferior.

3.3. DISEÑO CONCEPTUAL Y CARACTERÍSTICAS

Como es lógico, una montaña rusa está conformada por zonas diferenciadas. En los últimos años el desarrollo de las nuevas tecnologías, y la variación y combinación de las ya existentes ha llevado al desarrollo de múltiples posibilidades a la hora de añadir un elemento en el recorrido de una montaña rusa. En cambio, hay tres zonas que toda montaña rusa debe tener: la estación, la trayectoria y la zona de frenado.

En el caso de la montaña rusa diseñada, se busca que la estructura vista desde arriba tenga una forma similar a un rectángulo. De esta forma, se puede plantear aprovechar el área interior con distintos comercios, restaurantes, recreativos o tiendas de souvenirs.

La trayectoria está compuesta por 4 elementos principales: el “drop” (caída) formado por una hélice, tramos rectos, el “loop” vertical y la colina. En el presente trabajo se estudia la parte de la trayectoria formada por el “loop” vertical y la colina. Sin embargo, no se estudian la zona de la estación, la rampa ascendente, el “drop” en hélice ni la zona de frenado, pues su

¹¹ Fuente: <https://rollercoaster.fandom.com>

diseño excede el alcance de este proyecto y los objetivos perseguidos, aunque se menciona su funcionalidad más adelante.

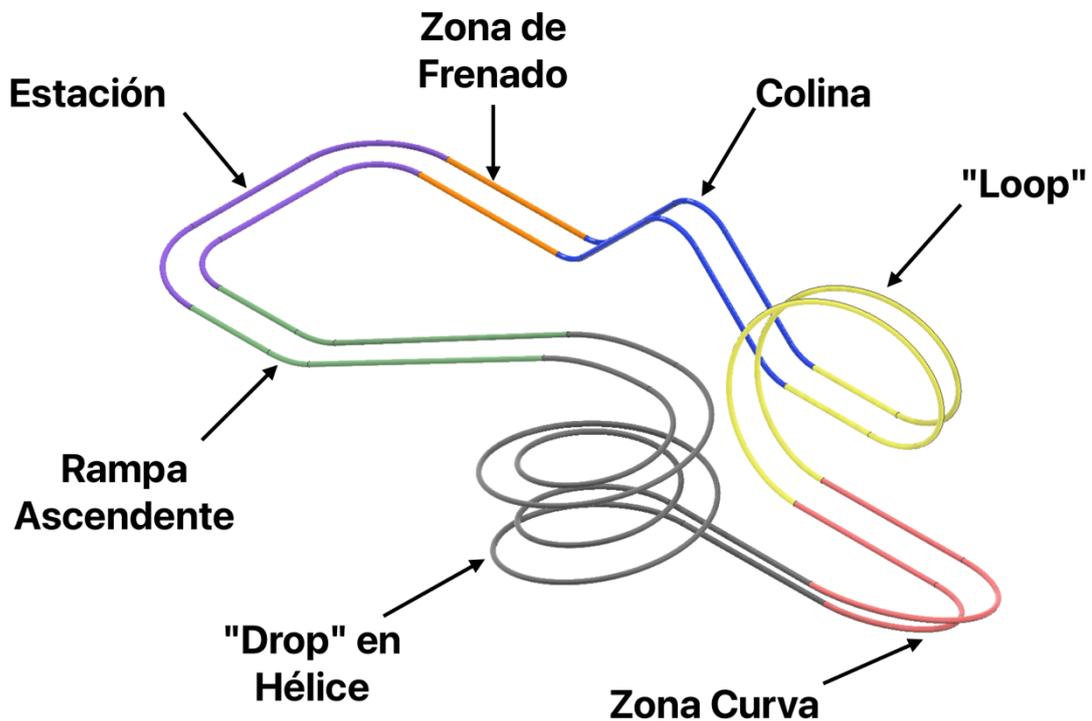


Figura 15: Zonas conceptuales de la montaña rusa

En la Figura 15 se muestra el diseño de la montaña de rusa estudiada. Tal y como se puede observar, se diferencian las diferentes zonas y elementos mencionados. A continuación, se explicarán las distintas partes que lo componen:

1. La estación (violeta): es el punto de comienzo y final del recorrido. Es necesario equiparla con una sala de control con operarios. Se debe contar con un sistema para controlar el peso y estatura de las personas que desean acceder a la atracción.
2. Rampa ascendente (verde): en este tramo el vehículo asciende ganando energía potencial gravitatoria. Esta energía ganada será aprovechada durante todo el recorrido, convirtiéndose en energía cinética y volviéndose a convertir en energía potencial continuamente. La cuenta con un sistema de elevación por medio de cadenas. Si la montaña rusa está diseñada para ir en un solo sentido (como es el caso de estudio) se debe disponer de un sistema antirretroceso.
3. "Drop" en hélice (negro): el recorrido presenta un "drop" en hélice con dos giros de 360° horizontales. Es el inicio del recorrido, movido únicamente por la inercia obtenida a partir de la energía potencial gravitatoria ganada en la subida por la rampa. Este estilo de caída inicial presenta giros cerrados y peraltados, de forma que se provocan fuerzas g de aceleración positivas a los pasajeros del vehículo.
4. Zona curva (rojo): este tramo viene representado por media circunferencia, con un descenso moderado. Será necesario aplicar un peralte para evitar la sensación de descarrilamiento del vehículo y poder tener mayores velocidades durante el tramo sin riesgo de que la estructura sufra un sobreesfuerzo por las fuerzas laterales.
5. "Loop" Vertical (amarillo): es el único elemento en el recorrido que presenta una inversión. Se trata de un giro vertical de 360° , en cuyo punto más alto los pasajeros

se encontrarán bocabajo. Los extremos que conectan el “loop” con la zona curva y con la colina deberán de disponer de un sistema de aceleración, cuyo estudio no es competencia del presente trabajo.

Aunque para el estudio realizado se ha simplificado considerando el “loop” como una hélice con eje horizontal, realmente este elemento está formado por 3 tramos distintos. Puesto que el objetivo de este elemento es que en el punto más alto la velocidad del vehículo sea mayor o igual que una velocidad mínima, la velocidad a la que entra y sale el vehículo en el “loop” debe ser elevada. Si el radio de todo el “loop” fuera constante la fuerza centrífuga que se tendría en la entrada y en la salida de este sería demasiado elevada para la seguridad de los pasajeros. Es por esto que tanto la entrada como la salida del “loop” es una clotoide (también conocida como espiral de Cornú). Esta curva es característica por su forma, pues su radio de curvatura disminuye de manera inversamente proporcional a la distancia recorrida sobre ella. Así, se entra y se sale de dos tramos rectos (radio de curvatura infinito y por tanto fuerza centrífuga nula), que mediante clotoides conectan con el tramo superior del “loop”, que sí tiene el radio deseado, consiguiendo que la fuerza centrífuga percibida por los pasajeros no sea perjudicial [5].

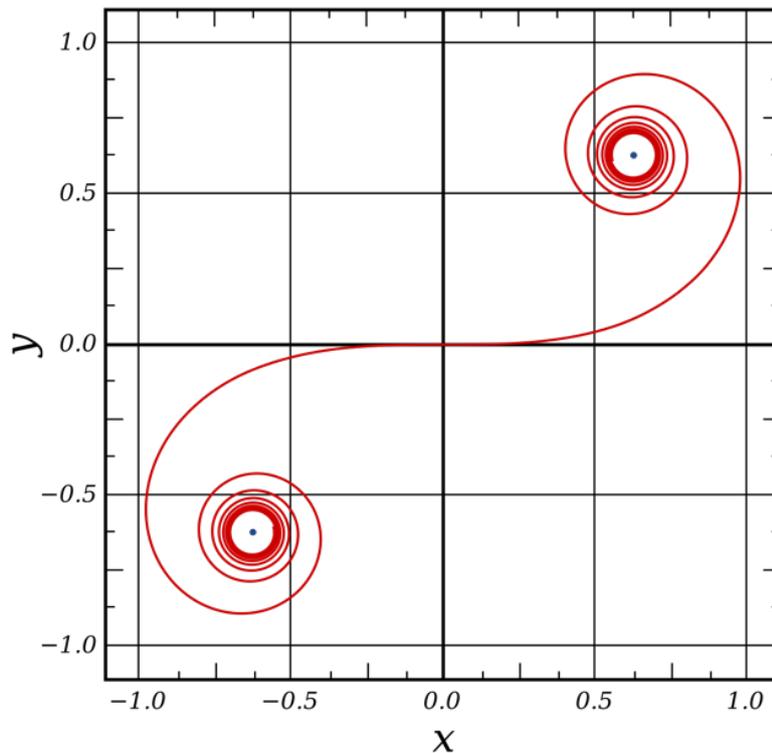


Figura 16: Representación gráfica de clotoide

6. Colina (azul): es el tramo final de la trayectoria y está compuesto por la rampa ascendente y por la rampa descendente.
7. Zona de frenado (naranja): es el tramo recto final previo a la estación. Se opta por un sistema compuesto por el frenado magnético, seguido por unos frenos neumáticos, que impulsan de forma lenta el vehículo hasta la estación. Así, se disminuirá la velocidad del vehículo de forma que no sea peligrosa su circulación por la estación.

Puesto que el estudio y diseño de una montaña rusa es demasiado extenso para un proyecto como es un trabajo de final de grado, se procederá con el diseño y cálculo del tramo compuesto por el "loop" vertical y la colina, como ya se ha comentado.

En cuanto a la estructura de soporte, se han valorado dos opciones distintas. La primera de ellas, es realizar esta estructura con torres en celosía, empleando perfiles tubulares. La otra alternativa ha sido disponer un pilar monoposte de perfil tubular. Finalmente, se ha optado por la segunda opción, ya que es el proceso que se sigue habitualmente en el diseño de estructuras de este estilo.

4. NORMATIVA DE REFERENCIA

- SEGURIDAD DE LAS ATRACCIONES Y DE LA MAQUINARIA DEL ENTRETENIMIENTO, PARTE 1 (UNE-EN 13814-1:2019) [4]

Es la norma de aplicación para todos las maquinas y estructuras que forman parte de los dispositivos de entretenimiento. En esta se definen las diferentes reglas de seguridad que se deben seguir.

En esta, se especifican los requisitos mínimos necesarios para garantizar la seguridad en el diseño, cálculo, fabricación e instalación, de estructuras y máquinas móviles, instaladas de manera temporal o permanente, destinadas a ser utilizadas por las personas como actividad de ocio.

Se sigue lo dictado en esta norma para:

1. Estudiar los diferentes riesgos que se pueden presentar en el funcionamiento de una montaña rusa.
 2. Conocer los efectos de las aceleraciones del vehículo sobre los pasajeros, así como sobre la propia estructura.
 3. Realizar las comprobaciones del diseño frente a ELU y ELS.
- EUROCÓDIGO 1: ACCIONES EN ESTRUCTURAS. PARTE 1-4: ACCIONES GENERALES. ACCIONES DE VIENTO (ENV 1991-1-4:2005) [6]

Esta norma se ha aplicado para el estudio del comportamiento de la estructura diseñada frente a la acción del viento, complementando lo expuesto en [4].

- CÓDIGO TÉCNICO DE LA EDIFICACIÓN (CTE), DOCUMENTO BÁSICO DE SEGURIDAD ESTRUCTURAL (DB-SE) [7]
- CÓDIGO TÉCNICO DE LA EDIFICACIÓN (CTE), DOCUMENTO BÁSICO DE SEGURIDAD ESTRUCTURAL, CIMIENTOS (DB-SE-C) [8]
- CÓDIGO TÉCNICO DE LA EDIFICACIÓN (CTE), DOCUMENTO BÁSICO DE SEGURIDAD ESTRUCTURAL, ACERO (DB-SE-A) [9]

Estos tres últimos se utilizan para establecer coeficientes de cálculo, así como diferentes valores límite y procedimientos, pues la norma [4] no especifica todos estos.

- CÓDIGO ESTRUCTURAL (REAL DECRETO 470/2021)

Norma de aplicación para evaluar aquellas estructuras que queden fuera del ámbito propio de la edificación, para el cual se usa el CTE [7].

5. SOLUCIÓN ESTRUCTURAL

Inicialmente se opta por el diseño de una estructura soporte basada en monopostes de sección circular hueca. En el modelo, se definen los soportes como empotrados en su base (unión con la cimentación) y con unión rígida en la cabeza de estos (unión entre los soportes y los raíles). Por otro lado, se definen los elementos rigidizadores como vigas capaces de transmitir únicamente esfuerzo axial.

Tal y como se muestra el Anexo de Cálculo Estructural, al realizar las comprobaciones estructurales dictadas por normativa, se comprueba que hay ciertos parámetros que se sobrepasan del límite marcado, por lo que se opta por una estructura alternativa.

Así pues, se opta finalmente por añadir tornapuntas a los soportes. De esta forma, se “desdoblan” los soportes, generando una triangulación ente el soporte vertical y el inclinado, articulando tanto la base como la cabeza de ambos, lográndose así canalizar el momento transmitido al terreno a través de un par de fuerzas de reacción.

De esta forma se consigue que, al realizar las comprobaciones y cálculos pertinentes, todos los parámetros y verificaciones queden dentro del rango admisible, teniendo una estructura resistente y estable.

6. RESUMEN DEL PRESUPUESTO

Presupuesto de ejecución material

1 Acondicionamiento del terreno	5.988,63 €
1.1 Excavación	1.992,67
1.2 Transporte de tierras	745,96
1.3 Desbroce y limpieza del terreno	3250
2 Cimentaciones	24.181,04 €
2.1 Zapatas de hormigón armado	19.885,84
2.2 Vigas de atado de hormigón armado	3.098,79
3.3 Regularización	1196,41
3 Estructura	53.146,24 €
3.1 Perfiles de acero	50.004,99
3.2 Placa de anclaje	3.141,25
Total:	83.315,91 €

Asciende el presupuesto de ejecución material a la expresada cantidad de OCHENTA Y TRES MIL TRESCIENTOS QUINCE EUROS CON NOVENTAIÚN CÉNTIMOS

Presupuesto base de licitación

Presupuesto de ejecución material	83.315,91 €
13% de gastos generales	10.813,07
6% de beneficio industrial	4.998,95
Presupuesto de ejecución por contrata	99.145,93 €
21% IVA	20.820,64
Total:	119.966,58 €

Asciende el presupuesto base de licitación a la expresada cantidad de CIENTO DIECINUEVE MIL NOVECIENTOS SESENTA Y SEIS EUROS CON CINCUENTA Y OCHO CÉNTIMOS.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] R. Coker, *Roller Coasters: A Thrill Seeker's Guide to the Ultimate Scream Machines*, New York: Metrobooks, 2002.
- [2] A. Sandy, «Ultimate Roller Coaster,» 26 Julio 2007. [En línea]. Available: <https://www.ultimaterollercoaster.com>. [Último acceso: 27 abril 2023].
- [3] J. Rubin, «aecom,» Themed Entertainment Association (TEA), 2020. [En línea]. Available: <https://aecom.com>. [Último acceso: 28 abril 2023].
- [4] Comité AEN/CTN, «UNE-EN13814-1 Seguridad de las atracciones y de la maquinaria de entretenimiento. Parte 1: Proyecto y fabricación,» Febrero 2020.
- [5] E. Sáenz de Cabezón, «Derivando,» [En línea]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=XElov0VaYml>. [Último acceso: 29 abril 2023].
- [6] CEN, «EUROCÓDIGO 1: ACCIONES EN ESTRUCTURAS. PARTE 1-4: ACCIONES GENERALES. ACCIONES DE VIENTO (ENV 1991-1-4:2005),» Junio 2018.
- [7] Ministerio de Fomento, «Código Técnico de la Edificación, Documento Básico de Seguridad Estructural (CTE DB-SE)».
- [8] Ministerio de Fomento, «Código Técnico de la Edificación, Documento Básico de Seguridad Estructural, Cimentaciones (CTE DB-SE-C)».
- [9] Ministerio de Fomento, «Código Técnico de la Edificación, Documento Básico de Seguridad Estructural, Acero (CTE DB-SE-A)».
- [10] Ministerio de transportes, movilidad y agenda urbana, «Código Estructural (Real Decreto 470/2021)».
- [11] AENOR, «Perfiles huecos para construcción soldados, conformados en frío de acero no aleado y de grano fino. Parte 1: Condiciones técnicas de suministro.».

- [12] «Interactive 'Blue Book',» [En línea]. Available: <https://www.steelforlifebluebook.co.uk>. [Último acceso: 3 Mayo 2023].
- [13] AutoDesk, «Manual del Ingeniero».
- [14] Dlubal, «Manual RFEM 6,» [En línea]. Available: <https://www.dlubal.com>. [Último acceso: 10 Diciembre 2022].
- [15] Dlubal, «Manual RWIND 2,» [En línea]. Available: <https://www.dlubal.com>. [Último acceso: 13 Diciembre 2022].
- [16] Ministerio de Fomento, «Código Técnico de la Edificación, Documento Básico de Seguridad Estructural, Acciones en la edificación (CTE DB-SE-AE)».
- [17] J. Pombo y J. A.C. Ambrósio, «Modelling tracks for roller coaster dynamics,» *International Journal of Vehicles Design*, vol. 45, nº 4, pp. 470-500, Enero 2007.
- [18] M. Rui Dias Viegas, «Development of Computational Models of Roller Coaster Vehicles and Occupants for Injury Analysis,» Trabajo de fin de Máster, IDMEC, Departamento de Ingeniería Mecánica, Lisboa, Portugal, 2016.
- [19] «Wikipedia: Coeficiente de resistencia,» [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Coeficiente_de_resistencia. [Último acceso: 2 Mayo 2023].
- [20] Real Academia Española, «Diccionario de la lengua española,» [En línea]. Available: <https://dle.rae.es>.

II. ANEXO DE CÁLCULO ESTRUCTURAL

1. MATERIALES

1.1. ACERO

El diseño de la montaña rusa se lleva a cabo a base de perfiles tubulares de acero. Se emplea para todas las barras de la estructura acero estructural con designación S355JR, ya que presenta un límite elástico elevado y es apropiado para las cargas a las que va a estar sometida la misma.

Tabla 1: Propiedades de los distintos tipos de acero, de [9]

Tabla 4.1 Características mecánicas mínimas de los aceros UNE EN 10025

DESIGNACIÓN	Espesor nominal t (mm)				Temperatura del ensayo Charpy °C
	Tensión de límite elástico f_y (N/mm ²)			Tensión de rotura f_u (N/mm ²)	
	t ≤ 16	16 < t ≤ 40	40 < t ≤ 63	3 ≤ t ≤ 100	
S235JR					20
S235J0	235	225	215	360	0
S235J2					-20
S275JR					20
S275J0	275	265	255	410	0
S275J2					-20
S355JR					20
S355J0	355	345	335	470	0
S355J2					-20
S355K2					-20 ⁽¹⁾
S450J0	450	430	410	550	0

⁽¹⁾ Se le exige una energía mínima de 40J.

Este acero presenta un límite elástico de entre 355 MPa y 335 MPa, dependiendo del espesor de la chapa, y una tensión de rotura de 470 MPa.

1.2. HORMIGÓN

Se emplea hormigón armado para la ejecución de las cimentaciones que soportarán la estructura, tanto para las zapatas como para las vigas de atado. Puesto que el terreno se supone húmedo, raramente seco, la clase de exposición es el XC2. Por ello, de acuerdo con la Tabla 43.2.1.b del Código Estructural [10], la resistencia característica del hormigón debe ser de 25 N/mm². Por último, la consistencia del hormigón será fluida, puesto que es la recomendada para hormigones de edificación. Por todo esto, se utilizará un hormigón HA-25/F/20/XC2.

De igual forma, se emplea hormigón de limpieza HL-15 para el recubrimiento inferior de la zapata, siendo este de 10 cm.

Para las armaduras de las zapatas se emplea acero tipo corrugado de tipo B500S, pues es el más común en elementos de este estilo.

1.3. PERFILES DE ACERO UTILIZADOS

Tal y como se ha explicado, la estructura está realizada en su totalidad con elementos de sección tubular hueca circular (CHS) conformados en frío, según la norma EN 10219-2 [11]. Los distintos perfiles empleados, cuya clase se ha obtenido de [12] son:

Tabla 2: Perfiles empleados

Perfil	168.3x5	323.9x6.3	219.1x5	406.4x8
Clase	2	3	2	3

2. SOFTWARE EMPLEADO

Para el diseño conceptual de la montaña rusa se emplea el paquete de modelado paramétrico de sólidos en 3D producido por la empresa de software AutoDesk, Autodesk Inventor, empleando la licencia de estudiante concedida por dicha empresa (Autodesk, año 2023, versión estudiante) [13].

Para el cálculo de la estructura se hace uso de la licencia para estudiantes facilitada por la empresa de software Dlubal. En concreto, se emplea el programa de análisis estructural por el método de los elementos finitos RFEM [14], con el que, a partir del boceto lineal importado desde Autodesk Inventor, se definen las barras, nudos y elementos de apoyo, así como las diferentes cargas a las que se va a someter la estructura, y las posibles combinaciones de estas.

También se hace uso del programa RWIND 2 [15], programa de dinámica de fluidos computacional con el que se puede simular el efecto de las cargas de viento sobre la estructura a partir del emplazamiento y condiciones del proyecto. Este es compatible con el programa de elementos finitos utilizado (RFEM) y permite realizar la simulación fluidodinámica de la estructura sometida a la acción del viento de diseño, para posteriormente aplicar las fuerzas obtenidas en los nodos de la malla de elementos finitos al modelo discretizado en el programa de cálculo estructural.

3. ACCIONES SOBRE LA ESTRUCTURA

Se entiende por acción como a una perturbación sobre el sistema que tiende a cambiar su estado actual (posiblemente de equilibrio), y se traduce siempre en una variación de las variables de estado del sistema. En el caso de acciones mecánicas, el efecto de las mismas sobre la estructura se traduce en tensiones, deformaciones, flechas...

3.1. ACCIONES PERMANENTES

En el caso del diseño llevado a cabo, se consideran como acciones permanentes únicamente el peso propio de la estructura.

3.1.1. PESO PROPIO

La estructura diseñada está compuesta principalmente por acero de clase S355JR. Este presenta una densidad media de 7850 kg/m^3 .

Cuando se habla del peso propio de la estructura, no solo se debe tener en cuenta los pilares y la estructura de los raíles. También se debe tener en cuenta el peso aportado por los elementos de las uniones, componentes electrónicos, eléctricos, etc. En este diseño se suponen incluidos en el peso propio de la estructura, ya que el peso que aportan es despreciable frente al de la propia estructura.

3.2. ACCIONES VARIABLES

Son aquellas cargas que cambian a lo largo del tiempo, tanto en magnitud, como en posición.

Dentro de este tipo de acciones, se incluyen las cargas de viento, nieve, cargas debido a cambios de temperatura o asentamientos y las sobrecargas de usos normales.

La norma UNE-EN13814-1 [4] recoge que también se debe considerar como acciones variables las cargas debidas al funcionamiento habitual de la atracción. Por tanto, se deben tener en cuenta las cargas dinámicas, giroscópicas y todas aquellas que se produzcan como resultado del movimiento del vehículo sobre la estructura

3.2.1. CARGAS DE VIENTO

El cálculo del efecto producido por el viento sobre la montaña rusa es complejo debido a la geometría de la misma. Por ello, mediante el uso del programa RWIND, el software de dinámica de fluidos computacional (CFD) para realizar la simulación en túnel de viento de la estructura, se calcula y se exportan las fuerzas producidas por el viento sobre la estructura a RFEM. Se hace uso de la norma ENV 1991-1-4:2005, donde vienen recogidos todos los procedimientos a seguir para poder calcular este efecto [6].

La fuerza del viento F_w que actúa sobre una estructura o elemento estructural viene definido por la siguiente expresión:

$$F_W = C_s C_d \cdot \sum_{\text{elementos}} C_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref} \quad (1)$$

Donde:

$C_s C_d$: factor estructural.

C_f : coeficiente de fuerza para el elemento estructural o la estructura.

$q_p(z_e)$: presión correspondiente a la velocidad de pico a la altura de referencia z_e .

A_{ref} : área de referencia (proyectada) para el elemento estructural o la estructura.

Se comprueba que los valores de los distintos términos empleados en la expresión son válidos con respecto a lo estipulado en la norma ENV 1991-1-4:2005 [6], sabiendo lo siguiente:

1. Localización: como ya se ha comentado, la montaña rusa diseñada se ubica en el municipio de San Martín de la Vega, Madrid. Tal y como se observa en la Figura 17, se corresponde con la Zona A, en la que el valor fundamental de la velocidad básica del viento es de 26 m/s.

Por otro lado, puesto que las zonas oeste y sur de la ubicación de la estructura están despobladas y por el norte y el este hay diferentes construcciones bajas, se considera que se trata de una categoría de terreno II. Esta categoría se aplica a áreas con vegetación baja, y obstáculos aislados (árboles, edificaciones, etc.) con separaciones de, al menos, 20 veces la altura de los obstáculos.



Figura 17: Zonas diferenciadas sobre mapa del territorio español [6]

2. Período de servicio (vida útil): la vida útil prevista de la estructura es de, como mínimo, 10 años, con un ciclo de funcionamiento mínimo de 35000 h.

Aunque la estructura esté diseñada para una velocidad básica del viento de 26 m/s, el vehículo, por seguridad de los pasajeros, no circulará por la estructura si la velocidad del viento supera los 15 m/s. En el momento en el que se superen estos 15 m/s, serán los operarios los que deban cerrar la montaña rusa de forma inmediata.

El perfil de viento utilizado, y reflejado en la Tabla 3, se genera automáticamente por el programa RFEM en base al CTE DB-SE-AE [16] al introducir la ubicación de la estructura y la categoría del terreno, tal y como se puede ver en la Figura 18. Este perfil de viento es exportado a RWIND, donde se realiza la simulación fluidodinámica oportuna. Una vez finalizada la simulación, los resultados de la interacción fluido-estructura (fuerzas y presiones resultantes sobre la estructura) son importados a RFEM, donde finalmente se realiza el cálculo de tensiones/deformaciones y desplazamientos.

Tabla 3: Perfil de velocidad de viento generado por RFEM

Núm.	Altura z [m]	Velocidad del viento v [m/s]
1	0.000	32.31
2	2.898	37.46
3	5.795	40.75
4	8.693	42.67
5	11.591	44.02
6	14.488	45.06
7	17.386	45.91
8	20.284	46.63
9	23.181	47.25
10	26.079	47.80
11	28.977	48.29
12	31.874	48.73
13	34.772	49.13
14	37.670	49.50
15	40.567	49.85
16	43.465	50.17

Diseño y cálculo estructural de un tramo de 75 metros de longitud de una montaña rusa situada en San Martín de la Vega, Madrid

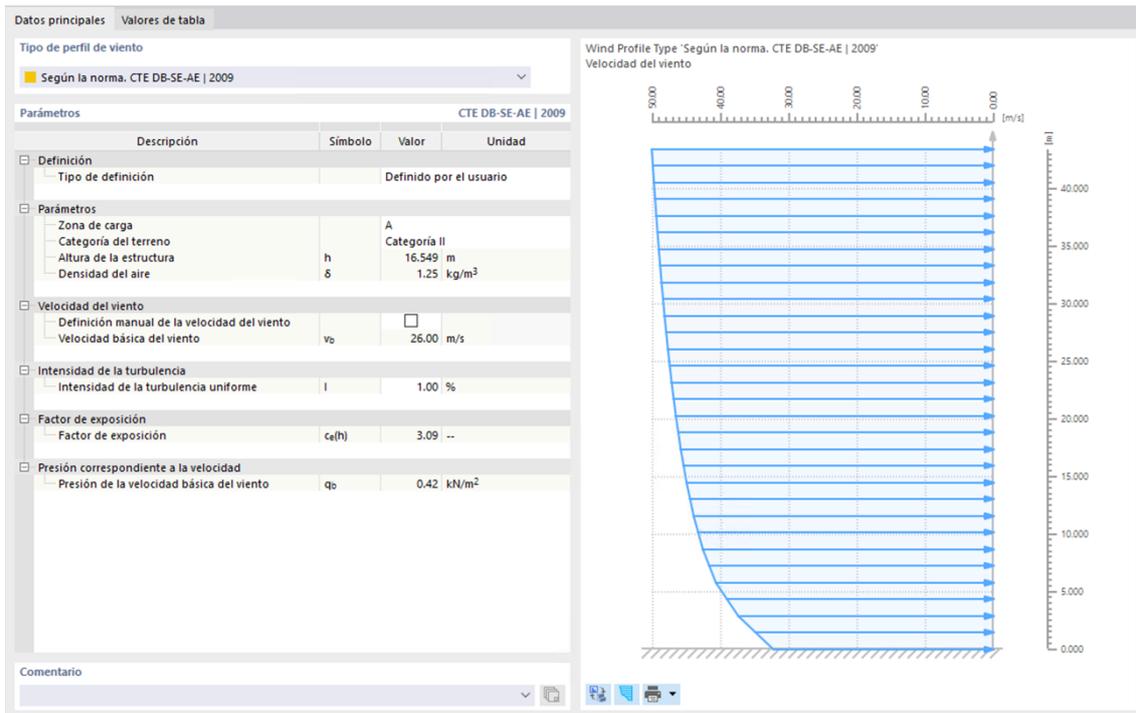


Figura 18: Perfil de velocidad de viento v (m/s) a lo largo de la altura (m) generado por RFEM y los datos introducidos para su generación

Los valores de los distintos parámetros utilizados para realizar las simulaciones se pueden observar en la siguiente tabla.

Tabla 4: Parámetros del modelo de simulación CFD definidos en RWIND

Parámetros del modelo	
Parámetros del flujo	
Fluido	Aire
Densidad	1,25 kg/m ³
Viscosidad cinemática	0,000015 m ² /s
Parámetros de cálculo	
Densidad de malla para cálculo dinámico de fluidos	20%
Número máximo de iteraciones	500
Residuo objetivo	0,01
Nivel de detalle	2
Propiedades del modelo de turbulencias	
Intensidad de turbulencia	1,0%

Para la simulación de viento se consideran 8 direcciones de viento distintas, a intervalos de 45°, tal y como se puede ver en la siguiente figura.

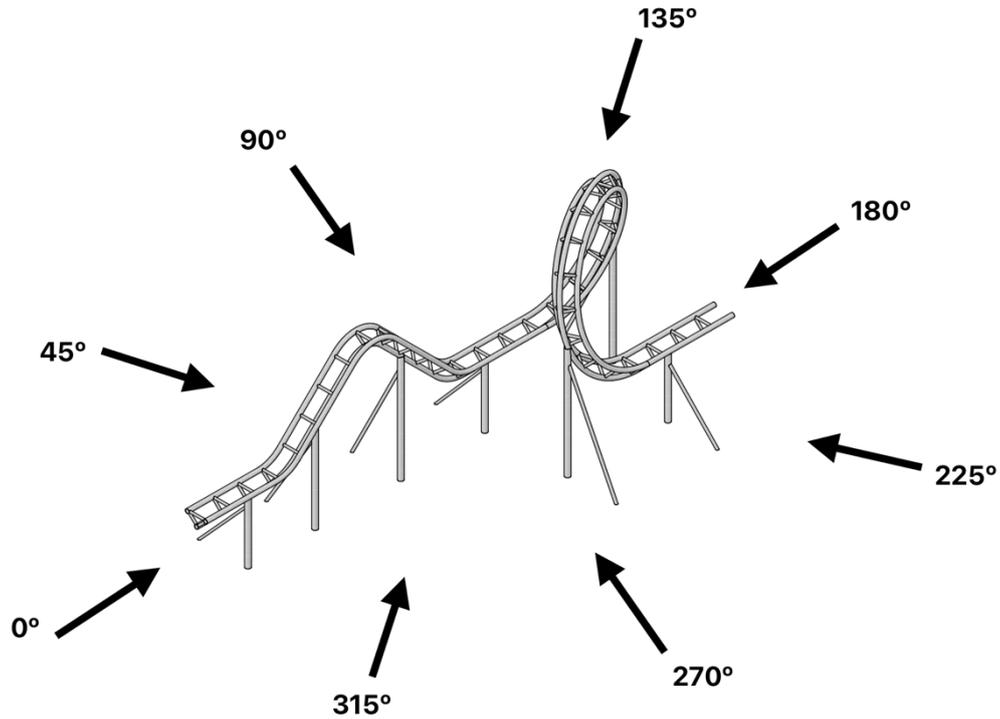
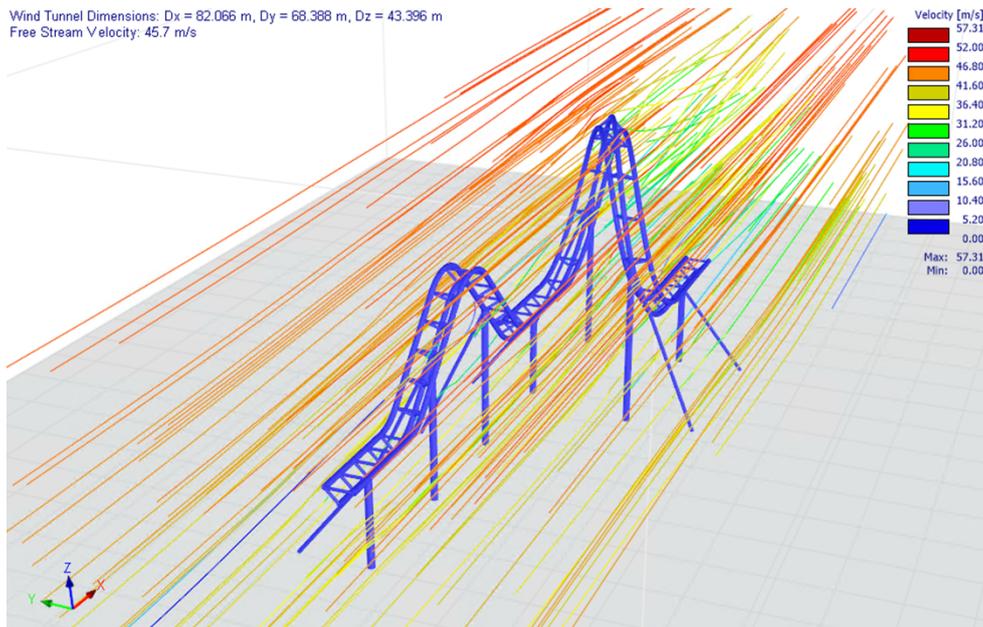


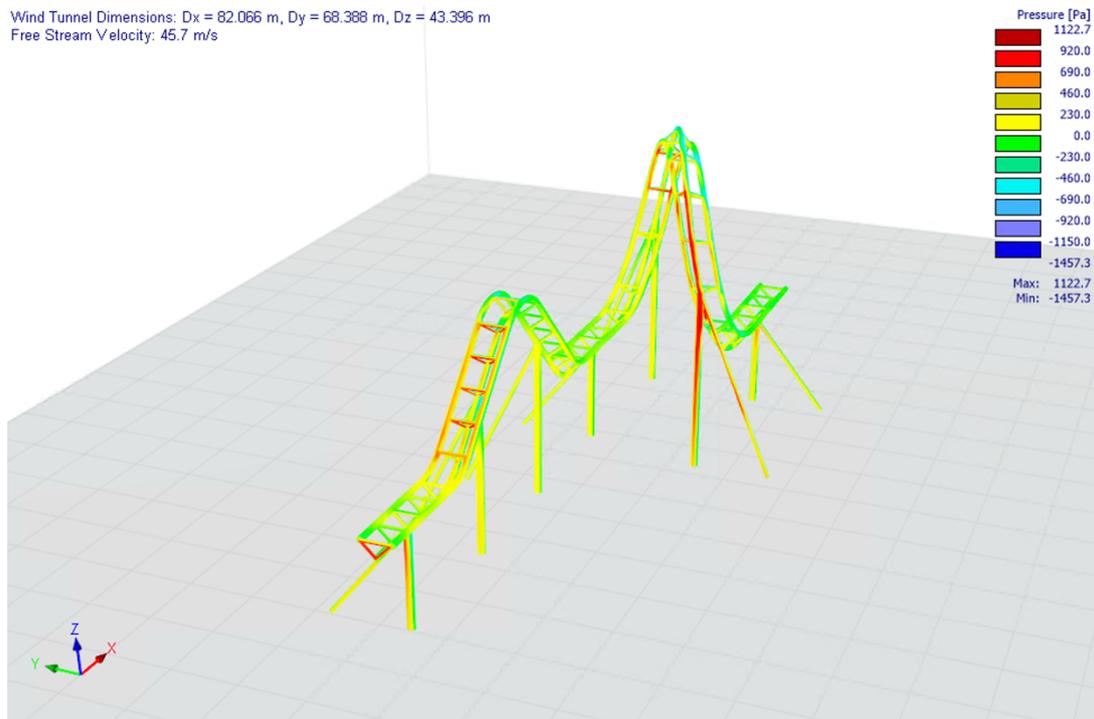
Figura 19: Direcciones de viento

En las siguientes figuras se muestran algunas de las posibles representaciones que ofrece el programa RWIND a partir del ensayo con el perfil de viento definido para el viento incidiendo con un ángulo de 0°, 45° y 90°. En concreto se representan, las líneas de velocidad del viento (en las que se puede ver la interacción de las distintas corrientes de viento con la estructura), el campo de presiones en la superficie de la estructura, viendo zonas de presión positiva en colores cálidos y zonas de succión con colores fríos.

Diseño y cálculo estructural de un tramo de 75 metros de longitud de una montaña rusa situada en San Martín de la Vega, Madrid



a) Líneas de velocidad del viento



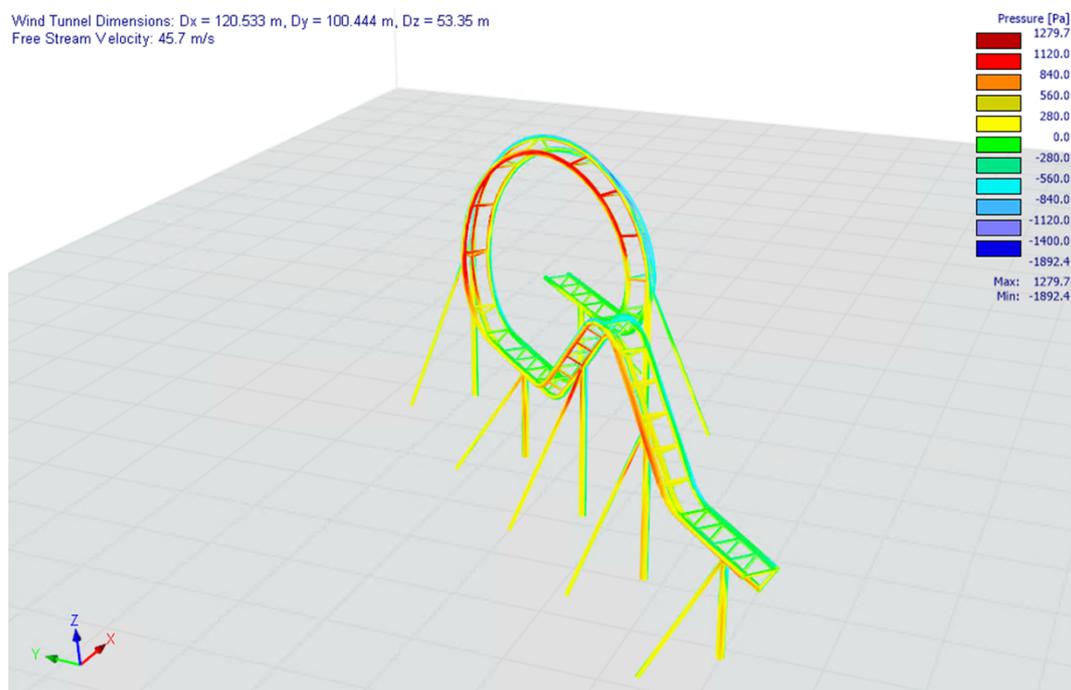
b) Campo de presiones

Figura 20: Viento a 0°

Diseño y cálculo estructural de un tramo de 75 metros de longitud de una montaña rusa situada en San Martín de la Vega, Madrid



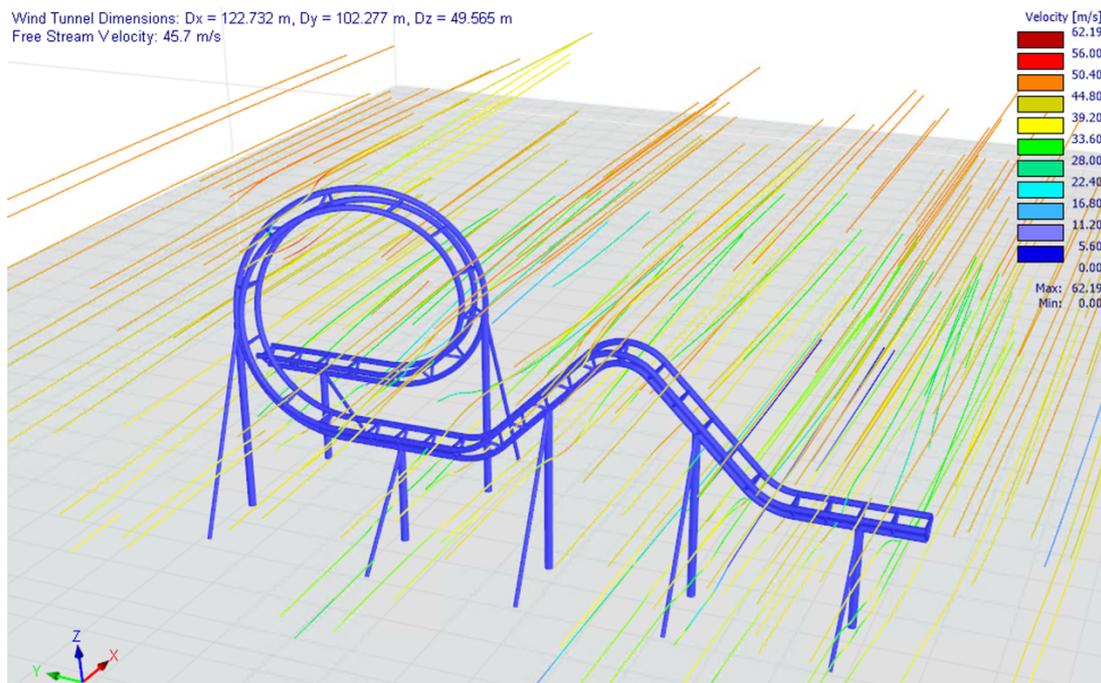
a) Líneas de velocidad del viento



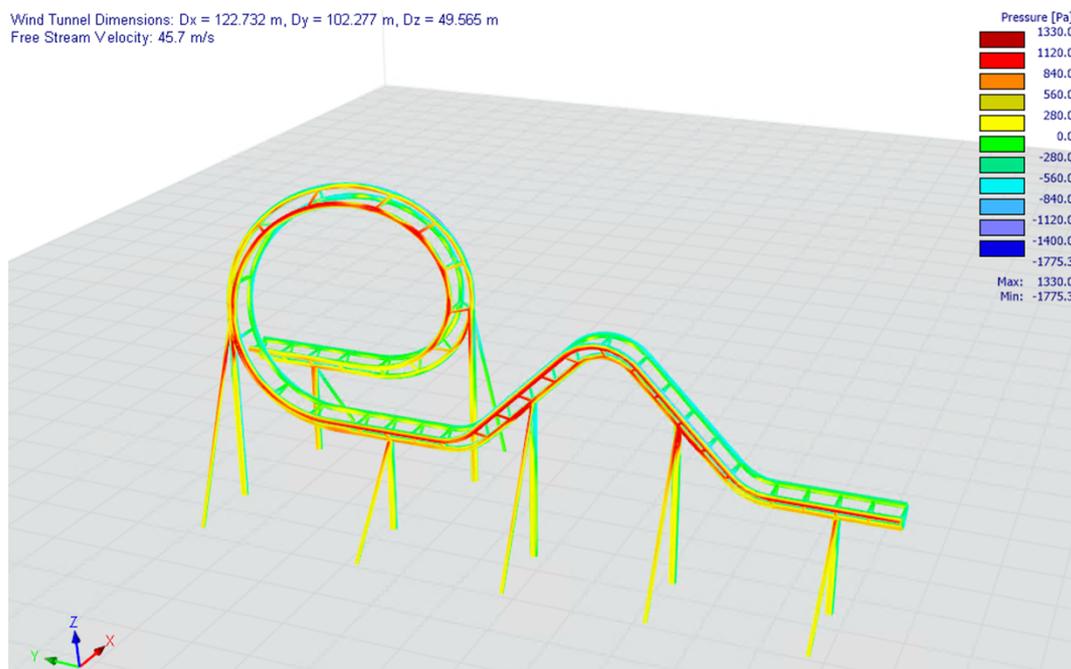
b) Campo de presiones

Figura 21: Viento a 45°

Diseño y cálculo estructural de un tramo de 75 metros de longitud de una montaña rusa situada en San Martín de la Vega, Madrid



a) Líneas de velocidad del viento



b) Campo de presiones

Figura 22: Viento a 90°

3.2.2. CARGAS DE NIEVE

La acumulación de nieve puede suponer un peso extra importante en ciertas estructuras. En el caso de las montañas rusas abiertas existirá una acumulación considerable en zonas semi-cerradas, como por ejemplo en la caseta donde podrían ubicarse los operarios, o en elementos decorativos.

Como se ha comentado anteriormente, en el presente trabajo solo se estudia un tramo de la montaña rusa, que presenta zonas inclinadas, por lo que es improbable que se produzca una acumulación cuyo volumen suponga un peso importante para la estructura.

Por otro lado, en el caso de producirse una nevada, por motivos de seguridad se llevará al cierre de la montaña rusa. También se debe tener en cuenta que una velocidad de viento como la empleada en el diseño, volaría la posible acumulación de nieve, por lo que tampoco tendría sentido su combinación con las otras acciones consideradas.

3.2.3. ACCIONES TÉRMICAS

En el diseño llevado a cabo, no se tienen en cuenta las posibles acciones térmicas sobre la estructura por cambios bruscos de temperatura. Esto es así porque se trabaja bajo la hipótesis de que los tramos continuos de la estructura de raíles de la montaña rusa, cuya longitud no supera los 40 metros lineales, se unen entre sí mediante conexiones de chapas frontales atornilladas con holgura suficiente para alojar las posibles dilataciones térmicas.

3.2.4. FUERZAS DE INERCIA DEL VEHÍCULO

Todas las fuerzas que se consideran sobre el vehículo para el diseño de la estructura, están descritas en el apartado *II.4.1*.

Teniendo en cuenta las vibraciones producidas por el deslizamiento del vehículo sobre la estructura, la norma UNE-EN13814-1 [4] establece un coeficiente de vibración $\varphi_2 = 1,2$, a falta de modelar con detalle el vehículo y su comportamiento. Este coeficiente mayorará las fuerzas inerciales del vehículo.

La norma especifica que, en caso de modelarse el vehículo y su comportamiento de forma detallada, podrá reducirse este coeficiente. Puesto que en el presente proyecto no se ha llevado a cabo esto, se considera este coeficiente $\varphi_2 = 1,2$.

3.2.5. COLISIONES INTENCIONADAS DURANTE EL FUNCIONAMIENTO

En la montaña rusa diseñada no es posible ningún tipo de colisión intencionada, por lo que no es necesario tener en cuenta sus posibles efectos sobre la estructura.

3.2.6. CARGAS DE FUEGO

Los posibles efectos por incendio no se consideran en el presente proyecto, puesto que quedan fuera de su alcance.

4. ANÁLISIS DE FUERZAS INERCIALES DEL VEHÍCULO SOBRE LA ESTRUCTURA

Existen diversos métodos y aplicaciones para poder calcular las fuerzas inerciales de un vehículo circulando sobre una estructura. Un ejemplo de esto, sería la integración paso a paso mediante el análisis multicuerpo, propuesto por [17]. La gran mayoría de estos resultan complejos y extensos, y centran su análisis en el vehículo. Puesto que el presente trabajo se centra en el análisis de la estructura, y no en el diseño y análisis del vehículo, este tipo de métodos resulta inviable.

Por esto, se recurre a un análisis sencillo de las fuerzas que transmite el vehículo a la estructura en ciertos puntos de esta. Para ello, se hace uso de las Leyes de Newton, así como del teorema de la conservación de energía.

Aparte de las cargas actuantes obtenidas a partir del análisis mencionado, no se debe olvidar el peso del propio vehículo, que actuará siempre de forma vertical y que debe considerarse en todos los puntos.

Se han supuesto las siguientes hipótesis:

1. En cuanto a la fuerza de fricción de las ruedas del vehículo, ya se ha mencionado que, el diseño del vehículo escapa al alcance del proyecto. Por lo tanto, se supone que las ruedas están fabricadas de un material cuyo coeficiente de rozamiento con los raíles es prácticamente nulo. De esta forma, se trabaja bajo la hipótesis de que las fuerzas de fricción son muy inferiores a las obtenidas con el análisis y pueden ser despreciadas.
2. De igual forma, las fuerzas aerodinámicas producidas por el vehículo al circular con cierta velocidad serán despreciadas puesto que la aceleración de frenada que provocan estas fuerzas es prácticamente nula. Posteriormente, se comprobará que esta hipótesis es correcta.

Teniendo en cuenta estas dos últimas hipótesis, se puede concluir que en los tramos sin curvatura (tramos horizontales y la subida y bajada de la colina), la única fuerza que aparece es la del propio peso del vehículo. También se puede afirmar que en los tramos rectos la velocidad será prácticamente constante.

4.1. FUERZAS SOBRE LA VAGONETA

4.1.1. FUERZAS GRAVITATORIAS

Para estimar las fuerzas gravitatorias que provoca el vehículo sobre la estructura, se tiene en cuenta el peso del propio vehículo (con todos los elementos mecánicos que contiene) y el peso del número máximo de pasajeros que pueden circular en este vehículo.

Puesto que en este proyecto no se diseña el vehículo de la montaña rusa, se utiliza el modelo que se propone en [18], a partir del cual se estiman los pesos mencionados.

Los distintos elementos que se tienen en cuenta, así como sus propiedades, quedan recogidos en la *Tabla 5*.

Tabla 5: Propiedades de los elementos del vehículo

Nº	Cuerpos rígidos	Masa (kg)	Inercias (kg.m ²)		
			$I_{\xi\xi}$	$I_{\eta\eta}$	$I_{\zeta\zeta}$
1	Juego de ruedas delanteras izquierdas	10,1	0,14115	0,13446	0,93322
2	Juego de ruedas delanteras derechas	10,1	0,14115	0,13446	0,93322
3	Eje delantero	51,5	0,097884	2,3432	2,34232
4	Chasis	245	13,0706	77,8762	90,9305
5	Eje trasero	51,5	0,097884	2,3432	2,34232
6	Juego de ruedas posterior izquierda	10,1	0,14115	0,13446	0,93322
7	Juego de ruedas posterior derecha	10,1	0,14115	0,13446	0,93322
8	Cuerpo	280	30,7503	127,8009	145,6759

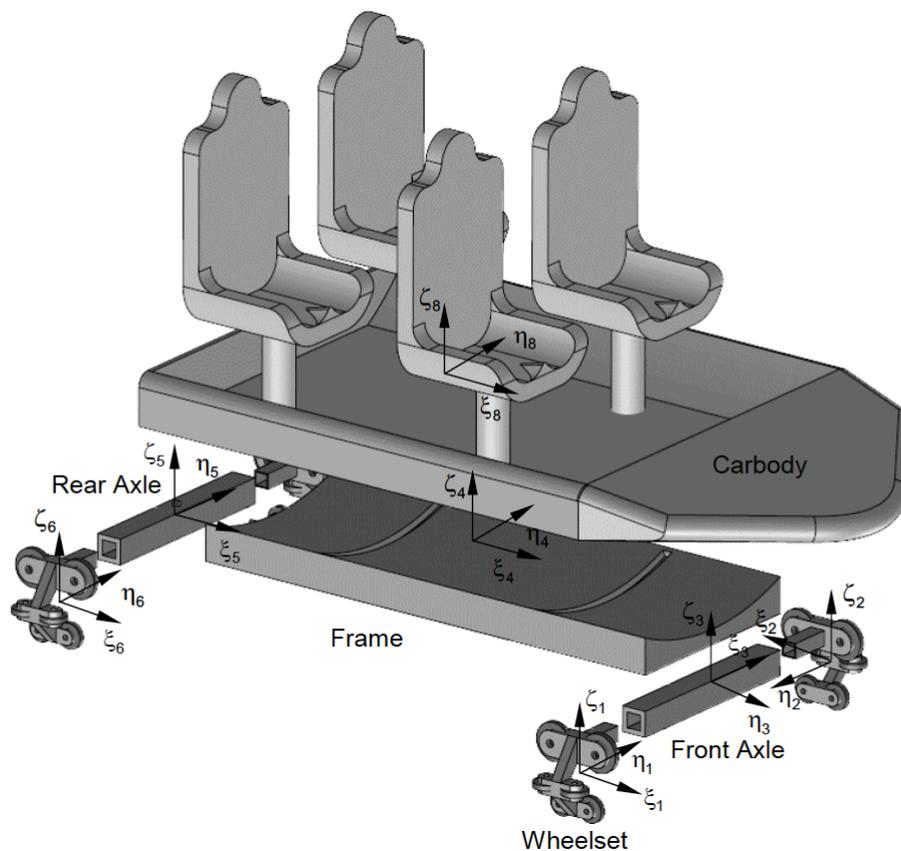


Figura 23: Representación geométrica del vehículo propuesto [20]

A partir de los datos recogidos en la tabla, se puede saber que la masa total del vehículo, a falta de tener en cuenta los pasajeros, es de 668.4 kg.

Por otro lado, se supone que los 4 pasajeros que pueden viajar en la montaña rusa son mayores de 10 años, por lo que, tal y como menciona la norma UNE-EN13814-1 [4], el peso de cada pasajero debe calcularse como:

$$Q_k = 0,75 \text{ kN}$$

para todos los cálculos a fatiga

$$Q_k = 0,75 \text{ kN}$$

para todos los cálculos estáticos y más de 4 pasajeros por compartimento

$$Q_k = 1,35 \text{ kN} - ((n - 1) \times 0,15 \text{ kN}) \quad \text{para cálculos estáticos}$$

donde: $1 \leq n \leq 4$, siendo n el número de pasajeros.

Por tanto, para el cálculo estático, el peso total a considerar es de:

$$\text{Peso total} = 668,4 \text{ kg} \times \frac{9,81 \text{ N}}{1 \text{ kg}} \times \frac{1 \text{ kN}}{1000 \text{ N}} + 1,35 \text{ kN} - 3 \times 0,15 \text{ kN} \approx 10,3 \text{ kN}.$$

Sabiendo esto, se puede estimar la masa total del vehículo totalmente cargado en unos 1050 kg.

4.1.2. FUERZAS TRANSMITIDAS AL CIRCULAR EL VEHÍCULO SOBRE LOS RAÍLES

Tal y como se ha mencionado, se hace uso del teorema de la conservación de la energía mecánica para calcular la velocidad en ciertos puntos de la estructura.

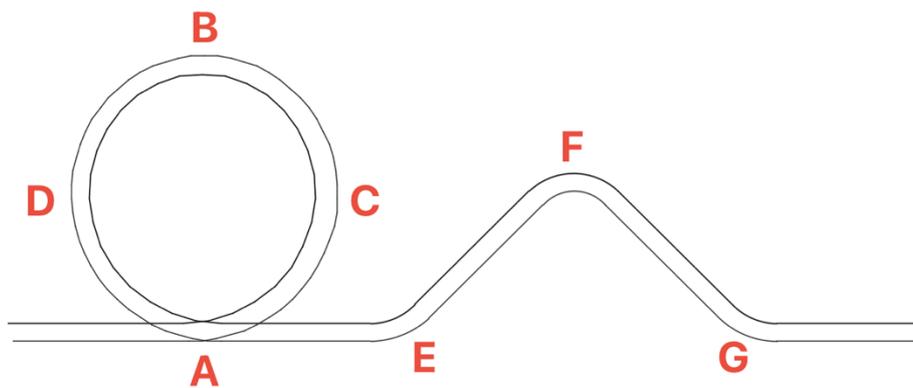


Figura 24: Puntos de la estructura en los que se va a calcular la velocidad del vehículo

Cabe recordar que, tal y como se ha explicado en el apartado 3.3. de la memoria, el “loop” propuesto es una simplificación del real, puesto que realmente un “loop” vertical tiene forma de clotoide, y no es una circunferencia perfecta como la diseñada.

Por ello, no se calculan las fuerzas producidas por el vehículo a la entrada y a la salida del “loop”, ya que, en estos dos tramos, realmente no se tendría el radio de la circunferencia, sino un radio mucho mayor, siendo la fuerza centrífuga en estos puntos menor a la que se pueden calcular con el modelo diseñado.

El hecho de adoptar una clotoide es, principalmente, para evitar que las fuerzas que presentaría el vehículo en la mitad inferior sean excesivas, ya que estas fuerzas son proporcionales a la velocidad e inversamente proporcionales al radio.

4.1.2.1. VELOCIDAD MÍNIMA EN EL PUNTO MÁS ALTO DEL “LOOP” (punto “B”)

En el “loop” vertical hay un instante, en el punto más alto de este, en el que el vehículo se encuentra totalmente bocabajo. Aunque, como en la mayoría de vehículos en montañas rusas actuales, se hace uso de ruedas auxiliares en la parte inferior de estos, si el vehículo tuviese una velocidad lineal inferior a cierto valor, la fuerza de la gravedad sería superior a la fuerza centrífuga, y los raíles tendrían que soportar la totalidad del peso del vehículo.

Con todo esto, se plantea que, como mínimo, la fuerza centrífuga debe ser igual al peso del vehículo. En ausencia de otras fuerzas, se tiene que:

$$F_c = P \rightarrow m \cdot \frac{v^2}{R} = m \cdot g \rightarrow v = \sqrt{g \cdot R} = \sqrt{9,81 \cdot 5} = 7 \text{ m/s} \approx 25 \text{ km/h}$$

Esta velocidad es razonable para una montaña rusa de las dimensiones planteadas, por lo que se puede concluir que este procedimiento es correcto.

A partir de este valor, se obtienen las velocidades en el resto de puntos calculados.

4.1.2.2. VELOCIDAD A LA ENTRADA Y SALIDA DEL "LOOP" (punto "A")

En el punto "A", a la entrada y salida del "loop", el vehículo tiene la misma velocidad, y por tanto la misma fuerza resultante.

A partir del teorema de la conservación de la energía mecánica:

$$Em_A = Em_B \rightarrow Ec_A + Ep_A = Ec_B + Ep_B \rightarrow$$
$$\frac{1}{2} \cdot m \cdot v_A^2 + m \cdot g \cdot h_A = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_B^2 + m \cdot g \cdot h_B$$

Se considera h_B como la diferencia de alturas entre ambos puntos, de forma que $h_A = 0$ m y $h_B =$ diámetro del "loop" = 10 m. Sustituyendo el resto de valores, y operando, se llega a:

$$\frac{1}{2} \cdot v_A^2 = \frac{1}{2} \cdot 7^2 + 9,81 \cdot 10$$

De esta última ecuación, se obtiene que la velocidad en el punto "A" es de 15,66 m/s, que es aproximadamente una velocidad de 56 km/h, siendo una velocidad razonable para una montaña rusa como la diseñada.

4.1.2.3. PUNTOS A LA MITAD DE LA ALTURA DEL "LOOP" (punto "C" y punto "D")

Se sigue el mismo procedimiento que el empleado para calcular la velocidad en el punto "A". Así, a partir del punto "A", sabiendo su velocidad y considerando que su altura es nula, se calcula la velocidad que tiene el vehículo en los puntos "C" y "D", que es la misma en ambos por estar los dos a una altura igual al radio de "loop" (5 metros) con respecto del punto "A". Por lo tanto, para el punto "C" (que coincide con la velocidad en el punto "D"):

$$Em_A = Em_C \rightarrow Ec_A + Ep_A = Ec_C + Ep_C \rightarrow$$
$$\frac{1}{2} \cdot m \cdot v_A^2 + m \cdot g \cdot h_A = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_C^2 + m \cdot g \cdot h_C$$

Teniendo en cuenta que se conoce $v_A = 15,66$ m/s, que $h_A = 0$ y que $h_C = 5$ m, se tiene:

$$\frac{1}{2} \cdot 15,66^2 = \frac{1}{2} \cdot v_C^2 + 9,81 \cdot 5$$

De esta última ecuación, se obtiene que la velocidad en los puntos "C" y "D" es de 12,13 m/s (unos 44 km/h).

En este punto sí existe una fuerza centrífuga, dirigida hacia afuera de la circunferencia en dirección horizontal, y el peso del vehículo.

Esta fuerza centrífuga se calcula con la siguiente ecuación:

$$F_{C_C} = F_{C_D} = m \cdot \frac{v_C^2}{R} = 1050 \cdot \frac{12,13^2}{5} = 30,9 \text{ kN}$$

4.1.2.4. INICIO Y FINAL DE LA COLINA (puntos "E" y "G")

Como se ha mencionado, se asume que en los tramos horizontales la velocidad es constante, por lo que, a la llegada de la colina, el vehículo tiene la misma velocidad que en el punto "A". De igual forma, como la altura ascendida en la colina es la misma que la que se desciende posteriormente, se asume que la velocidad en los puntos "E" y "G" es la misma (15,66 m/s).

En el inicio del ascenso E-F, así como en el final del descenso F-G, presentan un radio de curvatura de 2,5 m. Como el vehículo tiene la velocidad de 15,66 m/s:

$$F_{C_E} = F_{C_G} = m \cdot \frac{v_E^2}{R} = 1050 \cdot \frac{15,66^2}{2,55} = 103 \text{ kN}$$

Esta fuerza será percibida formando 45° con el eje horizontal y el vertical, y en sentido hacia el terreno, tal y como se ve en la Figura 25. A la componente vertical, se le debe sumar el peso del propio vehículo.

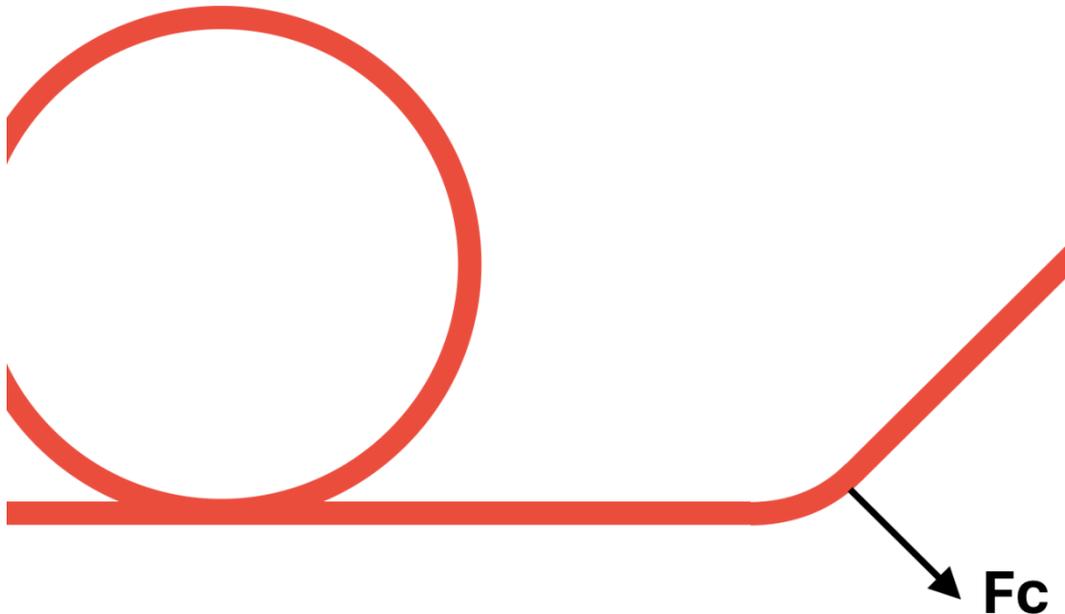


Figura 25: Fuerza resultante en puntos "E" y "G"

4.1.2.5. CIMA DE LA COLINA (punto "F")

El último punto cuya velocidad hace falta conocer es el que se tiene en la cima de la colina.

Aplicando el mismo teorema que se ha empleado hasta el momento, se calcula la velocidad en "F" a partir de la velocidad en "E" y "G". Teniendo en cuenta que la altura del punto "F" está aproximadamente 7 metros por encima de los puntos "E" y "G", se asume que $h_E = h_G = 0$ m, $h_F = 7$ m y $v_E = v_G = 15,66$ m/s. De esta forma, se tiene que:

$$\begin{aligned}Em_E &= Em_F \rightarrow Ec_E + Ep_E = Ec_F + Ep_F \rightarrow \\ \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_E^2 + m \cdot g \cdot h_E &= \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_F^2 + m \cdot g \cdot h_F \rightarrow \\ \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_E^2 &= \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_F^2 + m \cdot g \cdot h_F \rightarrow\end{aligned}$$

Con esto, se llega a que:

$$\frac{1}{2} \cdot 15,66^2 = \frac{1}{2} \cdot v_F^2 + 9,81 \cdot 7$$

De esta última ecuación, se obtiene que la velocidad en el punto "F" es de 10,4 m/s, (unos 37,5 km/h).

Con esta velocidad, sabiendo que el radio de curvatura en la colina es de 2,5 metros, se puede saber la fuerza resultante en este punto (sin saber todavía si es hacia arriba o hacia abajo). Esta fuerza es absorbida por la estructura, ya que como se ha comentado anteriormente, en caso de ser una fuerza de despegue se transmite del vehículo a la estructura por medio de la rueda auxiliar inferior. Así, suponiendo que la fuerza resultante "Fr" va hacia arriba, se tiene que:

$$\begin{aligned}\sum F &= 0 \rightarrow F_c - P = Fr \rightarrow \\ P + Fr &= F_c = m \cdot \frac{v^2}{R} \rightarrow \\ Fr &= m \cdot \left(\frac{v^2}{R} - g \right) = 1050 \cdot \left(\frac{10,4^2}{2,5} - 9,81 \right) \approx 35,2kN\end{aligned}$$

4.1.3. FUERZAS AERODINÁMICAS

Se puede concluir que la hipótesis adoptada de despreciar las fuerzas aerodinámicas es correcta, pues simplificando el modelo del vehículo propuesto, se tiene, para un cubo de las dimensiones iguales a las del vehículo, un coeficiente de forma $C_f = 1,05$ [19], un área frontal $A = 1$ m² y la densidad del aire $\rho_{aire} = 1,225$ kg/m³. Se tiene una fuerza aerodinámica en el punto "A" (donde es máxima la velocidad del vehículo) de:

$$Fa_{m\acute{a}x} = \frac{1}{2} \cdot C_f \cdot A \cdot \rho_{aire} \cdot v_{m\acute{a}x}^2 = \frac{1}{2} \cdot 1,05 \cdot 1 \cdot 1,225 \cdot 15,66^2 \approx 160N$$

Esta fuerza se aplica sobre el vehículo en la dirección de su movimiento y en sentido contrario al mismo, frenándolo. La aceleración de frenada que se ve reflejada en el vehículo es:

$$F = m \cdot a \rightarrow$$

$$a = \frac{F}{m} = \frac{160}{1050} = 0,15 \text{ N/kg} = 0,15 \text{ m/s}^2$$

Por tanto, se puede concluir que se trata de una aceleración despreciable y que es correcto despreciarla a la hora de calcular las fuerzas producidas por el vehículo sobre la estructura.

4.2. RESUMEN DE CARGAS APLICADAS

Teniendo en cuenta lo mencionado en el anterior apartado, se elabora una tabla con las fuerzas aplicadas sobre la estructura, así como su localización, dirección y sentido. En los puntos en los que se tienen fuerzas con componente vertical, se suma el peso del vehículo.

Se definen los tramos 1 y 2, siendo estos los dos tramos horizontales de la estructura. El tramo 1 es el que se encuentra entre el “loop” y la colina, y el tramo 2 es el último tramo de la estructura, posterior a la colina.

Para simplificar la aplicación de estas cargas sobre la estructura, siendo que los raíles no tienen inclinación lateral, se supone que las fuerzas mencionadas se reparten de forma equitativa entre las 4 ruedas del vehículo, siendo la fuerza aplicada en cuatro puntos y con valor de $F/4$.

Se debe recordar que, tal y como se menciona en el apartado 3.2.4., se debe multiplicar estas fuerzas por $\varphi_2 = 1,2$. Con todo esto, los valores de las fuerzas que se deben introducir en el modelo de la estructura a calcular son:

Tabla 6: Fuerzas aplicadas en los distintos tramos de la estructura, de acuerdo con la Figura 24

Tramo/Punto	Velocidad (m/s)	$1,2 \cdot F_v/4$ (kN)	$1,2 \cdot F_h/4$ (kN)
Punto A	15,66	-3,09	0
Punto C	12,13	-3,09	+9,27
Punto D	12,13	-3,09	-9,27
Tramo 1	15,66	-3,09	0
Punto E	15,66	-25	+21,85
Punto F	10,4	+10,54	0
Punto G	15,66	-25	-21,85
Tramo 2	15,66	-3,09	0

4.3. SEGURIDAD DE LA TRAYECTORIA

La norma UNE-EN13814-1 [4] especifica que las aceleraciones laterales y verticales, así como la combinación simultánea de ambas, deben estar limitadas por ciertos valores superiores e inferiores, de lo contrario pueden ser perjudiciales para los pasajeros.

Algunos de los efectos nocivos para la salud de los pasajeros que pueden provocar estas aceleraciones, fuera de los rangos especificados por la norma, son la alteración de la circulación sanguínea o daños en las vértebras.

También se debe tener en cuenta el riesgo de despegue del vehículo, pues hay zonas, como en la colina propuesta, en la que la fuerza vertical resultante puede ser demasiado elevada como para que exista riesgo de despegue. Para evitar el despegue del vehículo se hace uso de las ruedas guía inferiores y, de ser necesario según la norma [4] se debe diseñar el vehículo con un sistema de sujeción que evite el despegue de los pasajeros.

Una vez definida la trayectoria de la montaña rusa y calculadas las distintas velocidades y aceleraciones, se comprueban los distintos parámetros marcados por la normativa, tal y como se ha explicado en el anterior apartado.

Puesto que el recorrido diseñado no presenta inclinación en los carriles, no es necesaria la comprobación de las fuerzas laterales. En cambio, sí que se deben comprobar las aceleraciones verticales.

Puesto que este procedimiento es extenso y requiere la parametrización del recorrido, así como la programación de distintos códigos que muestren por pantalla los resultados oportunos, se ha obviado esta parte del proyecto y se ha supuesto que los valores que se obtendrían están dentro de los rangos dictados por la norma [4].

Aunque no se lleve a cabo, en caso de que se comprobasen estos parámetros y hubiese alguna aceleración vertical fuera de rango, las posibles soluciones pasarían por disminuir la inclinación de subida y bajada de la colina o disminuir radios de giro.

Se requiere tantas iteraciones como sean necesarias, hasta que los resultados obtenidos presenten valores dentro de los rangos establecidos por la normativa.

5. DISEÑO DE LA ESTRUCTURA

5.1. MODELADO DE LA ESTRUCTURA DE LOS RAÍLES

Los raíles por los que circula el vehículo en una montaña rusa tienen dos funciones principales. Por un lado, tal y como se ha explicado anteriormente, son los encargados de guiar al vehículo, limitando sus grados de libertad y marcando la trayectoria que este debe seguir. Por otro lado, también tienen una función estructural. Esto es porque cuando el vehículo circula, los raíles son los encargados de transmitir los esfuerzos recibidos del vehículo a los pilares sobre los que se apoyan.

Dentro de la industria de las montañas rusas, existen tres tipos principales de raíles.

1. Las estructuras cuyos raíles se componen de dos únicos perfiles tubulares, unidos entre sí por medio de rigidizadores, directamente apoyados sobre la estructura de soporte. Este tipo de estructuras es más susceptible a posibles deformaciones, ya que no cuenta con los rigidizadores de los dos tipos que se comentan a continuación, por lo que puede presentar deformaciones excesivas.



Figura 26: Ejemplo de montaña rusa diseñada a partir de dos perfiles tubulares

2. La estructura más común en los parques de atracciones es la compuesta por dos perfiles tubulares (sobre los que circula el vagón) y un tercer perfil tubular inferior unido a la estructura de soporte, conectados entre sí mediante rigidizadores o barras de triangulación. Esta permite una mejor respuesta estructural que la anterior alternativa, pues los esfuerzos se ven principalmente transmitidos a la viga inferior, y por tanto a los soportes, reduciendo las solicitaciones en los dos raíles superiores.

Existen variedad de disposiciones para los rigidizadores, si bien en el presente proyecto se opta por disponer la triangulación que se puede ver en la Figura 27, donde las barras interiores de la triangulación se unen a las barras principales de manera que sean capaces de transmitir únicamente axil de tracción o compresión.

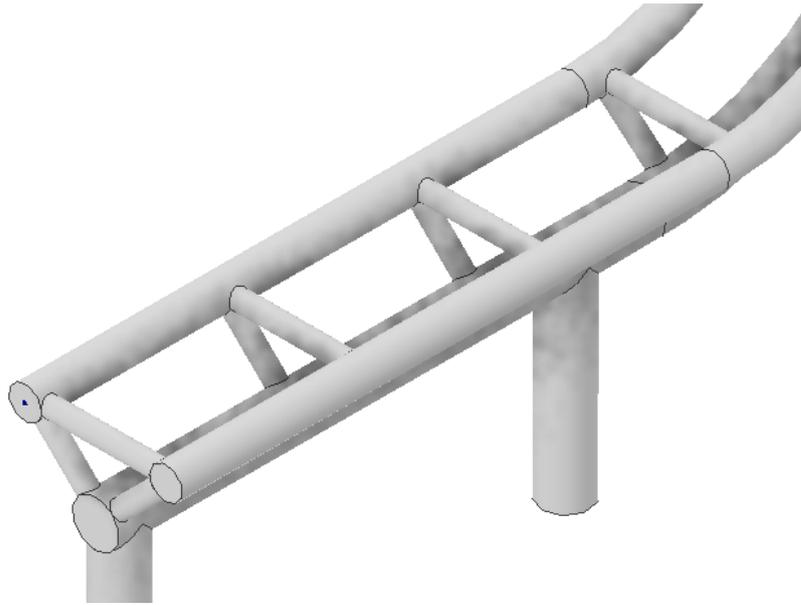


Figura 27: Estructura de los railes diseñados (con 3 perfiles tubulares)

3. La última alternativa, sería el uso de un raíl con forma de cercha tipo Warren. Esta estructura permite que la distancia entre soportes sea mucho mayor con respecto a los otros dos tipos. Esto, por otro lado, provoca que las secciones necesarias en los perfiles tubulares se vean disminuidas, a costa de aumentar el precio total de la estructura, pues aumenta la cantidad de barras empleadas y número de uniones a ejecutar.



Figura 28: Ejemplo de montaña rusa diseñada a partir de cuatro perfiles tubulares (Cercha tipo Warren)

5.2. MODELADO INICIAL DE LA ESTRUCTURA

5.2.1. HIPÓTESIS ADOPTADAS

Para el modelado, se siguen las siguientes hipótesis:

1. Los elementos empleados para discretizar el modelo de elementos finitos son unidimensionales tipo “viga”, con 6 grados de libertad en cada nodo. Este tipo se caracteriza por ser capaz de transmitir todos los esfuerzos y momentos en sus extremos, como puede observarse en la Figura 29.

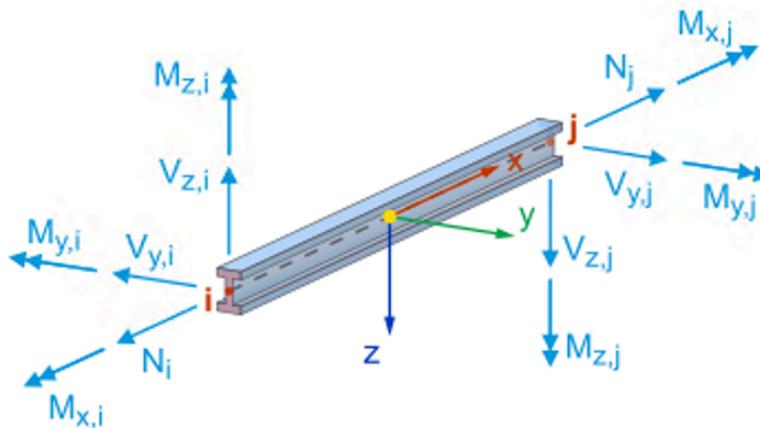


Figura 29: Elemento finito tipo viga

Todas las barras del modelo, a excepción de los rigidizadores, se definen como elementos tipo viga en el programa RFEM.

Los rigidizadores, sin embargo, se definen como elementos uni-dimensionales tipo “cercha”, capaces de transmitir únicamente esfuerzos axiales internos de tracción o compresión.

2. La técnica de cálculo empleada es el análisis geoméricamente lineal. Al calcular según esta técnica, el equilibrio se analiza en un sistema estructural no deformado, siendo las fuerzas directamente proporcionales a los desplazamientos.
3. Las comprobaciones y cálculos se llevan a cabo en un entorno 3D.

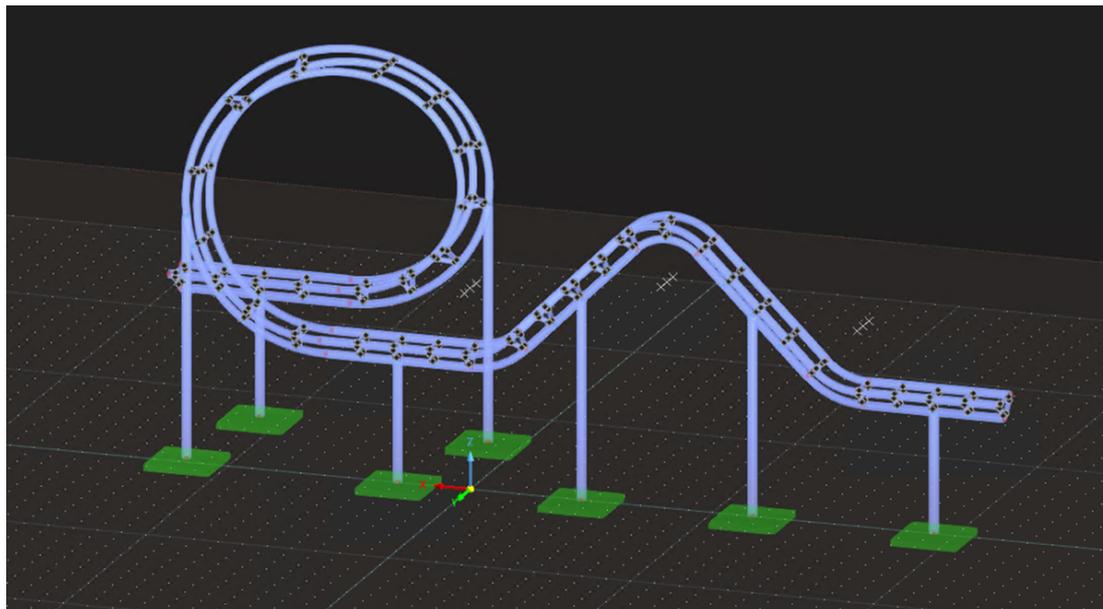


Figura 30: Modelo inicial

5.2.2. PREDIMENSIONADO

Para el cálculo de la estructura, se deben estimar unos perfiles iniciales para poder realizar las iteraciones necesarias y llegar a los perfiles óptimos, tanto de los raíles, como de la estructura de soporte.

En cuanto a los perfiles tubulares de los raíles por los que circula el vagón se parte de un perfil CHS 323.9x6.3, pues se trata de un perfil habitual en estructuras como la diseñada y con las características correctas *a priori*.

Por otro lado, para la estimación de los perfiles a emplear en la estructura soporte, se debe seleccionar estos por medio de un criterio inicial. En este proyecto, para simplificar la estructura, se opta por utilizar un mismo perfil tubular para todos los pilares, por lo que se predimensiona aquel que presenta condiciones más desfavorables. El criterio empleado en el predimensionado se basa en limitar la esbeltez relativa de los soportes sometidos a compresión, comprobando más adelante en el cálculo definitivo que se cumplen los Estados Límite establecidos en la normativa bajo las acciones a las que estará sometida la estructura.

Así pues, puesto que se emplean perfiles tubulares circulares, la esbeltez relativa en los ejes “y” y “z” serán iguales, ya que los radios de giro i_y e i_z también lo son. Por lo tanto, suponiendo que los pilares trabajan principalmente a compresión, se debe limitar su esbeltez relativa a 2 [18]. Por otro lado, se utiliza un acero S355JR, de forma que su módulo de elasticidad es $E = 210.000$ MPa y su límite elástico es $f_y = 355$ MPa. Se considera en una primera instancia pilares monoposte empotrados en su base y con todos los grados de libertad libres en la cabeza (extremo superior), de forma que el pilar se puede asimilar a una barra empotrada-libre con posibilidad de traslación. De esta forma, se está en la situación más desfavorable y la beta de pandeo que le corresponde es igual a 2. Con todo esto, se calcula la esbeltez relativa como sigue:

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\sqrt{\frac{\pi^2 * 210.000}{355}}} < 2 \rightarrow \lambda < 152,82$$

Con esto, se calcula el radio de giro mínimo $i_y=i_z=i$ como sigue:

$$\lambda = \frac{l}{i} = \frac{\beta * L}{i} = \frac{2 * 9953}{i} < 152,82 \rightarrow i > 130,3 \text{ mm}$$

Partiendo de este valor, se toma el perfil CHS 406.4x8 (Clase 3), con $i = 141$ mm, presentando una esbeltez relativa $\lambda_r = 1,84 < 2$.

6. COMBINACIÓN DE ACCIONES

6.1. CASOS DE CARGA

En el modelo diseñado se incluyen los 17 casos de carga explicados a continuación.

Las acciones CC3 a CC10 se aplican alternativamente sobre el modelo, ya que representan las diferentes direcciones de viento. Tal y como se ha explicado anteriormente, se consideran 8 direcciones de incidencia distintas (0º, 45º, 90º, etc.), por lo que no sería lógica la combinación de estas cargas.

De igual forma, las acciones CC11 a CC18 se aplican alternativamente sobre el modelo, ya que representan las fuerzas que transmite el vehículo sobre la estructura al circular sobre esta en el supuesto de estar ubicado en distintas posiciones a lo largo del recorrido de los raíles, luego no pueden suceder más de una a la vez.

Tabla 7: Casos de Carga considerados en el diseño

Caso de Carga	Descripción	Categoría
CC1	Peso Propio de la Estructura	Permanente
CC3-CC10	Viento desde distintas direcciones	Viento
CC11-CC18	Fuerzas Inerciales del Vehículo	Cargas Inerciales

6.2. COMBINACIONES FUNDAMENTALES

La norma UNE-EN13814-1 [4] especifica en el apartado 4.3.6 que las acciones deben combinarse según indican las siguientes expresiones:

$$\sum \gamma_G \cdot G_k \quad (= \sum 1,35 \cdot G_k) \quad (2)$$

$$\sum \gamma_G \cdot G_k + \sum \gamma_Q \cdot Q_{k,i} \quad (= \sum 1,1 \cdot G_k + \sum 1,35 \cdot Q_{k,i}) \quad (3)$$

Donde:

- $\gamma_G = 1,35$ es el coeficiente parcial de seguridad solo para acciones permanentes;
- $\gamma_G = 1,1$ es el coeficiente parcial de seguridad para acciones permanentes junto con una o más acciones variables;
- $\gamma_G = 0,9$ es el coeficiente parcial de seguridad para acciones permanentes que actúan favorablemente;
- $\gamma_Q = 1,35$ es el coeficiente parcial de seguridad para acciones variables;
- G_k es el valor característico de las acciones permanentes;
- $Q_{k,i}$ es el valor característico de las acciones variables;

Se llevan a cabo distintas combinaciones, según el Estado Límite a comprobar:

1. La cantidad de combinaciones correspondientes a ELU son 17. Corresponde a las combinaciones de carga con los coeficientes explicados al principio de este mismo apartado.

2. Para las combinaciones de cargas correspondientes a ELS, se realizan las siguientes combinaciones:
 - Situación “fuera de servicio”: 1*Peso Propio + 1*Viento según [6].
 - Situación “en servicio”: 1*Peso Propio + 1*Carga móvil + 0,6*Viento según [6].

El coeficiente, cuyo valor es 0,6, tomado para evaluar el efecto del viento viene de la condición de que, para que la montaña rusa esté en funcionamiento, la velocidad del viento debe ser inferior a 15 m/s [6]. Puesto que la velocidad básica del viento considerada para la simulación es de 26 m/s, se multiplica la carga del viento por $\frac{15}{26} \approx 0,6$, para poder simular la situación límite, en la que la montaña rusa esté en funcionamiento y la velocidad del viento sea la máxima permitida.

7. COMPROBACIONES ESTRUCTURALES

Se evalúan los distintos Estados Límite a los que se somete la estructura, comprobando que esta cumple todos los criterios necesarios.

7.1. VERIFICACIÓN DE LOS ESTADOS LÍMITE DE SERVICIO (ELS)

La norma UNE-EN13814-1 [4], que se toma como referencia para las comprobaciones de la montaña rusa, no recoge los procedimientos que se deben seguir para verificar este estado límite, por lo que se seguirá lo redactado en el CTE DB-SE [7] así como los valores de referencia para las comprobaciones, y se aplicará el criterio del autor del proyecto para ciertos aspectos de la comprobación. Es importante realizar estas verificaciones, pues se debe comprobar que las deformaciones y flechas máximas resultantes en la estructura no sean críticas.

La comprobación que se realiza frente a desplazamientos horizontales en las cabezas de los soportes es la siguiente:

- Desplome local: $d < h/500$, siendo h la altura del pilar [7]

En los pilares más altos, cuyas longitudes son de unos 10 m, el desplome local máximo admisible es de unos 20 mm.

Al simular las distintas combinaciones de carga sobre la estructura, se comprueba que los desplazamientos de las cabezas de los pilares son excesivos, tal y como se muestra en las siguientes figuras.

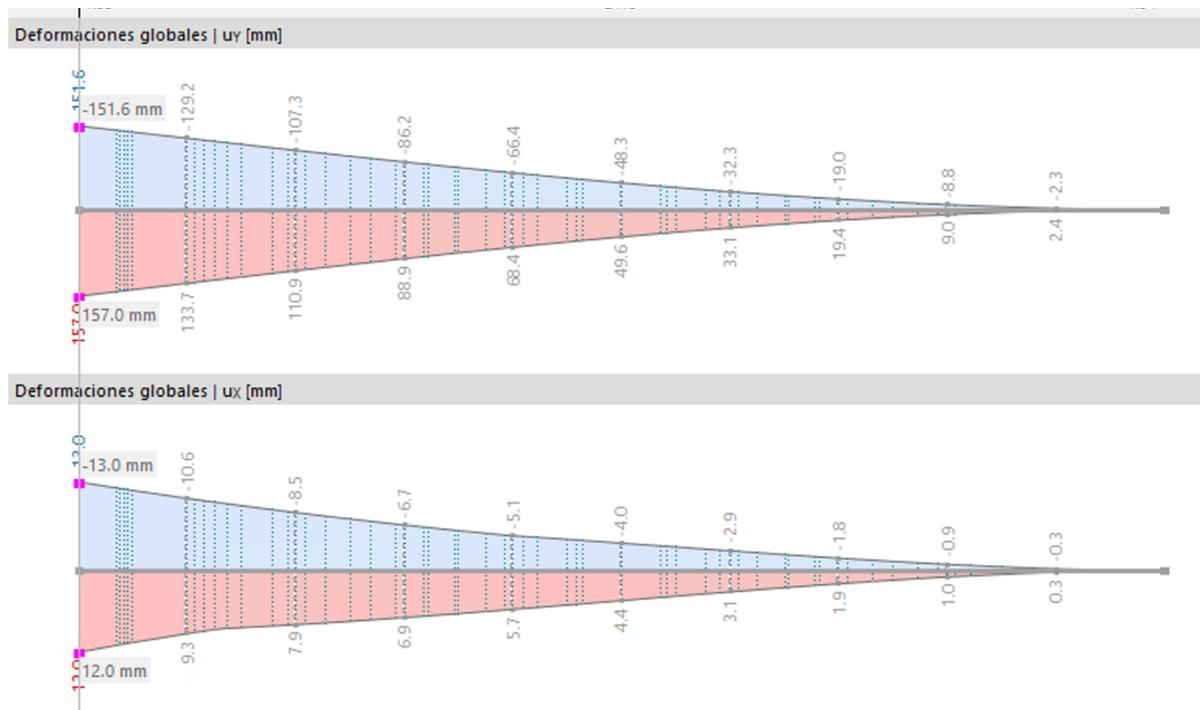


Figura 31: Máximo desplome en cabeza de soporte "fuera de servicio"

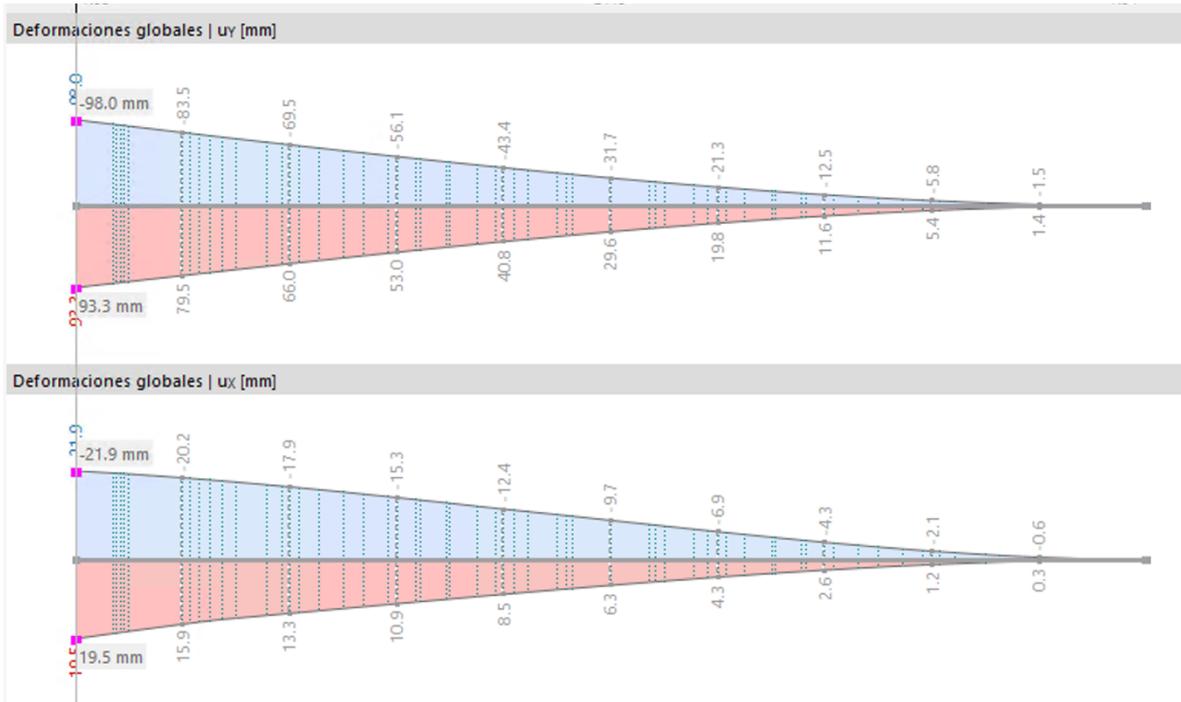


Figura 32: Máximo desplome en cabeza de soporte “en servicio”

Los desplomes máximos y mínimos que se observan en la dirección Y del modelo (dirección perpendicular al tramo) al aplicar la envolvente “ELS fuera de servicio” son:

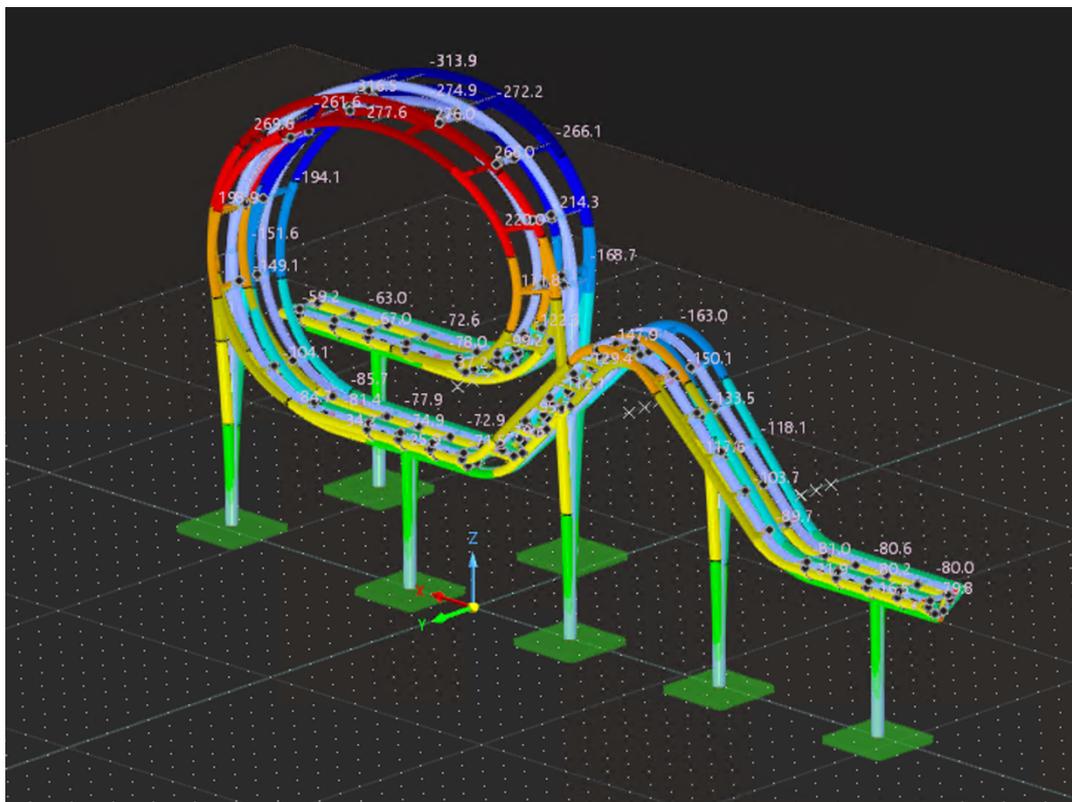


Figura 33: Desplomes máximos y mínimos en el eje Y del modelo

7.2. SOLUCIÓN ALTERNATIVA ADOPTADA

A fin de estabilizar la estructura frente a la acción del viento lateral, se opta por añadir tornapuntas unidos a la cabeza de cada uno de los pilares, con la finalidad de limitar el desplazamiento en la dirección perpendicular al tramo, manteniendo la sección del perfil de los pilares.

Se decide “desdoblar” los soportes, generando una triangulación entre el soporte vertical y el inclinado (tornapuntas), articulando tanto la base como la cabeza de ambos, lográndose así canalizar el momento transmitido al terreno a través de un par de fuerzas de reacción, lo cual resulta ser más efectivo.

Para los soportes inclinados o tornapuntas, teniendo en cuenta que la beta de pandeo de estos es $\beta = 1$ puesto que sus dos extremos estarán articulados, que la longitud del puntal más largo es $L = 10,727$ m y que se limita la esbeltez relativa a 2 porque pueden trabajar tanto a tracción como a compresión, se aplica el mismo procedimiento que en el apartado 5.2.2 y se llega a que $i_y = i_z > 70,2$ mm. Por todo esto, se opta por un perfil CHS 219.1x5 (Clase 2) para estos puntales.

Por otro lado, se definen las secciones inicial y final del tramo de la estructura analizado como intraslacionales, de forma que el desplome en la dirección longitudinal del tramo se vea reducida. Esto es porque al analizar solo un tramo aisladamente, no se está teniendo en cuenta que el resto de tramos actuarían solidariamente con este, contribuyendo a limitar el desplazamiento en esta dirección del tramo diseñado.

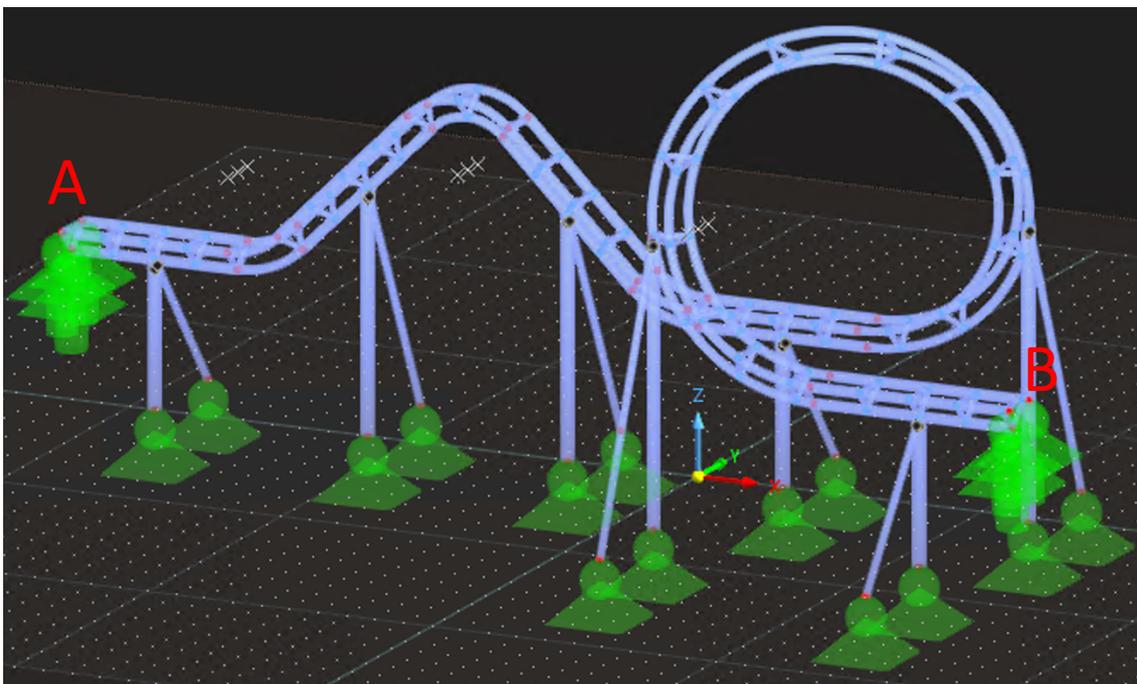


Figura 34: Solución estructural final

De esta forma, se vuelve a comprobar los desplomes locales de las cabezas de los soportes y tornapuntas, verificándose que en ningún caso se supera el límite de 20 mm en los pilares más altos.

Diseño y cálculo estructural de un tramo de 75 metros de longitud de una montaña rusa situada en San Martín de la Vega, Madrid

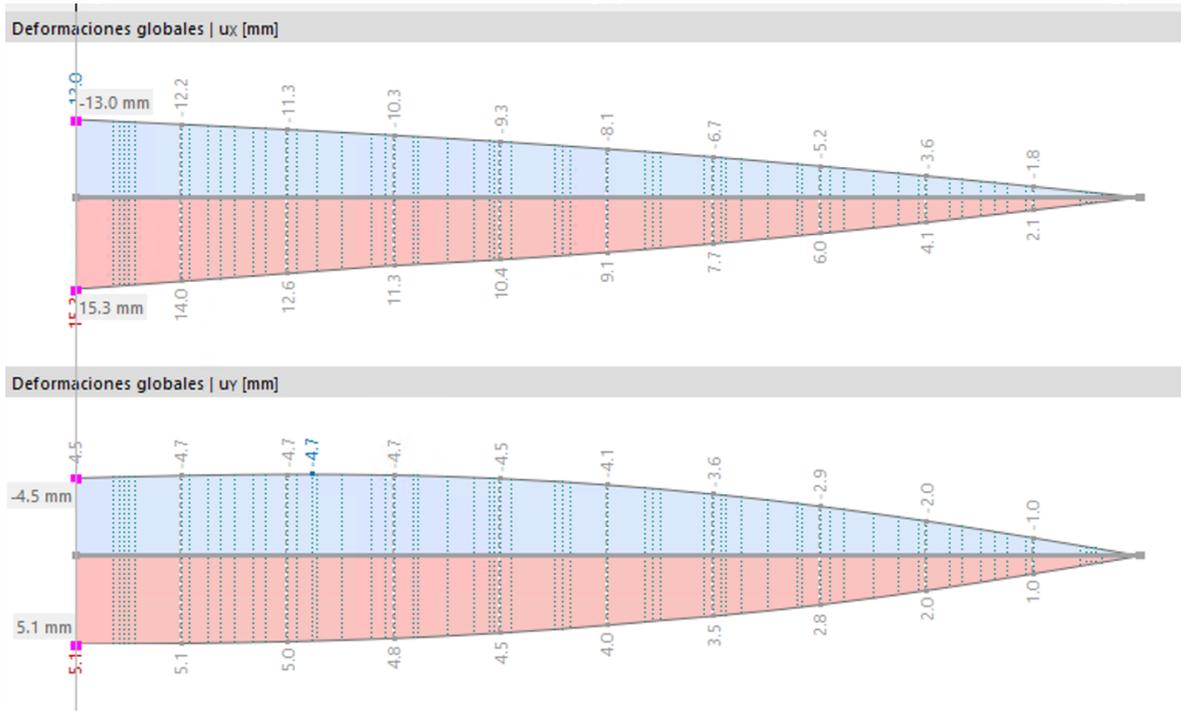


Figura 35: Máximo desplome en cabeza de soporte "fuera de servicio"

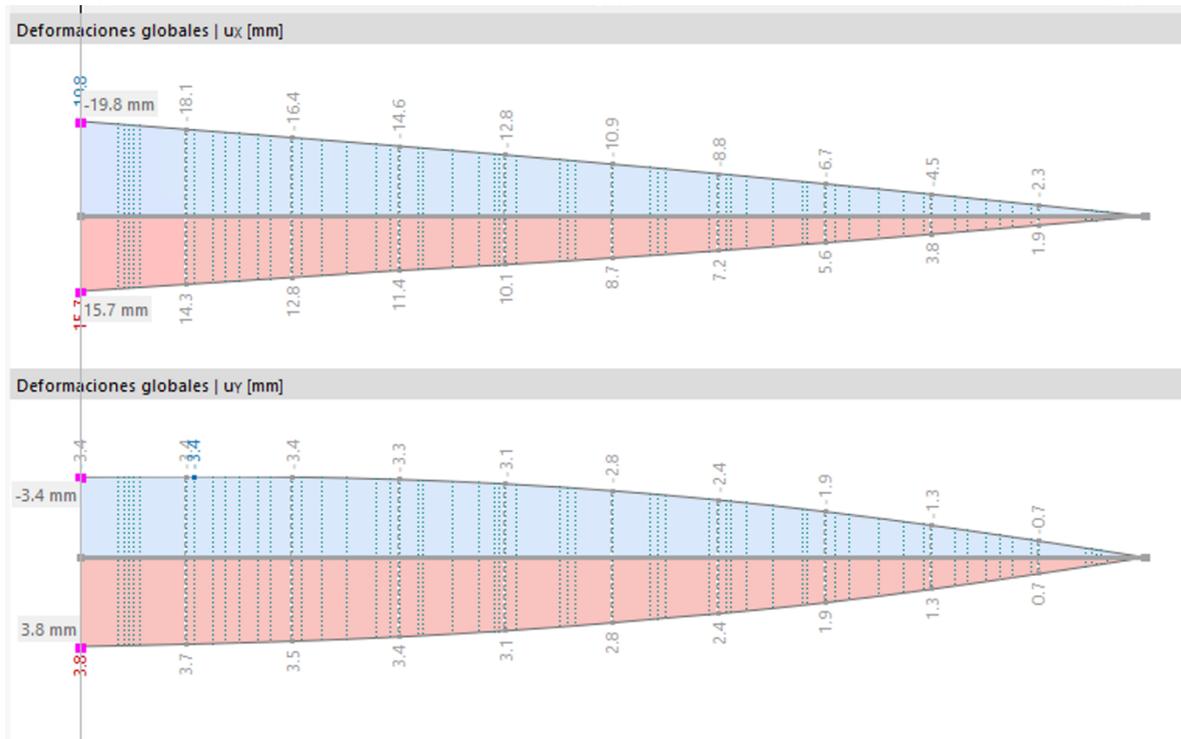


Figura 36: Máximos desplomes en cabeza de soporte "en servicio"

Con esta solución adoptada, los desplomes máximos y mínimos que se observan en la dirección Y del modelo (dirección perpendicular al tramo) al aplicar la envolvente "ELS fuera de servicio" son:

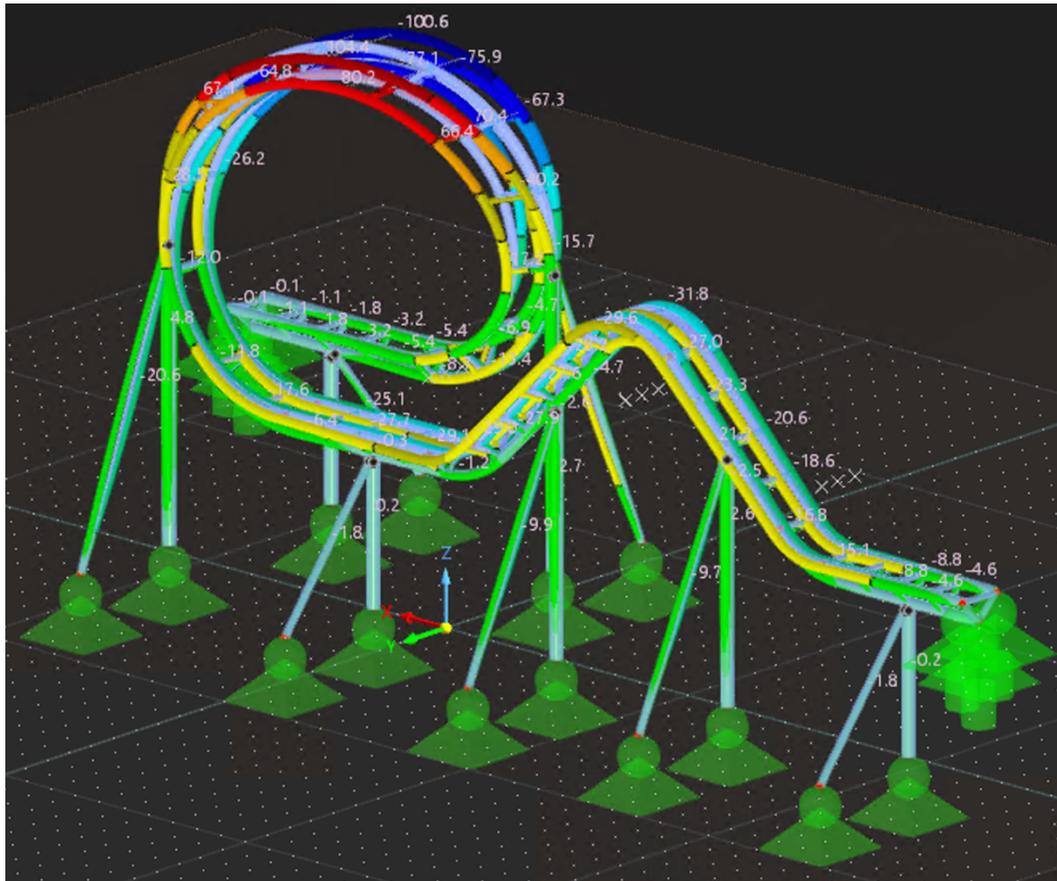


Figura 37: Desplomes máximos y mínimos en el eje Y del modelo

7.3. VERIFICACIÓN DE LOS ESTADOS LÍMITE ÚLTIMOS (ELU)

Tal y como se ha explicado, las comprobaciones de ELU engloban las combinaciones más desfavorables a las que se puede someter la estructura, de forma que, si la estructura no cumple las verificaciones realizadas, se podría llegar al fallo estructural. Se deben verificar e identificar todos los estados límite últimos en:

- Elementos solicitados a tracción
- Elementos solicitados a compresión
- Elementos solicitados a flexión
- Elementos solicitados a flexión compuesta

7.3.1. VERIFICACIÓN DE LA RESISTENCIA DE LAS SECCIONES (ELU RESISTENCIA)

Se realiza una distinción entre tensiones estáticas predominantes y fluctuantes predominantemente adecuadamente, ya que las fluctuantes quedan fuera del alcance del presente proyecto. La norma UNE-EN13814-1 [4] especifica que las propiedades de los materiales, así como sus tensiones características, son las recogidas en el Eurocódigo 3, recogidas también en [21]. Se debe garantizar la resistencia estática de los materiales empleados bajo la siguiente condición:

$$R_d \leq f_y / \gamma_{My} \quad (4)$$

$$R_d \leq f_u / \gamma_{Mu} \quad (5)$$

Donde:

R_d es la resistencia de diseño del material;

f_y es la tensión de límite elástico;

f_u es la tensión de rotura (resistencia máxima a la tracción);

$\gamma_{My} = 1,1$ es el coeficiente parcial de seguridad para la resistencia elástica;

$\gamma_{Mu} = 1,5$ es el coeficiente parcial de seguridad para el límite de la resistencia máxima a la tracción cuando $f_y/f_u < 0,75$;

$\gamma_{Mu} = 2$ es el coeficiente parcial de seguridad para el límite de la resistencia máxima a la tracción cuando $f_y/f_u > 0,75$;

En el caso del modelo diseñado, se emplea el acero S355JR, con un espesor inferior a los 16mm para todos los elementos. Por esto, de acuerdo con lo reflejado en la Tabla 1 para la estructura se tiene:

$$f_y = 355 \text{ N/mm}^2$$

$$f_u = 470 \text{ N/mm}^2$$

Por tanto $f_y/f_u = 0,75$ y es correcto considerar $\gamma_{Mu} = 1,5$.

Partiendo de las ecuaciones (5) y (6), se obtiene que $R_d \leq 313,33 \text{ N/mm}^2$.

Así pues, se deberá verificar que, en ningún punto de la estructura, la tensión equivalente de Von Mises supera los $313,33 \text{ N/mm}^2$.

Por otro lado, tal y como se expone en el artículo 10 del CTE [7], "El objetivo del requisito básico "Seguridad estructural" consiste en asegurar que el edificio tiene un comportamiento estructural adecuado frente a las acciones e influencias previsibles a las que pueda estar sometido durante su construcción y uso previsto". Es por ello que se deben cumplir la exigencia básica SE 1: Resistencia y estabilidad, y la exigencia básica SE 2: Aptitud al servicio.

Por esto mismo, a la hora de realizar los cálculos y comprobaciones de los distintos ELU, la resistencia del material se minora y las cargas de diseño se incrementan mediante el empleo de coeficientes parciales de seguridad.

La resistencia del acero, siguiendo lo dictado en el CTE DB-SE-A Art. 4.5, se minora como sigue:

$$f_{yd} = f_y / \gamma_M \quad (6)$$

Donde:

f_{yd} : resistencia de cálculo.

f_y : tensión del límite elástico.

γ_M : coeficiente parcial de seguridad.

Tabla 8: Coeficientes parciales de seguridad del material, según [9]

Coeficientes	Valor	Descripción
γ_{M0}	1,05	Coeficiente parcial de seguridad relativo a la plastificación del material
γ_{M1}	1,05	Coeficiente parcial de seguridad relativo a los fenómenos de inestabilidad
γ_{M2}	1,25	Coeficiente parcial de seguridad relativo a la resistencia última del material o sección, y a la resistencia de los medios de unión
γ_{M3}	1,1	Coeficiente parcial para la resistencia al deslizamiento de uniones con tornillos pretensados en ELS
γ_{M3}	1,25	Coeficiente parcial para la resistencia al deslizamiento de uniones con tornillos pretensados en ELU
γ_{M3}	1,4	Coeficiente parcial para la resistencia al deslizamiento de uniones con tornillos pretensados y agujeros rasgados o con sobremedida

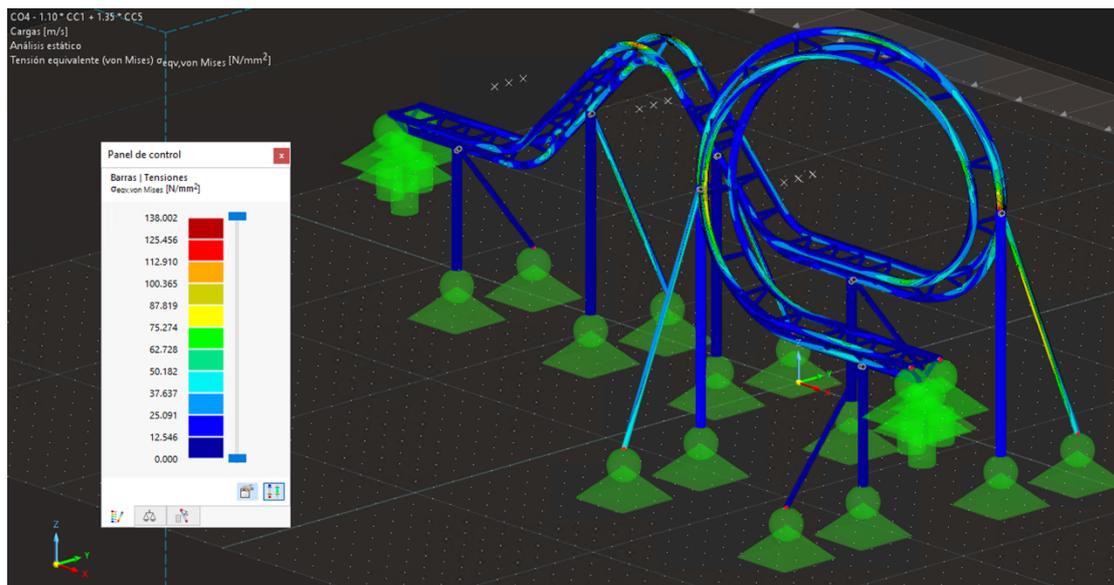


Figura 38: Tensión equivalente de Von Mises en la situación más desfavorable

Se comprueba que, con los soportes inclinados (tornapuntas) añadidos, bajo ninguna de las combinaciones a ensayar en el ELU, la tensión equivalente de Von Mises supera el valor de R_d en ninguna sección de la estructura, siendo el máximo valor de esta tensión de 138 N/mm^2 bajo la combinación CO4: $1,1 \cdot \text{CC1} + 1,35 \cdot \text{CC5}$.

Siguiendo lo dictado en el apartado 6.2 del Anejo 22 del Código Estructural [10], se realiza la comprobación del ELU resistencia de algunas de las secciones de la estructura. El primer paso será comprobar que se tiene flexión compuesta sin interacción del esfuerzo cortante, verificando que, en toda la estructura, se cumple la siguiente condición:

$$V_{Ed} \leq 0,5 \cdot V_{c,Rd} = 0,5 \cdot A_v \cdot \frac{f_{yd}}{\sqrt{3}} \quad (7)$$

Siendo:

V_{Ed} Valor de cálculo del cortante más elevado en la sección estudiada

A_v Área resistente a cortante de la sección circular

f_{yd} Límite elástico del material reducido mediante el coeficiente de seguridad correspondiente

Así pues, para la comprobación de flexión compuesta sin interacción del cortante, se cumple el ELU si se verifica que en todas las secciones de la estructura el "Factor ELU" cumple la siguiente condición:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{c,Rdy}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{c,Rdz}} \leq 1 \quad (8)$$

Siendo:

N_{Ed}	Valor de cálculo del axil en la sección estudiada
$M_{y-z,Ed}$	Valor de cálculo de los momentos flectores en la sección estudiada
$N_{pl,Rd} = A \cdot f_{yd}$	Resistencia plástica de la sección bruta
A	Área del perfil
$M_{c,Rd} = M_{pl,Rd} = W_{pl} \cdot f_{yd}$	Resistencia de la sección a flexión para las secciones de Clase 1 y 2
$M_{c,Rd} = M_{el,Rd} = W_{el} \cdot f_{yd}$	Resistencia de la sección a flexión para las secciones de Clase 3
W_{el} y W_{pl}	Módulos resistentes elástico y plástico correspondientes a la fibra con mayor tensión

La comprobación de ELU se realiza para la barra más solicitada de cada uno de los cuatro grupos (soportes, tornapuntas, rigidizadores y raíles). En las siguientes figuras se distinguen estos cuatro tipos, estando resaltadas las barras pertenecientes al grupo en cuestión.

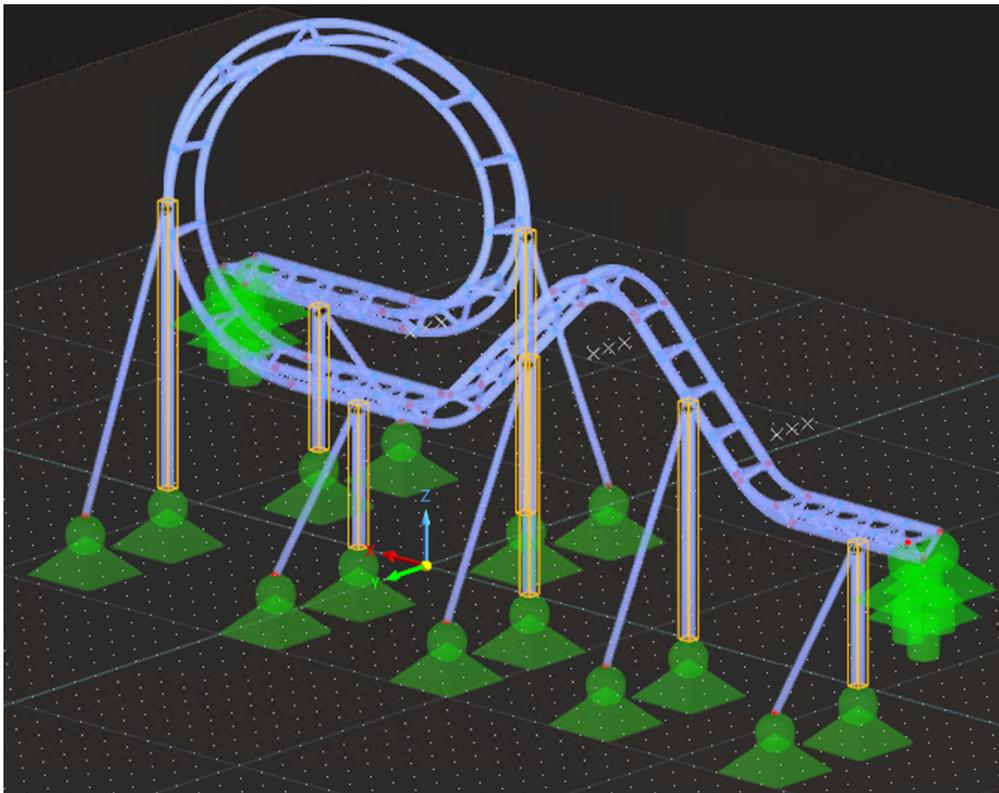


Figura 39: Soportes

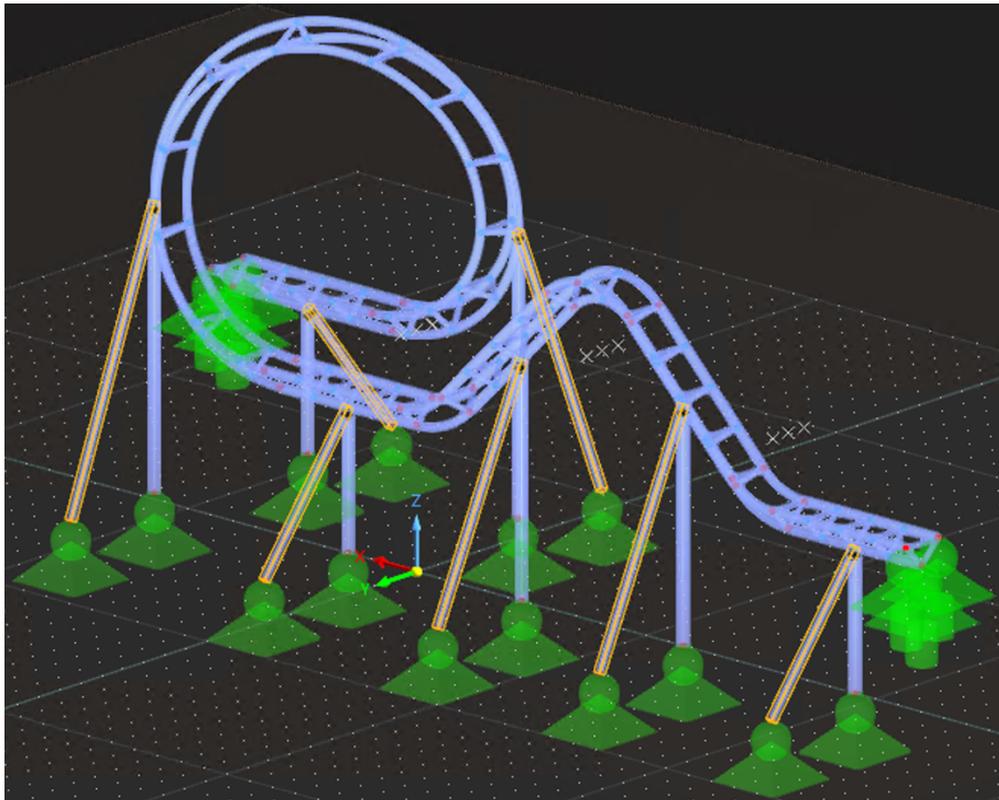


Figura 40: Tornapuntas

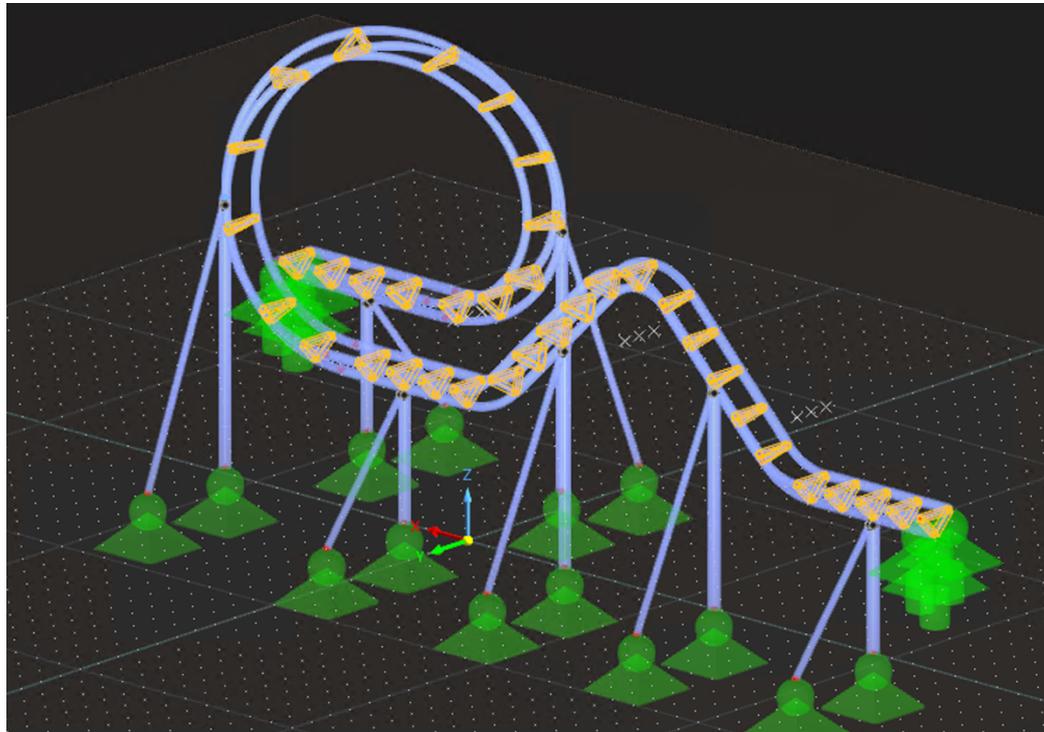


Figura 41: Rigidizadores

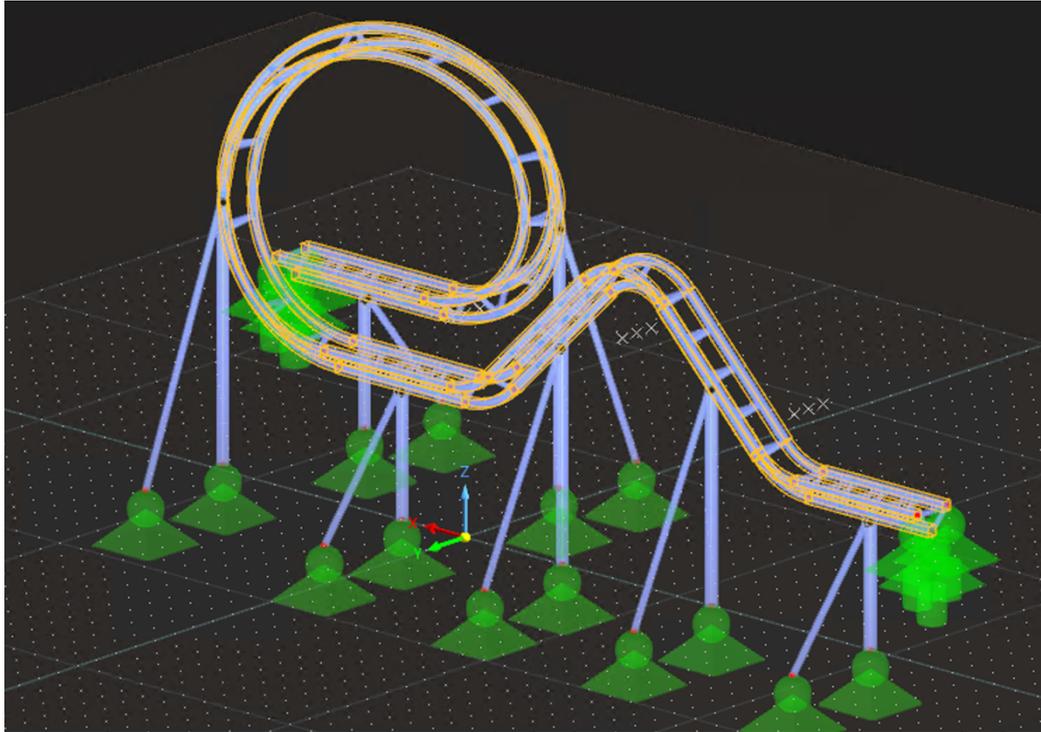


Figura 42: Raíles

En las tablas siguientes se detalla la comprobación para cada uno de los grupos. Los esfuerzos introducidos son los correspondientes a la sección de la barra más solicitada de cada grupo (indicada en la figura correspondiente), extraídos directamente de RFEM, indicados en valor absoluto.

Nótese que el número de las barras indicado en cada una de las tablas está generado automáticamente por RFEM y los ejes indicados son referidos a los ejes locales de cada barra, definidos por el programa.

Tabla 9: ELU Resistencia grupo soportes

Grupo	Soportes
Perfil	406.4x8
Clase	3
Barra más solicitada	115
Combinación de carga	CO4: 1,1*CC1 + 1,35*CC5
Axil (N)	167030
Cortante y (N)	370
Cortante z (N)	60
Flector y (N·m)	9820
Flector z (N·m)	170
¿Interacción del cortante?	No
Factor ELU Resistencia	0,05
¿Cumple?	Sí



Figura 43: Barra 115

Tabla 10: ELU Resistencia grupo tornapuntas

Grupo	Tornapuntas
Perfil	219.1x5
Clase	2
Barra más solicitada	157
Combinación de carga	CO4: 1,1*CC1 + 1,35*CC5
Axil (N)	130160
Cortante y (N)	420
Cortante z (N)	170
Flector y (N·m)	8450
Flector z (N·m)	1400
¿Interacción del cortante?	No
Factor ELU Resistencia	0,115
¿Cumple?	Sí

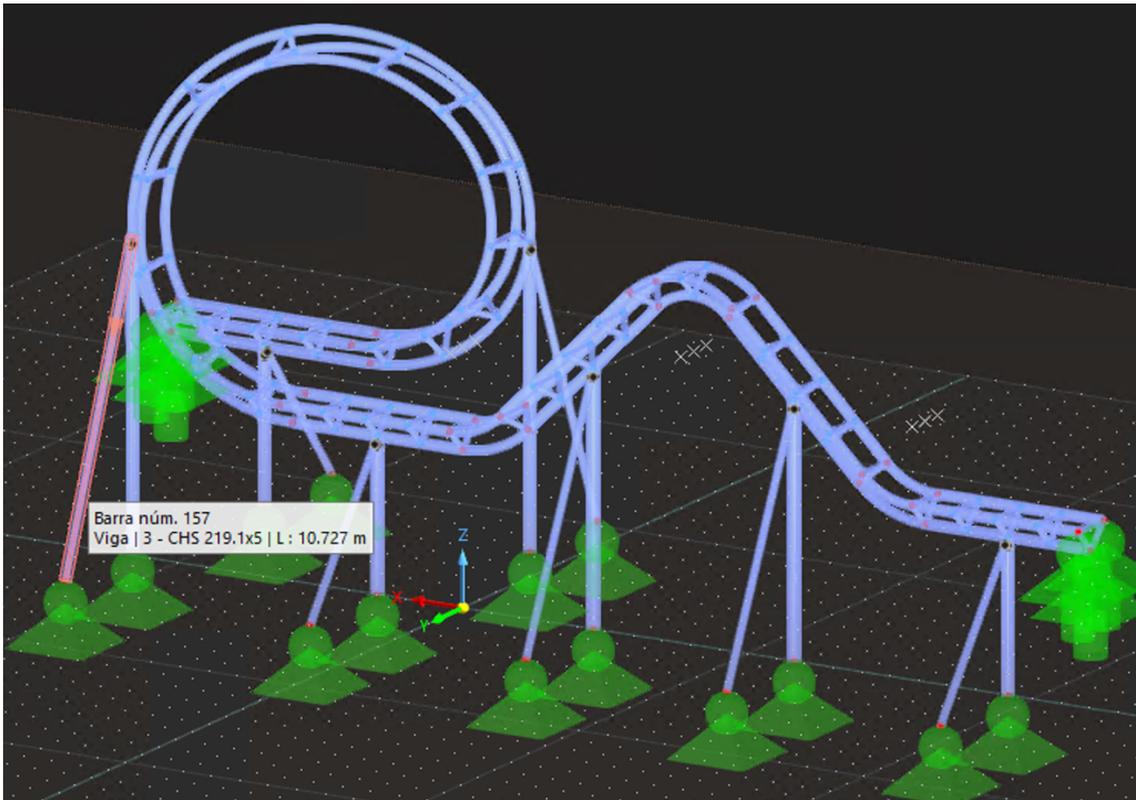


Figura 44: Barra 157

Tabla 11: ELU Resistencia grupo Rigidizadores

Grupo	Rigidizadores
Perfil	168.3x5
Clase	2
Barra más solicitada	65
Combinación de carga	CO4: 1,1*CC1 + 1,35*CC5
Axil (N)	80000
Cortante y (N)	0
Cortante z (N)	0
Flector y (N·m)	0
Flector z (N·m)	0
¿Interacción del cortante?	No
Factor ELU Resistencia	0,1
¿Cumple?	Sí

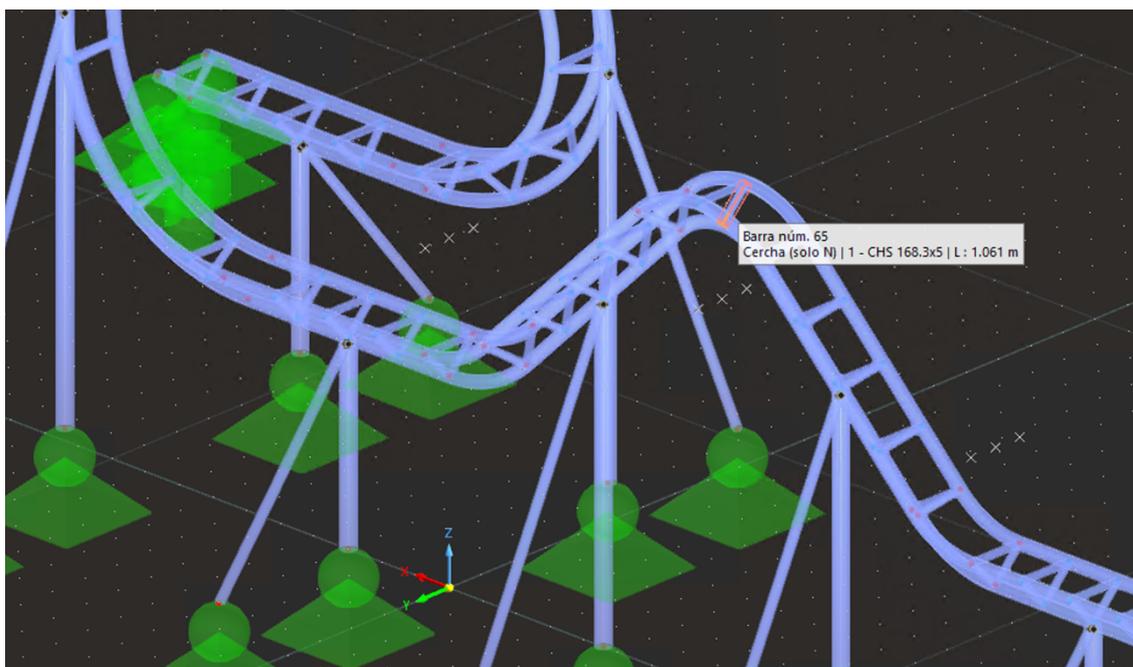


Figura 45: Barra 65

Tabla 12: ELU Resistencia grupo Raíles

Grupo	Raíles
Perfil	323.9x6.3
Clase	3
Barra más solicitada	30
Combinación de carga	CO4: 1,1*CC1 + 1,35*CC5
Axil (N)	22940
Cortante y (N)	53800
Cortante z (N)	57500
Flector y (N·m)	49530
Flector z (N·m)	31860
¿Interacción del cortante?	No
Factor ELU Resistencia	0,0113
¿Cumple?	Sí

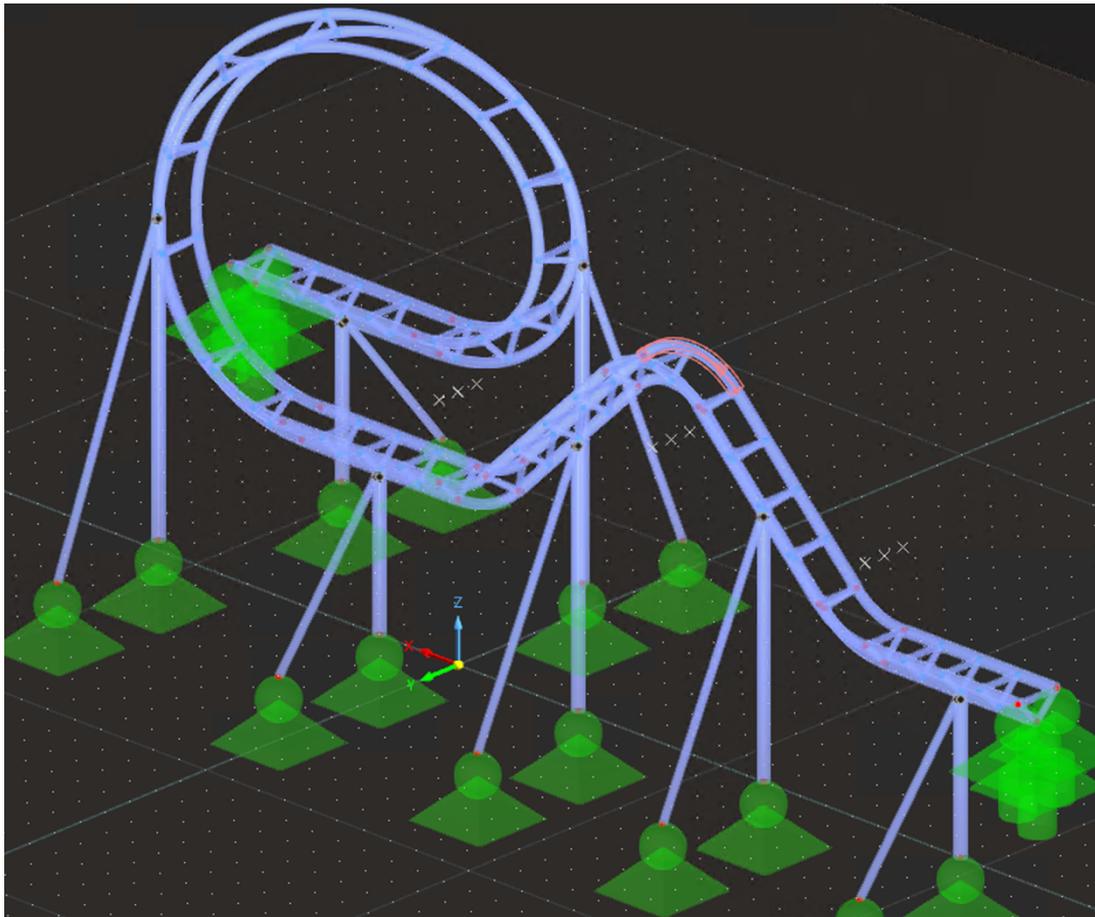


Figura 46: Barra 30

7.3.2. VERIFICACIÓN DE LA ESTABILIDAD DE LAS BARRAS (ELU PANDEO)

Puesto que el estudio del pandeo por torsión queda fuera del alcance del proyecto, se efectúa la comprobación de las barras comprimidas frente al posible fallo por pandeo, siguiendo el apartado 6.3 del CTE DB-SE-A [9], comprobando para cada sección:

$$\frac{N_{ed}}{\chi_y \cdot A \cdot f_{yd}} + \alpha_y \cdot k_y \cdot \frac{C_{m,y} \cdot M_{y,ed} + e_{N,y} \cdot N_{ed}}{W_y \cdot f_{yd}} + k_z \cdot \frac{C_{m,z} \cdot M_{z,ed} + e_{N,z} \cdot N_{ed}}{W_z \cdot f_{yd}} < 1 \quad (9)$$

$$\frac{N_{ed}}{\chi_z \cdot A \cdot f_{yd}} + k_y \cdot \frac{C_{m,y} \cdot M_{y,ed} + e_{N,y} \cdot N_{ed}}{W_y \cdot f_{yd}} + \alpha_z \cdot k_z \cdot \frac{C_{m,z} \cdot M_{z,ed} + e_{N,z} \cdot N_{ed}}{W_z \cdot f_{yd}} < 1 \quad (10)$$

- COMPROBACIÓN DE LOS SOPORTES

Para realizar esta verificación, se comprueba el pilar más solicitado. En este caso, el soporte más solicitado corresponde a la barra 115 (Figura 43). En la sección más solicitada de esta barra se tiene un axil de compresión $N_{ed} = -167,03$ kN y un momento flector $M_{y,ed} = 9,82$ kNm, siendo $M_{z,ed} \approx 0$ kNm, para la combinación de cargas 1,1·G+1,35·W₉₀.

Diseño y cálculo estructural de un tramo de 75 metros de longitud de una montaña rusa situada en San Martín de la Vega, Madrid

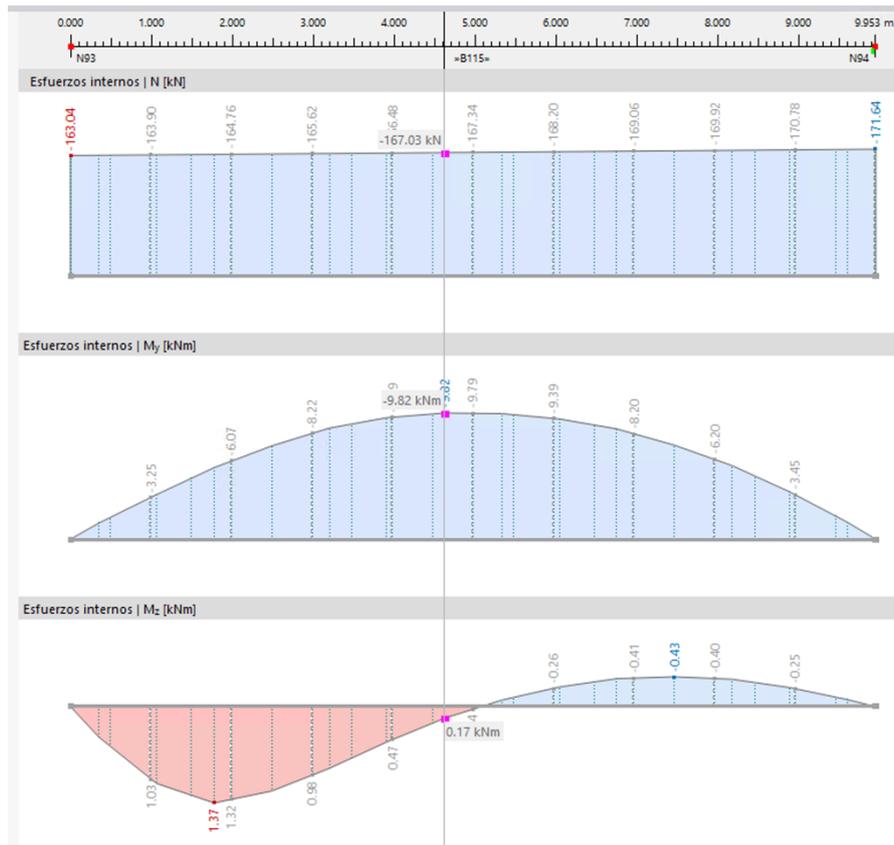


Figura 47: Esfuerzos en soporte más solicitado

Se debe tener en cuenta que, tal y como se justifica en el predimensionado, la esbeltez relativa de la barra está limitada a 2. En este caso la beta de pandeo de la barra es igual a 1 al haber articulado sus extremos y haberla arriostrado a través de los tornapuntas. Siendo la longitud de la barra 9953 mm, $i_y = i_z = 141\text{mm}$ y considerando las propiedades del acero empleado, se llega a que:

$$\bar{\lambda}_y = \bar{\lambda}_z = \frac{\beta * L}{i} = \frac{0,924 * 9953}{141} = 0,924 < 2$$

Puesto que el perfil empleado es un perfil tubular conformado en frío, la curva de pandeo a emplear es la "c", con un $\alpha_y = \alpha_z = 0,49$. Así, se llega a que:

$$\phi_y = \phi_z = 0,5 \cdot \left[1 + \alpha_y \cdot (\bar{\lambda}_y - 0,2) + \bar{\lambda}_y^2 \right] = 1,104$$

$$\chi_y = \chi_z = \frac{1}{\phi_y + \sqrt{\phi_y^2 - \bar{\lambda}_y^2}} = 0,585 < 1$$

Se debe calcular el valor de k_y , para lo que se define $N_{c,Rd} = A \cdot f_{yd} = A \cdot \frac{f_y}{1,05}$. Teniendo en cuenta que $\bar{\lambda}_y < 1$, el valor de k_y es:

$$k_y = 1 + 0,6 \cdot \bar{\lambda}_y \cdot \frac{N_{ed}}{\chi_y \cdot N_{c,Rd}} = 1,0256$$

Tal y como se ha comentado, el perfil empleado para los soportes es de Clase 3, por lo que hay ciertos coeficientes de las ecuaciones (7) y (8) que vienen determinados en la tabla 6.8 de [9]:

Tabla 13: Términos a emplear, obtenida de [9]

Tabla 6.8 Términos de comprobación, según peor clase de sección en la pieza							
Clase	A	W _y	W _z	α _y	α _z	e _{N,y}	e _{N,z}
1	A	W _{pl,y}	W _{pl,z}	0,6	0,6	0	0
2	A	W _{pl,y}	W _{pl,z}	0,6	0,6	0	0
3	A	W _{el,y}	W _{el,z}	0,8	1	0	0
4	A _{eff}	W _{eff,y}	W _{eff,z}	0,8	1	Según pieza y tensiones	Según pieza y tensiones

Por otro lado, aplicando la tabla 6.10 del apartado 6.3.4.2 del CTE DB-SE-A [9], puesto que tanto los soportes como los tornapuntas tienen las bases y las cabezas con rigidez rotacional nula, tenemos factor de momento uniforme equivalente $C_m = 0,95$. Por todo esto, a partir de las ecuaciones (7) y (8), se comprueba:

$$\left\{ \begin{matrix} 1/0,585 \\ 1/0,585 \end{matrix} \right\} \cdot \frac{167030}{10000 \cdot \frac{355}{1,05}} + \left\{ \begin{matrix} 1 \\ 0,8 \end{matrix} \right\} \cdot \frac{1,0256 \cdot 0,95 \cdot 9820}{978000 \cdot \frac{355}{1,05}} = \left\{ \begin{matrix} 0,085 \\ 0,085 \end{matrix} \right\} < \left\{ \begin{matrix} 1 \\ 1 \end{matrix} \right\}$$

Se comprueba entonces que el perfil propuesto para los pilares es correcto y que estas barras no fallarán por pandeo.

- COMPROBACIÓN DE LOS TORNAPUNTAS

Para la comprobación de los tornapuntas, se analiza aquél que recibe mayores sollicitaciones, que en el modelo se corresponde con la barra 157 (Figura 44). Para la combinación de cargas CO8: 1,1·G+1,35·W_270, se tiene unos momentos flectores M_{y,ed} y M_{z,ed} prácticamente nulos en toda la barra, por lo que se analiza la resistencia de la barra a pandeo bajo axil de compresión sin interacción con los momentos flectores, empleándose el máximo valor del axil a lo largo de la barra, N_{ed} = -130,32 kN.

Diseño y cálculo estructural de un tramo de 75 metros de longitud de una montaña rusa situada en San Martín de la Vega, Madrid

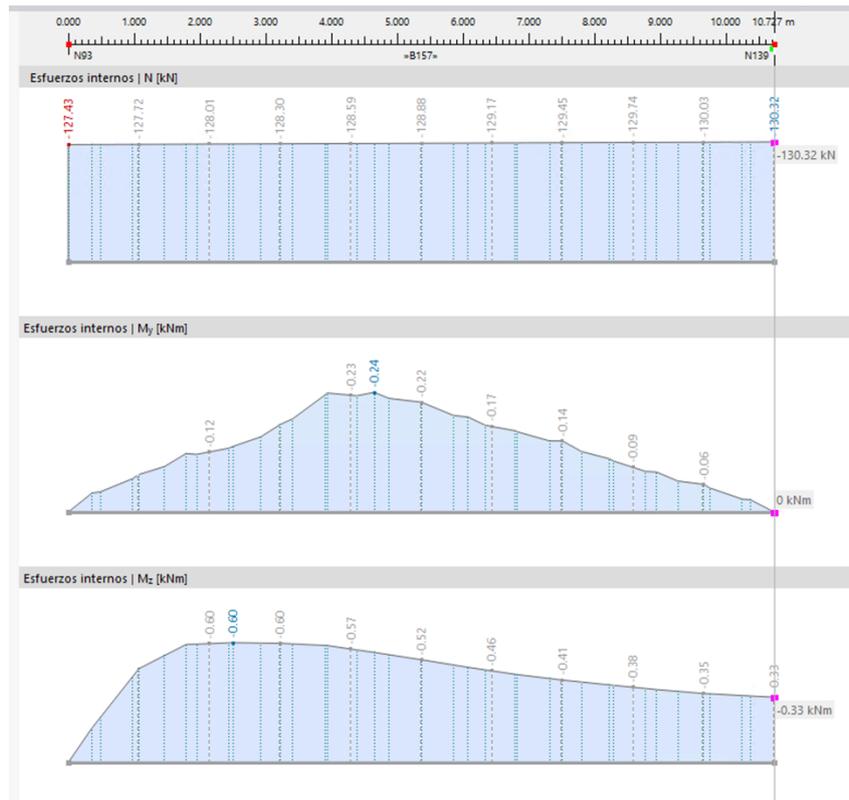


Figura 48: Esfuerzos en tornapunta más solicitado

La comprobación se va a llevar a cabo a partir de las ecuaciones (9) y (10), teniendo en cuenta que no hay interacción con los momentos flectores:

$$\frac{N_{ed}}{\chi_y \cdot A \cdot f_{yd}} < 1 \quad (11)$$

Se debe tener en cuenta que, tal y como se justifica en el predimensionado, la esbeltez relativa de la barra está limitada a 2. En este caso, la esbeltez relativa, teniendo en cuenta que la beta de pandeo es 1, que la longitud de la barra es de 10727 mm, que $i_y = i_z = 75,7mm$ y considerando las propiedades del acero empleado, se llega a que:

$$\bar{\lambda}_y = \bar{\lambda}_z = \frac{\beta * L}{i} = 1,85 < 2$$

$$\sqrt{\frac{\pi^2 * 210.000}{355}}$$

Puesto que el perfil empleado es un perfil tubular conformado en frío, la curva de pandeo a emplear es la "c", con un $\alpha_y = \alpha_z = 0,49$. Así, se llega a que:

$$\phi_y = \phi_z = 0,5 \cdot \left[1 + \alpha_y \cdot (\bar{\lambda}_y - 0,2) + \bar{\lambda}_y^2 \right] = 2,625$$

$$\chi_y = \chi_z = \frac{1}{\phi_y + \sqrt{\phi_y^2 - \bar{\lambda}_y^2}} = 0,223 < 1$$

Por tanto, aplicando la ecuación (11) se tiene que:

$$\frac{130.320}{0,223 \cdot 3360 \cdot \frac{355}{1,05}} = 0,51 < 1$$

Por lo que se comprueba entonces que los perfiles propuestos son correctos y que los tornapuntas no fallarán por pandeo.

7.4. CONCLUSIONES ELU

Al desdoblar los soportes añadiendo los tornapuntas, estabilizando así el conjunto para asegurar el cumplimiento de los Estados Límite de Servicio, las solicitaciones en las barras se ven reducidas significativamente, por lo que se tiene un amplio margen de seguridad en los ELU comprobados.

Se toma esta propuesta como correcta, ya que se está trabajando del lado de la seguridad, y el objetivo del proyecto no es encontrar la estructura óptima, sino analizar una determinada propuesta de diseño, aunque en un proyecto de mayor envergadura se podría buscar una estructura de apoyo alternativa, que permitiese emplear perfiles con menor diámetro sin que ello conlleve un incremento de deformaciones en la estructura.

7.5. PLACA DE ANCLAJE

Las placas de anclaje son los elementos de unión entre los soportes de la estructura y los elementos de cimentación. Su cálculo se basa en lo recogido en el apartado 8.8.1 del *CTE DB SE-A* [9].

Las placas de anclaje son los elementos de unión a través de los cuales los soportes transmiten los esfuerzos al cimiento (zapata) de manera que este pueda resistirlos y transmitirlos al terreno. Cumplen las siguientes funciones:

- Mecánicas: transmitir un esfuerzo entre dos materiales con características y comportamientos diferentes.
- Constructivas: la placa cumple también con otras funciones:
 - Posicionamiento: Garantizar la ubicación exacta del pilar.
 - Nivelación: Conseguir la misma cota para las bases de los pilares.
 - Aplomado: Asegurar la verticalidad del pilar.

Las dimensiones de los distintos elementos de las placas de anclaje son:

- La placa de base \neq a. b. e
- Los pernos de anclaje n_{ϕ}, ϕ

7.5.1. ELEMENTOS

La placa de base será de acero S355JR, pues debe ser soldable con el soporte, de forma que:

$$f_{yk} = 355 \text{ N/mm}^2$$

$$\gamma_{M0} = 1,05$$

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_{M0}} = 338,1 \text{ N/mm}^2$$

Se considera un espesor inicial de la placa, tanto para las placas de los soportes como para las de los tornapuntas, de 22 mm.

Los pernos constituyen el elemento de unión entre el cimiento y la placa de base. Son embebidos en el hormigón de la cimentación, garantizando que se transmiten los esfuerzos de tracción. En una misma placa, todos son del mismo diámetro y son dispuestos simétricamente con respecto al eje de flexión.

Se opta por barras corrugadas de acero B500S, de forma que:

$$f_{yk} = 500 \text{ N/mm}^2$$

$$\gamma_M = 1,15$$

La placa de base apoya sobre una capa de mortero, intermedia entre la placa y la cimentación. Por ello, se habla de la resistencia portante o resistencia de cálculo de la unión f_{jd} , que adopta un valor:

$$f_{jd} = \beta_j \cdot k_j \cdot f_{cd} \quad (12)$$

Siendo:

$$\beta_j = 2/3 \quad \text{coeficiente de la junta}$$

$$k_j \approx 1 \quad \text{factor de concentración que tiene en cuenta la mejora de resistencia por efecto del confinamiento del hormigón bajo la placa}$$

$$f_{cd} = f_{ck}/\gamma_c \quad \text{resistencia de cálculo del hormigón, siendo } \gamma_c = 1,5$$

Por tanto, se considera en el cálculo: $f_{jd} = f_{cd}$, que, teniendo en cuenta que se emplea un hormigón HA-25, resulta:

$$f_{jd} = f_{cd} = \frac{25}{1,5} = 16,667 \text{ N/mm}^2$$

7.5.2. MODELO MECÁNICO

Puesto que el pie del soporte está articulado, la base se prepara para resistir únicamente esfuerzo axial de compresión o de tracción.

Las combinaciones de cálculo que se emplean para los distintos ELU son los dictados por la norma [4], de forma que se emplean las mismas combinaciones que las empleadas para el cálculo de los ELU de los soportes y tornapuntas. Los Estados Límite Últimos a partir de los cuales se va a dimensionar los distintos elementos son:

- 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

7.5.3. PREDIMENSIONADO

Las dimensiones iniciales de las placas de anclaje se obtienen a partir de lo siguiente, teniendo en cuenta que \varnothing es el diámetro exterior del perfil:

$$a = b = 100 + \varnothing + 100$$

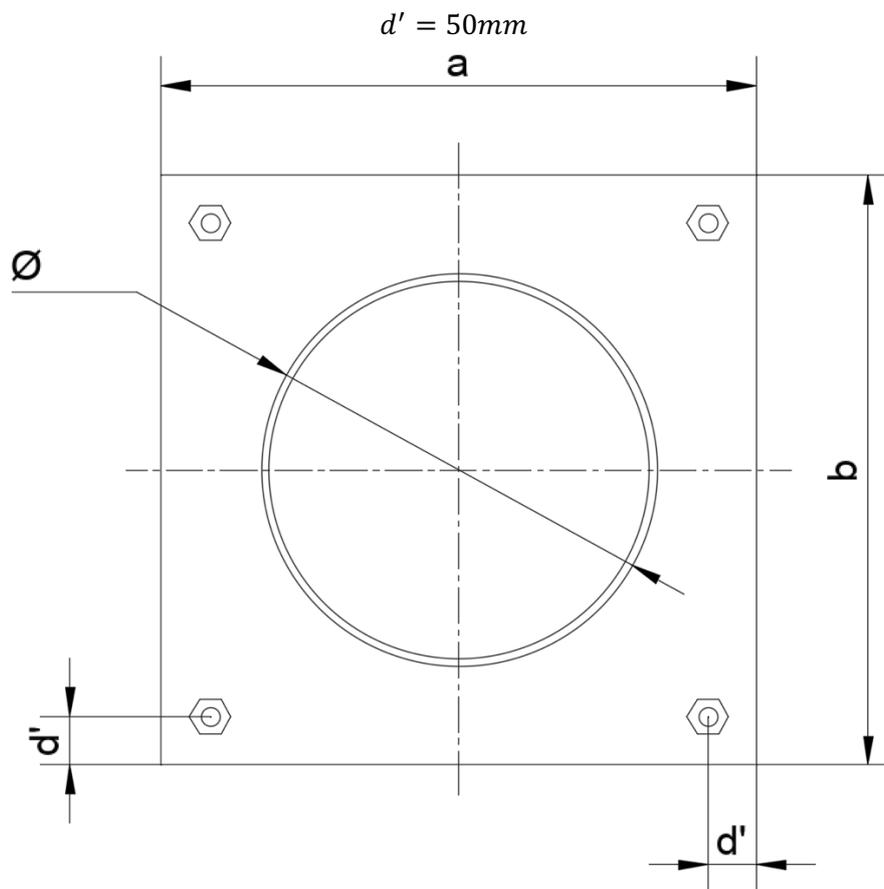


Figura 49: Dimensiones de placa de anclaje

- Para el grupo de los soportes, puesto que su diámetro exterior es 406,4, se tiene que las dimensiones iniciales de la placa de anclaje son $a = b \approx 610$ mm.
- Para el grupo de los tornapuntas, puesto que su diámetro exterior es 219.1, se tiene que las dimensiones iniciales de la placa de anclaje son $a = b \approx 420$ mm.

Se calcula la anchura complementaria de apoyo (Figura 50), siendo este valor el máximo voladizo de la placa que puede aguantar la resistencia de cálculo del apoyo y queda definida por la expresión:

$$c = e \cdot \sqrt{\frac{f_{yd}}{3 \cdot f_{jd}}} \quad (13)$$

Donde:

- e Espesor de la placa de base
- f_{yd} Resistencia de cálculo de la placa ($\gamma_{M0} = 1,05$)
- f_{jd} Resistencia de cálculo de la unión (f_{cd})

Sustituyendo los valores en esta última ecuación, se tiene que el valor de la anchura complementaria c es de:

$$c = 22 \cdot \sqrt{\frac{\frac{500}{1,15}}{3 \cdot \frac{25}{1,5}}} = 57,21 \text{ mm}$$

7.5.4. ESTADOS LÍMITE ÚLTIMOS

7.5.4.1. ELU AGOTAMIENTO DEL APOYO

El primer paso a realizar es calcular el área portante de la placa (Figura 50). Puesto que $2 \cdot c = 114,42 \text{ mm} < \varnothing_{int}$ y que $\varnothing_{ext} + 2 \cdot c < a$ para ambos casos, se calcula el área portante como el área de la corona cuyo diámetro exterior es el diámetro exterior del perfil más 2·c, y el diámetro interior es el diámetro interior del perfil menos 2·c. Así:

$$A_p = \pi(R_{ext} + c)^2 - \pi(R_{int} - c)^2$$

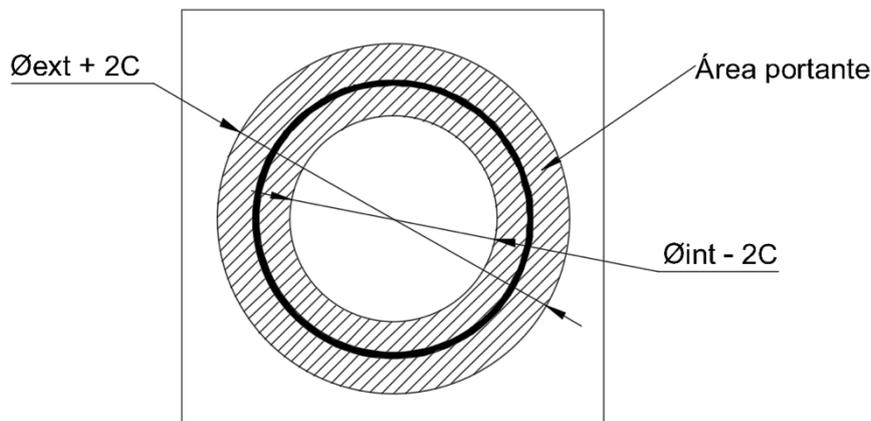


Figura 50: Área portante de la placa

Puesto que no se tiene momento flector, la comprobación a realizar es:

$$\sigma = \frac{N_{Ed}}{A_p} \leq f_{jd} \quad (14)$$

Tabla 14: Comprobación ELU agotamiento del apoyo en soportes

Grupo	Soportes
Barra	115
Combinación de cargas	1,1·G+1,35·W_90
Axil de compresión (N)	171640
Área portante (mm²)	153222,16
$\sigma(N/mm^2)$	1,12 N/mm ²
$\sigma \leq f_{jd}$	Sí

Tabla 15: Comprobación ELU agotamiento del apoyo en tornapuntas

Grupo	Tornapuntas
Barra	157
Combinación de cargas	1,1·G+1,35·W_270
Axil de compresión (N)	130320
Área portante (mm²)	80323,68
$\sigma(N/mm^2)$	1,62 N/mm ²
$\sigma \leq f_{jd}$	Sí

Por tanto, se puede afirmar que, con las dimensiones propuestas, las placas cumplen el ELU.

7.5.4.2. ELU AGOTAMIENTO DE LA PLACA CON CARTELAS A FLEXIÓN

La presente comprobación no es necesaria ya que, en los apoyos analizados, dada la configuración que se le ha dado a los extremos de las barras del modelo (articulados), no existe momento flector, por lo que no se dispone de cartelas de rigidización.

7.5.4.3. ELU AGOTAMIENTO DE LOS PERNOS

Para placas como la diseñada, se deben disponer, al menos, 4 pernos de 20 mm de diámetro. Se evalúa la tracción máxima que soporta la placa en dirección perpendicular a esta, repartiendo dicha tracción entre los 4 pernos.

Se comprueba que el número de pernos, con el diámetro propuesto, son suficientes para soportar el esfuerzo de tracción máximo. Para ello se debe comprobar que:

$$A_s = n_{\phi} \cdot A_{r\phi} \geq \frac{T_d}{\sigma_s} \quad (15)$$

Donde:

n_{ϕ}	número de pernos traccionados
$A_{r\phi}$	$0,8 \cdot A_{\phi}$ para pernos roscados
A_{ϕ}	área nominal del perno
T_d	esfuerzo axil de tracción perpendicular a la placa (N)
$\sigma_s = f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = \frac{500}{1,15}$	tensión límite de diseño (N/mm ²)

Se realizan las comprobaciones para ambos grupos:

Tabla 16: Comprobación ELU agotamiento de los pernos en soportes

Grupo	Soportes
Barra	115
Combinación de cargas	1,1·G+1,35·W_225
Axil de tracción Td (N)	89600
σ_s (N/mm²)	434,78
$A_{r\phi}$ (mm²)	251,33
n_{ϕ}	4
$n_{\phi} \cdot A_{r\phi} \geq \frac{T_d}{\sigma_s}$	Sí

Tabla 17: Comprobación ELU agotamiento de los pernos en tornapuntas

Grupo	Tornapuntas
Barra	157
Combinación de cargas	1,1·G+1,35·W_90
Axil de tracción Td (N)	118310
σ_s (N/mm²)	434,78
$A_{r\phi}$ (mm²)	251,33
n_{ϕ}	4
$n_{\phi} \cdot A_{r\phi} \geq \frac{T_d}{\sigma_s}$	Sí

7.5.4.4. ELU ANCLAJE DE LOS PERNOS

Se necesita hallar el valor de $l_a = l_{b,neto}$ (longitud de anclaje), que es la longitud que el perno debe tener embebida en el hormigón para impedir la pérdida de adherencia antes de alcanzarse la sollicitación máxima del perno T_{ϕ} . Esta longitud depende de la posición que ocupa la barra dentro de la pieza del hormigón. En el caso del proyecto, se asume la posición I, de

buena adherencia de las armaduras, ya que los pernos forman un ángulo entre 45° y 90° con la horizontal.

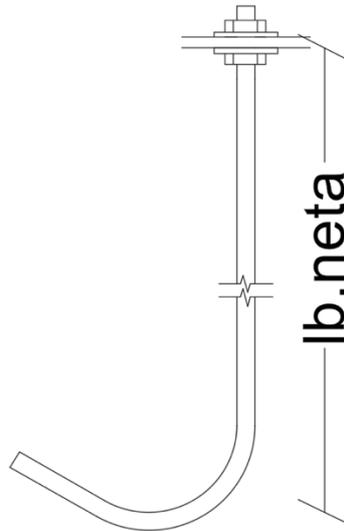


Figura 51: longitud de anclaje de pernos

Para llegar al valor de la longitud de anclaje, primero se debe calcular la longitud básica de anclaje (l_b). Puesto que la estimación de esta longitud es tediosa, en el apartado 3.1.1.2 del Anejo 26 del Código Estructural [10] se establece una formulación simplificada. Define un valor m para el cálculo de barras corrugadas, cuyo valor recoge la siguiente tabla:

Tabla 18: Valores de m según el tipo de hormigón y de acero, para barras corrugadas

f_{ck} (N/mm ²)	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

Para el caso del proyecto, con barras corrugadas con acero B500S de 20 mm de diámetro y hormigón HA-25, se tiene un valor de $m=1,5$. Empleando la formulación definida por el Código Estructural, tanto para el grupo de soportes como el de tornapuntas:

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

Ahora, ya que se tratan de patillas normalizadas, se toma el valor de $\beta = 0,7$ para el caso de tracción y $\beta = 1$ para el caso de compresión. Se obtiene el valor de la longitud de anclaje a partir de la ecuación:

$$l_a = l_{b, neta} = l_b \cdot \beta \cdot \frac{A_s}{A_{s, real}} = l_b \cdot \beta \cdot \frac{T_d}{n_\phi \cdot A_\phi \cdot f_{yd}} \leq \max(10\phi, 150\text{mm}, \frac{l_b}{3})$$

Tabla 19: Comprobación ELU anclaje de los pernos en soportes

Grupo	Soportes
Barra	115
Combinación de cargas	1,1·G+1,35·W_225
Axil de tracción Td (N)	89600
$l_b \cdot \beta$ (N/mm ²)	600
A_ϕ (mm ²)	314,16
n_ϕ	4
$l_b \cdot \beta \cdot \frac{T_d}{n_\phi \cdot A_\phi \cdot f_{yd}}$ (mm)	69,88
$\text{máx} \left(10\phi, 150\text{mm}, \frac{l_b}{3} \right)$ (mm)	200
l_a (mm)	200

Tabla 20: Comprobación ELU anclaje de los pernos en tornapuntas

Grupo	Tornapuntas
Barra	157
Combinación de cargas	1,1·G+1,35·W_90
Axil de tracción Td (N)	118310
$l_b \cdot \beta$ (N/mm ²)	420
A_ϕ (mm ²)	314,16
n_ϕ	4
$l_b \cdot \beta \cdot \frac{T_d}{n_\phi \cdot A_\phi \cdot f_{yd}}$ (mm)	90,95
$\text{máx} \left(10\phi, 150\text{mm}, \frac{l_b}{3} \right)$ (mm)	200
l_a (mm)	200

Por lo que se tiene que la longitud de anclaje necesaria es de 200 mm para ambos grupos de placas de anclaje.

7.5.5. DIMENSIONES FINALES

Se ha comprobado que las dimensiones iniciales propuestas son suficientes para el cumplimiento de los distintos ELU comprobados. Así pues, para las placas de los soportes se tendrá unas dimensiones de $a = b = 610$ mm, y para los tornapuntas se tendrá unas dimensiones de $a = b = 420$ mm, siendo el espesor de las placas de ambos tipos de 22 mm.

Para ambos grupos se tendrá cuatro pernos de 20 mm de diámetro roscados, con una longitud de anclaje de 200 mm.

8. ELEMENTOS DE LA CIMENTACIÓN

La cimentación engloba el conjunto de elementos cuya función es transmitir los esfuerzos de la estructura al terreno. Los elementos principales que se van a dimensionar en el presente trabajo son las placas de anclaje y las zapatas.

Para realizar el dimensionado de las zapatas, se dimensiona teniendo en cuenta que se trata dos grupos independientes. Por un lado, se escoge el pilar más solicitado, replicando las dimensiones obtenidas en el resto de las zapatas de los pilares, y se actúa de la misma forma para los tornapuntas.

Para realizar este dimensionado, se debe tener en cuenta, tal y como se ha mencionado en el punto 1.2.3 de la memoria, que se considera que la tensión máxima admisible en el terreno es de 0,2 MPa.

El procedimiento para hallar las dimensiones óptimas de los elementos de cimentación se basa en la comprobación de una serie de ELU, específicos para cada uno de los mismos.

8.1. ZAPATAS

Al igual que con las placas de anclaje, se dimensiona la zapata necesarias para el soporte o tornapuntas con mayores solicitaciones. Se disponen las zapatas de forma que la cara superior de estas quede al nivel del terreno.

Para hallar las dimensiones óptimas de la zapata, se comprueban los Estados Límite Últimos de Deslizamiento, Vuelco y Hundimiento. De esta forma, para cada ELU se emplea una combinación distinta en el soporte o tornapuntas más desfavorable, buscando las condiciones más desfavorables de la estructura.

8.1.1. PREDIMENSIONADO

Se diseña una zapata con forma rectangular, centrada en el eje del pilar, de forma que sus tres dimensiones son a, b y h. Se dimensionan, de la misma forma que con las placas de anclaje, separando dos grupos de zapatas distintos, siendo un grupo el de las zapatas de los tornapuntas y el otro el de los pilares. Se determina $h = 0,7$ m para las zapatas de los pilares y para las de los tornapuntas y se define $b = a$ para ambos grupos, ya que el esfuerzo cortante que deben soportar las zapatas en ambos ejes es similar.

El peso de la zapata, siendo el peso específico del hormigón $\gamma_h = 25 \text{ kN/m}^3$, será de:

$$P_z = a \cdot b \cdot h \cdot \gamma_h = 25 \cdot h \cdot a^2 \text{ kN (a en metros)}$$

Se dispone de una placa de anclaje centrada, de forma que el centro del soporte queda ubicado a una distancia $a/2$ del borde de la zapata.

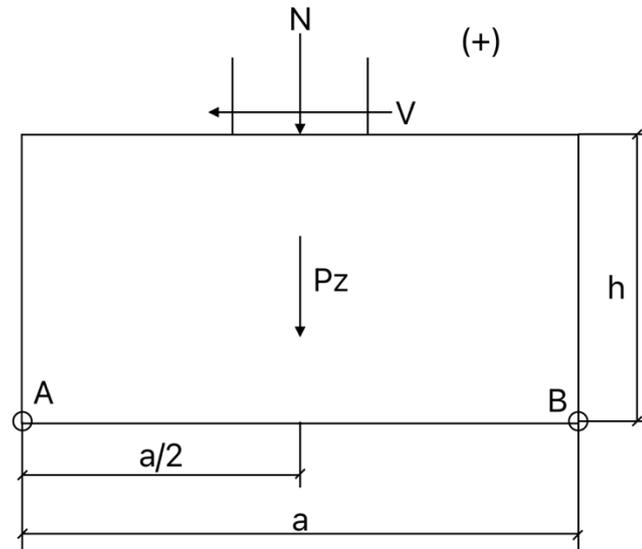


Figura 52: Representación gráfica de la zapata diseñada

Con esto, se puede decir que las solicitaciones totales que recibe el centro de la cara inferior de la zapata son:

$$N_T = P_z + N_P + N_W \quad (16)$$

$$V_T = V_P + V_W \quad (17)$$

$$M_T = (V_P + V_W) * h \quad (18)$$

Siendo:

P_z peso de la zapata

N_P axil de compresión por el peso propio de la estructura

N_W axil de compresión (o tracción, considerado como negativo) debido a la acción del viento

V_P cortante debido al peso propio de la estructura

V_W cortante debido a la acción del viento

N_T axil de compresión total que recibe la superficie inferior de la zapata

V_T cortante total que recibe la superficie inferior de la zapata

M_T momento flector total que recibe la superficie inferior de la zapata

8.1.2. ESTADOS LÍMITE ÚLTIMOS

Para los distintos coeficientes de seguridad parciales a emplear, dentro de cada ELU, se hace uso de la tabla 2.1. del CTE DB-SE-C [8], que son:

Tabla 21: Coeficientes de seguridad parciales

Situación de dimensionado	Tipo	Materiales		Acciones	
		γ_R	γ_M	γ_E	γ_F
Persistente o transitoria	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
	Pilotes				
	Arrancamiento	3,5	1,0	1,0	1,0
	Rotura horizontal	3,5	1,0	1,0	1,0
	Pantallas				
	Estabilidad fondo excavación	1,0	2,5 ⁽⁶⁾	1,0	1,0
	Sifonamiento	1,0	2,0	1,0	1,0
Rotación o traslación					
Equilibrio límite	1	1,0	0,6 ⁽⁷⁾	1,0	
Modelo de Winkler	1	1,0	0,6 ⁽⁷⁾	1,0	
Elementos finitos	1,0	1,5	1,0	1,0	

8.1.2.1. ELU DESLIZAMIENTO

Según el CTE DB-SE-C: “Se podrá producir este modo de rotura cuando, en elementos que hayan de soportar cargas horizontales, las tensiones de corte en el contacto de la cimentación con el terreno superen la resistencia de ese contacto”.

Se debe comprobar que el valor de cálculo del efecto de las acciones (las fuerzas deslizantes) con el valor de cálculo de la resistencia del terreno (las fuerzas que se oponen al deslizamiento). Para ello, se comprueba que:

$$V_T \leq \frac{1}{\gamma_R} (N_T \cdot tg\phi_d) \quad (19)$$

Donde:

V_T es el cortante total en la base de la zapata en la hipótesis considerada

γ_R es el coeficiente parcial de resistencia, de valor mínimo 1,5, de acuerdo con la tabla 2.1 del CTE DB SE-C

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

ϕ_d es el ángulo de rozamiento interno de cálculo entre cimiento y terreno; este valor deriva del ángulo de rozamiento entre cimiento y terreno (ϕ), pero afectado de un coeficiente de minoración $\phi_d = 2\phi / 3$

Puesto que no se ha llevado a cabo un estudio geotécnico ni se tienen datos sobre el rozamiento entre los cimientos y el terreno, se emplea el ángulo de rozamiento más desfavorable, correspondiente a un terreno muy suelto. Según la tabla 4.1. del CTE DB SE-C, ϕ es de 30° .

8.1.2.2. ELU VUELCO

Según el CTE DB-SE-C: "Se podrá producir este modo de rotura en cimentaciones que hayan de soportar cargas horizontales y momentos importantes cuando, siendo pequeño el ancho equivalente de la cimentación, el movimiento predominante sea el giro de la cimentación".

Por tanto, debe cumplirse la condición $E_{d,dst} \leq E_{d,stab}$, es decir, el valor de cálculo del efecto de las acciones desestabilizadoras debe ser menor o igual al valor de cálculo del efecto de las acciones estabilizadoras.

La comprobación, teniendo en cuenta los coeficientes de seguridad parciales descritos anteriormente, se realiza mediante la siguiente ecuación:

$$\gamma_{E,dst} \cdot M_{dst} \leq \gamma_{E,stab} \cdot M_{stab} \quad (20)$$

Para determinar si una acción es estabilizante o no, se calcula, considerando el vuelco respecto de los puntos A y B de la zapata, el valor de a que hace que una acción tenga un efecto u otro, de forma que obtenido el carácter de las acciones se pueda obtener la dimensión mínima de la longitud a .

- Respecto de A, la acción será estabilizante si $\sum M_i = N_i \cdot \frac{a}{2} - V_i \cdot h > 0$
- Respecto de B, la acción será estabilizante si $\sum M_i = N_i \cdot \frac{a}{2} + V_i \cdot h > 0$

8.1.2.3. ELU HUNDIMIENTO

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, también llamada presión de hundimiento. La condición para evitar el estado límite de hundimiento se expresará como:

$$E_d \leq R_d \rightarrow q_b \leq q_s \quad (21)$$

De esta forma, se debe comprobar que:

$$q_b \equiv \sigma = \frac{N_T}{\left(a - 2 \cdot \frac{M_T}{N_T}\right) \cdot b} \leq q_s \equiv \sigma_{adm} = 200 \text{ kN/m}^2 \quad (22)$$

8.1.3. DIMENSIONES FINALES

Realizando las comprobaciones explicadas en los anteriores puntos, se llega a las siguientes dimensiones de las zapatas de ambos grupos.

- Grupo soportes:
Se consideran el peso propio de la estructura, el viento incidiendo a 90° y el viento incidiendo a 270°, siendo el pilar más solicitado el correspondiente a la barra 115 (Figura 43). Con esto, las acciones a considerar son (siendo negativos los axiles de tracción):

N_p (kN)	30.78
N₉₀ (kN)	102.06
V_{y_90} (kN)	0.21
V_{z_90} (kN)	2.78
N₂₇₀ (kN)	-90.42
V_{y_270} (kN)	1.37
V_{z_270} (kN)	2.57

Con esto, se obtiene las dimensiones de la zapata $a = b = 315$ cm.

Por otro lado, se obtiene que el armado necesario es, para ambos sentidos, $12\emptyset 16c/24$, $L = 279$ mm, teniendo este mismo armado tanto en la cara superior como en la cara inferior de las zapatas.

- Grupo tornapuntas:
Se consideran el peso propio de la estructura, el viento incidiendo a 90° y el viento incidiendo a 270°, siendo el tornapunta más solicitado el correspondiente a la barra 164 del modelo.

Con esto, las acciones a considerar son (siendo negativos los axiles de tracción):
Con esto, se obtiene las dimensiones $a = b = 315$ cm.

N_p (kN)	7.44
V_p (kN)	0.53
N₉₀ (kN)	90.04
V_{y_90} (kN)	0
V_{z_90} (kN)	0.6
N₂₇₀ (kN)	-98.62
V_{y_270} (kN)	0.53
V_{z_270} (kN)	1.66

Con esto, se obtiene las dimensiones $a = b = 315$ cm.

Por otro lado, se obtiene que el armado necesario es, para ambos sentidos, $15\emptyset 16c/21$, $L = 299$ mm, teniendo este mismo armado tanto en la cara superior como en la cara inferior de las zapatas.

III. MEDICIONES Y PRESUPUESTO

1. ACONDICIONAMIENTO DEL TERRENO

Nº	Ud	Descripción	Medición	Precio	Importe (€)
----	----	-------------	----------	--------	-------------

1.1 Excavación

1.1.1 m³ Excavación a cielo abierto, en cualquier tipo de terreno, con medios mecánicos, y carga a camión.

Criterio de valoración económica: El precio no incluye el transporte de los materiales excavados.

Incluye: Replanteo general y fijación de los puntos y niveles de referencia. Colocación de las camillas en las esquinas y extremos de las alineaciones. Excavación en sucesivas franjas horizontales y extracción de tierras. Refinado de fondos y laterales a mano, con extracción de las tierras. Carga a camión de los materiales excavados.

Criterio de medición de proyecto: Volumen medido sobre las secciones teóricas de la excavación, según documentación gráfica de Proyecto.

Criterio de medición de obra: Se medirá el volumen teórico ejecutado según especificaciones de Proyecto, sin incluir los incrementos por excesos de excavación no autorizados, ni el relleno necesario para reconstruir la sección teórica por defectos imputables al Contratista. Se medirá la excavación una vez realizada y antes de que sobre ella se efectúe ningún tipo de relleno. Si el Contratista cerrase la excavación antes de conformada la medición, se entenderá que se aviene a lo que unilateralmente determine el director de la ejecución de la obra.

Total m ³ :	94,533	21,08	1.992,67
------------------------	--------	-------	-----------------

Total 1.1 Excavación			1.992,67
-----------------------------	--	--	-----------------

1.2 Transporte de tierras

1.2.1 m³ Transporte de tierras con camión de los productos procedentes de la excavación de cualquier tipo de terreno a vertedero específico, instalación de tratamiento de residuos de construcción y demolición externa a la obra o centro de valorización o eliminación de residuos, situado a una distancia no limitada.

Criterio de valoración económica: El precio incluye el tiempo de espera en obra durante las operaciones de carga, el viaje de ida, la descarga y el viaje de vuelta, pero no incluye la carga en obra.

Incluye: Transporte de tierras a vertedero específico, instalación de tratamiento de residuos de construcción y demolición externa a la obra o centro de valorización o eliminación de residuos, con protección de las mismas mediante su cubrición con lonas o toldos.

Criterio de medición de proyecto: Volumen medido sobre las secciones teóricas de las excavaciones, incrementadas cada una de ellas por su correspondiente coeficiente de esponjamiento, de acuerdo con el tipo de terreno considerado.

Criterio de medición de obra: Se medirá, incluyendo el esponjamiento, el volumen de tierras realmente transportado según especificaciones de Proyecto.

Coeficiente de esponjamiento de 1,3.

Total m ³ :	122,893	6,07	745,96
------------------------	---------	------	---------------

Total 1.2 Transporte de tierras			745,96
--	--	--	---------------

1.3 Desbroce y limpieza del terreno

- 1.3.1 m² Desbroce y limpieza del terreno con arbustos, con medios mecánicos. Comprende los trabajos necesarios para retirar de las zonas previstas para la edificación o urbanización: arbustos, pequeñas plantas, tocones, maleza, broza, maderas caídas, escombros, basuras o cualquier otro material existente, hasta una profundidad no menor que el espesor de la capa de tierra vegetal, considerando como mínima 25 cm; y carga a camión. El precio no incluye la tala de árboles ni el transporte de los materiales retirados.

Total m ² :	1650	1,97	3.250
Total 1.3 Desbroce y limpieza del terreno			3.250
Total Presupuesto parcial nº 1 Acondicionamiento del terreno:			5.988,63

2. CIMENTACIONES

Nº (€)	Ud	Descripción	Medición	Precio	Importe
-----------	----	-------------	----------	--------	---------

2.1 Zapatas de hormigón armado

- 2.1.1 m² Montaje de sistema de encofrado recuperable metálico, para zapata de cimentación, formado por paneles metálicos, amortizables en 200 usos, y posterior desmontaje del sistema de encofrado. Incluso elementos de sustentación, fijación y acodamientos necesarios para su estabilidad y líquido desencofrante, para evitar la adherencia del hormigón al encofrado.

Incluye: Limpieza y preparación del plano de apoyo. Replanteo. Aplicación del líquido desencofrante. Montaje del sistema de encofrado. Colocación de elementos de sustentación, fijación y acodamiento. Aplomado y nivelación del encofrado. Desmontaje del sistema de encofrado. Limpieza y almacenamiento del encofrado.

Criterio de medición de proyecto: Superficie de encofrado en contacto con el hormigón, medida según documentación gráfica de Proyecto.

Criterio de medición de obra: Se medirá la superficie de encofrado en contacto con el hormigón realmente ejecutada según especificaciones de Proyecto.

Total m²: 86,171 197,29 **16.803,39**

- 2.1.2 m³ Zapata de cimentación de hormigón armado, realizada con hormigón HA-25/F/20/XC2 fabricado en central, y vertido desde camión, y acero UNE-EN 10080 B 500 S, con una cuantía aproximada de 50 kg/m³. Incluso armaduras de espera del pilar, alambre de atar, y separadores.

Total m³: 186,026 16,57 **3.082,45**

Total 2.1 Zapatas de hormigón armado 19.885,84

2.2 Vigas de atado de hormigón armado

- 2.2.1 m³ Viga de atado de hormigón armado, realizada con hormigón HA-25/F/20/XC2 fabricado en central, y vertido desde camión, y acero UNE-EN 10080 B 500 S, con una cuantía aproximada de 60 kg/m³. Incluso alambre de atar, y separadores.

Criterio de valoración económica: El precio incluye la elaboración de la ferralla (corte, doblado y conformado de elementos) en taller industrial y el montaje en el lugar definitivo de su colocación en obra, pero no incluye el encofrado.

Incluye: Colocación de la armadura con separadores homologados. Vertido y compactación del hormigón. Coronación y enrase. Curado del hormigón.

Criterio de medición de proyecto: Volumen medido sobre las secciones teóricas de la excavación, según documentación gráfica de Proyecto.

Criterio de medición de obra: Se medirá el volumen teórico ejecutado según especificaciones de Proyecto, sin incluir los incrementos por excesos de excavación no autorizados.

Total m³: 9,362 214,24 **2.005,71**

- 2.2.2 m² Montaje de sistema de encofrado recuperable metálico, para viga de atado, formado por paneles metálicos, amortizables en 200 usos, y posterior desmontaje del sistema de encofrado. Incluso elementos de sustentación, fijación y acodamientos necesarios para su estabilidad y líquido desencofrante, para evitar la adherencia del hormigón al encofrado.

Incluye: Limpieza y preparación del plano de apoyo. Replanteo. Aplicación del líquido desencofrante. Montaje del sistema de encofrado. Colocación de elementos de sustentación, fijación y acodamiento. Aplomado y nivelación del encofrado. Desmontaje del sistema de encofrado. Limpieza y almacenamiento del encofrado.

Criterio de medición de proyecto: Superficie de encofrado en contacto con el hormigón, medida según documentación gráfica de Proyecto.

Criterio de medición de obra: Se medirá la superficie de encofrado en contacto con el hormigón realmente ejecutada según especificaciones de Proyecto.

Total m ² :	61,896	17,66	1.093,08
------------------------	--------	-------	-----------------

Total 2.2 Vigas de atado de hormigón armado			3.098,79
--	--	--	-----------------

2.3 Regularización

- 2.3.1 m² Capa de hormigón de limpieza y nivelado de fondos de cimentación, de 10 cm de espesor, de hormigón HL-150/B/20, fabricado en central y vertido desde camión, en el fondo de la excavación previamente realizada.

Incluye: Replanteo. Colocación de toques y/o formación de maestras. Vertido y compactación del hormigón. Coronación y enrase del hormigón.

Criterio de medición de proyecto: Superficie medida sobre la superficie teórica de la excavación, según documentación gráfica de Proyecto.

Criterio de medición de obra: Se medirá la superficie teórica ejecutada según especificaciones de Proyecto, sin incluir los incrementos por excesos de excavación no autorizados.

Total m ² :	153,580	7,78	1.196,41
------------------------	---------	------	-----------------

Total 2.3 Regularización			1.196,41
---------------------------------	--	--	-----------------

Total Presupuesto parcial nº 2 Cimentaciones:			24.181,04
--	--	--	------------------

3. ESTRUCTURA

Nº	Ud	Descripción	Medición	Precio	Importe (€)
3.1 Perfiles de acero					
3.1.1	Kg	Acero UNE-EN 10219-1 S355J2H, en pilares formados por piezas simples de perfiles huecos conformados en frío de las series redondo, cuadrado o rectangular, acabado con imprimación antioxidante, colocado con uniones soldadas en obra, a una altura de más de 3 m. Criterio de valoración económica: El precio incluye las soldaduras, los cortes, los despuntes, las piezas especiales, las placas de arranque y de transición de pilar inferior a superior, los casquillos y los elementos auxiliares de montaje. Incluye: Limpieza y preparación del plano de apoyo. Replanteo y marcado de los ejes. Colocación y fijación provisional del pilar. Aplomado y nivelación. 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.			
			Total kg: 19.159,000	2,61	50.004,99
			Total 3.1 Perfiles de acero		50.004,99
3.2 Placa de anclaje					
3.2.1	Ud	Placa de anclaje de acero UNE-EN 10025 S355JR en perfil plano, con taladro central, de 610x610 mm y espesor 22 mm, y montaje sobre 4 pernos de acero corrugado UNE-EN 10080 B 500 S de 20 mm de diámetro y 20 cm de longitud total, embutidos en el hormigón fresco, y atornillados con arandelas, tuerca y contratuerca una vez endurecido el hormigón del cimient. Incluso mortero autonivelante expansivo para relleno del espacio resultante entre el hormigón endurecido y la placa y protección anticorrosiva aplicada a las tuercas y extremos de los pernos.			
			Total Ud:	7,000	301,48
					2.110,36
3.2.2	Ud	Placa de anclaje de acero UNE-EN 10025 S355JR en perfil plano, con taladro central, de 420x420 mm y espesor 22 mm, y montaje sobre 4 pernos de acero corrugado UNE-EN 10080 B 500 S de 20 mm de diámetro y 20 cm de longitud total, embutidos en el hormigón fresco, y atornillados con arandelas, tuerca y contratuerca una vez endurecido el hormigón del cimient. Incluso mortero autonivelante expansivo para relleno del espacio resultante entre el hormigón endurecido y la placa y protección anticorrosiva aplicada a las tuercas y extremos de los pernos.			
			Total Ud:	7,000	147,27
					1.030,89
			Total 3.2 Placa de anclaje		3.141,25
Total Presupuesto parcial nº 3 Estructura:					53.146,24

4. BASE DE LICITACIÓN

Presupuesto de ejecución material

1 Acondicionamiento del terreno	5.988,63 €
1.1 Excavación	1.992,67
1.2 Transporte de tierras	745,96
1.3 Desbroce y limpieza del terreno	3250
2 Cimentaciones	24.181,04 €
2.1 Zapatas de hormigón armado	19.885,84
2.2 Vigas de atado de hormigón armado	3.098,79
3.3 Regularización	1196,41
3 Estructura	53.146,24 €
3.1 Perfiles de acero	50.004,99
3.2 Placa de anclaje	3.141,25
Total:	83.315,91 €

Asciende el presupuesto de ejecución material a la expresada cantidad de OCHENTA Y TRES MIL TRESCIENTOS QUINCE EUROS CON NOVENTAIÚN CÉNTIMOS

Presupuesto base de licitación

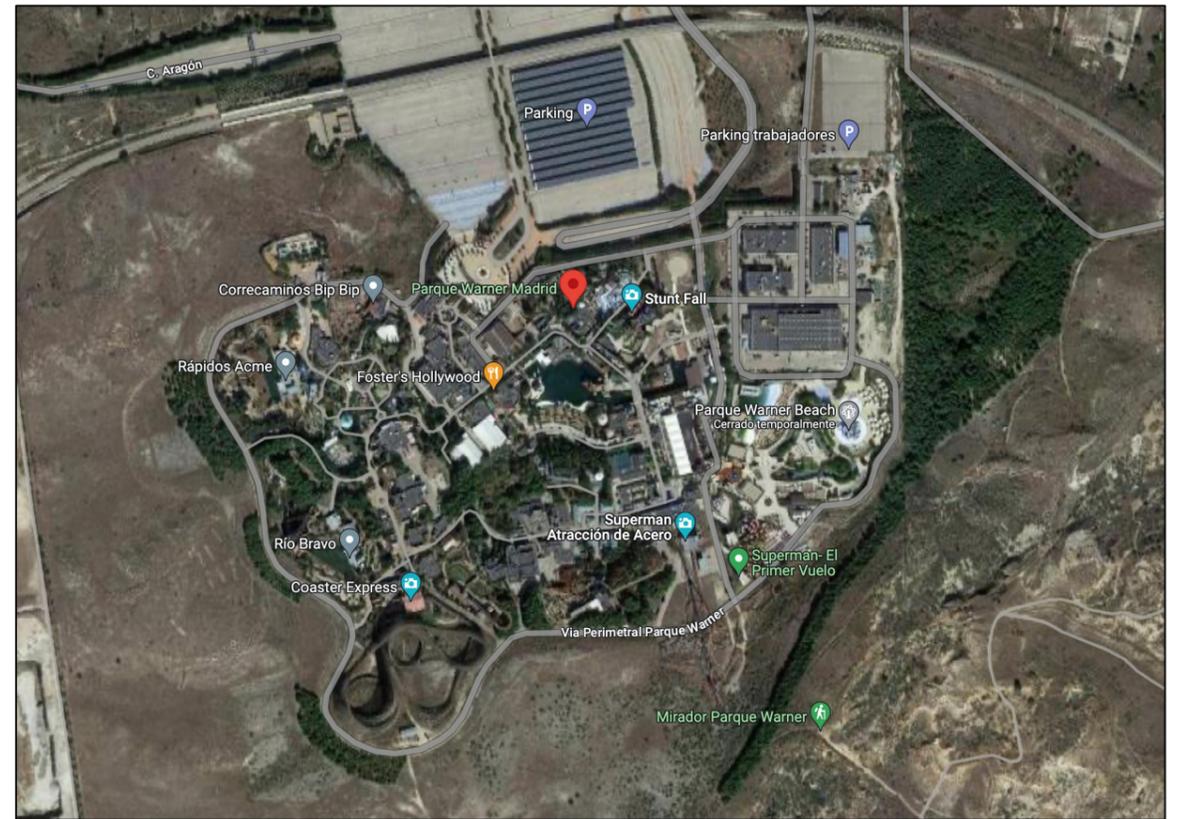
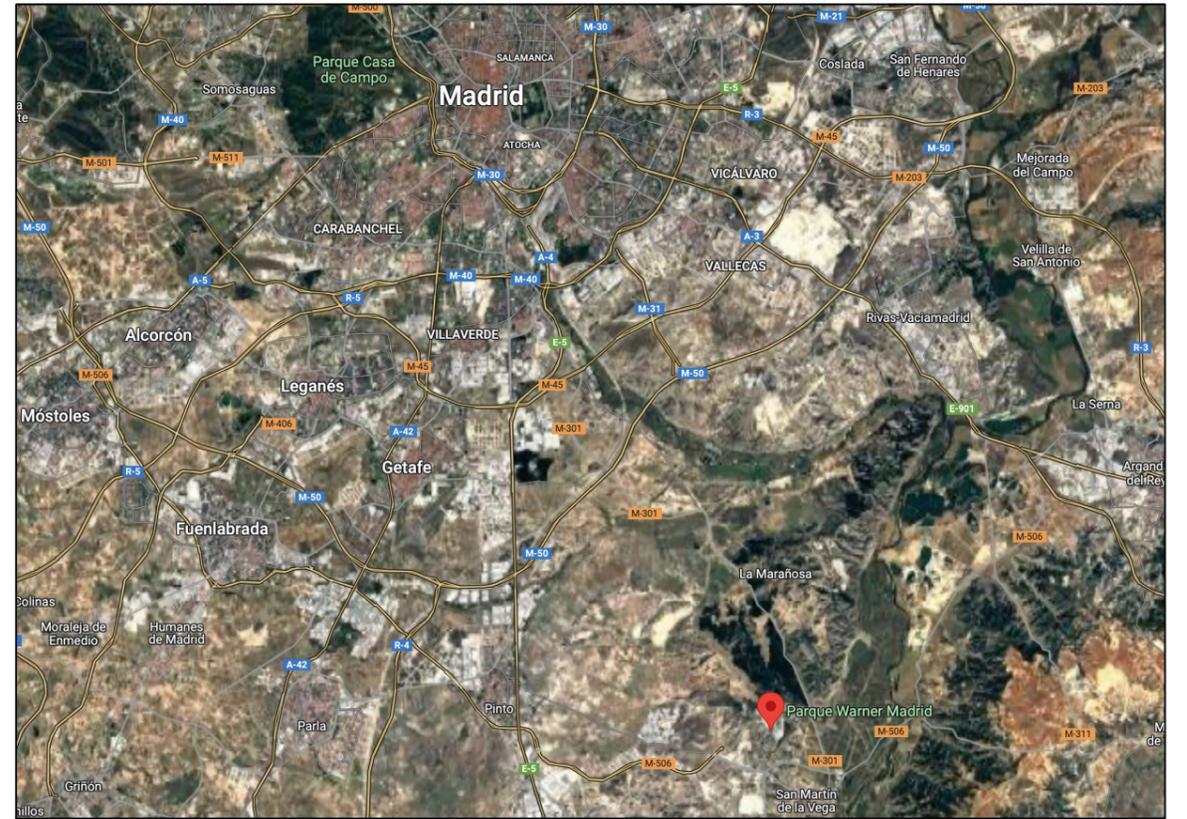
Presupuesto de ejecución material	83.315,91 €
13% de gastos generales	10.813,07
6% de beneficio industrial	4.998,95
Presupuesto de ejecución por contrata	99.145,93 €
21% IVA	20.820,64
Total:	119.966,58 €

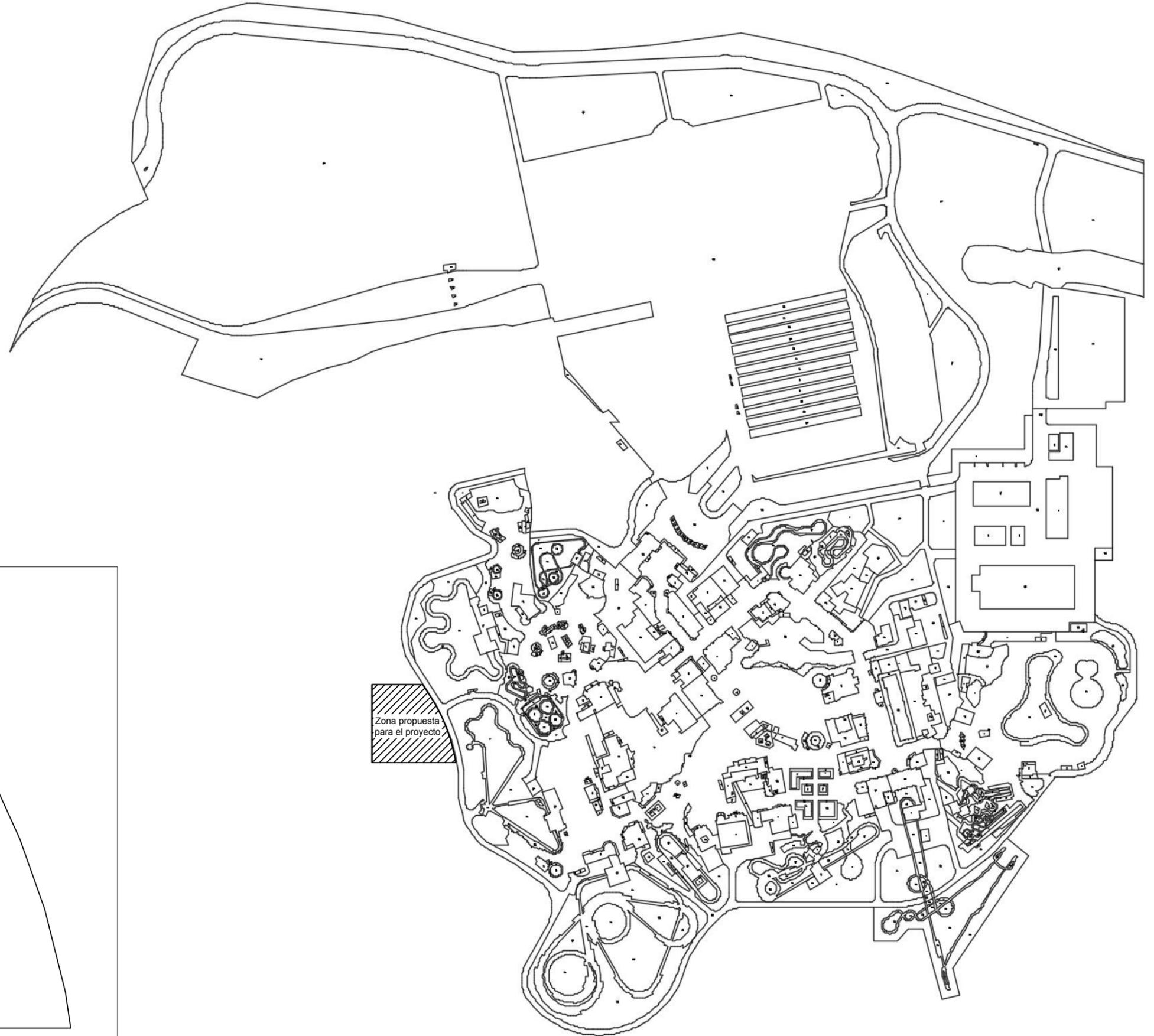
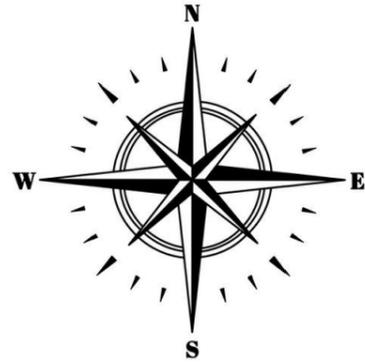
Asciende el presupuesto base de licitación a la expresada cantidad de CIENTO DIECINUEVE MIL NOVECIENTOS SESENTA Y SEIS EUROS CON CINCUENTA Y OCHO CÉNTIMOS.

IV. PLANOS

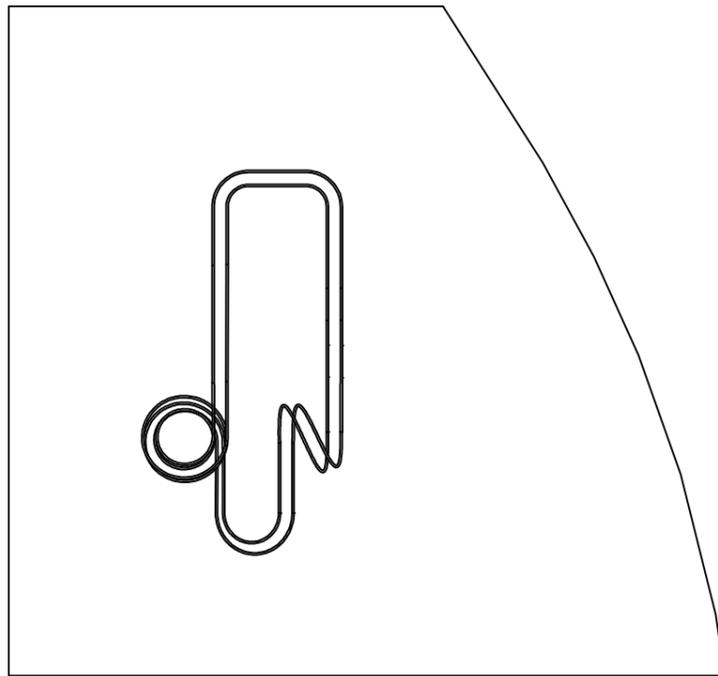
1. ÍNDICE DE PLANOS:

- Situación
- Emplazamiento
- Vista isométrica de la estructura
- Cimentación
- Placas de anclaje de soportes
- Placas de anclaje de tornapuntas
- Vistas y acotación de la estructura
- Vista frontal
- Uniones soldadas





Distribución en parcela:



TRABAJO FINAL DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR INGENIERÍA INDUSTRIAL VALENCIA

Proyecto:
DISEÑO Y CÁLCULO ESTRUCTURAL DE UN TRAMO DE 75 METROS DE LONGITUD DE UNA MONTAÑA RUSA.

Plano:
Emplazamiento

Autor:
Javier Llavador García

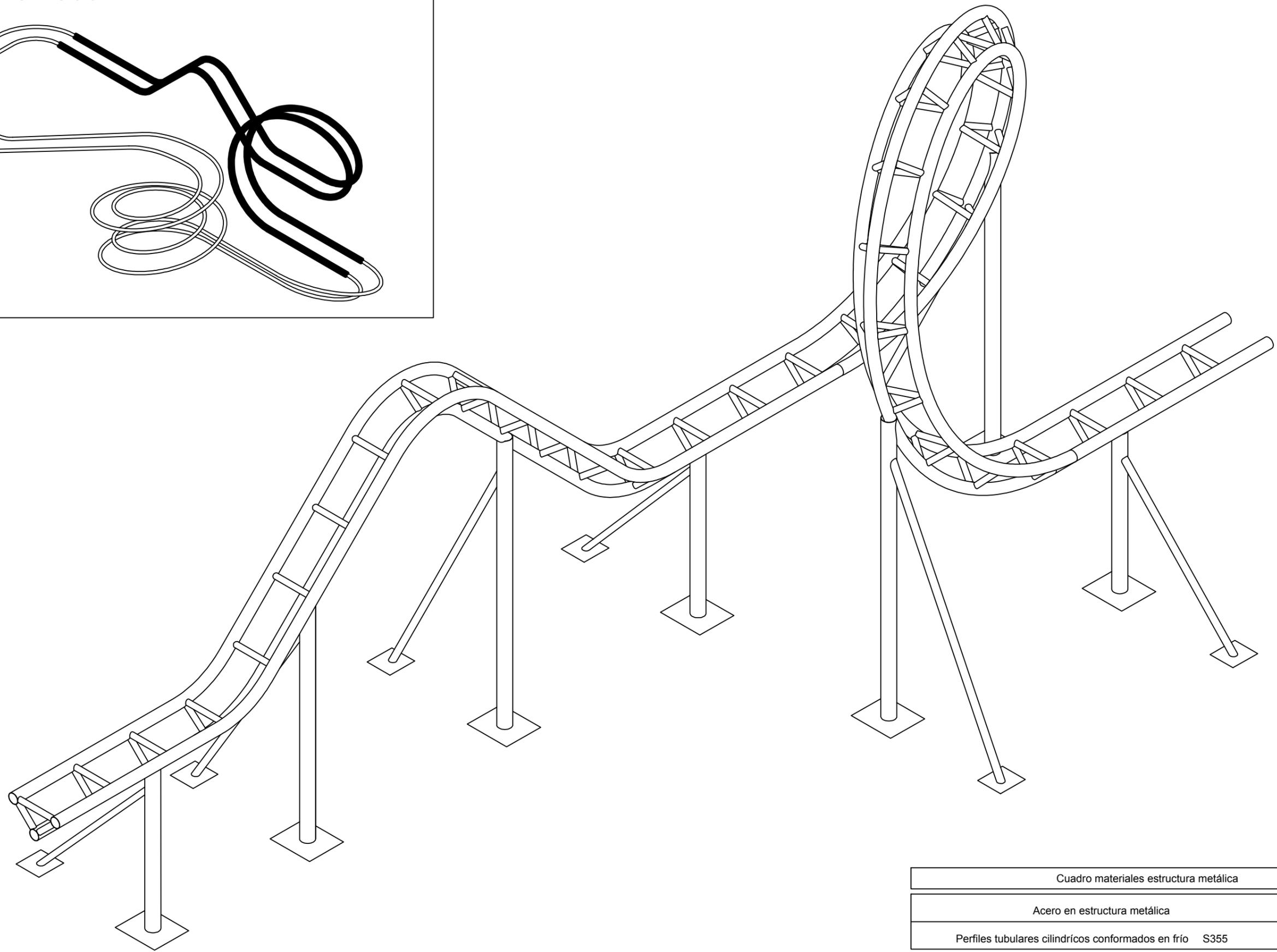
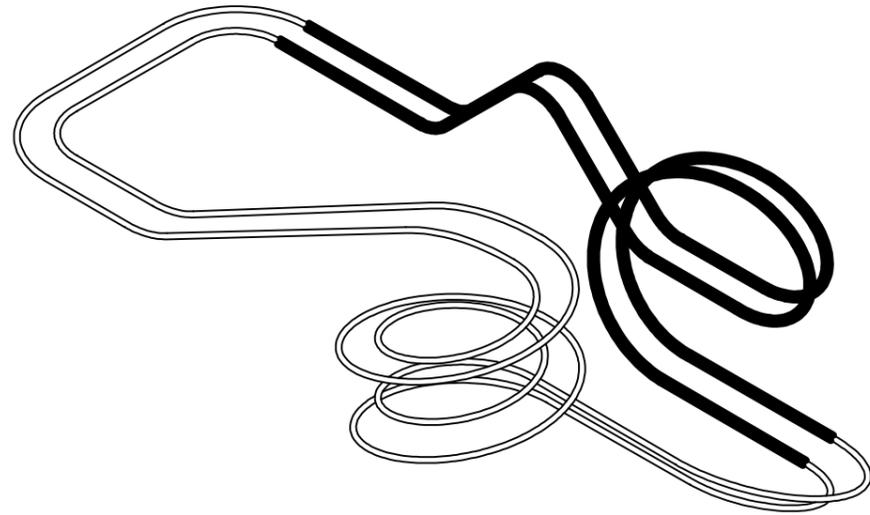
Fecha:
Junio 2023

Escala:
S/E

Nº Plano:

2

Tramo analizado:



Cuadro materiales estructura metálica		
Acero en estructura metálica	γ_{M0}	γ_{M1}
Perfiles tubulares cilíndricos conformados en frío S355	1.05	1.05

TRABAJO FINAL DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR INGENIERÍA INDUSTRIAL VALENCIA

Proyecto:
DISEÑO Y CÁLCULO ESTRUCTURAL DE UN TRAMO DE 75 METROS DE LONGITUD DE UNA MONTAÑA RUSA.

Plano:
Vista Isométrica de la estructura

Autor:
Javier Llavador García

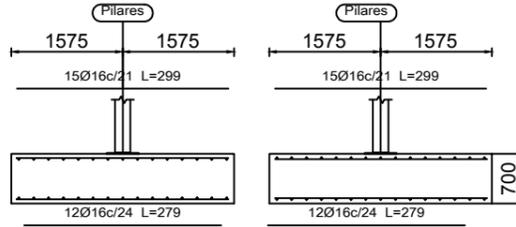
Fecha:
Junio 2023

Escala:
1:100

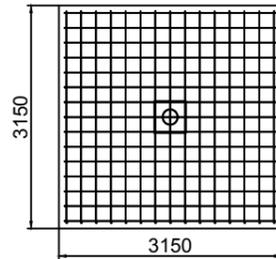
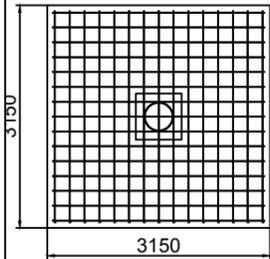
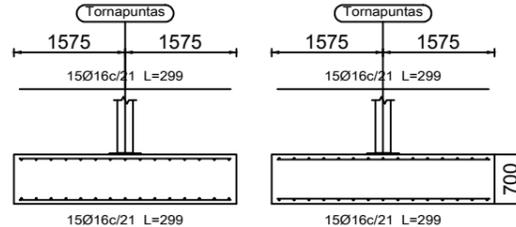
Nº Plano:

3

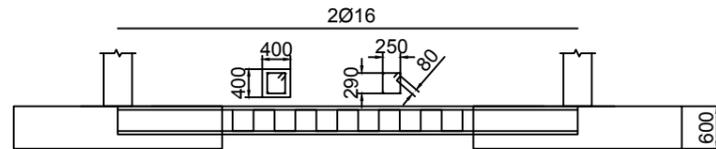
Pilares



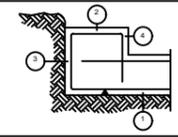
Tornapuntas

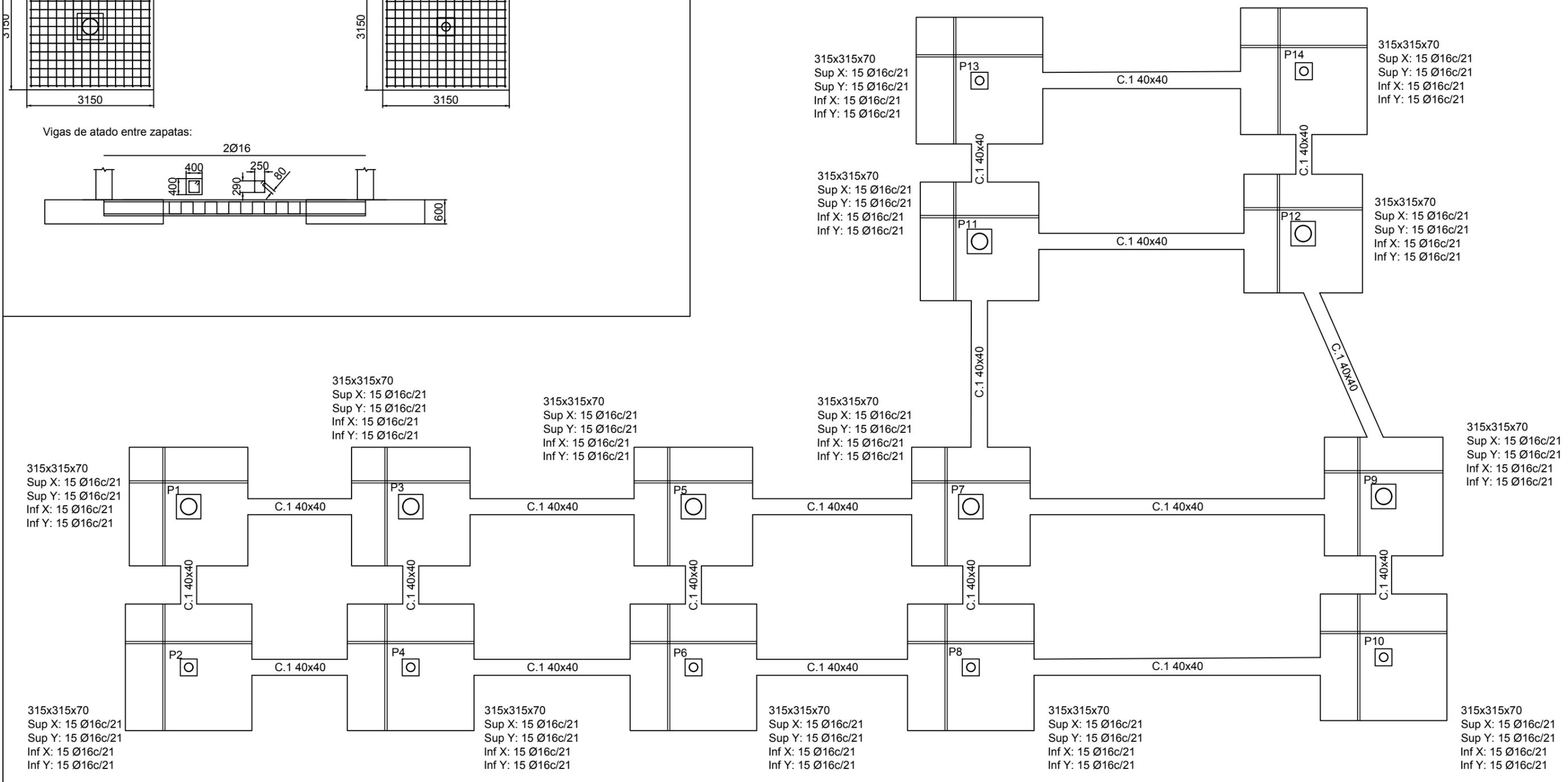


Vigas de atado entre zapatas:

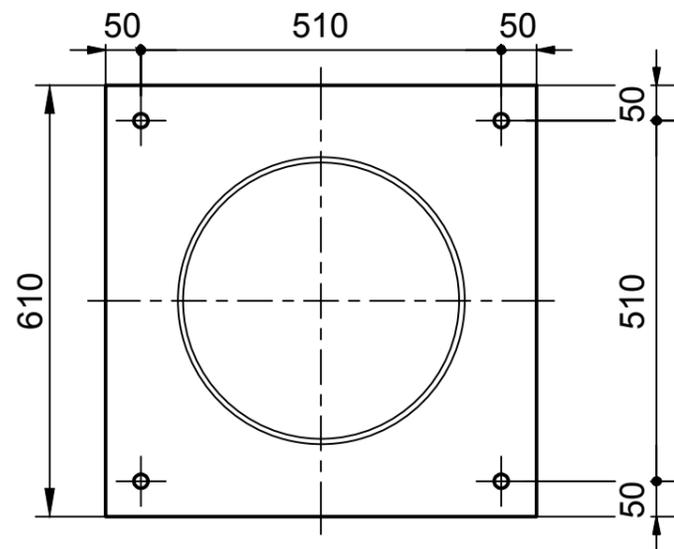
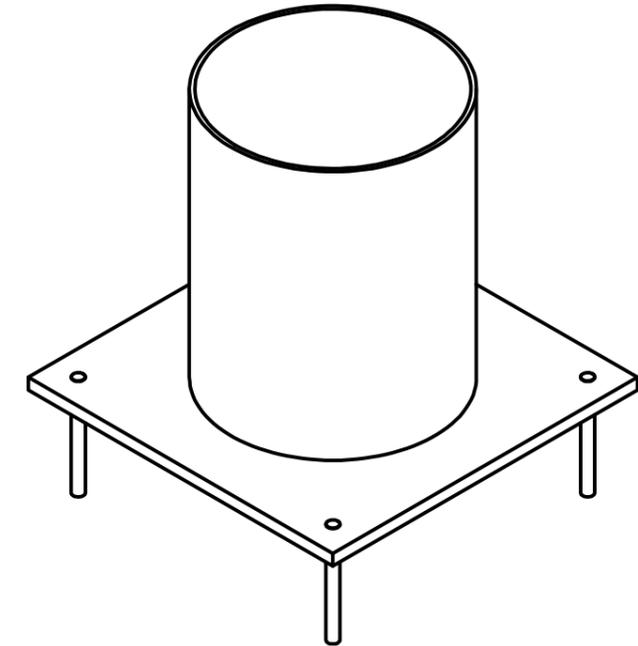
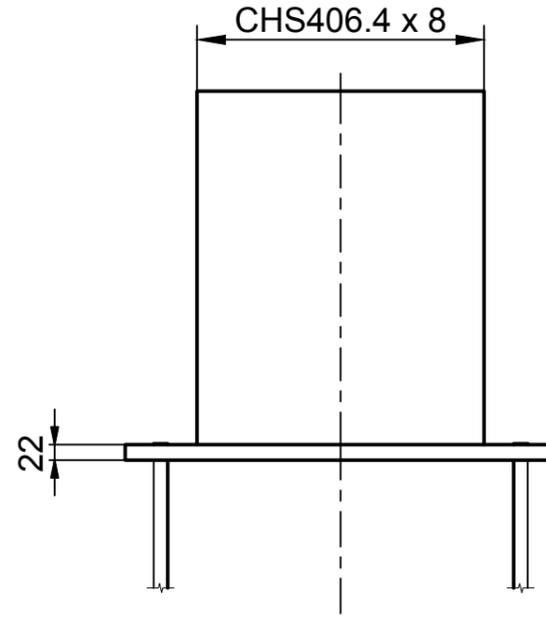
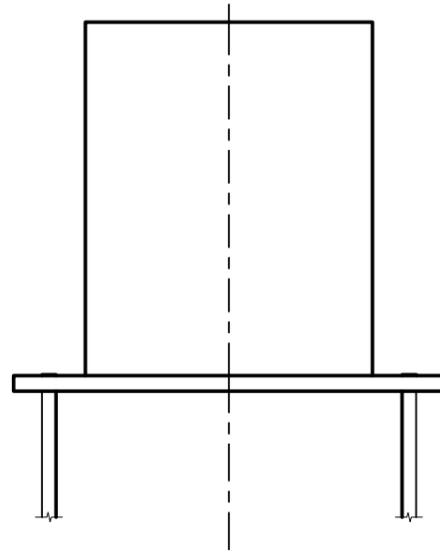


Características de los materiales - Losas de cimentación									
Materiales	Hormigón					Acero			
	Control		Características			Control		Características	
Elemento Zona/Planta	Nivel Control	Coef. Ponde.	Tipo	Consistencia	Tamaño máx. árido	Exposición Ambiente	Nivel Control	Coef. Ponde.	Tipo
	Estadístico	γ = 1.50	H.30F30C2	Fluida (8-9 cm)	20 mm		Normal	γ = 1.15	B500S
Exposición/ambiente	Terreno		Terreno protegido u hormigón de limpieza			XC1	XC2	XC3	XC4
Recubrimientos nominales (mm)	80		Ver Exposición/Ambiente						
Notas									
<ul style="list-style-type: none"> - Control Estadístico en EHE, equivale a control normal - Solapes según EHE - El acerosutilizado deberá estar garantizado con un distintivo reconocido: Sello CIETSID, CC-EHE, ... 									

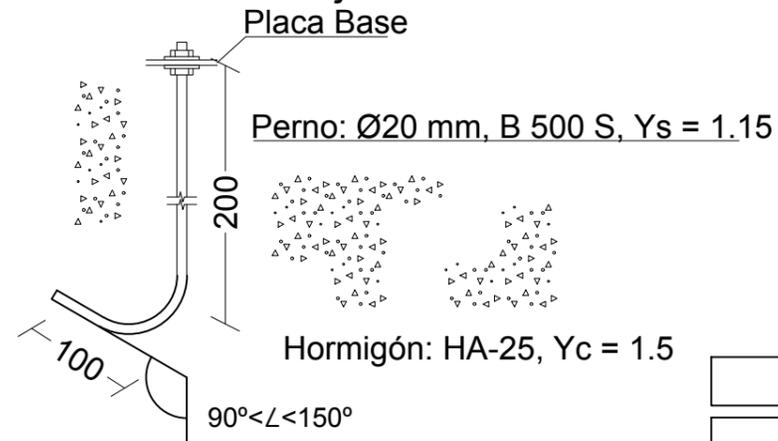
Recubrimientos nominales	
	1a: Recubrimiento inferior contacto terreno ≥ 8 cm. 1b: Recubrimiento con hormigón de limpieza 4 cm. 2: Recubrimiento superior libre 4/5 cm. 3: Recubrimiento lateral contacto terreno ≥ 8 cm. 4: Recubrimiento lateral libre 4/5 cm.
Datos geotécnicos	
Tensión admisible del terreno considerada = 0.2 MPa (2kg/cm2)	



Dimensiones Placa= 610x610x22 mm (S355)
 Pernos = 4Ø20 mm, B 500 S, Ys = 1.15



Detalle Anclaje Perno



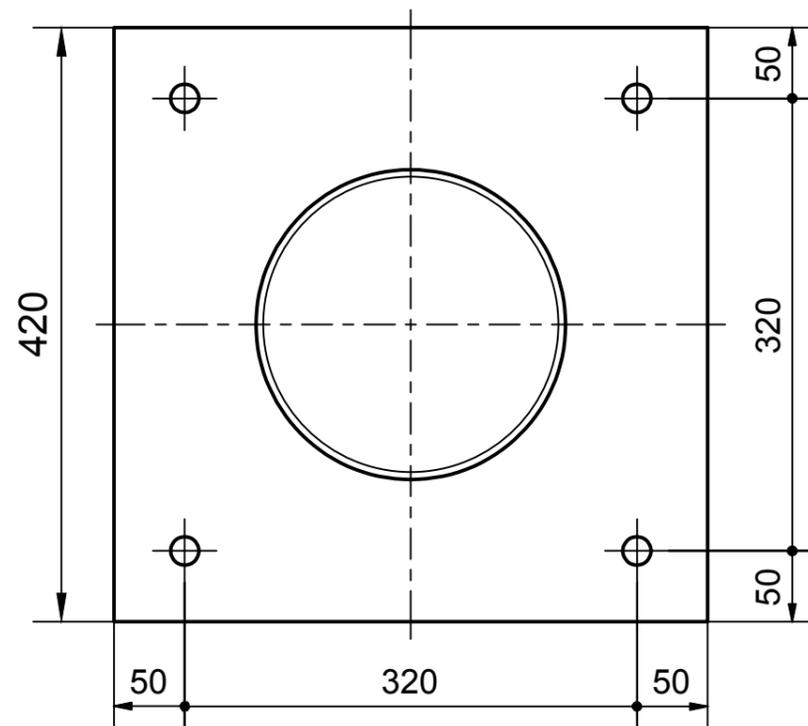
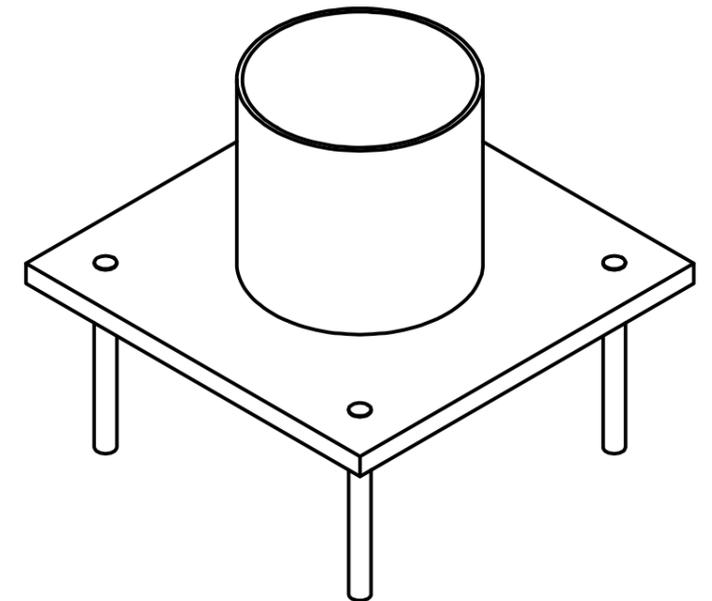
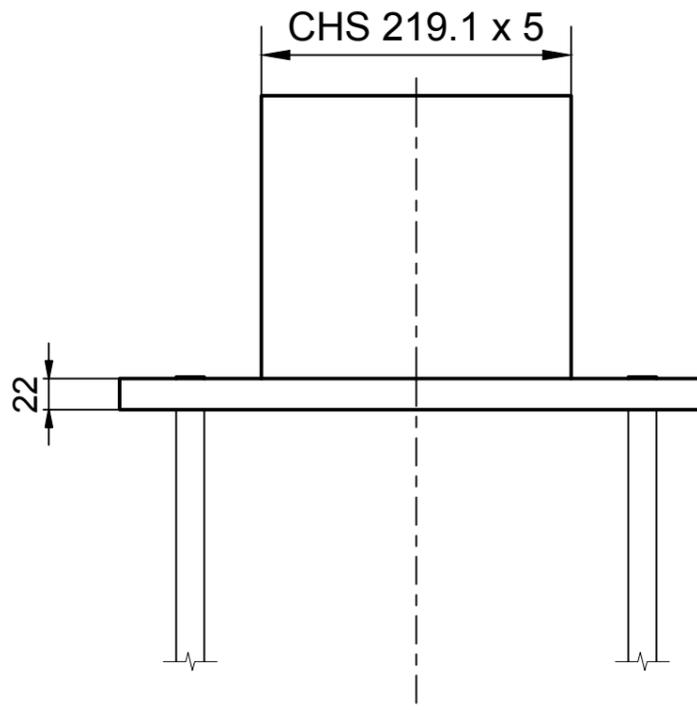
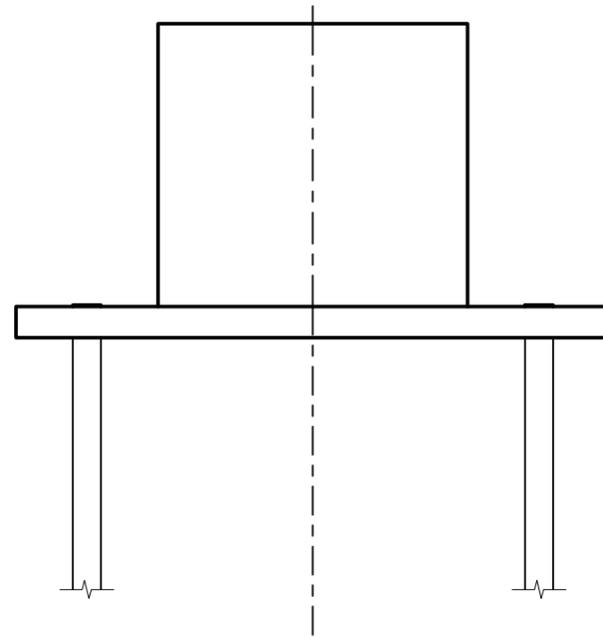
Cuadro materiales placas de anclaje

	γ_{M0}	γ_{M1}
Acero en estructura metálica		
Perfiles tubulares huecos conformados en frío S355 (UNE EN 10219-2)	1.05	1.05
Acero pernos de anclaje	γ_s	
Barras corrugadas B500S	1.15	
Hormigón empleado	γ_c	
Hormigón armado HA-25/F/20/XC2	1.5	

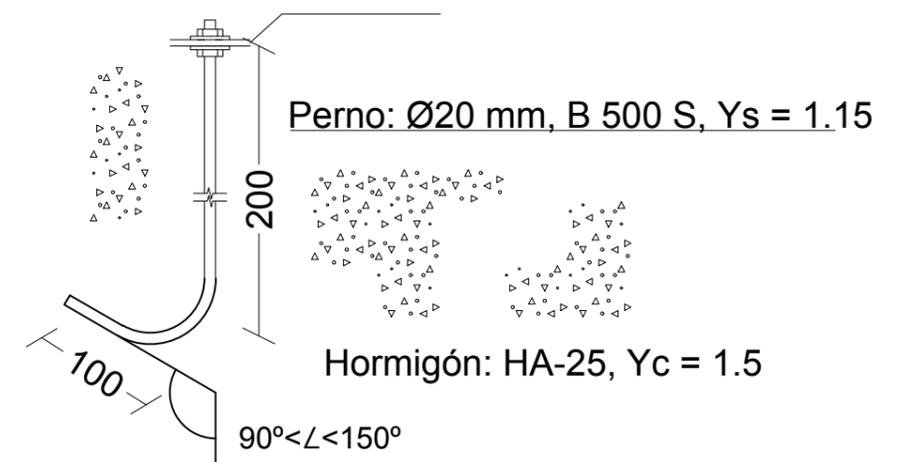
Cotas en mm

Dimensiones Placa = 420x420x22 mm (S355)

Pernos = 4Ø20 mm, B 500 S, Ys = 1.15

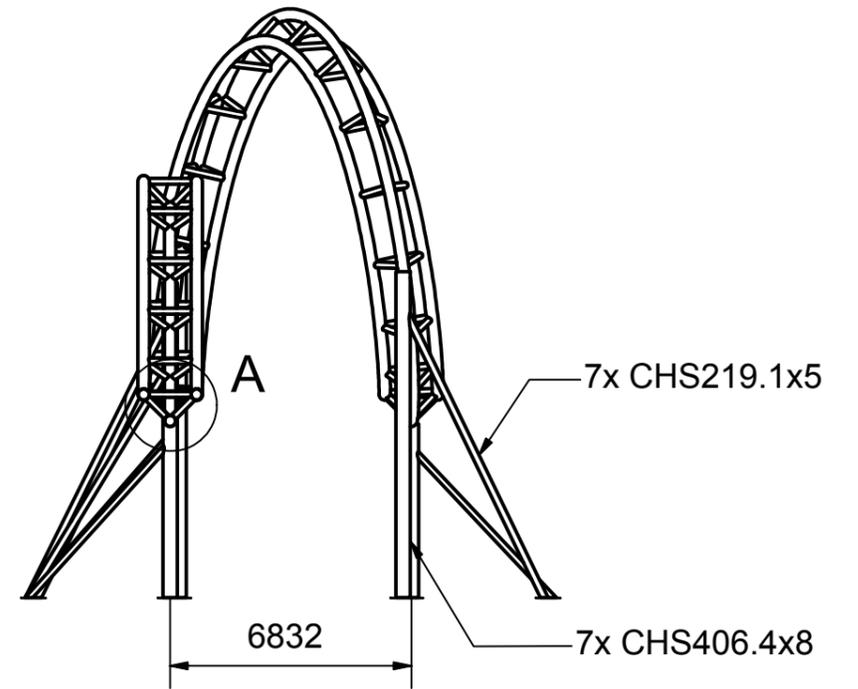
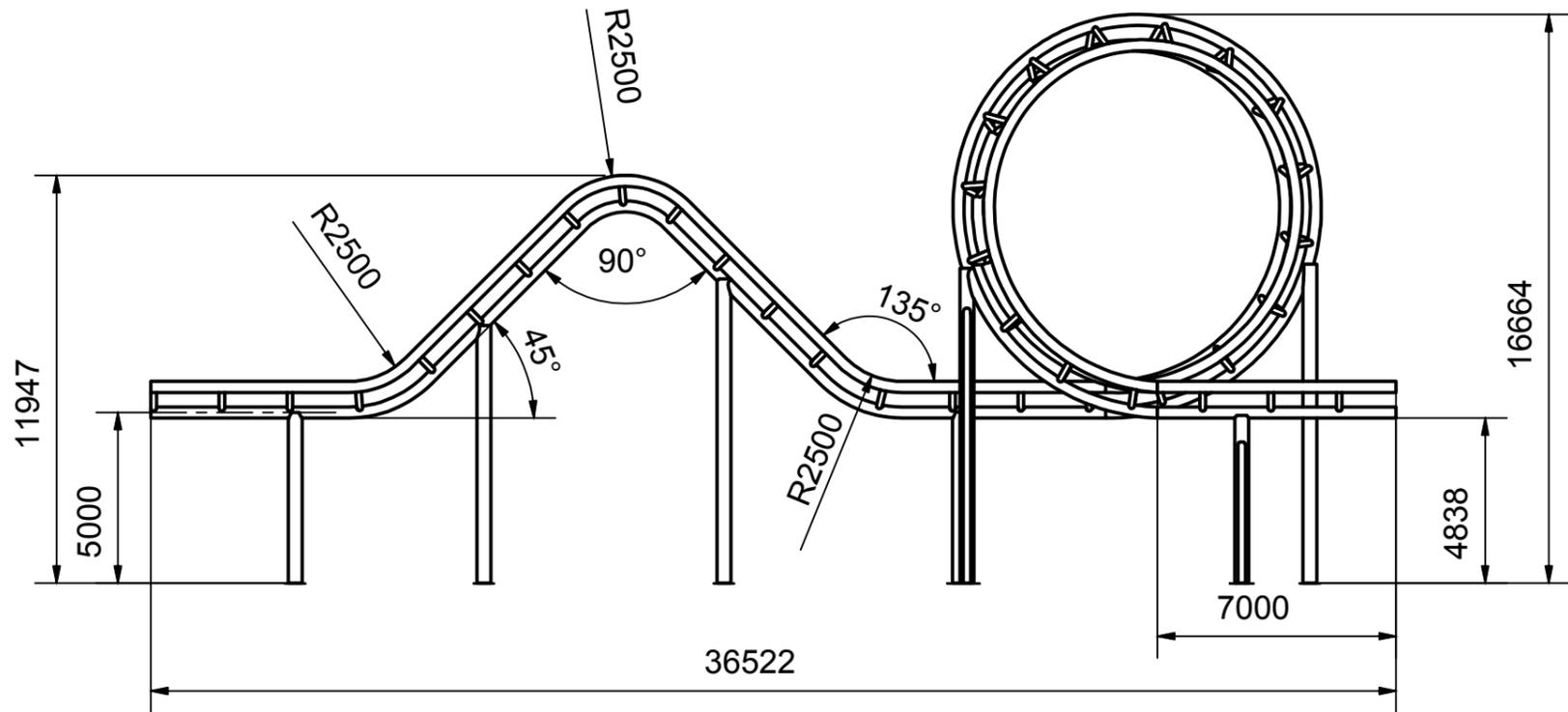


Detalle Anclaje Perno

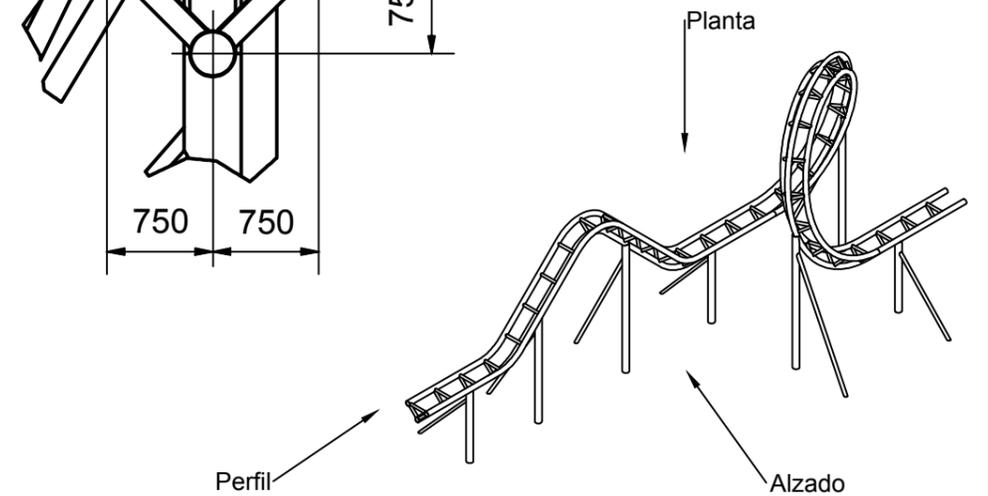
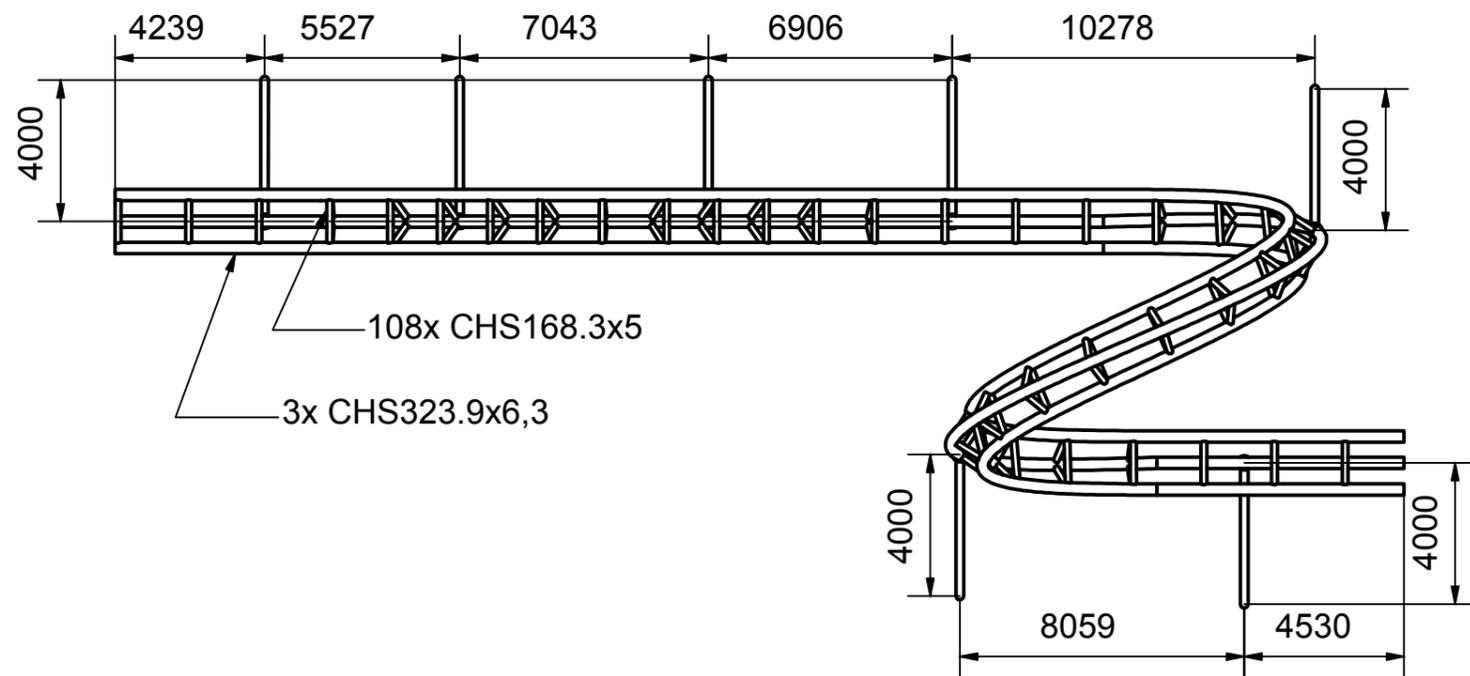
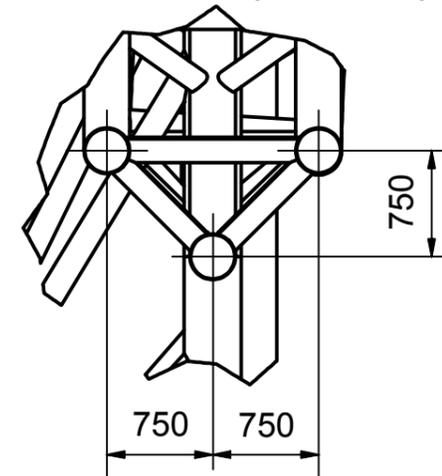


Cuadro materiales placas de anclaje		
Acero en estructura metálica	γ_{M0}	γ_{M1}
Perfiles tubulares huecos conformados en frío S355 (UNE EN 10219-2)	1.05	1.05
Acero pernos de anclaje	γ_s	
Barras corrugadas B500S	1.15	
Hormigón empleado	γ_c	
Hormigón armado HA-25/F/20/XC2	1.5	

Cotas en mm

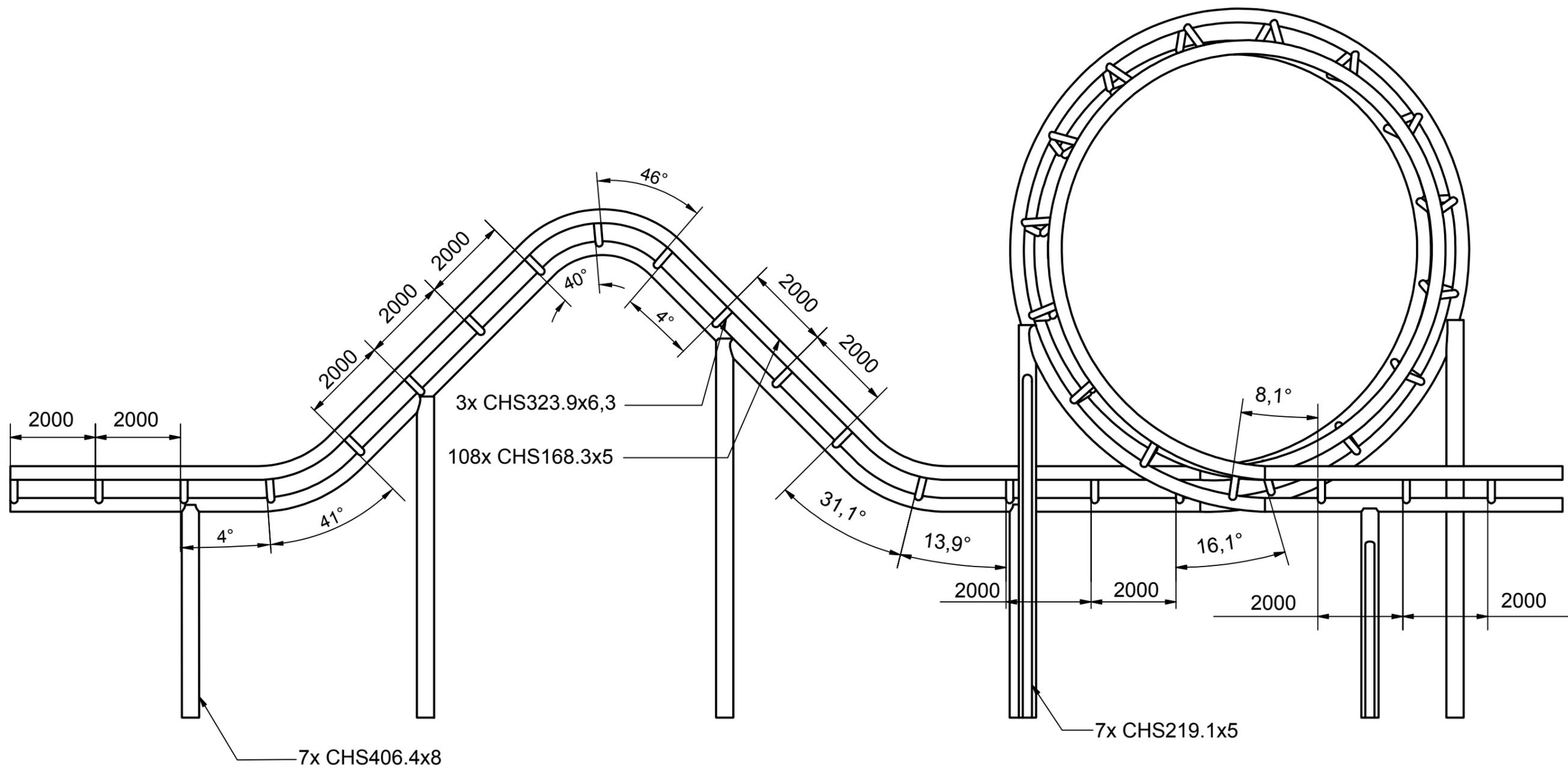


Detalle A (1 : 50)



Cuadro materiales estructura metálica		
Acero en estructura metálica	γ_{M0}	γ_{M1}
Perfiles tubulares huecos conformados en frío S355 (UNE EN 10219-2)	1.05	1.05

Cotas en mm



Cuadro materiales estructura metálica		
Acero en estructura metálica	γ_{M0}	γ_{M1}
Perfiles tubulares huecos conformados en frío S355 (UNE EN 10219-2)	1.05	1.05

Cotas en mm

TRABAJO FINAL DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR INGENIERÍA INDUSTRIAL VALENCIA

Proyecto:
DISEÑO Y CÁLCULO ESTRUCTURAL DE UN TRAMO DE 75 METROS DE LONGITUD DE UNA MONTAÑA RUSA.

Plano:
Vista frontal

Autor:
Javier Llavador García

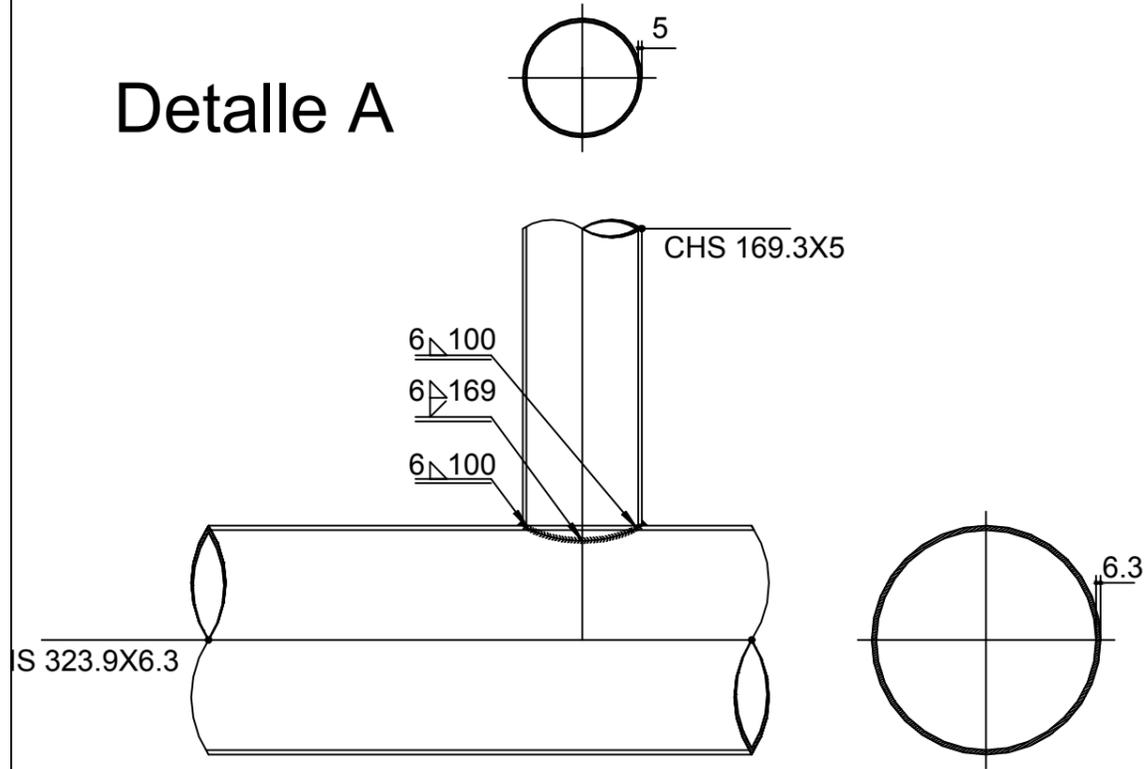
Fecha:
Junio 2023

Escala:
1:100

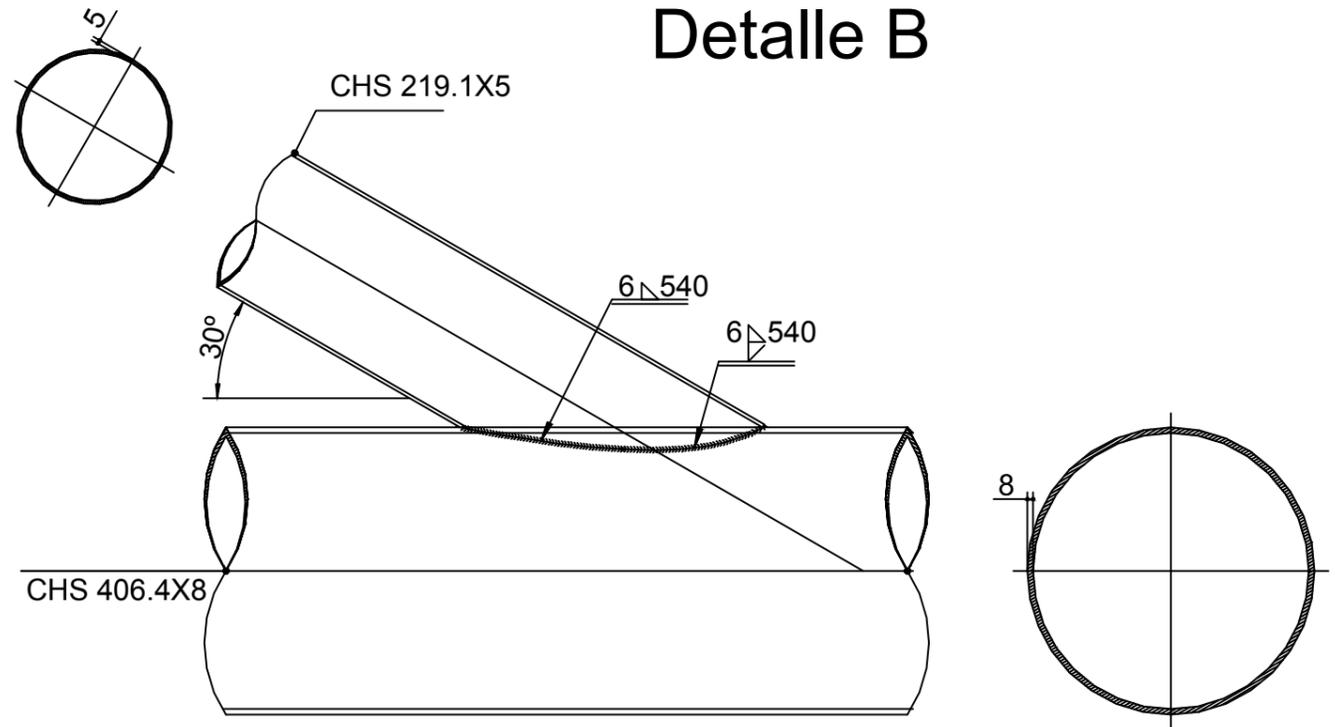
Nº Plano:

8

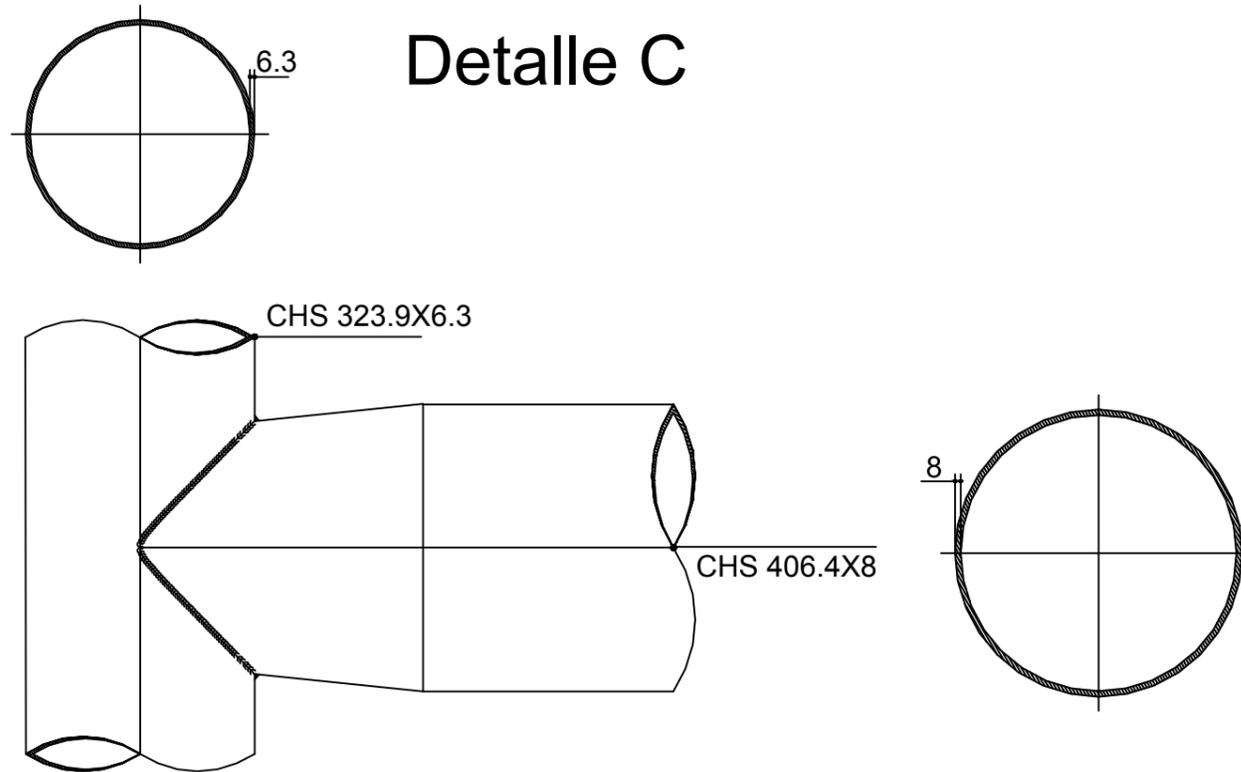
Detalle A



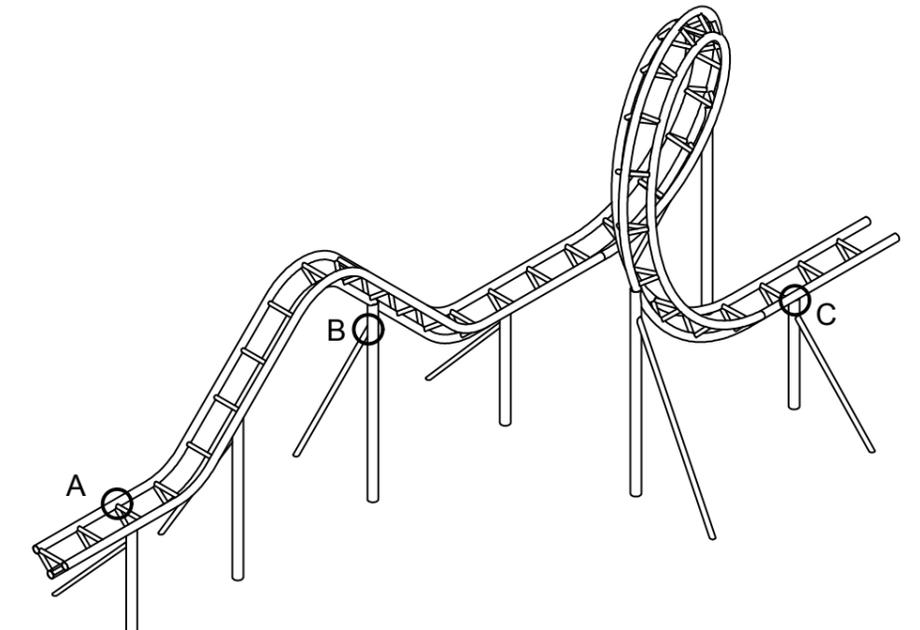
Detalle B



Detalle C



Cotas en mm



Cuadro materiales estructura metálica		
Acero en estructura metálica	γ_{M0}	γ_{M1}
Perfiles tubulares huecos conformados en frío S355 (UNE EN 10219-2)	1.05	1.05