



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ETS INGENIERÍA DE CAMINOS,
CANALES Y PUERTOS

TRABAJO DE FIN DE MASTER

Diseño estructural de viaductos de luces medias en líneas de Hyperloop. Aplicación a un viaducto sobre el río Adaja en el T.M. de Olmedo (Valladolid)

Presentado por

Marín Vilches, Lorenzo

Para la obtención del

Master Universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

Curso: 2020/2021

Fecha: Septiembre 2021

Tutor: Museros Romero, Pedro

Cotutor: Lázaro Fernández, Carlos Manuel



A mi familia

A mis amigos

Resumen

Este Trabajo Fin de Máster trata sobre el comportamiento estructural de viaductos de luces medias para líneas de Hyperloop. En él se estudian soluciones basadas en una estructura continua de vanos múltiples, para la cual se proporcionan criterios de diseño obtenidos mediante modelos teóricos de nivel de complejidad creciente.

El trabajo parte de una panorámica actual de la tecnología del Hyperloop en sus aspectos fundamentales, analizándolos en relación a otros medios de transporte como el ferrocarril, el avión y el barco, para los servicios de pasajeros y de mercancías; dándole importancia a las propuestas de infraestructura de las diferentes empresas dedicadas al desarrollo de dicha tecnología.

Tras esta visión general, el estudio se enfoca en viaductos de luces medias, partiendo de los estudios previos realizados por profesores del Dpto. de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras de esta Escuela, relativos a tubos autoportantes de 25 mm de espesor y 4 m de diámetro. Para ello, se evalúa mediante modelos de barras y modelos lámina diferentes configuraciones de viaductos con luces del vano central que van desde los 28 m a los 84 m. En los modelos de barras se han estudiado sus ELS de confort y ELU de resistencia e inestabilidad, mientras en los modelos lámina este se centra en la inestabilidad del tubo como lámina y las tensiones producidas por las acciones en una configuración con imperfecciones. Se obtiene que es posible configuraciones con luces del vano central de hasta 70 m, siendo necesario anillos rigidizadores cada 7 m; y que para los casos donde se necesiten luces mayores, será necesario la colocación de nuevos elementos que aporten mayor rigidez al conjunto.

Para poner de manifiesto la posibilidad de proyectar una infraestructura para este nuevo medio de transporte, se realiza un anteproyecto de viaducto para el hyperloop, con un vano central de 63 m de luz, en la actual localización del cruce por el río Adaja en Olmedo (Valladolid) de la línea del AVE Galicia-Madrid.

Abstract

This Master's Thesis explains the structural behavior of the medium spans of viaducts for the Hyperloop lines. It studies solutions based on a continuous structure of multiple spans, for which design criteria obtained through theoretical models where increasing complexity is provided.

The project is based on a current overview of the Hyperloop technology in its fundamental aspects, analyzing it in relation to other means of transport such as railways, planes and ship, for passenger and freight services; focusing in the infrastructure proposals of the different companies dedicated to the development of this technology.

After this overview, the study focuses on viaducts of medium spans, based on the previous studies carried out by professors of the Department of Mechanics of Continuous Media and Theory of Structures of this University, related to self-supporting tubes of 25 mm thickness and 4 meters in diameter. To do this, different configurations of viaducts with central spans which range from 28 m to 84 m are evaluated using bar models and sheet models. In the bar models, their comfort SLS and resistance and instability ULS have been studied, while in the sheet models this focuses on the instability of the tube as a sheet and the stresses produced by the actions in a configuration with imperfections. The result shows that it is possible to configurate with central span lights up to 70 m, being necessary rigidizing rings every 7 m; and for those cases where larger lights are needed, it will be necessary to place new elements that provide greater rigidity to the whole.

To highlight the possibility of designing an infrastructure for this new means of transport, a preliminary viaduct project is carried out for the hyperloop, with a central span of 63 m of light, in the current location of the crossing by the Adaja River in Olmedo (Valladolid) of the Galicia-Madrid AVE line.

ÍNDICE

RESUMEN	3
ABSTRACT	5
ÍNDICE	7
1. INTRODUCCIÓN	9
2. LA INFRAESTRUCTURA PARA HYPERLOOP: ESTADO DE LA TÉCNICA	11
2.1. EVOLUCIÓN HISTÓRICA: DEL FERROCARRIL ATMOSFÉRICO AL HYPERLOOP	11
2.2. HYPERLOOP FRENTE A OTROS MODOS DE TRANSPORTE.....	13
2.2.1. <i>Hyperloop como servicio de Pasajeros</i>	14
2.2.2. <i>Hyperloop como servicio de carga</i>	17
2.2.3. <i>Coste del sistema</i>	19
2.2.4. <i>Política y Medio Ambiente</i>	20
2.2.5. <i>Hyperloop como alternativa a otros medios de transporte</i>	21
2.3. AVANCES EN LA CARRERA POR EL HYPERLOOP.....	22
2.4. INFRAESTRUCTURA DEL HYPERLOOP.....	23
3. ESTUDIO DE VIADUCTOS DE LUCES MEDIAS PARA HYPERLOOP ...	29
3.1. DEFINICIÓN DEL MODELO DE BARRAS.....	29
3.1.1. <i>Modelo de tramos infinitos</i>	30
3.1.2. <i>Verificación del modelo de barras</i>	35
3.2. ESTUDIO DE VARIACIÓN DE LUCES DEL VANO CENTRAL: ELS Y ELU	36
3.2.1. <i>Estado Límite de Servicio</i>	36
3.2.2. <i>Estado Límite Último: de Resistencia y de Inestabilidad</i>	39
3.3. DEFINICIÓN DEL MODELO LÁMINA	46
3.3.1. <i>Verificación del modelo láminas</i>	50
3.4. ESTUDIO DE VARIACIÓN DE LUCES DEL VANO CENTRAL: ESTUDIO DE INESTABILIDAD Y ESTUDIO TENSIONAL	51
3.4.1. <i>Estudio de inestabilidad</i>	54
3.4.2. <i>Estudio tensional</i>	56
3.5. RECOMENDACIONES DE DISEÑO	59
4. APLICACIÓN A UN VIADUCTO SOBRE EL RÍO ADAJA	61
4.1. SOLUCIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA PARA EL HYPERLOOP	62
4.1.1. <i>Descripción geométrica de la infraestructura</i>	62
4.1.2. <i>Materiales</i>	65
4.1.3. <i>Acciones</i>	65
4.1.4. <i>Terreno valle del río Adaja</i>	70
4.2. COMPROBACIÓN ESTRUCTURAL.....	72
4.2.1. <i>Definición de los modelos</i>	72
4.2.2. <i>Estado Límite de Servicio</i>	75
4.2.3. <i>Estado Límite Último de Resistencia</i>	76
4.2.4. <i>Estado Límite Último de Inestabilidad</i>	79
4.2.5. <i>Estudio Inestabilidad</i>	81
4.2.6. <i>Estudio tensional</i>	83
4.3. VALORACIÓN ECONÓMICA.....	87
4.3.1. <i>Unidades de obra</i>	88
4.3.2. <i>Mediciones</i>	90
4.3.3. <i>Valoración económica</i>	93
4.3.4. <i>Conclusiones de la valoración económica</i>	94

5. CONCLUSIONES	97
ÍNDICE DE TABLAS	99
ÍNDICE DE FIGURAS	101
REFERENCIAS	107
ANEJOS	109
ANEJO I: PRIMER MODO DE PANDEO DE LOS CASOS DE ESTUDIO DE INESTABILIDAD	109
ANEJO II: PLANOS DEL VIADUCTO PARA EL HYPERLOOP SOBRE EL RÍO ADAJA (OLMEDO, VALLADOLID).....	125
ANEJO III: DIMENSIONAMIENTO DE ENCEPADOS Y PILOTES	137
ANEJO IV: RELACIÓN DEL TFM CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE DE LA AGENDA 2030.....	143

1. INTRODUCCIÓN

La historia del transporte es la historia de la humanidad. Desde la aparición de la rueda, la necesidad de transportarnos o de transportar mercancías cada vez más pesadas ha hecho que los medios de transporte hayan ido evolucionando, desde los carruajes de caballos, pasando por los vehículos, barcos, aviones y actualmente en fase de estudio y pruebas, el Hyperloop.

Este nuevo medio de transporte está en fase de desarrollo y poco a poco se va conociendo parte de los avances que lo constituyen. En este documento se profundiza sobre la tecnología del hyperloop en sus aspectos básico en comparación con otros medios de transporte, centrándose en la infraestructura y se establecen algunas recomendaciones sobre la infraestructura para viaductos de luces medias para el hyperloop, debido a sus claras diferencias con otras infraestructuras de viaductos para ferrocarril o carretera.

Dentro del estudio comparativo frente a medios como el avión, el barco y el tren, se indaga sobre el hyperloop como servicio de pasajeros, estudiándose aspectos como: los tiempos de viaje, la frecuencia, la comodidad, la fiabilidad, la capacidad o la interoperabilidad. También se realiza una comparación como servicio de carga, comparándose con cada uno de los medios de transporte competidores del sector. Otro aspecto de suma importancia será el coste del sistema, del cual se empieza a tener conocimiento al respecto, indicándose la suma importancia que los estados tienen sobre la introducción del hyperloop en las ciudades, debido a que es un transporte caro, pero medio ambientalmente muy necesario, apoyándose en los objetivos pactados en el Acuerdo de París.

La infraestructura es un aspecto crucial en todos estos aspectos. Actualmente, existen muchas empresas alrededor del globo que estudian sobre estos asuntos como son Virgin Hyperloop One, Hyperloop TT, Transpod o Zeleros. Casi todas proponen una infraestructura elevada, con pilas más o menos separadas a la misma distancia, pero con algunos aspectos diferentes como el concepto de sustentación de la cápsula, la propia cápsula en sí, la forma de los apoyos del tubo con las pilas o incluso los materiales y la construcción de los tubos.

Los profesores Pedro Museros, Carlos Lázaro, Benjamín Pinazo y Salvador Monleón proponen en su artículo “*Key aspects in the analysis and design of Hyperloop infrastructure under static, dynamic and thermal loads*” exponen diferentes propuestas de dimensionamiento, analizando varias configuraciones de tubos frente a los efectos de la acción térmica, la inestabilidad del tubo, las tensiones provocadas por las acciones que lo solicitan, estudios a fatiga y estudios dinámicos para diferentes combinaciones geométricas y de acciones. Entre las configuraciones que proponen, destaca aquella donde el tubo, formado por acero dúplex S460, tiene un espesor de 25 mm y un diámetro de 4 m apoyado en pilas equidistantes de entre 20 y 40 m donde no se permite la dilatación longitudinal ni transversal del tubo en los apoyos, pero sí el giro perpendicular al eje del tubo. La imposibilidad de dilatación longitudinal hace que el diseño del tubo tenga una fuerte dependencia de la expansión térmica, principalmente por las tensiones provocadas y la inestabilidad del tubo como lámina, cuya dependencia viene ligada a aspectos geométricos como el espesor del tubo o la necesidad de anillos de rigidización.

Es por ello por lo que en el presente documento se realiza un estudio partiendo de esta configuración variando las luces del vano central desde 28 a 84 m con características de viaducto. Este estudio se centra en dos modelos. El primer modelo es un modelo de barras donde se estudia para diferentes configuraciones el estado límite de servicio según la comprobación de confort para trenes del Eurocódigo 0, y los estados límite últimos de resistencia e inestabilidad según la EAE. El segundo modelo es un modelo lámina donde se estudia la inestabilidad como lámina de diferentes configuraciones y las tensiones producidas en los alrededores de los apoyos para el caso de introducción de imperfecciones. Toda esta información nos ofrece un vistazo a un posible diseño de un viaducto para un caso real.

Para probar con las recomendaciones de diseño obtenidas, se realiza un anteproyecto de un viaducto utilizando información del actual cruce de la línea de AVE Galicia-Madrid por su paso por el río Adaja en Olmedo, provincia de Valladolid. Se prediseña un viaducto de luz del vano central de 63 m, comprobando frente a las acciones pertinentes los estados límite últimos y de servicio estudiados anteriormente, así como la inestabilidad de la lámina del tubo y la tensión cercana a los puntos más solicitados frente a la introducción de imperfecciones; además de las comprobaciones de la cimentación. Para finalizar, se realiza una valoración económica del proyecto por kilómetro, tanto de la parte del viaducto como de los tramos estándar.

El documento que se presenta a continuación indaga sobre algunos aspectos cruciales del diseño de viaductos de hyperloop, basándose en la evolución que las diferentes empresas dedicadas al hyperloop han propuesto y centrándose en diseño simples como base para futuros estudios de viaductos de luces mayores a los estudiados.

Este trabajo forma parte del proyecto *Análisis Dinámico aplicado al Diseño de Viaductos para Hyperloop: Vibraciones de Flexión, Torsión y Límites Normativos* apoyado por la Generalitat Valenciana dentro del programa de financiación a la investigación AICO2019.

2. LA INFRAESTRUCTURA PARA HYPERLOOP: ESTADO DE LA TÉCNICA

El ser humano siempre ha estado buscando la forma más eficiente de transportarse y con el paso del tiempo hemos ido desarrollando distintas tecnologías que nos han permitido movernos no únicamente por llanuras y montañas mediante carreteras y vías ferroviarias sino también entre continentes cruzando océanos y usando el espacio aéreo. El transporte ha ido evolucionando mediante el uso de coches, trenes, barcos, aviones y, en la actualidad, cada vez más actores en diferentes ámbitos de la sociedad piensan en el hyperloop como el siguiente paso de esta aparentemente inagotable evolución.

El hyperloop es un medio de transporte tanto de pasajeros como de mercancías que consiste básicamente en una serie de cápsulas que usan una mezcla de levitación por aire o magnética y propulsión eléctrica viajando a través de una red de tubos a baja presión rozando el vacío. Estos tubos permiten que se minimicen al máximo la fricción del aire y los raíles de sustentación y guiado pudiendo así alcanzar velocidades de hasta 1200 kilómetros por hora.

El concepto por el que quiere competir el hyperloop frente a otros medios de transporte es el rozamiento atmosférico. Este hace que en medios como el ferrocarril o las aeronaves no se puedan alcanzar velocidades mayores y disminuir con ello notablemente los tiempos de trayecto. El sistema aprovecha la facilidad de mantener un sistema a muy baja presión pudiendo soportar pequeñas variaciones en la densidad del aire.

2.1. Evolución histórica: del ferrocarril atmosférico al Hyperloop

Como se decía anteriormente, la idea principal del Hyperloop es la bajada de la presión dentro de un tubo, reduciéndose en gran medida la resistencia del objeto que se mueva a través de él. Este concepto nació a principios del siglo XVII con la invención del sistema de vacío, aplicándose posteriormente como sistema de medio de transporte, desarrollado por George Medhurst en 1844. El denominado “ferrocarril atmosférico” aprovechaba una bomba de aire para valerse del gradiente de presión como propulsión: la presión de aire se transmitía mediante una tubería capaz de mover el vehículo como si fuera un pistón, haciendo así que este no tuviera que llevar una fuente de energía.

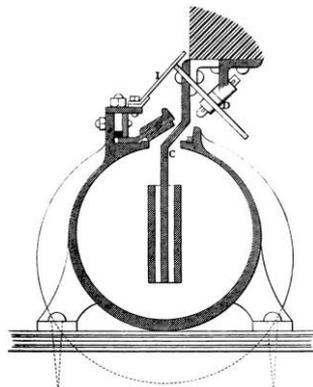


Figura 1. Sistema de impulso del ferrocarril atmosférico. Fuente: trainhistory.net

La primera versión del ferrocarril atmosférico se construyó en Londres a mediados del siglo XIX, expandiéndose la idea a otras ciudades como Dublín, Londres y París. Pero esta tecnología cayó en el olvido con la aparición de las locomotoras de vapor, ya que estas eran más potentes.

Aun así, siguieron construyéndose algunos sistemas en otras ciudades como, por ejemplo, en Manhattan en 1870, antecesor del metro de Nueva York, a finales del siglo XIX, donde solamente se usaba en las grandes urbes como medio para transportar paquetes en bancos, hospitales, oficinas postales, etc., sistema que denominaron “tubo neumático” o “tubo de Lamson”.

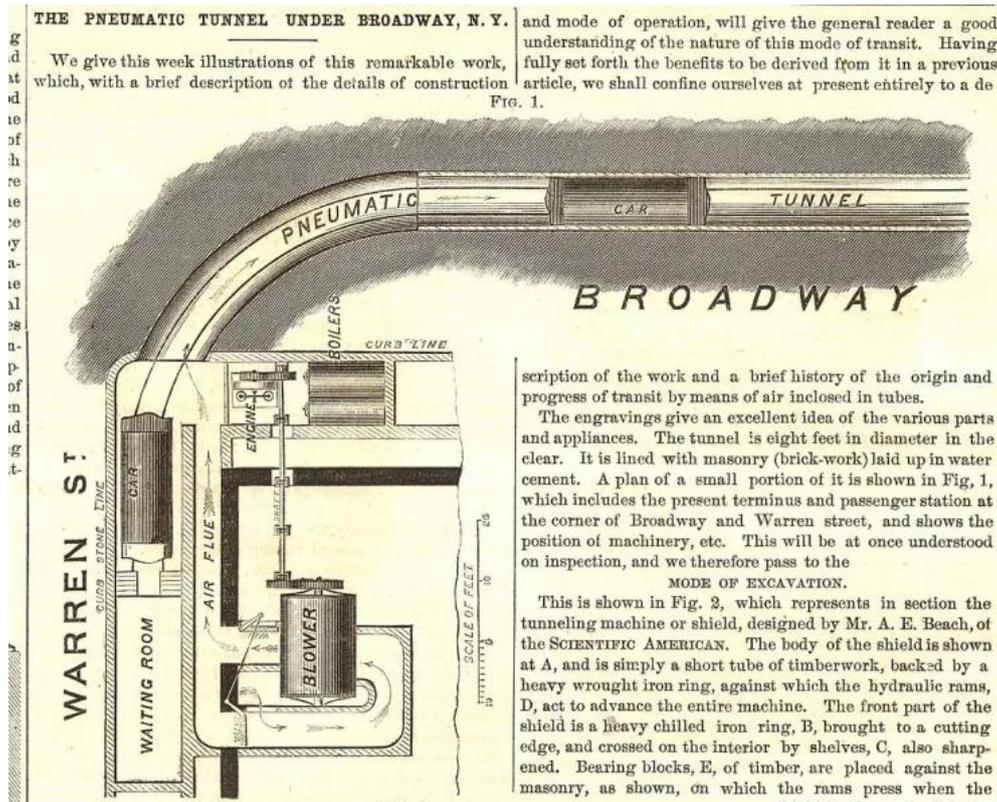


Figura 2. Prototipo de tubo neumático del metro de Nueva York. Fuente: scientificamerican.com

Desde entonces han sido muchos los que han proyectado/ideado algún medio de transporte parecido al hyperloop como la línea Boston-Nueva York diseñada por Robert Goddard en 1910, con un tiempo de trayecto de 12 minutos, posteriormente estudiada en los años 90 por el Instituto tecnológico de Massachussets con una estimación de 45 minutos. O más reciente, el sistema neumático y magnético desarrollado por la startup ET3 de vagones similares a vehículos que viajarían a través de tubos en 2010.

La idea del transporte por vacío o el hyperloop ha sido un tema recurrente como sistema de transporte futurista, como se puede ver en obras como *March of intellect* (1820) de William Health, la novela de Julio Verne *Paris en el siglo XX* (1863, 1994), la historia *Double Star* (1956) de Robert Heinlein donde se hablaban de "vacutubos", o en la serie de Matt Groening *Futurama* (1999) donde las personas se transportan por la ciudad por tubos mediante variaciones de presión.



Figura 3. *March of intellect* (1820), de William Heath. Fuente: Wikimedia commons

Pero en 2012 aparece “de nuevo” el concepto del transporte en vacío gracias a Elon Musk quien propone la idea en televisión y la bautiza como *Hyperloop*. Tras el anuncio, Musk publica un Whitepaper o publicación científica abierta donde explica su idea de hyperloop, donde cada vagón podría mover 28 personas por los tubos mediante la levitación por cojinetes de aire o repulsión de superficies, diferenciándose de los trenes chinos y japoneses. Esta publicación unida al concurso universitario propuesto por Musk con su empresa SpaceX, animó a empresas del sector al desarrollo de este nuevo sistema, así como universidades y centros de todo el mundo a participar en nuevas ideas para el desarrollo de esta tecnología. De esto nacieron empresas como: Virgin Hyperloop One, Hyperloop Transportation Technologies (Hyperloop TT), Arrivo, Hardt Hyperloop, Zeleros, TransPod, DGW Hyperloop y The Boring Company del propio Musk.

2.2. Hyperloop frente a otros modos de transporte

Aunque el Hyperloop es un concepto que está en desarrollo, ya se conocen algunas ideas principales de su diseño que lo hacen superior en algunos aspectos a los modos de transporte actualmente en uso.

En este apartado se pretende analizar algunos de los aspectos conocidos de dicha tecnología, comparándolos con los principales medios de transporte de larga distancia. Esta investigación pretende proporcionar una foto actual con matices del futuro cercano sobre aspectos como los servicios de pasajeros y de mercancías, costes de las infraestructuras, y temas relacionados con el medio ambiente y la necesidad de actuaciones político-sociales.

2.2.1. Hyperloop como servicio de Pasajeros

La comparación en este aspecto con otros modos de transporte se centra en las características del servicio como son: tiempo de viaje, frecuencia, comodidad y fiabilidad; y en las características de la operatividad que son: consumo de energía, capacidad e interoperabilidad del sistema.

2.2.1.1. Tiempo de viaje

Se estima que el hyperloop tendrá una velocidad entre los 1000 y los 1200 km/h para distancias entre 500 y 800 km. Esta velocidad se verá mitigada por la necesidad de una aceleración y desaceleración gradual al principio y al final del viaje. El Whitepaper de Elon Musk indica que para un trayecto de Los Ángeles a San Francisco (alrededor de 600 km) el tiempo de recorrido será de unos 35 minutos (Elon Musk, 2013), y en el proyecto de HORIZON de la Unión Europea se expone que el tiempo de recorrido entre París y Berlín (alrededor de 1000 km) será de 1 hora (HORIZON 2021).

Sin embargo, no existirían el tiempo de rodaje propio de los trayectos en avión, pudiendo existir el tiempo de paradas intermedias, en el caso que las hubiera, o un tiempo de estacionamiento como se hace en los viajes aéreos, que incluiría un tiempo de registro debido a que la novedad del transporte podría atraer a posibles acciones terroristas, además del registro fronterizo y posiblemente de aduanas (en el caso de hablar de conexiones entre países extracomunitarios). Otro aspecto a señalar sería el tiempo de embarque del equipaje: posiblemente en este caso existiría una incertidumbre, ya que podría materializarse como en el transporte por ferrocarril, donde el pasajero embarca junto su equipaje o, en cambio, podría llevarse a cabo al modo del transporte aéreo, donde el equipaje puede ser facturado y embarca por otra línea paralela a la línea de embarque de pasajeros, con lo cual el tiempo de trayecto aumentaría con respecto al primero.



Figura 4. Comparación de tiempos de recorrido para el trayecto París-Berlín respecto al medio de transporte utilizado. Horizon (2021)

	Hyperloop	Aire	AVE
Velocidad media (km/h)	1000 – 1200 km/h 800 – 1000 km/h (con 1 o 2 paradas intermedias)	Boeing 737-800: 830 km/h Airbus A350: 900 km/h	250 – 230 km/h
Tiempos de viaje	SF-LA (600 km): 35min / 1h / 1h20min París-Berlín (1000 km): 1h / 1h20min / 1h40min Tánger-Madrid (600 km): 45min / 1h10min / 1h30min	SF-LA (600 km): 1h35min París-Berlín (1000 km): 1h45min Tánger-Madrid (600 km): 1h20min	Madrid-Barcelona (500 km): 2h30min Sevilla-Barcelona (1000 km): 5h30min Paris-Barcelona (830 km): 6h45min
Tiempo Acceso/Salida	Bajo en estaciones en centro ciudad Alto en estaciones fuera de ciudad	Generalmente alto	Bajo por estaciones en centro ciudad
Tiempo embarque/desembarque	Alto-Medio/ Alto-Bajo (Incertidumbre)	Alto/Alto	Medio/Bajo

Tabla 1. Comparación tiempos de viaje. Hyperloop frente a otros medios de transporte.

2.2.1.2. Frecuencia

En el artículo Structure of Hyperloop Systems with Intermediate Station de E. E. Dudnikov se pone de manifiesto un tiempo de aceleración para alcanzar 1220 km/h de 435 segundos (7.25 min) y un tiempo de parada de 616 segundos (10.27 min). Por ejemplo, para el trayecto de San Francisco a Los Ángeles, el trayecto se realizaría en 35 minutos, de los cuales 17.52 min serían tiempos de aceleración y deceleración, es decir la mitad del tiempo del trayecto. Evidentemente, si en el trayecto es necesario hacer paradas intermedias, estos tiempos se multiplicarán por cada parada. Las paradas deben ser optimizadas para poder aprovechar al máximo la frecuencia del hyperloop, evitando reducciones de velocidades o solapes de tiempos de aceleración y parada.

La frecuencia dependerá del número de tubos por trayecto y sentido, a mayor número de tubos, más cantidad de viajes posibles por trayecto. En el caso de paradas en estaciones intermedias, será necesario la implementación de líneas de frenado y de aceleración, para cada uno de los sentidos (o tubos de cada sentido), como salidas y entradas del tubo principal del trayecto (o tubos principales del trayecto).

Viendo la posible alta frecuencia del hyperloop, uno de los servicios que se podrían aplicar sería el utilizado para el transporte aéreo de venta de billetes anticipados. Para itinerarios con tiempos de trayecto cercanos a la media hora, cabe la posibilidad de implementar un servicio sin cita previa, de tal forma que el recorrido se realiza cuando un número suficiente de usuarios llega al vehículo, sin horarios.

	Hyperloop	Aire	AVE
Frecuencia	3 – 6 viajes/hora 1 cada 10 – 15 min	SF-LA: 3 viajes/hora París-Berlín: 6 viajes/día Tánger-Madrid: 3 viajes/día	Madrid-Barcelona: 6 viajes/día Sevilla-Barcelona: 2 viajes/día Paris-Barcelona: 1 viaje/día

Tabla 2. Comparación frecuencia de trayectos. Hyperloop frente a otros medios de transporte.

2.2.1.3. Comodidad

Una de las posibles preocupaciones del hyperloop es la fuerza g que podría producirse en los usuarios debido a la alta aceleración repentina debida a las altas velocidades de la cápsula por el paso en curvas y valles. Una métrica común que se comenta en diferentes documentos es la de tomar como valor máximo de comodidad el valor 0.5g. Esto haría que se tuvieran que reducir velocidades en algunos tramos y/o tomar desniveles extremadamente suaves y giros muy amplios. Si los radios de curvatura de un tren de alta velocidad pueden llegar a los 7 km, en Hyperloop no se espera que sean menores del doble.

Otro aspecto a estudiar es la del posible ruido interno en la cápsula debido a las turbinas de impulso (en función de las características del vehículo/empresa).

	Hyperloop	Aire	AVE
Comodidad	Menor que 0.5g	Despegue y aterrizaje: 0.25-0.40g	Frenado emergencia: 0.1g

Tabla 3. Comparación comodidad del usuario. Hyperloop frente a otros medios de transporte.

2.2.1.4. Fiabilidad

Las características de la infraestructura por dónde va la cápsula (hermético y elevado) hace que tenga una elevada resistencia a las condiciones climáticas a diferencia de los aviones (caso de la erupción del volcán de Islandia Eyjafjallajökull que paró el tráfico aéreo del norte y centro de Europa en abril del 2010, cancelando más de 20000 vuelos) y el transporte por ferrocarril (caso de la borrasca Filomena de enero 2021 que paró todo tipo de transporte por ferrocarril y carretera en el interior de la península, e incluso redujo drásticamente la actividad del aeropuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas).

	Hyperloop	Aire	AVE
Fiabilidad	Muy alto Protegido a lluvia y nieve	Medio Afectado por eventos meteorológicos	Medio Afectado por eventos meteorológicos

Tabla 4. Comparación fiabilidad. Hyperloop frente a otros medios de transporte.

2.2.1.5. Capacidad

El Hyperloop Alpha de Elon Musk define una capacidad de 28 personas. Teniendo en cuenta la frecuencia definida anteriormente de 10 – 15 minutos, se estima que cada hora transportaría un total de 112 – 140 pasajeros por hora que es menor que alguno de los medios de transporte con los que se compara. Una de las posibles mejoras sería la de transportar en tramos con mayor demanda un mayor número de vehículos (idea que se extiende al pensamiento de varias empresas como Zeleros, Virgin Hyperloop One, etc.) o incluso la construcción de un mayor número de tubos, aumentándose así la capacidad. En todo caso, tampoco se descarta la construcción de cápsulas con un mayor número de pasajeros.

	Hyperloop	Aire	AVE
Capacidad vehículo	28 plazas por vehículo Posible aumento por nº de vehículos y/o nº de tubos	Boeing 737-800: 189 plazas Airbus A350: 348 pasajeros	Serie 102/112: 334 plazas
Capacidad por hora	1 veh: 112 – 140 p/h 3 veh: 336 – 420 p/h 5 veh: 560 – 600 p/h	SF-LA: 400 pasajeros/hora	-
Capacidad por año	1 veh: 900 k p/año 3 veh: 2.5 M p/año 5 veh: 3.5 M p/año	SF-LA: 2.5 M pasajeros (puente aéreo cada 20 min 6:00-23:00)	Madrid-Barcelona: 4,11 M pasajeros (2017)

Tabla 5. Comparación capacidad. Hyperloop frente a otros medios de transporte.

2.2.1.6. Interoperabilidad

Uno de los inconvenientes del hyperloop es la introducción de las infraestructuras de carga y descarga en las ciudades, por lo que la interoperabilidad que ejercen otros medios de transportes como la alta velocidad con el ferrocarril convencional (cercanías o metro) sería complicada. Todo dependerá de la integración de la infraestructura del hyperloop en las ciudades. Esta vendría dada por la administración y el balance de beneficios que daría a las ciudades.

Una de las opciones que propone Elon Musk para el futuro con la evolución del sistema Loop, es la de tunelizar el hyperloop. Esto hará que la integridad de la infraestructura en los centros de las ciudades sea relativamente más fácil (con las complicaciones de la construcción tanto de los túneles como de la estación).

2.2.2. Hyperloop como servicio de carga

Aunque siempre se habla sobre el transporte de pasajeros, otro uso de gran interés sería el transporte de mercancías. Este cambio de enfoque sería menos arriesgado para probar la tecnología y podría dar pie a las primeras líneas de hyperloop.

La carga que podría llevar el hyperloop estará limitada por el tamaño y el peso. Según los estudios que se han realizado anteriormente, este medio podría ser capaz de albergar como carga un contenedor estándar de 20 o 40 pies (tubo de 4 metros de diámetro frente a un contenedor de dimensiones 2.29x2.34 m²) a falta de regular el tonelaje de carga.

2.2.2.1. Transporte aéreo

El mercado del transporte mediante el aire sería la principal competencia, aunque existirían algunas diferencias.

El servicio aéreo proporciona tiempos de entrega rápidos para distancias grandes y es utilizado para transportar cargas urgentes, de alto valor o perecederas. Su rapidez hace que prácticamente todas las empresas de mensajería (FedEX, UPS, etc.) utilicen este medio de transporte, motivadas por el comercio online y su necesidad de entregas al día siguiente o en varios días.

Para que el hyperloop pueda competir debería de realizar trayectos entre dos puntos donde el comercio sea constante y cuyas características sean: cargas urgentes, de alto valor y/o perecederas. La modalidad ideal para el hyperloop sería una red con dos hubs, donde la mercancía llegaría al hub mediante otro medio de transporte (puerto, aeropuerto, camión, ferrocarril) para ser transportado a larga distancias y en poco tiempo en el hyperloop. Este sistema competiría con la red hub-and-spoke del transporte aéreo, que, aunque sea más competitiva en cuanto a los diferentes orígenes y destinos múltiples en menor tiempo, cabría comparar el tonelaje de la carga que podría ser mayor en el hyperloop.

En datos generales y bajo la falta de un estudio detallado, el transporte aéreo sería una mejor opción frente a las cargas que actualmente se transportan. Este matiz hace que en el caso de que se compare con mayores cargas, ganaría ventajas el hyperloop.

2.2.2.2. Transporte por carretera

Como pasa con el resto de los medios, es difícil que el hyperloop quitara cuota de mercado al transporte por carretera. El transporte por hyperloop necesitaría de servicio en el origen y un servicio en el destino final, descarga y carga en camión.

La única posibilidad en la que tendría ventajas el hyperloop sería a distancias muy elevadas y para productos de cierta importancia (materias primas perecederas, cargas urgentes, etc.) o para transportes habituales de largas distancias.

2.2.2.3. Transporte ferroviario

Las características de las cargas que transporta el ferrocarril (granel, materias primas sin procesar, minerales, etc.) que en general no es sensible al tiempo, hace que el hyperloop no tenga ventajas frente al ferrocarril, siguiendo el debate del uso de la alta velocidad (AVE) para el transporte de mercancías, cuyo uso eventual ha sido el del servicio postal compartiendo el transporte de pasajeros.

2.2.2.4. Transporte marítimo

La existencia del transporte por el aire (caro pero rápido) y el transporte por el agua (barato pero lento) hace que el hyperloop gane ventajas como medio intermedio.

Algunas empresas como Virgin Hyperloop One proponen la construcción de tubos bajo el agua; y la empresa Zeleros propone la utilización del hyperloop como medio de descarga y transporte entre el puerto y el centro de clasificación tierra adentro. Esta última opción haría que, como los terrenos tierras adentro son más baratos que los terrenos cercanos al puerto, no se necesitara espacio de almacenaje en puertos, aumentando las instalaciones portuarias y por lo tanto la productividad del puerto.



Figura 5. Prototipo de cápsula de carga del hyperloop. Fuente: HHLA (2018)

2.2.3. Coste del sistema

El Whitepaper de Elon Musk “Hyperloop Alpha” estimaba un coste de 6 billones de dólares (casi 5 mil millones de euros) para el transporte de pasajeros entre las ciudades de Los Ángeles y San Francisco, unos 17 M\$/mi (9 M€/km). Hyperloop One en una de sus presentaciones indicó un coste de 25-27 M\$/mi (12-14 M€/km) para un hyperloop elevado por tierra, aunque algunos documentos promocionales para inversores de la misma empresa estimaron un coste de la línea de entre 84 y 121 M\$/mi (48-69 M€/km) (Alex Konrad 2016). En el artículo “SpaceX Hyperloop: a future technology disruption of the transportation system?” se habla sobre el coste de la infraestructura, estimándose un coste de construcción aproximado de entre 30 M€/km y 75 M€/km (Harris y Wonglimpiyarat 2021).

En comparación con el coste medio de la red actual de AVE de unos 18 millones de euros por kilómetro, estas estimaciones parecen indicar que el coste de las líneas de hyperloop será de dos a cuatro veces superior al del AVE. Cabe destacar que, como se comenta en el artículo anterior, el coste podría reducirse si el sistema funcionase completamente con energía solar, haciendo que la reducción de los costes operativos reduzca las inversiones en infraestructura.

Respecto al transporte aéreo, el aire sería el medio con mayores ventajas porque fuera de las instalaciones del aeropuerto no se necesita pagar ningún derecho de paso, siendo de destacar la expansión de los aeropuertos, que sí supondría un coste elevado que se compensarían con los aumentos de capacidad, flexibilidad y destinos.

Coste de infraestructura	
AVE	Media: 18 M€/km
	Línea Madrid-Valladolid: 24.5 M€/km
	Línea Córdoba-Málaga: 17.4 M€/km
	Línea Madrid- Zaragoza-Barcelona-Francia: 15.5 M€/km
AIRE	Renovación pista 14L-32R Aeropuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas: 10.8 M€
	Segunda pista Aeropuerto de Málaga: 624 M€
	Tercera terminal Barcelona-El Prat: 1.2 mil M€
	Aeropuerto Castellón: 150 M€ Aeropuerto de Ciudad Real: 450 M€
HYPERLOOP	(Hyperloop Alpha) Los Ángeles-San Francisco: 9 M€/km
	(Hyperloop One) Hyperloop elevado por tierra: 12-14 M€/km
	(Hyperloop One) Documento promocional: 48-69 M€/km
	Estimación artículo Wesley L. et al: 30-75 M€/km

Tabla 6. Comparación de costes en infraestructuras por modo de transporte

2.2.4. Política y Medio Ambiente

Aplicando una tarifa baja de 20 euros por pasajero, con un vehículo que transporta 28 personas a 1200 kilómetros por hora (Elon Musk, 2013), el hyperloop no podría cubrir el coste de la infraestructura. Por lo que podría ser cofinanciado por la administración pública. Esto dependerá de la consideración como interés público, al mismo modo que se hizo con Adif o Aena.

La instalación del hyperloop lo convertiría en una clara alternativa al avión y al tren, dejándose el primer modo para vuelos internacionales a largas distancias y el segundo para viajes locales, ahorrando energía y reduciendo la contaminación en las ciudades.

La mayor cuestión respecto al impacto ambiental son los efectos en las emisiones de dióxido de carbono, el efecto de la infraestructura sobre los ecosistemas y la huella ecológica de los materiales utilizados para su construcción, además de la contaminación acústica y la reconversión de los tubos y túneles al final de su vida útil.

El último informe del grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático (IPCC) advierte, en su escenario más optimista, de un cambio relativamente moderado al alza de la temperatura del planeta de 2 °C, aunque otros estudios predicen que el globo se calentará entre 2 y 6 °C en este siglo. Según un informe publicado por la EASA (European Union Aviation Safety Agency) y la Agencia Europea del Medio Ambiente exponen que el aumento de las emisiones de CO₂ ha sido entre los años 1990 y 2014 del 80%, previéndose que crezca un 45% entre 2014 y 2035. Estos datos hacen que los objetivos pactados en el Acuerdo de París parezcan difíciles de alcanzar.

Según Virgin Hyperloop One si una parte significativa de los vuelos de corto alcance son reemplazados por sistemas de hyperloop, la huella de carbono correspondiente se puede reducir a menos de la mitad: los vuelos a escala mundial en 2017 produjeron 946 millones de toneladas de CO₂ que se reducirían en un 58% si todos los vuelos de pasajeros entre 500 y 1500 kilómetros fueran sustituidos por trayectos en hyperloop.



Figura 6. Ejemplo de impacto paisajístico provocado por el Hyperloop. Fuente: HTT

Uno de los aspectos que se repiten en los diseños para la reducción del impacto medio ambiental es la utilización de tubos cubiertos por revestimientos de paneles solares con la posible inclusión de turbinas eólicas que producirían la energía necesaria para hacer funcionar el sistema, proporcionando un suministro eléctrico ininterrumpido.

La situación elevada de los tubos hace que el transporte no represente un gran problema para el medio ambiente o la vida silvestre. Una vía cerrada (los tubos) es más segura para los animales en comparación con los cruces de carreteras. Además, desde el ángulo de la contaminación acústica, el transporte será bastante silencioso. En cambio, el análisis del impacto en los lugares donde se tengan que realizar túneles será más concreto en función de la localización donde se realice, teniendo en consideración aspectos como los mecanismos de construcción y sus posibles afecciones a acuíferos.

2.2.5. Hyperloop como alternativa a otros medios de transporte

El hyperloop es una posible alternativa como medio de transporte de pasajeros, debido a aspectos como el tiempo de viaje, la frecuencia, la capacidad y la fiabilidad. Los tiempos de viaje serán mucho menores que los del AVE, comparándose con los tiempos de viaje del avión, teniendo la principal diferencia por aspectos como el tiempo de rodaje los tiempos de embarque y desembarque. Pasa igual con la frecuencia de viajes del hyperloop, siendo de 3 a 6 viajes por hora, aunque este aspecto tiene una fuerte dependencia con la infraestructura, ya que podría fluctuar en función del número de tubos por sentido o el número de paradas intermedias. Esta dependencia también se hace presente en la capacidad, ya que en un principio con una sola cápsula se pueden transportar un total de 28 pasajeros (a priori), pero este número puede aumentar en función del número de vehículos o de pasajeros por vehículo. Por ejemplo, para un aumento de 3 vehículos por trayecto, la capacidad por año sería parecida a la del avión. La fiabilidad es uno de los puntos fuertes de hyperloop, ya que no tiene dependencia climática debido a que la cápsula viaja por un tubo hermético y este se encuentra elevado en todo su recorrido. También caben destacar otros aspectos como la comodidad, que preocupa por las altas aceleraciones que pueda sufrir el pasajero, siendo un aspecto fundamental en el diseño de la línea para la descripción de desniveles o giros (desniveles extremadamente suaves y giros muy amplios); o como la interoperabilidad, ya que la introducción de los tubos en el interior de las ciudades sería un aspecto a debatir por las administraciones.

El hyperloop destacaría como medio de carga intermedio entre el aire (caro pero rápido) y el transporte por el agua (barato pero lento). Su principal competencia sería el transporte aéreo debido a las entregas rápidas o urgentes de mercancías, y a su alta capacidad de transportar cargas a cualquier otro punto del globo. Para el mismo tiempo de trayecto, el hyperloop consigue mayor capacidad de carga, por lo que este medio sería el óptimo para casos donde existieran dos hubs con transporte constante de gran cantidad de mercancías y donde el tiempo de entrega sea primordial. Es difícil que quitara carga de transporte para otros medios como por carretera o por ferrocarril. Debido a las características de carga-descarga origen-destino del transporte por carretera y a la no importancia del tiempo de entrega de las cargas del ferrocarril, hacen que solamente sea competitivo para altas cargas donde el tiempo de entrega sea importante y para transportes habituales a largas distancias. Cabe destacar su clara competencia frente al transporte marítimo, aunque dependerá de los hubs de transporte debido a la posibilidad de construcción de infraestructura entre ambos.

Al fin y al cabo, la proyección del hyperloop en las ciudades será una elección de la administración por aspectos como el coste de la infraestructura o la contaminación del medio. Algunos estudios de las empresas que compiten en la carrera del hyperloop indican que el coste su construcción será mayor que el coste de las líneas de ferrocarril, comparándose con los costes de la expansiones de los aeropuertos o puertos marítimos, aunque la rentabilidad que el uso de energías limpias como la energía solar pueden hacer que los proyectos sean altamente rentables. Otro aspecto a tener en cuenta por la administración sería la reducción de la huella de carbono en los trayectos, ya que el hyperloop reduciría drásticamente el impacto producido por las emisiones de CO2 provocadas por trayectos como los vuelos de corto alcance.

Como conclusión, el hyperloop sería una alternativa intermedia entre el transporte aéreo y marítimo, donde uno de los hándicap principales será la posibilidad de construcción de la infraestructura entre dos hubs. Este nuevo medio destacaría por el rápido transporte tanto de mercancías como de pasajeros entre dos puntos alejados una gran distancia y revolucionaría tanto la idea de los viajes de ocio o los trayectos a ciudades o centros de trabajo; además de que ayudarían a conseguir los objetivos pactados de huella de carbono dictados en el Acuerdo de París.

2.3. Avances en la carrera por el Hyperloop

Aunque todos los proyectos relacionados con las empresas anteriores rozan el secreto, poco a poco se van conociendo algunos avances.

Virgin Hyperloop ha realizado la primera prueba del sistema con pasajeros, donde dos empleados de la compañía han recorrido 500 metros en 15 segundos, alcanzando los 172 kilómetros por hora. Esta primera prueba se realizó con un vehículo prototipo y a una velocidad moderada con la finalidad de demostrar que los pasajeros pueden viajar con seguridad en la cápsula. La cápsula real tendrá capacidad para hasta 28 pasajeros con asientos ergonómicos y pantallas con captura de movimiento. Esto último es debido a la ausencia de ventanas, por lo que se implementarán pantallas que permitan una perspectiva realista incluso cuando el pasajero se mueva.

DP World en alianza con Virgin Hyperloop plantean abrir en Dubái el primer puerto con transporte por hyperloop, que, gracias a la reducción de tiempos en el transporte y el aumento de capacidad de inventarios, se estima un ahorro del 25% en el coste de almacenes y una mayor facilidad para implantar modelos just-in-time.

Mientras tanto TransPod opta por un diseño de cabina con ventanas y tubos transparentes, lo que bien podría quedar simplemente en un diseño.

Hyperloop TT es la única empresa de las nombradas en poseer una cápsula a escala real, además de tener proyectos en desarrollo en EE. UU., Abu Dabi, Francia y Alemania.

Por otra parte, Zeleros, la start-up española nacida en la UPV, es la empresa con la cápsula de viajeros más galardonada, por su diseño y por la gran cantidad de tecnologías integradas en su cápsula. Se dedica al desarrollo de tecnologías del transporte a altas velocidades mediante el Hyperloop no solamente desarrollando la cápsula sino también los métodos constructivos para los tubos por donde circularán, llamados como Tubelooop, una especie de tubo tricapa enrollado que es montado mediante el inflado de unos globos y que aprovecha varias reacciones químicas entre materiales inyectados para conseguir un tubo rígido final.

Aunque Elon Musk no esté involucrado personalmente en el desarrollo de ningún hyperloop, mediante su empresa The Boring Company se dedica a la construcción de túneles para desarrollar una red de carreteras subterráneas con múltiples niveles con el propósito de aliviar el tráfico en las ciudades. Para ello utiliza el denominado Loop, un sistema de transporte público subterráneo de alta velocidad en el que los pasajeros son transportados en Teslas a 250 kilómetros por hora, vehículos eléctricos y autónomos. The Boring Company asegura que los túneles han sido diseñados teniendo en mente la futura transición hacia el sistema del hyperloop.

El Hyperloop es una tecnología en estudio: vehículos en desarrollo, infraestructura de tubo y estaciones por desarrollar, falta de regulaciones gubernamentales, etc. Pero el continuo desarrollo de prototipos gracias a financiación de gobiernos y agencias gubernamentales están haciendo que se den pasos de gigante y que se puedan sacar conclusiones de un futuro cercano.

Esta tecnología permitirá que ciudades a mil kilómetros de distancia estén conectadas a tan solo media hora. Esto hace que se abran todo tipo de oportunidades laborales, ya que la población ya no tendrá que vivir cerca de donde trabaja, abriendo nuevos estilos de vida. Otro de los aspectos a destacar es que reduciría la presión en las infraestructuras de transporte, problema que actualmente padecen muchas ciudades debido al continuo crecimiento, que además produciría una reducción de la demanda de alojamiento y reducción de los precios, dando nuevas oportunidades inmobiliarias y comerciales tanto en estas ciudades como en ciudades cercanas.

2.4. Infraestructura del Hyperloop

Además de la tecnología que se necesita para desarrollar las cápsulas, los sistemas de presurización y despresurización del interior de los tubos, entre otras tecnologías, otro de los puntos más importantes del medio de transporte del hyperloop es el reto de la infraestructura.

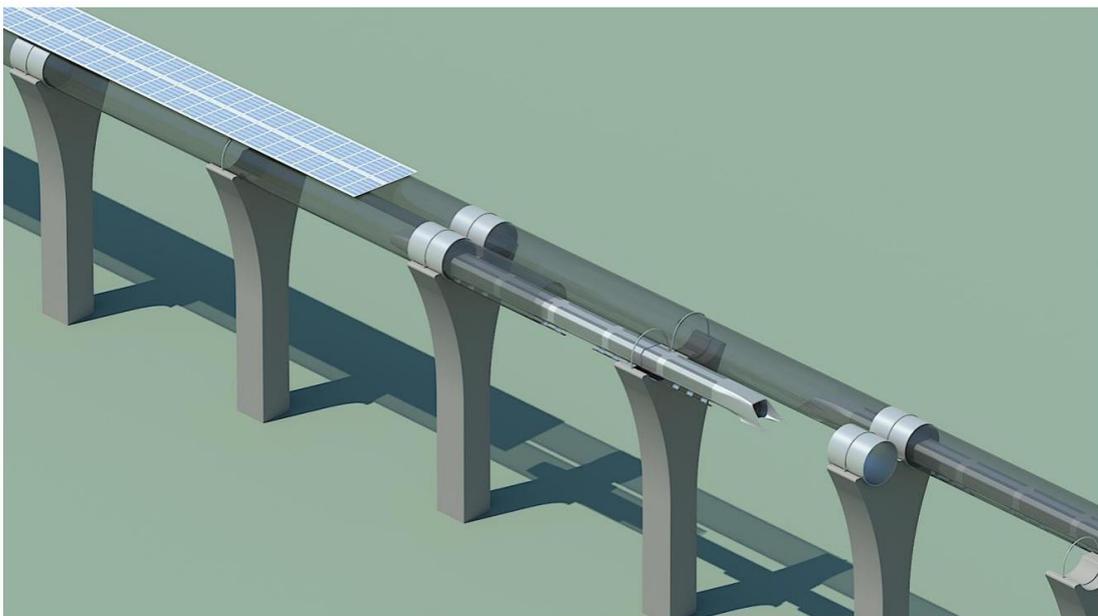


Figura 7. Infraestructura para la cápsula del Hyperloop Alpha. Fuente: Hyperloop Alpha, Elon Musk

En el Whitepaper en el que Elon Musk expuso la idea del Hyperloop Alpha, se definía una infraestructura formada por dos tubos infinitos apoyados sobre pilas de 6 m cada 30 m, cubiertos de placas solares. Los tubos tenían un diámetro de 3.30 m diseñado para dejar aliviar el flujo del aire alrededor de la cápsula, con un espesor de 23 a 25 mm que le proporciona resistencia a la presión, flexión y pandeo. Las conexiones tubo-pilar le permite un desplazamiento longitudinal, aliviando las expansiones térmicas. Mientras las pilas eran de hormigón armado, los tubos serían de acero con la finalidad de que puedan ser soldados con facilidad y que su acabado superficial interior y exterior puedan ser pulidas fácilmente para una mejor superficie de deslizamiento.

A partir de la idea de Elon Musk, otras empresas han ido desarrollando su propia tecnología para el medio del transporte, habiendo mucha competencia entre ellas.

Las imágenes de Virgin Hyperloop One sobre la primera prueba del hyperloop con pasajeros muestran una pista de 500 m en el desierto de Nevada. La infraestructura consta de un tubo soldado apoyado sobre pequeños pilares cada 10 metros aproximadamente. En la imagen también se aprecian detalles como los anillos de arriostamiento que el tubo lleva adosado y la compuerta de despresurización para la introducción de la cápsula en el tubo.



Figura 8. Pista de ensayos en el desierto de Nevada. Fuente: Virgin Hyperloop One

Otra imagen muestra cómo es el interior del tubo, que estará formado por una serie de carriles que guían a la cápsula. Aunque las diferentes propuestas de tecnologías hablan de levitación magnética, aérea o por repulsión de superficies, en los primeros ensayos se están probando la capacidad de poder llegar a los 1000 km/h. Por lo tanto, esta especie de carril puede que no sea parte de la propuesta final.



Figura 9. Interior del tubo de la pista de ensayos. Fuente: Virgin Hyperloop One

Por otra parte, Hyperloop TT tiene construida otra pista de pruebas de 320 m en Toulouse (Francia). Esta pista está formada por tubos cuya construcción es un ensamblado mediante tornillería de 16 módulos de 20 m de longitud y 4 metros de diámetro. Estos tubos están contruidos empleando una mezcla de acero, hormigón y fibra de carbono.



Figura 10. Pista de pruebas de Hyperloop TT en Toulouse. Fuente: HTT

En marzo de 2021, Hyperloop TT presenta la primera válvula de aislamiento a escala real. La válvula tiene una altura de apertura de 5 metros y es capaz de resistir una presión de algo más de 100 kPa (14.7 psi), pudiendo presurizar y despresurizar en un tiempo de 30 segundos.



Figura 11. Válvula de aislamiento del sistema de Hyperloop TT. Fuente: HTT

Transpod, por su parte, está en el desarrollo de su propia pista de ensayos en Droux (Francia). Aunque propone tubos transparentes como diseño final, su pista constará de un tubo de acero de 3 km de 2 m de diámetro apoyado cada 25 m sobre unos pilares de hormigón que lo elevan ligeramente del suelo (1 m). La unión entre los módulos del tubo será mediante una junta de expansión localizada en los apoyos del tubo. En esta misma zona existirá un apoyo metálico que une el tubo con la pila de hormigón.

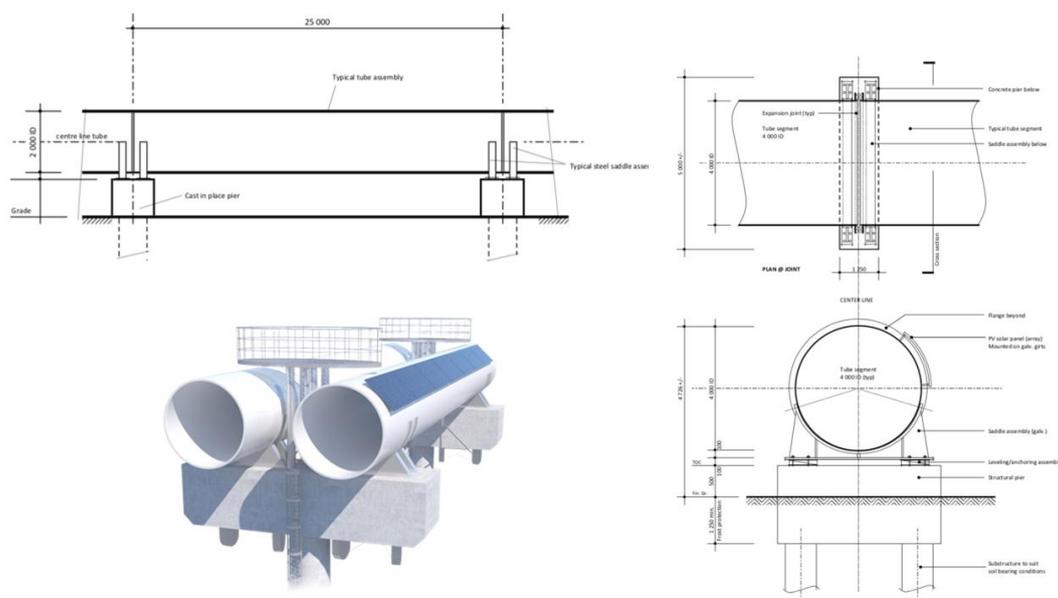


Figura 12. Diseño de la pista de pruebas de Transpod en Droux. Fuente: Transpod

Zeleros junto con la UPV ha propuesto un sistema llamado como Tubelooop que permite acelerar la construcción de rutas del hyperloop reduciendo costes de producción. El sistema consta de tres capas: la exterior y la interior están formadas por un plástico reforzado con fibras o un laminado de fibra de metal, y la tercera capa es una espuma polimérica o a base de cemento. Su construcción se basa en la elaboración conjunta de las capas exteriores, el inflado de un globo que le da la forma para después ser inyectado con espuma para terminar con la inyección de epoxi mediante una bolsa de vacío.

Como se aprecia en la siguiente imagen, las luces serán mucho mayores que las propuestas por las otras compañías comentadas, aunque parece ser una propuesta de diseño conceptual.



Figura 13. Proceso constructivo del módulo del tubo para el modelo propuesto por Zeleros-UPV. Fuente: Zeleros-UPV

Por último, el equipo de la UPV formado por Pedro Museros, Carlos Lázaro, Benjamín Pinazo y Salvador Monleón han estudiado en su artículo “*Key aspects in the analysis and design of Hyperloop infrastructure under static, dynamic and thermal loads*” las diferentes propuestas de dimensionamiento de infraestructuras para el hyperloop. Concretamente se estudian tubos metálicos Duplex EN14462 de espesor constante donde este se soporta por sí solo y trabaja como un tubo continuo apoyado en pilares de hormigón armado equidistantes de 20 a 40 m. Los profesores de la UPV analizan tanto la configuración donde la expansión térmica longitudinal está permitida por juntas de las que Musk denominó “telescópicas”, como otra alternativa donde no se permite la dilatación longitudinal ni transversal del tubo en los apoyos. Este último aspecto hace que la expansión térmica sea impedida y que el diseño del tubo dependa de ello, principalmente el espesor del tubo.

Para ello se realizan análisis sobre los efectos de las acciones térmicas, inestabilidad del tubo como membrana, se evalúan las tensiones provocadas por las acciones aplicadas (explicadas en los siguientes apartados) y se realizan estudios a fatiga y dinámico de diferentes combinaciones geométricas y de acciones.

Para la evaluación de todos estos análisis, los autores realizan un caso de estudio con luces entre pilares de 28 m, un diámetro del tubo de 4 m y un espesor de la membrana del tubo de 25 mm aplicándole al tubo una serie de acciones que se exponen en apartados siguientes.

El artículo concluye con la elección del material S460 para los tubos debido a la independencia de las propiedades de la sección frente a la fuerte repercusión de la temperatura en las tensiones; se establece que para luces menores de 30 m es suficiente con espesores de membrana del tubo de 25 mm (valor mínimo) y que las acciones de viento y de vehículo (con factores de impacto pequeños) no resultan relevantes; la fatiga no es un factor relevante en esta configuración; además, el factor de impacto dinámico aumenta con el número de vanos.

3. ESTUDIO DE VIADUCTOS DE LUCES MEDIAS PARA HYPERLOOP

Como se puede ver, cada una de las empresas que colaboran en el diseño del hyperloop ha tendido a un diseño diferenciado. Unos han optado por un diseño modular metálico de diferentes luces, de 10 m en el caso de Hyperloop One, de 20 m para Hyperloop TT o de 25 m para Transpod, u otros por un diseño modular tricapa de construcción sencilla como Zeleros-UPV. En definitiva, se pretende alcanzar el máximo de luz entre pilares con la posible intención de reducir el número de ellos. Esto hace que el tubo tenga que soportar mayores cargas por sí mismo y que la definición del tubo pueda ser modificada.

Este estudio se centra en cómo la evolución de la luz del vano central hace que la geometría del tubo deba ser modificada para que el propio tubo pueda soportar las acciones que lo solicitan.

3.1. Definición del modelo de barras

Para el modelo en estudio se va a tomar como base el caso práctico que se define en el artículo Museros et al. (2021). En él se define una viaducto de infinitos vanos con luces uniformes de 28 m. La infraestructura consta de un tubo apoyado sobre pilas de hormigón, quedando un modelo de apoyo simple que restringe la expansión térmica. Dado lo lejano que parece a fecha de hoy el posible desarrollo de las juntas de dilatación telescópicas que absorban movimientos de decenas de metros, se opta por trabajar con el citado modelo, donde los desplazamientos axiales del tubo son coaccionados por las pilas.

El tubo está fabricado con acero Duplex EN14462 con un peso específico de 78 kN/m^3 , un coeficiente de expansión térmica $\alpha = 1.3 \cdot 10^{-5} \text{ C}^{-1}$, un módulo de elasticidad de 200 GPa y un límite elástico de 460 MPa . El diámetro interno del tubo será de 4 m con un espesor de lámina de 25 mm.

Las pilas están fabricadas con un hormigón HA-30, con un peso específico de 25 kN/m^3 , un módulo de elasticidad de 33.58 GPa y una resistencia característica a compresión de 30 N/mm^2 . Las pilas constan de una sección rectangular de $3.5 \times 1.5 \text{ m}^2$.

Para el estudio se van a tener en cuenta las acciones de peso propio, cargas muertas, viento, acciones térmicas y el efecto dinámico del paso del vehículo. Las cargas muertas se considerarán como la mitad de las cargas de peso propio. La acción del viento será tenida en cuenta mediante una carga vertical de valor 4.13 kN/m . Como acción térmica se considerarán: $T_u + T_a = 60 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_g^+ = 12.6 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_g^- = 11.7 \text{ }^\circ\text{C}$; con un valor de simultaneidad $\omega_M = 1.0$. El peso del vehículo se considera como $F_k = 100 \text{ kN}$ y se va a tener en cuenta un factor de impacto $\eta = 1$.

El modelo consta de varios tramos de tubo de 28 m de luz apoyados en pilas de 7 m de altura. Los elementos que los conforman estarán divididos en 10 subelementos para mejorar el comportamiento del modelo. Las pilas estarán empotradas en su base, y en la unión tubo-pilar se permitirá el giro en la dirección perpendicular al eje longitudinal del tubo, teniendo un comportamiento de apoyo simple.

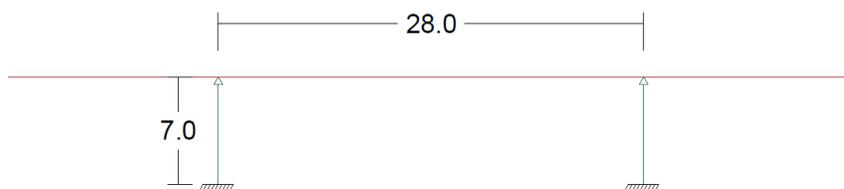


Figura 14. Modelo del caso de estudio del artículo Museros et al. (2021) (m). Fuente: Elaboración propia

3.1.1. Modelo de tramos infinitos

El número de tramos o vanos que se deben tener en cuenta en el modelo dependerá del error que se quiera cometer en factores determinantes como el axil o el momento en apoyos y centros de luz, y la flecha en centro de luz; y del número de vanos en lo que estos valores quieren ser evaluados.

Para ello se ha evaluado cuántos vanos es necesario introducir en el modelo para tener un error relativo menor del 5% con respecto a un modelo que teóricamente represente una estructura de tramos infinitos, centrándose en los valores de los esfuerzos axil y flector en apoyos y centro de luz, en los desplazamientos verticales en centro de vano y los giros en apoyos ($N(0)$, $N(14)$, $M(0)$, $M(14)$, $U3(14)$, $R2(0)$), para tener menores errores en los 7 vanos centrales.

Para estudiar el número de vanos necesarios se han obtenido 15 modelos donde se han ido añadiendo vanos a cada lado para cada salto partiendo de un modelo de 7 vanos centrales exclusivamente. En el último modelo se han añadido un total de 45 vanos a cada lado a parte de los 7 vanos centrales, admitiéndose que el comportamiento de este modelo será cuasi idéntico a una estructura de infinitos vanos.

Además, para poder evaluar el giro del tubo en el apoyo con la pila, se ha añadido en los extremos de cada modelo una rigidez a este desplazamiento basándose en la relación entre el giro y el momento flector.

$$M = k \cdot \theta \rightarrow k_{\theta} = M/\theta$$

Esta evaluación se ha realizado en el modelo con un número infinito de vanos (30+7+30 vanos) con la acción del vehículo con un factor de impacto de $\eta = 1$ aplicada en el centro del vano central. De esta forma el valor de la rigidez al giro que el tubo tiene en los apoyos se evaluará como una rigidez en los extremos de los modelos de valor:

$$k_{\theta} = 14077000 \text{ kN} \cdot \text{m}/\text{rad}$$

En los extremos de cada modelo además se han impedido la expansión en dirección longitudinal del tubo, liberándose el giro perpendicular a este de eje horizontal y el desplazamiento vertical.

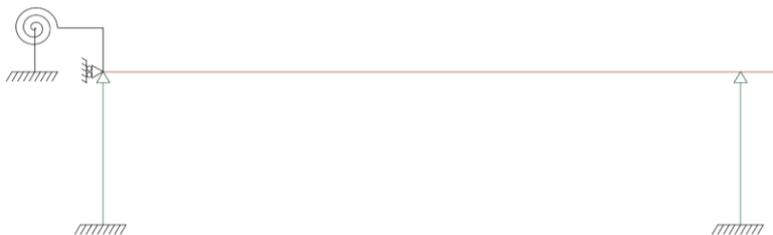


Figura 15. Condiciones de contorno en extremos de modelo. Fuente: Elaboración propia

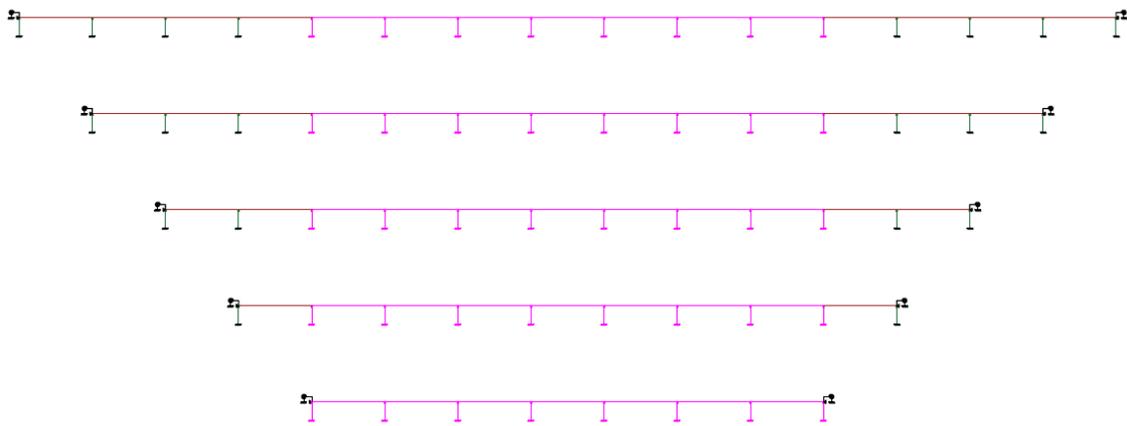


Figura 16. Ejemplos de modelos evaluados en el estudio de número de vanos. Fuente: Elaboración propia

Una vez definidos estos modelos, se ha realizado un análisis comparativo entre los resultados obtenidos en cada modelo para los axiles, flectores, desplazamiento vertical en centro y giro en extremo de vano, en comparación con el valor obtenido para el modelo de tramos infinitos.

Para una mejor interpretación de los resultados expuestos en las siguientes gráficas se van a definir las localizaciones donde se han obtenido los resultados (apoyo y centro de luz) según el siguiente gráfico. Cabe destacar que, al ser modelos simétricos, solamente se van a obtener los valores de la mitad izquierda del modelo.



Figura 17. Leyenda de las localizaciones de datos para la interpretación de gráficos de errores relativos. Fuente: Elaboración propia

VA describe los apoyos del vano y VC los centro de luz. Para poder localizar donde se sitúa el esquema, la localización VC 0 es el centro de luz del vano central del modelo.

Para el caso de los axiles en apoyo y centro de luz y del flector en el caso de la acción del vehículo, los errores son insignificantes, no pudiéndose decir lo mismo de los errores de los flectores para el resto de las acciones.

Para el caso de los giros en los apoyos solamente existirá para los casos de acción del vehículo y del viento, donde el error relativo será insignificante; siendo también nulo la flecha en centro de vano provocada por las acciones de temperatura e insignificante el error relativo de la flecha provocada por la acción del vehículo.

A continuación, se muestran los errores relativos para los flectores provocados por las cargas permanentes (peso propio y cargas muertas), la acción de temperatura con gradiente vertical positivo, la acción de temperatura con gradiente vertical negativo y acción de viento; y las flechas provocada por las cargas permanentes, la acción del vehículo y la acción del viento.

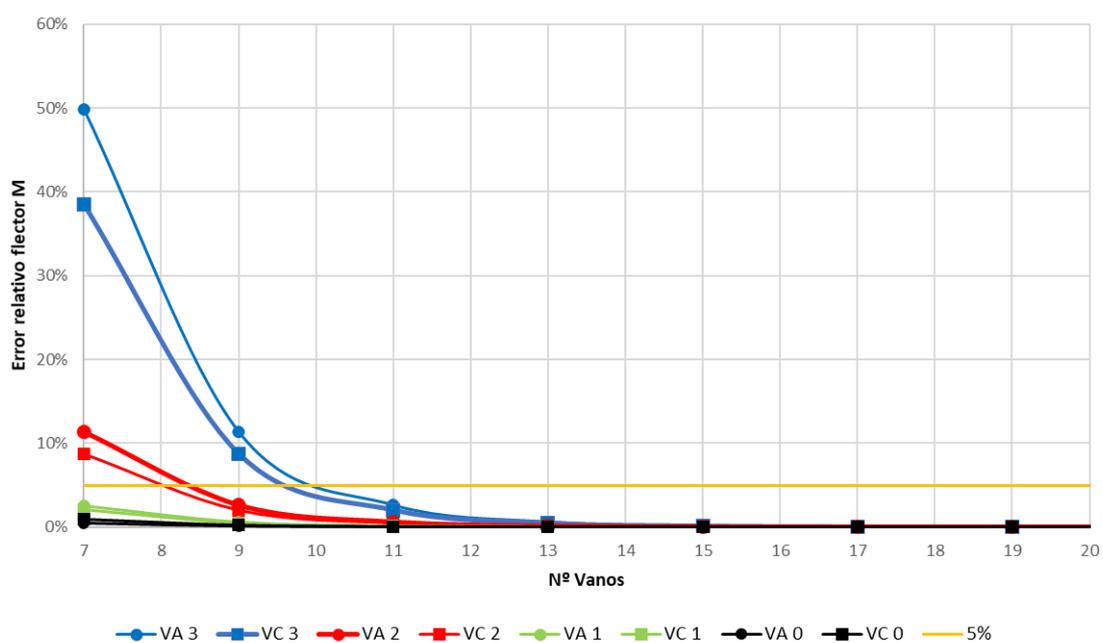


Figura 18. Error relativo del flector M para el caso de acción Permanente. Fuente: Elaboración propia

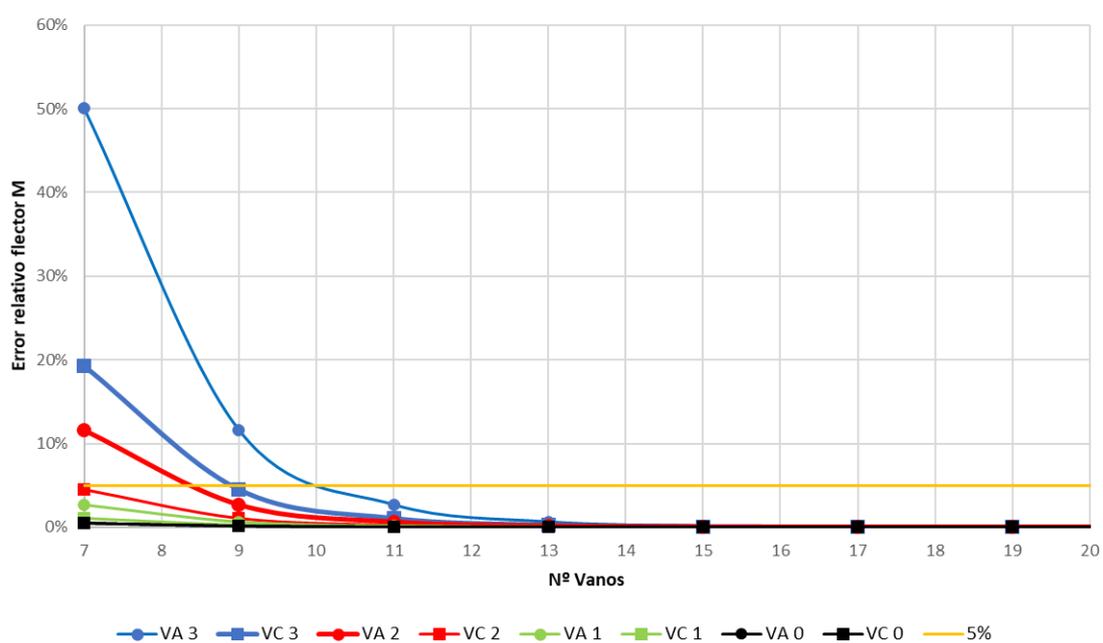


Figura 19. Error relativo del flector M para el caso de acción de Temperatura + Tg^+ . Fuente: Elaboración propia

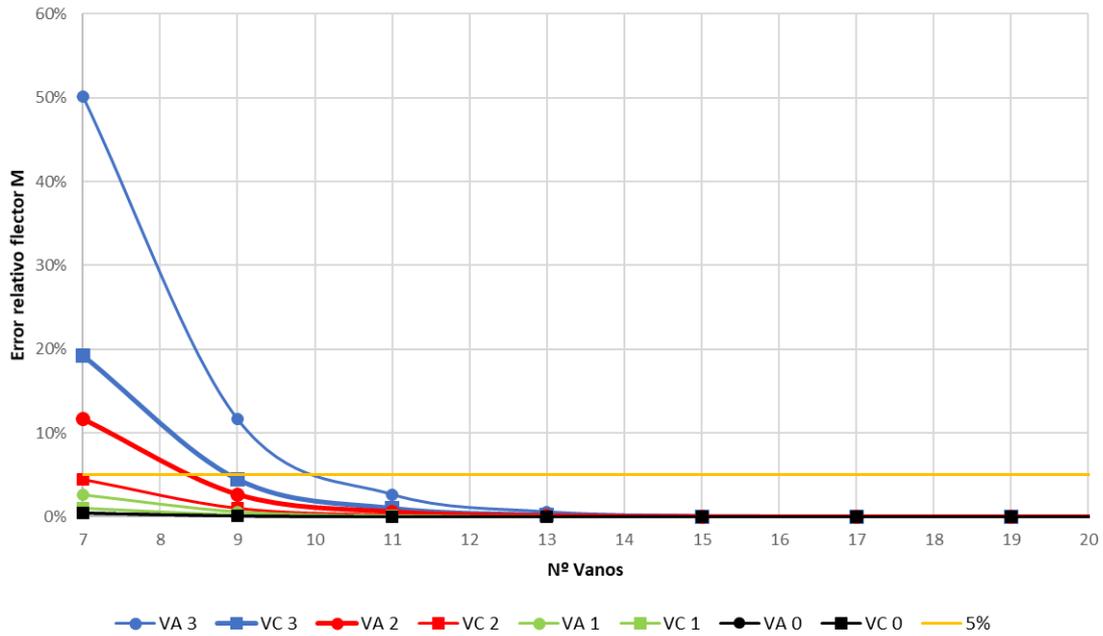


Figura 20. Error relativo del flector M para el caso de acción de Temperatura + Tg.
Fuente: Elaboración propia

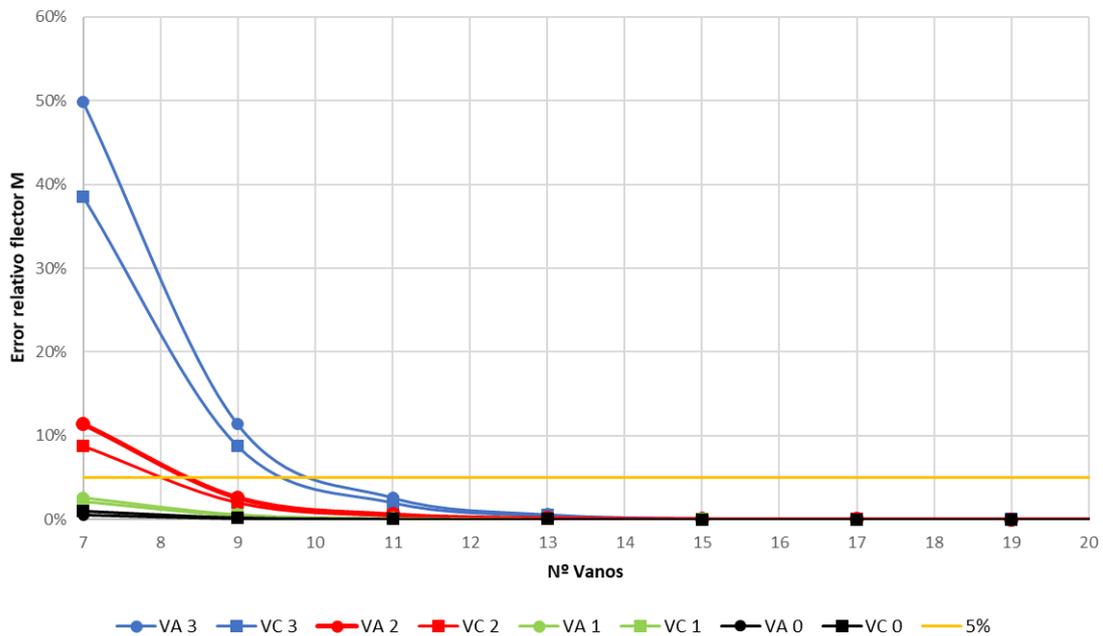


Figura 21. Error relativo del flector M para el caso de acción de Viento. Fuente: Elaboración propia

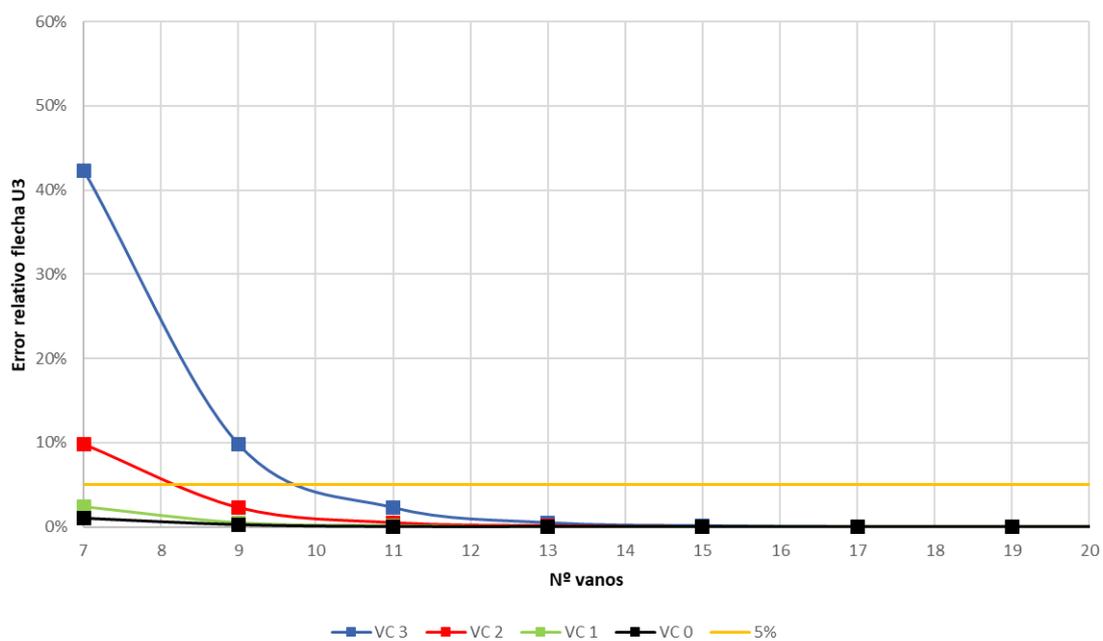


Figura 22. Error relativo de la flecha U3 para el caso de acción de Vehículo. Fuente: Elaboración propia

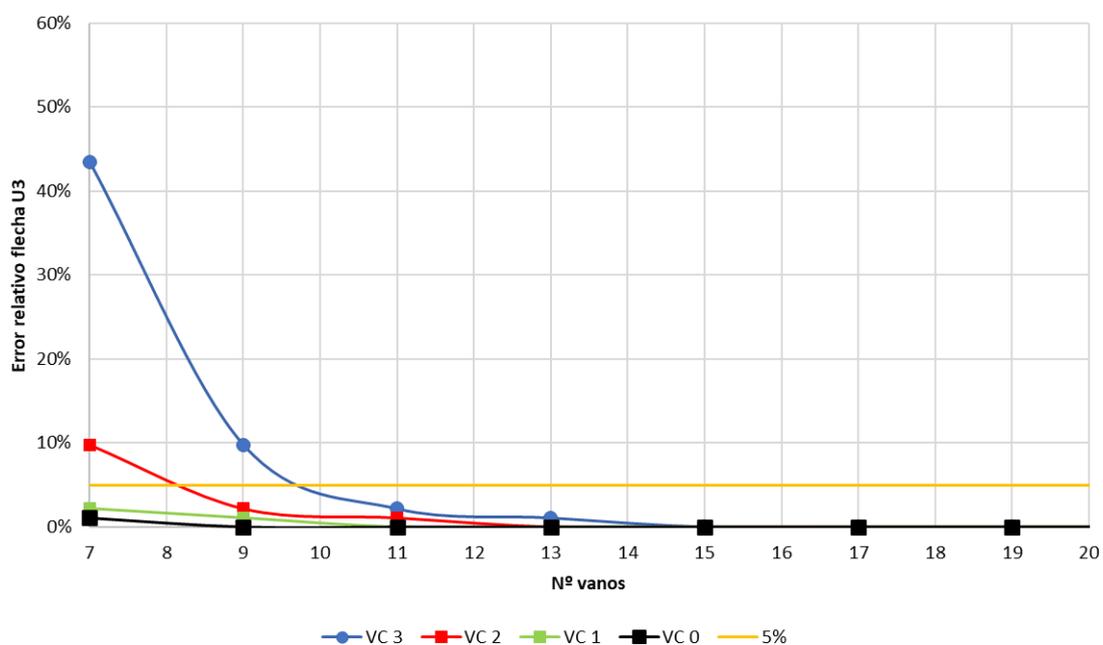


Figura 23. Error relativo de la flecha U3 para el caso de acción de Viento. Fuente: Elaboración propia

Analizando las gráficas anteriores se puede observar que para tener resultados con errores menores al 5% centrándose en los 7 vanos centrales de la estructura se necesitarán al menos un total de 11 vanos (2+7+2) siguiendo esta configuración:



Figura 24. Modelo simplificado de evaluación para viaducto del hyperloop. Luces de vanos de 28 m. Fuente: Elaboración propia

Cabe destacar que si el estudio se centrara en reducir el error relativo en menos vanos centrales se necesitarían menor número de vanos. Por ejemplo, centrándose en los 3 vanos centrales, se necesitarían 7 vanos, mientras para 5 se necesitarían 9.

3.1.2. Verificación del modelo de barras

En este apartado se va a comprobar el modelo descrito en los anteriores apartados comparándose los resultados con los expuestos en el artículo Museros et al. (2021). En él se han obtenido las tensiones de cada una de las acciones descritas para dos localizaciones del tubo: la fibra inferior del tubo en la sección del apoyo y la fibra superior del tubo en la sección de centro luz, para una configuración de tubo de 4 metros de diámetro con 25 mm de espesor y luces entre pilas de 28 m; obteniéndose los siguientes resultados:

Acción	$\sigma_{x,Ek}$ (x=0 m, y=-2.0 m) (MPa)	$\sigma_{x,Ek}$ (x=+14 m, y=+2.0 m) (MPa)
Permanentes	-7.64	-3.82
Vehículo	-0.69	-1.54
Viento	-0.86	-0.43
Temperatura	-171.21	-172.38

Tabla 7. Valores de las tensiones de secciones de apoyo y centro luz del artículo Museros et al. (2021). Fuente: Artículo Museros et al. (2021)

Para el modelo descrito en los anteriores apartados, teniendo en cuenta la simplificación obtenida en el apartado 3.1.1. de 11 vanos, se han obtenido las siguientes tensiones:

Acción	$\sigma_{x,Ek}$ (x=0 m, y=-2.0 m) (MPa)	$\sigma_{x,Ek}$ (x=+14 m, y=+2.0 m) (MPa)
Permanentes	-7.74	-3.87
Vehículo	-0.70	-1.57
Viento	-0.88	-0.44
Temperatura	-171.21	-172.38

Tabla 8. Valores de las tensiones de secciones de apoyo y centro luz del modelo de barras en estudio. Fuente: Elaboración propia

Como se puede apreciar, los valores obtenidos por el modelo en estudio son muy similares a los obtenidos en el artículo, lo cual prueba la validez de dicho modelo.

3.2. Estudio de variación de luces del vano central: ELS y ELU

Una vez verificado el modelo propuesto, en este apartado se va a estudiar el alcance en cuanto a luces máximas que dicha configuración podría resolver. Para ello, se va a evaluar cómo el incremento de longitud del vano central afecta al cumplimiento del estado límite de servicio y de los estados límites últimos de resistencia e inestabilidad.

En este apartado se va a estudiar un modelo parecido al anteriormente definido, pero con un cambio en los tres vanos centrales. Los vanos anteriores y posteriores vendrán con longitudes de 28 m. El primer y tercer vano de los vanos centrales tendrán luces de 56 m, mientras el vano central evolucionará desde los 56 m a los 84 m (entre dos y tres veces la longitud unidad de 28 m). Además, se considera que los 3 vanos centrales tendrán características de viaducto, de tal forma que sus pilas tendrán alturas de 10.5 y 17 m, simulando el paso de la infraestructura por un valle.

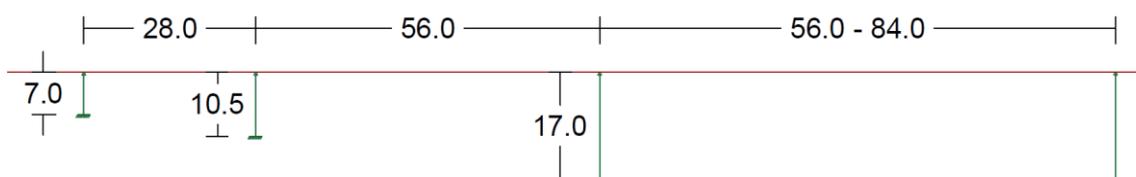


Figura 25. Modelo de estudio de variación de la luz del vano central. Fuente: Elaboración propia

El modelo evaluado está configurado por un tramo central según la descripción de la figura anterior y por un total de 4 tramos de 28 m a cada lado de los vanos centrales.



Figura 26. Modelo simplificado de evaluación para viaducto del hyperloop para luces medias. Ejemplo de vano central de 84 m. Fuente: Elaboración propia

Comparando el modelo simplificado descrito con el modelo de tramos infinitos (con las mismas características del tramo central) se obtiene que los errores que se cometen centrándose en los esfuerzos y desplazamientos que se han comparado en el apartado 3.1.2., serán menores del 3%.

Una vez descrito el modelo, se procede a realizar los estudios del estado límite de servicio y de los estados límite de resistencia y de inestabilidad.

3.2.1. Estado Límite de Servicio

Para evaluar el estado límite de servicio se va a tomar como referencia el criterio que se especifica en el Anejo A2.4.4.3.2. de *Criterios de flecha para comprobar el confort de los pasajeros* del Eurocódigo 0: Bases de diseño estructural (España Ministerio de Fomento y Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR) 2019).

Este criterio evalúa la relación entre la luz del vano en estudio L (m) y la flecha vertical δ (m) provocada por la acción del vehículo, y determina la flecha máxima admisible δ para puentes ferroviarios con tres o más vanos sucesivos simplemente apoyados correspondientes a una aceleración vertical admisible $b_v = 1 \text{ m/s}^2$, en un vehículo que circula a velocidad V (km/h), representada en la figura A2.3.

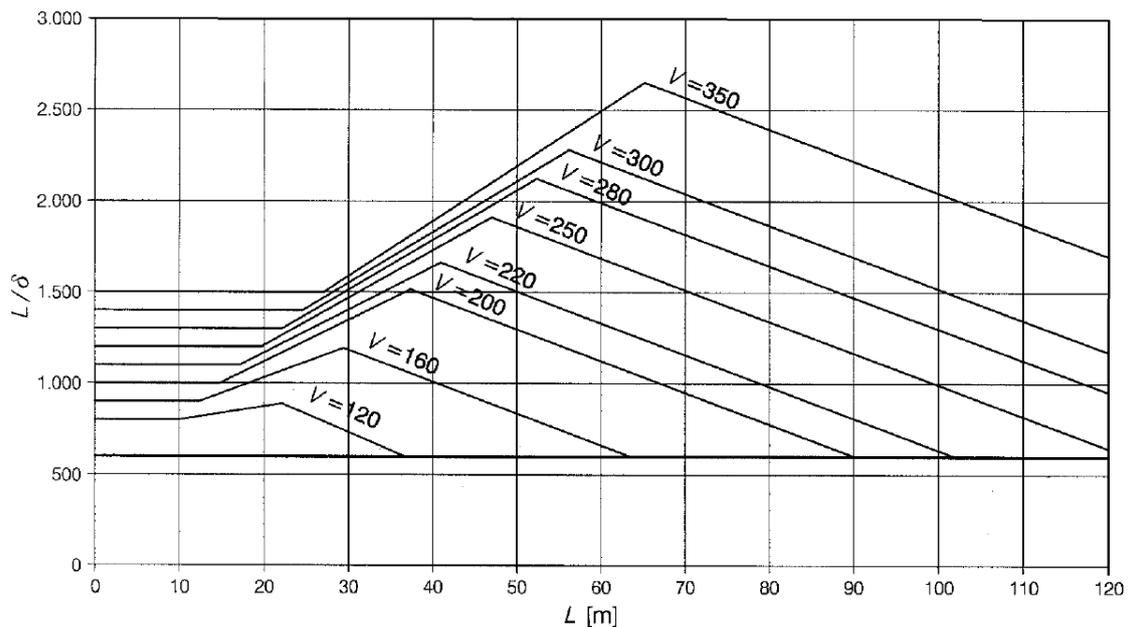


Figura 27. Flecha vertical máxima admisible δ para puentes ferroviarios con tres o más vanos sucesivos simplemente apoyados correspondientes a una aceleración vertical admisible $b_v = 1 \text{ m/s}^2$ en un coche con vehículo V (km/h). Fuente: Eurocódigo 0 (2019)

Aunque los valores que proporciona este criterio sean de aplicación para puentes de ferrocarril, se han extrapolado los resultados para los viaductos de hyperloop debido a su estrecha relación en lo que respecta al confort de los pasajeros. Esta relación se compara más adelante en el apartado 6.1.3.

Las cápsulas del hyperloop en el interior del tubo alcanzarán unas velocidades entre los 1000 y los 1200 km/h. Estas velocidades quedan fuera de los datos aportados por el estudio del Eurocódigo 0.

La evaluación del confort en el transporte por hyperloop queda fuera de este trabajo fin de máster. Es por ello por lo que se ha realizado un estudio matemático de la evolución de las diferentes series en función de su evolución en velocidades.

La gráfica muestra 3 zonas de tendencias diferentes. Existen 2 zonas donde los segmentos son paralelos: el primer tramo con pendiente 0 (horizontal) donde el desfase va disminuyendo con el aumento de la velocidad; y el tercer tramo con pendiente negativa donde el desfase está relacionado proporcionalmente con la velocidad. El cambio de pendiente entre el primero y el segundo tramo, y entre el segundo y el tercer tramo siguen rectas con diferentes pendientes, por lo que se puede conocer el final y el comienzo de los tramos primero y tercero. Por ende, el segundo tramo unirá el final del primero con el principio del tercero. Por cómo evolucionan los tramos primero y tercero, se puede apreciar como la pendiente del tramo segundo irá evolucionando de forma logarítmica, tendiendo para valores de velocidades elevadas a un límite superior.

De esta forma se ha obtenido la siguiente gráfica según las pautas que se han indicado en el anterior párrafo. Los resultados habrá que compararlos con un futuro estudio más exhaustivo que se centre en la aceleración que soportaría el usuario a velocidades superiores a las que se muestran en el gráfico del Eurocódigo 0.

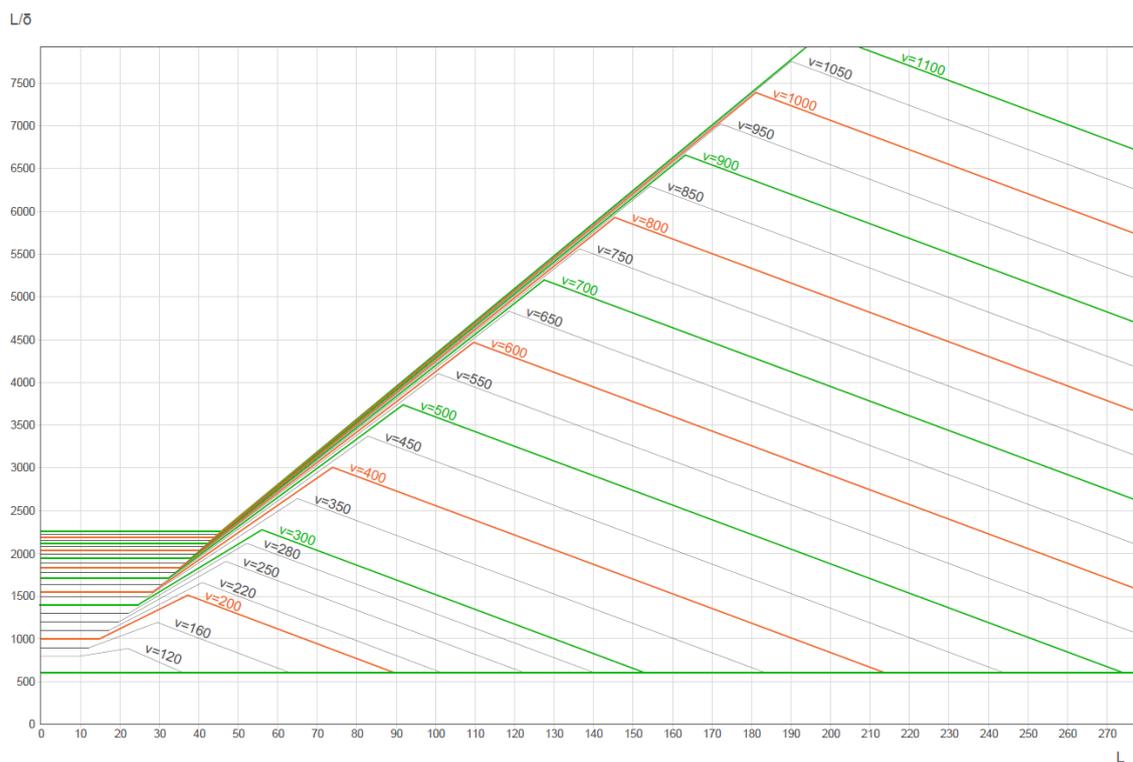


Figura 28. Flecha vertical máxima admisible δ según estudio estadístico basado en la figura A2.3 del Eurocódigo 0. Gráfica 1. Fuente: Elaboración propia

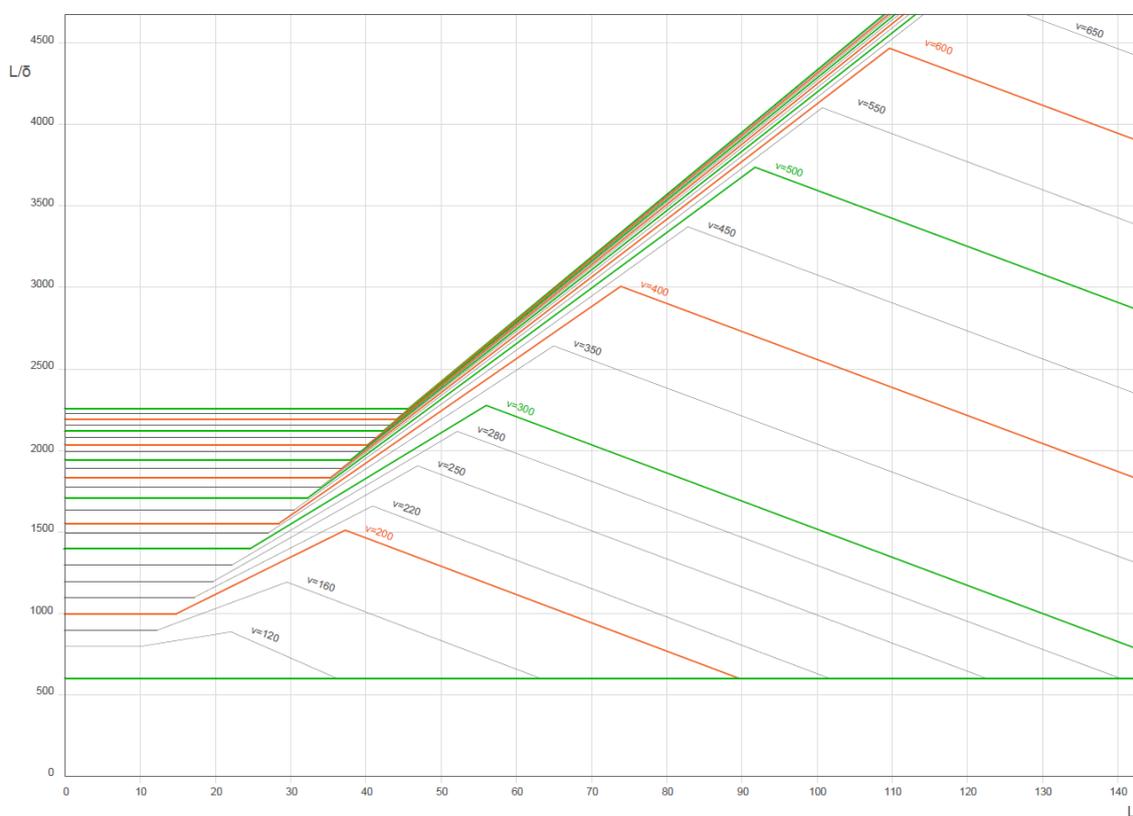


Figura 29. Flecha vertical máxima admisible δ según estudio estadístico basado en la figura A2.3 del Eurocódigo 0. Gráfica 2. Fuente: Elaboración propia

Los valores de L/δ deberán ser multiplicados por 0.9 por tener una configuración de viga continua de tres o más vanos, como indica el Eurocódigo 0.

Considerando que la cápsula alcance los 1000 km/h, para luces de 30, 60 y 90 m se obtienen unas flechas admisibles de 1.52, 2.38 y 2.54 cm respectivamente.

Para evaluar las flechas de los modelos estudiados definidos al principio del apartado 3.2., se va a considerar un factor de impacto $\eta = 2$.

Luz del vano central (m)	Flecha U3 (cm)	Flecha máxima admisible δ (cm)
56	0.33	2.35
58.8	0.38	2.37
61.6	0.43	2.40
64.4	0.48	2.41
67.2	0.53	2.43
70	0.59	2.45
72.8	0.65	2.46
75.6	0.72	2.48
78.4	0.79	2.49
81.2	0.87	2.51
84	0.95	2.52

Tabla 9. Valores de flecha U3 (cm) y flecha admisibles δ (cm) en función de la luz del vano central (m). Fuente: Elaboración propia

Como se aprecia en los resultados de la tabla anterior, los valores obtenidos de flecha son muy inferiores a los valores de la flecha máxima admisible, por lo que se puede indicar que, a falta de un estudio detallado que se centre en la aceleración que soportaría el usuario a velocidades mayores de 300 km/h, los viaductos de hyperloop para luces comprendidas entre 56 y 84 m en su vano central cumplirían para el estudio de estado límite de servicio indicado.

3.2.2. Estado Límite Último: de Resistencia y de Inestabilidad

Para estudiar los estados límite último de resistencia y de inestabilidad se va a tomar como referencia los métodos definidos en el capítulo IX de *Estados límite últimos* de la Instrucción de acero estructural EAE (España Ministerio de Fomento 2011).

La estructura está formada por un tubo de 4 m de diámetro con un espesor de 25 mm. Siguiendo el artículo 20.2. de clasificación de las secciones transversales, más concretamente la tabla 20.3.c. de esbelteces máximas para casos especiales de paneles comprimidos, la sección tubular pertenece a una clase de sección 4, como se demuestra a continuación.

$$C3 \rightarrow \frac{d}{t} \leq 90\varepsilon^2 ; \varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 0.71$$

$$\frac{d}{t} = \frac{4000}{25} = 160 ; 90\varepsilon^2 = 90 \cdot 0.51 = 45.98$$

$$\frac{d}{t} > 90\varepsilon^2 \rightarrow C4$$

Para los cálculo, se va a considerar la sección como una sección de clase 3, ya que más adelante, en el apartado 3.4.2., se realizará un estudio más preciso de las tensiones teniendo en cuenta además el comportamiento como lámina del tubo.

De esta forma, las comprobaciones a satisfacer por la infraestructura en estudio en su localización más solicitada serán:

- ELU de Resistencia

$$\sigma_{x,Ed} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M0}}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1$$

- ELU de inestabilidad

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1$$

Las características geométricas de la sección son las que se definen a continuación:

$$A = 0.3122 \text{ m}^2$$

$$I_{yy} = I_{zz} = 0.6166 \text{ m}^4$$

$$A_v = 0.1988 \text{ m}^2$$

$$W_{el} = 0.3083 \text{ m}^3$$

$$W_{pl} = 0.3950 \text{ m}^3$$

$$i = 1.4054 \text{ m}$$

$$I_T = 1.2333 \text{ m}^4$$

Como coeficientes parciales para la resistencia para los estados límite últimos se toman:

$$\gamma_{M0} = \gamma_{M1} = 1.05$$

Se va a comprobar los estados límite últimos anteriores para el caso de un viaducto con un vano central de 56 m de longitud exclusivamente para, una vez conocidos los resultados obtenidos, exponer estos del resto de luces hasta llegar a 84 m de longitud del vano central.



Figura 30. Modelo simplificado de evaluación para viaducto del hyperloop para luces medias. Ejemplo de vano central de 56 m.

Las acciones soportadas por el viaducto serán las definidas anteriormente de peso propio, cargas muertas como la mitad de las cargas de peso propio, viento como una acción vertical de valor 4.13 kN/m , acciones térmicas como $T_u + T_a = 60 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_g^+ = 12.6 \text{ }^\circ\text{C}$ con un valor de simultaneidad $\omega_M = 1.0$ y el efecto dinámico del paso del vehículo como una fuerza vertical en el centro luz del vano central de valor $F_k = 100 \text{ kN}$ con un factor de impacto $\eta = 2$

La combinación de acciones considerada es la que se muestra a continuación, donde la acción de temperatura se toma como predominante y donde las acciones de viento, peso propio, vehículo y las acciones de temperatura crean esfuerzos de mismo signo:

$$\gamma_{G,g}G_{k,g} + \gamma_{Q,T}Q_{k,T} + \gamma_{Q,w}\psi_{Q,w}Q_{k,w} + \gamma_{Q,F}\psi_{Q,F}Q_{k,F}$$

Los coeficiente de combinación y seguridad son: $\gamma_{G,g} = 1.35$, $\gamma_{Q,i} = 1.50$, $\psi_{Q,w} = 0.6$, $\psi_{Q,F} = 0.8$.

Para el caso de un viaducto con la configuración y la combinación de cargas anteriormente definidas, los esfuerzos serán los indicados en las siguientes figuras. Para una mejor identificación, solamente se muestran los esfuerzos para los tres vanos centrales.



Figura 31. Diagrama de esfuerzos axiales en los tres vanos centrales del modelo de 56 m de luz. Fuente: Elaboración propia

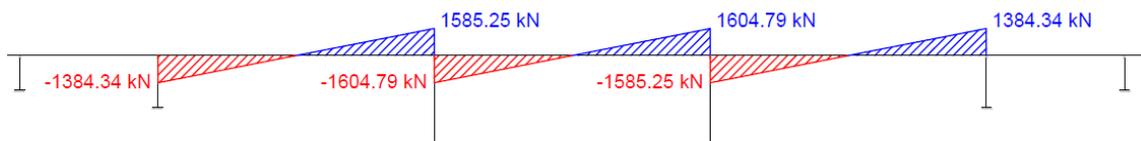


Figura 32. Diagrama de esfuerzos cortantes en los tres vanos centrales del modelo de 56 m de luz. Fuente: Elaboración propia



Figura 33. Diagrama de momentos flectores en los tres vanos centrales del modelo de 56 m de luz. Fuente: Elaboración propia

Los esfuerzos de diseño serán los siguientes:

$$N_{Ed} = 73053.81 \text{ kN}$$

$$V_{Ed} = 1604.79 \text{ kN}$$

$$M_{Ed} = 16121.33 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

El primer paso que se va a realizar es comprobar si existe una reducción de la resistencia de cálculo a flexión y axil por la interacción flexor-cortante-axil, debiéndose cumplir:

$$V_{Ed} < \frac{1}{2} V_{pl,Rd}$$

donde $V_{pl,Rd}$ es la resistencia plástica de cálculo a cortante con valor:

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v (f_y / \sqrt{3})}{\gamma_{M0}} = 50271.39 \text{ kN}$$

$$1604.8 < \frac{1}{2} 50271.39 = 25135.7 \text{ kN}$$

De esta forma no existirá reducción de la resistencia de cálculo a flexión y axil.

Se procede a la comprobación del estado límite último de resistencia:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1$$

donde los términos son los siguientes:

- $N_{c,Rd}$ es la resistencia de cálculo de la sección a compresión

$$N_{c,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 136773.3 \text{ kN}$$

- $M_{c,Rd}$ es la resistencia de cálculo de la sección a flexión

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{el} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 135064.8 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Por lo tanto:

$$\frac{73053.81}{136773.3} + \frac{16121.33}{135064.8} = 0.53 + 0.12 = 0.65 < 1$$

En cuanto a la comprobación tensional, la tensión máxima σ_x se localiza en la cara superior de la sección del vano central con valor de:

$$\sigma_{x,Ed} = 286.29 \text{ MPa}$$

$$\frac{f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{460}{1.05} = 438.10 \text{ MPa}$$

$$286.29 \text{ MPa} < 438.10 \text{ MPa}$$

Como se puede apreciar, la estructura de viaducto para el hyperloop según la configuración definida con una luz del vano central de 56 m cumpliría para el estudio del estado límite último de resistencia.

Se procede a la comprobación del estado límite último de inestabilidad:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1$$

donde los términos son los siguientes:

- N_{Rk}/γ_{M1} es la resistencia de cálculo de la sección a compresión

$$\frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = 136773.3 \text{ kN}$$

- $M_{y,Rk}/\gamma_{M1}$ es la resistencia de cálculo de la sección a flexión

$$\frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}} = \frac{W_{el} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = 135064.8 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

- χ_{LT} es el coeficiente de reducción para pandeo lateral, que para el caso de elementos no susceptibles a deformaciones por torsión tiene un valor de 1.
- χ_y, χ_z son los coeficientes de reducción para pandeo por flexión. Estos vienen definidos según las tablas del Anejo IV de la EAE donde se relaciona el coeficiente de reducción respecto a la esbeltez relativa $\bar{\lambda}$ según una curva de pandeo. Esta curva se define en función de la geometría de la sección, en algunos casos de la forma de fabricación del perfil y de la resistencia del material utilizado.

Para este caso, la sección será una sección de perfil hueco con forma tubular y se supondrá que la pieza se ha conformado en frío. Por ello junto con el material del que está hecho S460, la curva utilizada será la curva de pandeo c.

La esbeltez relativa se define como la siguiente relación:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}}$$

donde N_{cr} es el esfuerzo axial crítico elástico para el modo de pandeo considerado, definido como:

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_{cr}^2}$$

donde L_{cr} es la longitud de pandeo en el plano de flexión definida como:

$$L_{cr} = \beta \cdot L$$

donde β es el coeficiente de pandeo que para el caso de una viga biapoyada tiene el valor de 1, y L que es la longitud del tramo estudiado, de valor 56 m.

Por lo tanto:

$$L_{cr} = 1 \cdot 56 = 56 \text{ m}$$

$$N_{cr} = 388138.3 \text{ kN}$$

$$\bar{\lambda} = 0.61$$

A partir del valor de $\bar{\lambda}$ y la curva de pandeo c se obtiene el valor de χ :

$$\chi = 0.78$$

- k_{yy}, k_{zy} son los coeficientes de interacción. Estos se han obtenido mediante el Método 2 definido en la tabla 35.3.c (a) de la EAE, donde se definen los coeficientes de interacción k_{ij} para elementos no susceptibles a deformación por torsión. Se definen como:

$$k_{yy} = C_{my} \left(1 + 0.6 \cdot \bar{\lambda}_y \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}/\gamma_{M1}} \right)$$

$$k_{zy} = 0.8 \cdot k_{yy}$$

donde C_{my} es un factor para la obtención del momento equivalente definido en la tabla 35.3.c (c) de la EAE. El caso en estudio pertenecerá al segundo supuesto con las condiciones de rango de $\alpha_h = -1$ y $\psi = 1$, por lo que el valor de este factor para una acción uniforme será:

$$C_{my} = 0.95 - 0.05 \cdot \alpha_h = 0.85$$

$$k_{yy} = 1.06$$

$$k_{zy} = 0.85$$

Por lo tanto:

$$\frac{73053.81}{0.78 \cdot 136773.3} + 1.06 \frac{16121.33}{1 \cdot 135064.8} = 0.68 + 0.13 = 0.81$$

$$\frac{73053.81}{0.78 \cdot 136773.3} + 0.85 \frac{16121.33}{1 \cdot 135064.8} = 0.68 + 0.11 = 0.79$$

Como se puede apreciar, la estructura de viaducto para el hyperloop según la configuración definida con una luz del vano central de 56 m cumpliría para el estudio del estado límite último de inestabilidad

Al realizar el mismo estudio para luces del vano central de 56 a 84 m, se obtienen los siguientes resultados. Las tablas siguientes muestran los diferentes ítems que se han obtenido en el proceso de cálculo del ELU de Resistencia y de Inestabilidad del caso de 56 m de luz del vano central para longitudes que van de los 56 a los 84 m.

Luz vano central (m)	N_{Ed} (kN)	V_{Ed} (kN)	M_{Ed} (kN · m)
56	73053.81	1604.79	16121.33
58.8	73053.81	1685.81	17385.83
61.6	73053.81	1753.27	18794.47
64.4	73053.81	1833.77	20113.09
67.2	73053.81	1901.75	21576.02
70	73053.81	1981.79	22951.00
72.8	73053.81	2050.23	24470.84
75.6	73053.81	2129.89	25904.60
78.4	73053.81	2188.24	27267.39
81.2	73053.81	2278.03	28976.68
84	73053.81	2347.19	30614.96

Tabla 10. Esfuerzos de diseño para los casos de 56 a 84 m de luz del vano central.

Fuente: Elaboración propia

Luz vano central (m)	ELU R Axil	ELU R Flector	ELU Resistencia	$\sigma_{x,Ed}$ (MPa)
56	0.534	0.119	0.653	-286.29
58.8	0.534	0.129	0.663	-290.39
61.6	0.534	0.139	0.673	-294.96
64.4	0.534	0.149	0.683	-299.24
67.2	0.534	0.160	0.694	-303.98
70	0.534	0.170	0.704	-307.40
72.8	0.534	0.181	0.715	-313.37
75.6	0.534	0.192	0.726	-316.98
78.4	0.534	0.202	0.736	-323.14
81.2	0.534	0.215	0.749	-327.98
84	0.534	0.227	0.761	-333.30

Tabla 11. Estados Límite Últimos de Resistencia para los casos de 56 a 84 m de luz del vano central. Fuente: Elaboración propia

Luz vano central (m)	ELU I1 Axil	ELU I1 Flector	ELU Inest 1	ELU I2 Axil	ELU I2 Flector	ELU Inest 2
56	0.684	0.127	0.811	0.684	0.101	0.786
58.8	0.701	0.139	0.840	0.701	0.112	0.812
61.6	0.718	0.154	0.872	0.718	0.123	0.841
64.4	0.737	0.168	0.904	0.737	0.134	0.871
67.2	0.757	0.184	0.940	0.757	0.147	0.903
70	0.784	0.200	0.984	0.784	0.160	0.944
72.8	0.800	0.217	1.017	0.800	0.174	0.973
75.6	0.823	0.235	1.058	0.823	0.188	1.011
78.4	0.848	0.253	1.101	0.848	0.202	1.050
81.2	0.874	0.275	1.149	0.874	0.220	1.094
84	0.902	0.297	1.199	0.902	0.238	1.140

Tabla 12. Estados Límite Últimos de Inestabilidad para los casos de 56 a 84 m de luz del vano central. Fuente: Elaboración propia

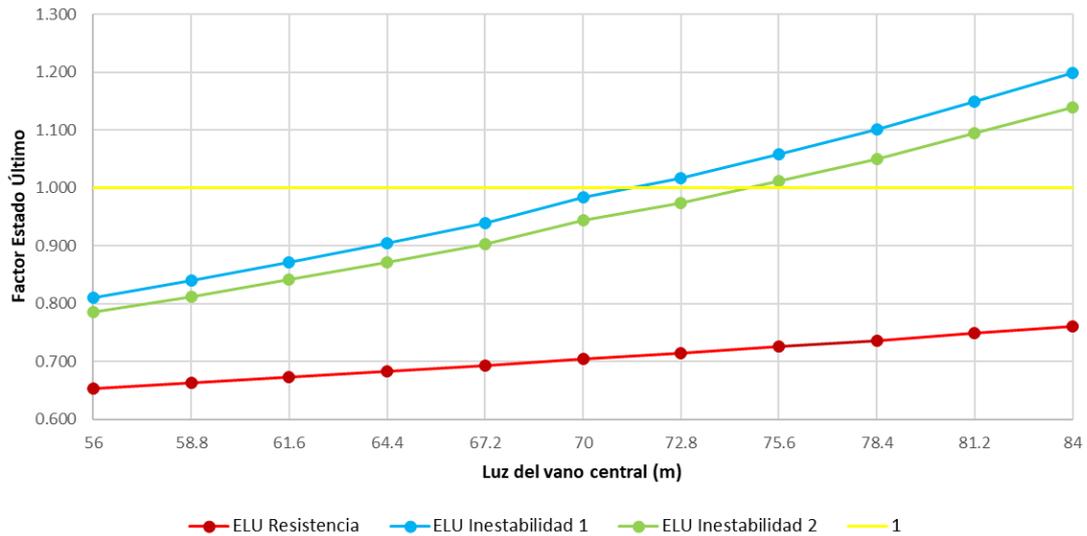


Figura 34. Resumen Estados Límite Últimos para los casos de 56 a 84 m de luz del vano central. Fuente: Elaboración propia

A la vista de los resultados obtenidos se aprecia que, a partir de los 70 m de luz del vano central, el viaducto deja de cumplir el ELU de inestabilidad. Tanto para el estado de límite último de resistencia como para el de inestabilidad se aprecia que el término del axil es el más desfavorable, llegando a tener un peso de 0.80 a partir de luces de 72.8 m.

3.3. Definición del modelo lámina

En los apartados anteriores se ha estudiado el comportamiento del tubo mediante un modelo barra, modelo aproximado de la estructura. Debido a las características del tubo, en este apartado el estudio se centra en su comportamiento como lámina, un estudio más preciso que permite, entre otras cosas, tener en cuenta la inestabilidad del tubo como lámina, las tensiones longitudinales y circulares debidas al vacío y la influencia de los refuerzos anulares de los soportes frente a la expansión térmica diferencial y la acción del vacío. Para ello, se realizará un análisis de la inestabilidad del tubo como lámina, obteniéndose el primer modo y su factor de pandeo; y se realizará una comprobación tensional teniendo en cuenta las imperfecciones del tubo definidas en el Eurocódigo 3 teniendo en cuenta la no-linealidad geométrica mediante un análisis P-delta.

El modelo de análisis es un modelo con elementos lámina, con una geometría tubular que consta de 3 tramos: uno central de 28 m y otro a cada lado de 14 m con condiciones de simetría a ambos lados; el tubo está unida a las pilas de 7 m mediante aparatos de apoyo que permiten el giro en la dirección perpendicular al eje longitudinal del tubo, teniendo un comportamiento de apoyo simple.

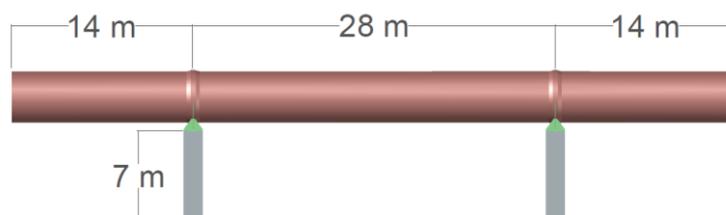


Figura 35. Esquema 3D del modelo lámina de 28 m de luz del vano central. Fuente: Elaboración propia

La unión entre el tubo y las pilas se materializa mediante el aparato de apoyo mostrado bajo, tres anillos de rigidización y un aumento del espesor local del tubo. El aparato de apoyo se forma por la unión de un anillo de rigidización con el apoyo del tubo a la pila, cuyo concepto se basa en las propuestas que las empresas del hyperloop han tomado para sus modelos, expuestos en el apartado 2.3 de este documento. Está formado por un conjunto de chapas de 50 mm de espesor. Para darle rigidez al elemento de apoyo, se han instalado 5 rigidizadores a cada lado. La configuración y geometría del elemento se describe en la siguiente figura.

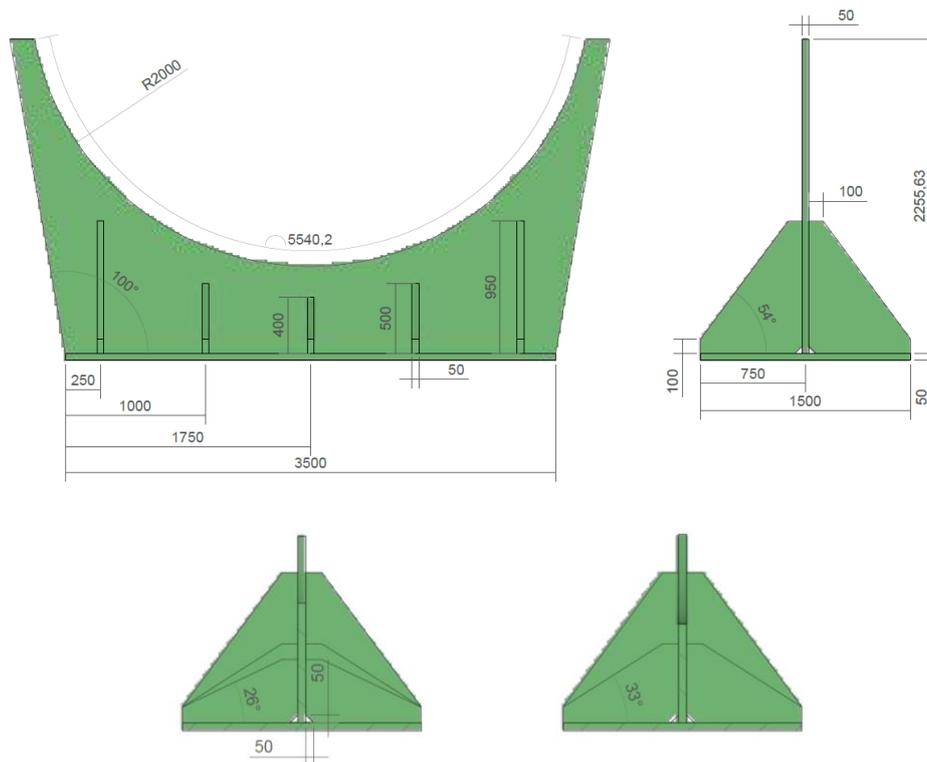


Figura 36. Definición geométrica del apoyo tubo-pilar (mm). Fuente: Elaboración propia

El tubo se diseña con un aumento del espesor de 100 mm en los 0.20 m a ambos lados del apoyo, atenuándose linealmente en 0.30 m (a cada lado) hasta el espesor del tubo de 25 mm, esto reduce las tensiones de punzonamiento que se producen en esta zona. Además del aumento del espesor, en el apoyo y a 0.10 m a cada lado de este se localizan tres anillos de rigidización, que aumentan el factor de pandeo, cuyo estudio se expone en el apartado 3.4. La sección de estos anillos será rectangular de 0.10 m de alto por 0.05 m. de ancho.

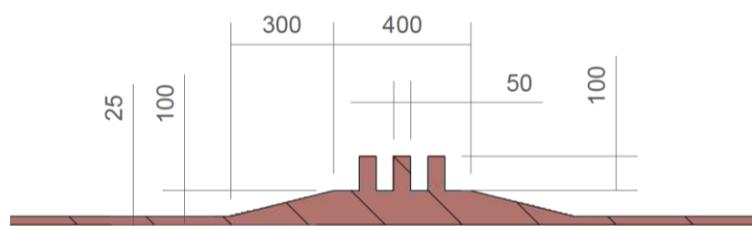


Figura 37. Definición geométrica del aumento del espesor y los anillos en apoyos (mm). Fuente: Elaboración propia

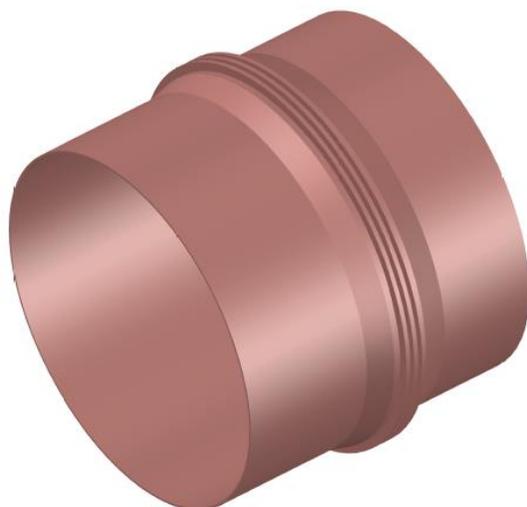


Figura 38. Esquema del tubo en apoyo: aumento del espesor y anillos. Fuente: Elaboración propia

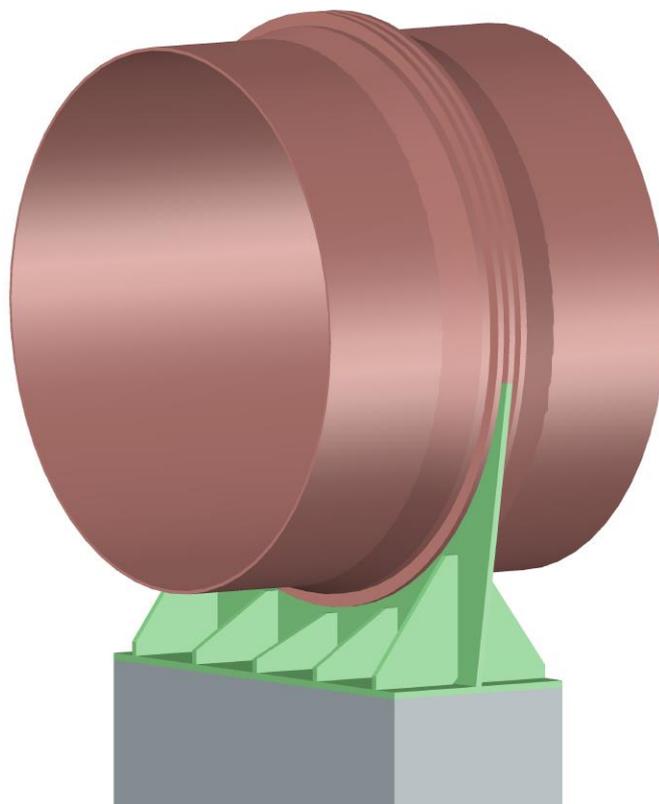


Figura 39. Esquema del aparato de apoyo. Fuente: Elaboración propia

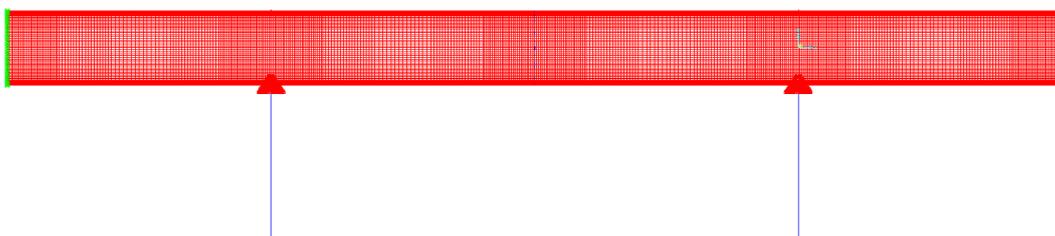


Figura 40. Modelo lámina del caso en estudio. Fuente: Elaboración propia

Los elementos lámina se reparten en el alzado cada 3°, con esta discretización se minimizan los esfuerzos parásitos debidos a la falta de continuidad de las tangentes e dirección circunferencial. En perfil, las dimensiones de los elementos varían en función de su cercanía al apoyo. De 0 m a 2.8 m, los elementos tienen una relación de dimensiones 1:1, de 2.8 m a 5.6 m la relación es de 1:1.5, de 5.6 m a 8.4 m la relación es de 1:2, y a partir de los 8.4 m la relación es de 1:3.

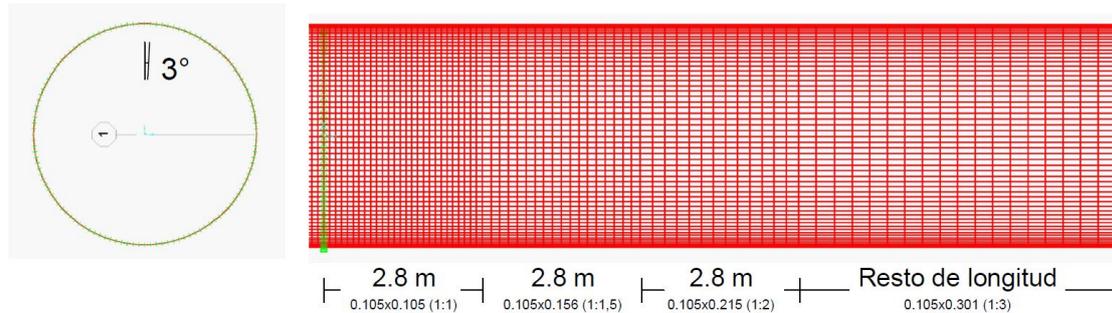


Figura 41. Alzado y perfil del modelo lámina para el caso en estudio. Fuente: Elaboración propia

En las condiciones de contorno en los extremos del modelo se impide el desplazamiento en dirección del eje del tubo y las pilas se encuentran empotradas en su base.

En cuanto a las acciones, en este caso se van a considerar las cargas de peso propio, cargas muertas, acciones térmicas, el efecto dinámico del paso del vehículo y la presión interna de vacío. Las cargas muertas se aplicarán en los 120° inferiores de la sección del tubo, incrementando el peso de esta zona en 0.3 veces el peso propio. La consideración de la carga muerta en esa zona es una estimación del peso de los elementos de guiado y levitación necesarios para la circulación del vehículo, como se explica en el apartado 2.3. Como acción térmica se considera: $T_u + T_a = 60 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_g^+ = 12.6 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_g^- = 11.7 \text{ }^\circ\text{C}$ con un factor de simultaneidad $\omega_M = 1.0$. Los gradientes verticales serán introducidos en 10 niveles de temperatura uniforme, cada uno definido por la altura en el alzado del tubo como se muestra en la siguiente figura.

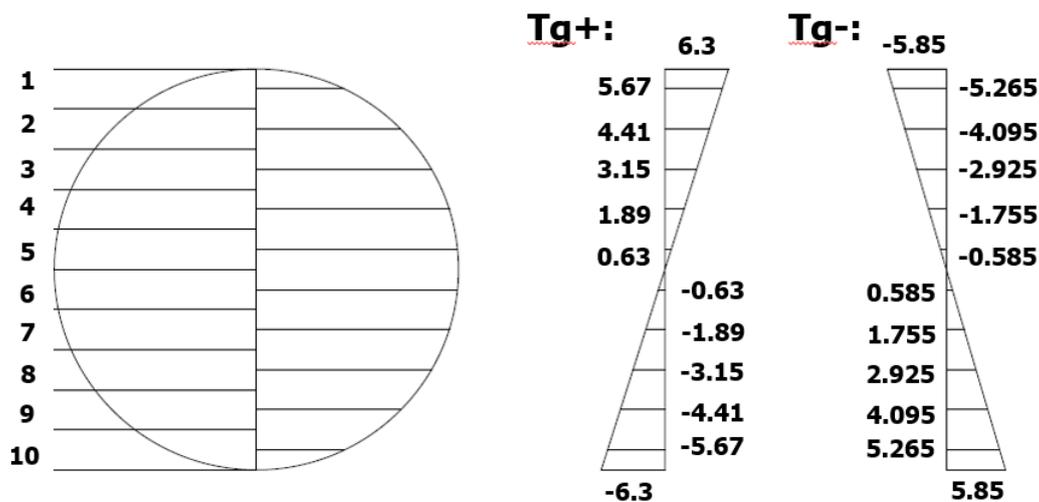


Figura 42. Modelo de introducción de los gradientes de temperatura T_g^+ y T_g^- en el alzado del tubo ($^\circ\text{C}$). Fuente: Elaboración propia

La acción de la presión interna de vacío se considera como una fuerza en superficie de valor $p_k = -101 \text{ kN/m}^2$, aplicada en la cara interna dirigida hacia el eje del tubo.

Para la acción del vehículo se va a considerar la carga definida para el modelo de barras, pero repartida a lo largo de la lámina como se expone a continuación. Cada una de las empresas propone un tipo de vehículo diferente y una tecnología y medios de guía distintos. Se ha considerado el modelo que expone Virgin Hyperloop One en su video de pruebas de su propuesta de cápsula. En él se aprecian tres carriles inferiores, uno central inferior de guiado y otros dos laterales de levitación. Es por ello por lo que se ha considerado que la cápsula irá guiada por tres carriles: uno inferior y otros dos a cada lado del tercio inferior de la sección del tubo (120° inferiores). Por la misma razón que en el caso de los carriles de guía, cada empresa considera diferentes longitudes de cápsula, por ejemplo, Zeleros 24 m y Virgin Hyperloop One 15 m. En este caso se ha supuesto que la longitud de la cápsula será la misma que la del coche del AVE serie 100, cuya longitud es de 19 m. De esta forma, la acción que irá por cada carril guía tendrá un valor de 3.51 kN/m .



Figura 43. Diseño interno del tubo de Virgin Hyperloop One en el primer ensayo con pasajeros de la cápsula. Fuente: Virgin Hyperloop One

3.3.1. Verificación del modelo láminas

Al igual que en la verificación del modelo de barras, en este apartado se va a comprobar el modelo descrito en el apartado anterior comparando los resultados obtenidos en tensiones del artículo Museros et al. (2021) con los obtenidos por el modelo. En este caso no se estudiarán las tensiones producidas por la acción del vehículo ni por la acción de viento, la primera por la descripción que se ha tomado que no es igual a la del artículo, y la segunda porque no se ha introducido en el modelo propuesto. El estudio se centra en las tensiones de la zona inferior del tubo en la sección del apoyo y en la zona superior en la sección de centro luz. Los resultados del artículo son:

Acción	$\sigma_{x,Ek}$ (x=0 m, y=-2.0 m) (MPa)	$\sigma_{x,Ek}$ (x=+14 m, y=+2.0 m) (MPa)	$\sigma_{\theta,Ek}$ (x=0 m, y=±2.0 m) (MPa)	$\sigma_{\theta,Ek}$ (x=+14 m, y=±2.0 m) (MPa)
Permanentes	-7.64	-3.82	-	-
Vacío	-14.67	0	4.40	-8.80
Temperatura	-171.21	-172.38	36.00	0

Tabla 13. Valores de las tensiones de secciones de apoyo y centro luz del artículo Museros et al. (2021). Fuente: Artículo Museros et al. (2021)

Comparando los resultados con los obtenidos por el modelo lámina descrito, se obtienen las tensiones siguientes donde cabe indicar que, debido a la configuración de refuerzo en los apoyos, en esta localización se han obtenido los valores a 0.5 m del apoyo:

Acción	$\sigma_{x,Ek}$ (x=0 m, y=-2.0 m) (MPa)	$\sigma_{x,Ek}$ (x=+14 m, y=+2.0 m) (MPa)	$\sigma_{\theta,Ek}$ (x=0 m, y=±2.0 m) (MPa)	$\sigma_{\theta,Ek}$ (x=+14 m, y=±2.0 m) (MPa)
Permanentes	-7.76	-3.57	-	-
Vacío	-12.51	-2.40	-4.47	-8.01
Temperatura	-172.27	-170.92	38.67	1.50

Tabla 14. Valores de las tensiones de secciones de apoyo y centro luz del modelo de láminas en estudio. Fuente: Elaboración propia

Como se aprecia en los resultados, los valores son muy similares para los casos de cargas permanentes y temperatura, pero no para los valores de la acción de presión de vacío. En la comparación del modelo definido en el artículo con respecto al definido para este caso de estudio de modelo lámina resalta la definición del aparato de apoyo. En el caso que se está estudiando se ha definido un aparato de apoyo que permite la configuración de libertad en el giro en los apoyos, como indica en el artículo, pero la condición de configuración apoyo-anillo rigidizador que se ha definido hace el desplazamiento perpendicular a la superficie del tubo este coaccionado. Esta restricción no se considera en la referencia indicada, y por ello las tensiones obtenidas para la acción de presión no son las que se obtienen en dicha referencia.

3.4. Estudio de variación de luces del vano central: Estudio de inestabilidad y estudio tensional

Tras comprobar el modelo lámina del tubo definido, en este apartado se pretende conocer hasta que luz es capaz de tener el viaducto en su tramo central, teniéndose en cuenta no solamente el estudio realizado en los anteriores apartados de estados límite último y estado límite de servicio, sino también su limitación de inestabilidad y su limitación tensional teniendo en cuenta las posibles imperfecciones de la lámina.

Estas limitaciones se van a estudiar mediante un análisis de la inestabilidad del tubo como lámina, obteniéndose el primer modo y su factor de pandeo; y mediante una comprobación tensional teniéndose en cuenta las imperfecciones del tubo definidas en el Eurocódigo 3 proporcionales al primer modo de pandeo y la no-linealidad geométrica mediante un análisis P-delta.

Los modelos que se van a evaluar constan de los tres vanos definidos en el modelo de verificación con las mismas condiciones de contorno, pero con cambios en las alturas de las pilas y las longitudes de los vanos. Las pilas tendrán una altura de 20 m, simulando el paso de un viaducto por un valle. Para la longitud de los vanos se ha tenido en cuenta las siguientes configuraciones:

- Luz vano central: 28 m; Longitud tramos 1° y 3°: 14 m.
- Luz vano central: 56 m; Longitud tramos 1° y 3°: 28 m.
- Luz vano vano central: 84 m; Longitud tramos 1° y 3°: 28 m.

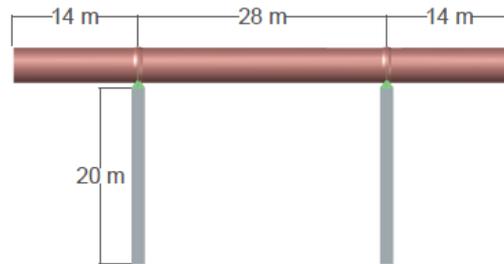


Figura 44. Modelo de estudio de vano central de 28 m de luz y tramos laterales de 14 m. Fuente: Elaboración propia

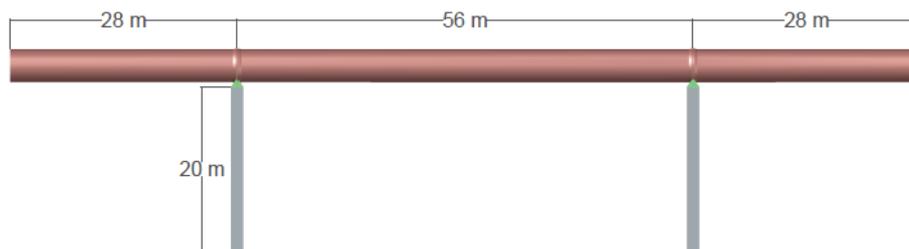


Figura 45. Modelo de estudio de vano central de 56 m de luz y tramos laterales de 28 m. Fuente: Elaboración propia

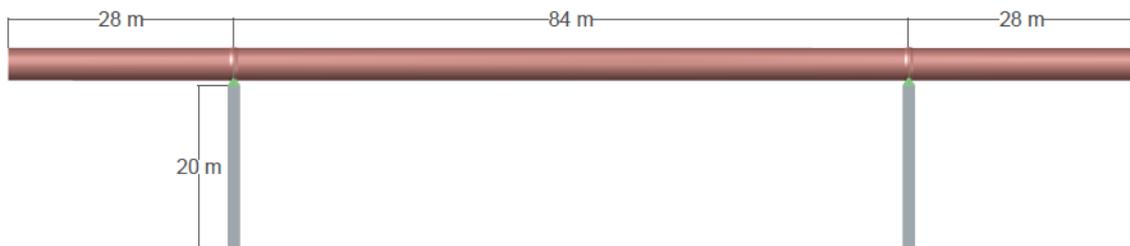


Figura 46. Modelo de estudio de vano central de 84 m de luz y tramos laterales de 28 m. Fuente: Elaboración propia

Para el caso del estudio de la inestabilidad del tubo se van a incluir anillos de rigidización con una configuración similar al de los apoyos. Se trata de 3 anillos de rigidización con mismas dimensiones y separación que los del apoyo; así como un aumento del espesor de la lámina de 50 mm en los 0.20 m a ambos lados del eje del anillo central, atenuándose linealmente en 0.30 m (a cada lado) hasta el espesor del tubo de 25 mm. Al igual que en el apoyo, esto reduce las tensiones de punzonamiento que se producen en la zona debido principalmente a la presión de vacío y la temperatura.

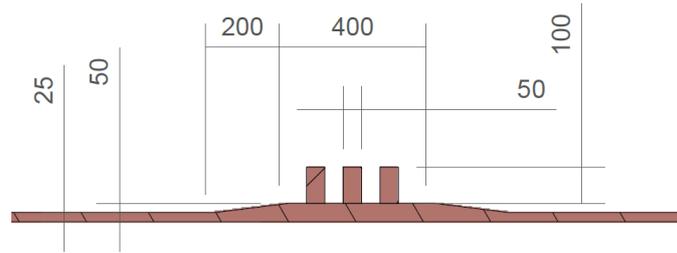


Figura 47. Definición geométrica del aumento del espesor y los anillos en rigidizadores (mm). Fuente: Elaboración propia

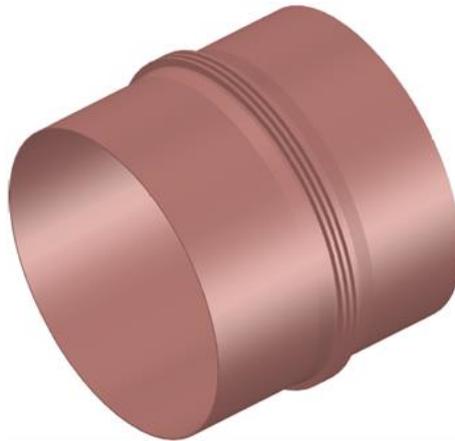


Figura 48. Esquema del tubo en rigidizador: aumento del espesor y anillos. Fuente: Elaboración propia

Las acciones a tener en cuenta serán las que se ha estudiado en el modelo de verificación de peso propio, carga muerta, acciones térmicas y presión de vacío. La carga muerta se considera el 0.3 del peso propio de los 120° inferiores del tubo. Las acciones térmicas consideradas son: $T_u + T_a = 60 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_g^- = 11.7 \text{ }^\circ\text{C}$, repartida como se indica en la figura 43. La acción de la presión interna de vacío se considera como una fuerza en superficie de valor $p_k = -101 \text{ kN/m}^2$, aplicada en la cara interna dirigida hacia el eje del tubo. Y la acción del vehículo se considera como tres cargas repartidas en tres ejes longitudinales (uno inferior y dos laterales en los 120° inferiores del tubo) de valor 3.51 kN/m .

Para ambos estudios se va a considerar la combinación de acciones expuesta para el caso de los estados límite últimos del apartado 3.2.2., donde la acción de temperatura se toma como predominante y la acción de presión de vacío se considera como una acción permanente:

$$\gamma_{G,g}G_{k,g} + \gamma_{G,p}G_{k,p} + \gamma_{Q,T}Q_{k,T} + \gamma_{Q,F}\psi_{Q,F}Q_{k,F}$$

donde los coeficientes de combinación y seguridad son: $\gamma_{G,i} = 1.35$, $\gamma_{Q,i} = 1.50$, $\psi_{Q,w} = 0.6$, $\psi_{Q,F} = 0.8$.

Cabe indicar que, a diferencia del caso de los estudios de límite último de resistencia e inestabilidad, al gradiente de temperatura más desfavorable será el negativo de valor $T_g^- = 11.7 \text{ }^\circ\text{C}$. Esto es debido a que las tensiones en los apoyos serán mucho mayores que en el centro de luz debido a la coacción de los aparatos de apoyo, y este gradiente hace que las tensiones sean mayores en estas zonas, como se puede apreciar más adelante en el estudio de tensiones del apartado 3.4.2.

3.4.1. Estudio de inestabilidad

El estudio de inestabilidad se basará en analizar el factor de pandeo de los modelos de láminas propuestos para luces de vano central de 28 m, 56 m y 84 m, con las configuraciones descritas, para diferentes supuestos de acciones e introduciendo en el modelo los anillos de rigidización nombrados anteriormente.

Los modelos de estudio serán los definidos en las figuras 31, 32 y 33 con la introducción de anillos de rigidización cada 28 m, 14 m y 7 m. A continuación, se exponen algunos ejemplos de configuraciones estudiadas.

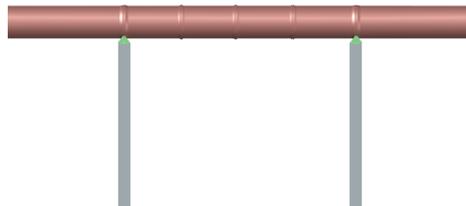


Figura 49. Modelo de estudio con 28 m de luz del vano central con anillos de rigidización cada 7 m. Fuente: Elaboración propia



Figura 50. Modelo de estudio con 56 m de luz del vano central con anillos de rigidización cada 14 m. Fuente: Elaboración propia



Figura 51. Modelo de estudio con 84 m de luz del vano central con anillos de rigidización cada 28 m. Fuente: Elaboración propia

Debido a que la acción predominante es la de temperatura y que la acción de presión es una acción a tener en cuenta en el diseño, debido, entre otros motivos, a las importantes tensiones circulares producidas en los aparatos de apoyo, los casos de acciones que se van a tener en cuenta para el estudio de la inestabilidad son:

- Caso de acciones térmicas
- Caso de acciones térmicas y presión
- Caso de combinación de acciones según ELU

En el Anejo I se muestra el primer modo de pandeo de cada combinación de luz central de vano – distancia entre anillos – caso de acción.

En la gran mayoría de los casos, el modo de pandeo involucra deformaciones de la superficie del tubo entre anillos de rigidización, tomando la sección una forma elipsoidal o trilobular. Para el caso de la temperatura, en los modelos de vanos centrales de luces de 28 m y 56 m con anillos cada 7 m y 14 m, el fallo conduce a un patrón de onda corta (patrón de Yoshimura). Para el caso del vano central de 84 m y para el caso de acciones térmicas, el modo de pandeo es tipo viga, existiendo una mezcla de comportamiento viga-lámina en los casos de 84 m de luz con anillos cada 7 m.

Las siguientes gráficas representan los diferentes factores de pandeo que se han obtenido para las diferentes luces de vano central con la disposición de los anillos a las distancias que se han comentado.

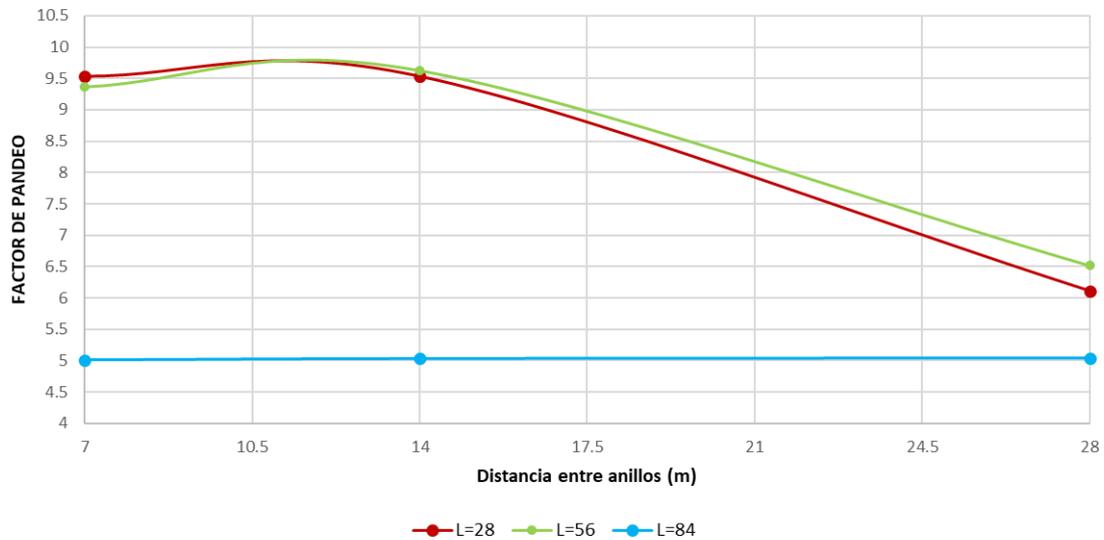


Figura 52. Factor de pandeo para el caso de las acciones térmicas. Fuente: Elaboración propia

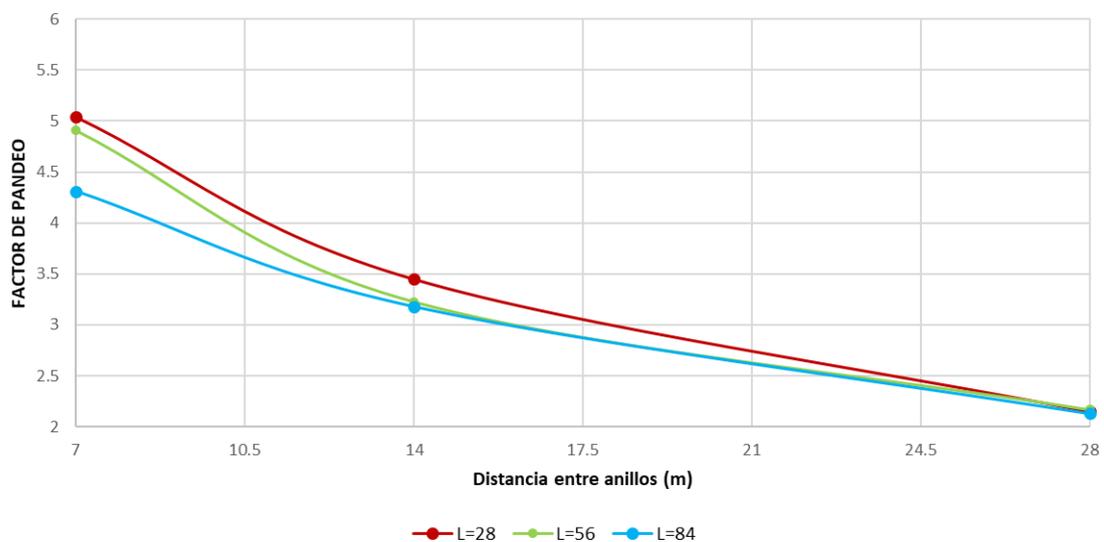


Figura 53. Factor de pandeo para el caso de las acciones térmicas y la presión de vacío. Fuente: Elaboración propia

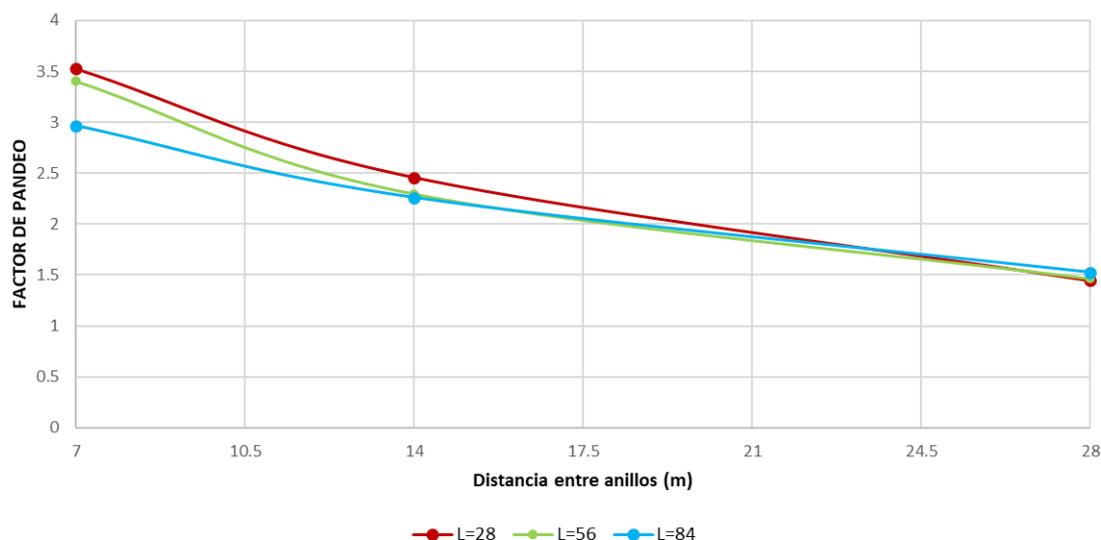


Figura 54. Factor de pandeo para la combinación de acción del ELU. Fuente: Elaboración propia

Se aprecia como la evolución de los factores de pandeo es similar en todos los casos, exceptuando el caso del vano central de 84 m de luz para las acciones térmicas. En este caso el modo de pandeo se produce con comportamiento como viga, lo que hace que no se pueda comparar con el resto de los casos que tienen modo de pandeo como lámina.

Para poder sacar alguna conclusión al respecto, se va a descartar configuraciones cuyo factor de pandeo sea inferior a 3. Este valor es algo menos restrictivo que el habitualmente usado de 4, ya que no se está considerando el incremento de rigidez que posiblemente añadirán los equipos situados en el interior del tubo, como carriles de sustentación de la cápsula, posibilidad de plataforma interna, u otros sistemas internos que puedan aportar rigidez al conjunto.

Para poder conseguir un factor de pandeo superior a 3 para el caso de la combinación del ELU, será necesario que los anillos de rigidización se sitúen a distancias menores de 7 m para el caso de un vano central de 84 m, menores de 9 m para el caso de 56 m y menores de 10 m para el caso de 28 m.

3.4.2. Estudio tensional

El estudio tensional se centra en la comprobación de la sección en la fibra superior del anillo del centro del vano y la fibra inferior del apoyo frente a la condición del estado límite último de resistencia tensional de la EAE, definido en el apartado 3.2.2. Para ello, se van a comparar las tensiones que se obtienen en esas fibras en un estudio estático lineal frente a las que se obtienen en un estudio estático no lineal P-delta en un modelo donde se han introducidos imperfecciones según el primer modo de pandeo.

Para introducir las imperfecciones en el modelo, se ha tomado como referencia el apartado 8 de la Parte 1-6 de Resistencia y estabilidad de láminas del Eurocódigo 3 (España Ministerio de Fomento y Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR) 2013), en el cual se define una amplitud de forma de imperfecciones geométricas equivalentes con respecto a un patrón afín al modo crítico de pandeo. Esta amplitud se define como el máximo entre:

$$\Delta w_{0,eq,1} = \ell_g \cdot U_{n1}$$

$$\Delta w_{0,eq,2} = n_i \cdot t \cdot U_{n2}$$

donde:

- ℓ_g son las longitudes de calibre, definidas en el apartado 8.4.4. de tolerancia de abolladura de este Eurocódigo. Entre los casos que se exponen, el caso en estudio pertenece a los supuestos a) y b) del subapartado (2) ya que existen compresiones de compresión meridionales (a) y compresiones circunferenciales o tensiones tangenciales (b). Las longitudes se definen como:

$$l_{gx} = 4\sqrt{r \cdot t}$$

$$l_{g\theta} = 2.3(l^2 \cdot r \cdot t)^{0.25} \quad l_{g\theta} \leq r$$

donde r es el radio de la lámina (2m), t el espesor de esta (0.025 m) y l es la longitud meridional del segmento laminar (7, 14, 28 m).

- t es el espesor de la pared de la lámina, de valor 0.025 m.
- n_i es un multiplicador de tolerancia, que se recomienda tomar como 25.
- U_{n1}, U_{n2} son los parámetros de amplitud de la imperfección de abolladura que depende de la calidad de tolerancia de fabricación. Se supone una calidad de Clase A o Excelente, donde los valores que toman son 0.010 en ambos casos.

Los valores de las longitudes de calibres serán iguales para todos los casos ya que el valor de l_{gx} toma el valor de 0.894 m y $l_{g\theta}$ el de 2 m, debido a que los valores superan al radio de la lámina. Por lo tanto, el valor de ℓ_g será de 2 m, siendo las amplitudes de forma:

$$\Delta w_{0,eq,1} = 0.02 \text{ m}$$

$$\Delta w_{0,eq,2} = 0.00625 \text{ m}$$

De esta forma, el valor considerado para la amplitud de forma de imperfecciones geométricas equivalente será:

$$\Delta w_{0,eq} = 0.02 \text{ m}$$

En este estudio se ha considerado las imperfecciones proporcionales al primer modo de pandeo del caso de las acciones térmicas y presión obtenido en el apartado anterior.

Las gráficas siguientes muestran los resultados obtenidos para las tensiones en la cara superior del anillo del centro del vano y la cara inferior del apoyo frente a la condición del estado límite último de resistencia tensional de la EAE, donde el límite superior es definido por:

$$\sigma_{x,Ed} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{460}{1.05} = 438.10 \text{ MPa}$$

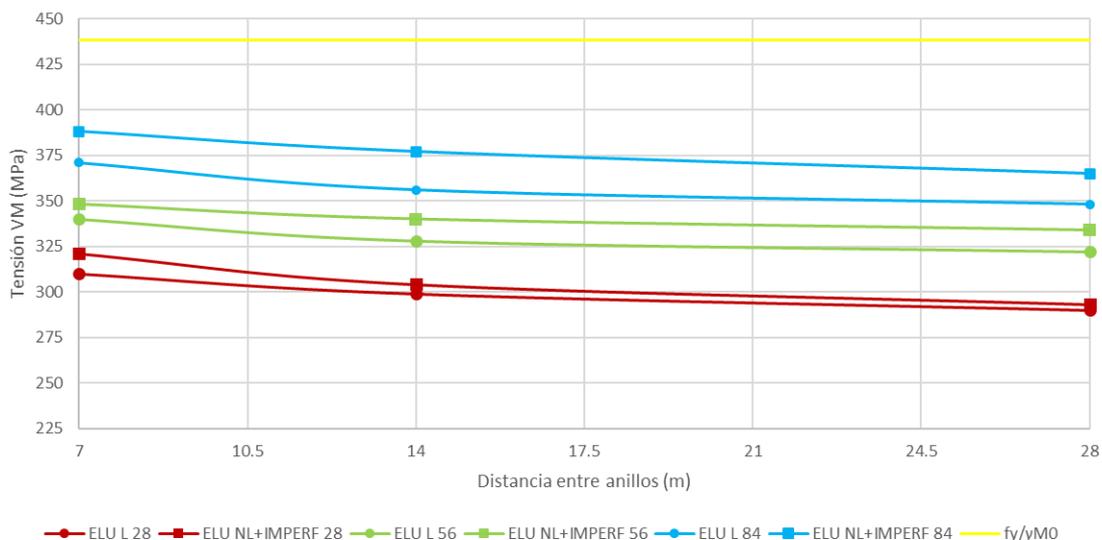


Figura 55. Tensiones de Von Mises en cara inferior de la sección de apoyo para la combinación de acciones de ELU. Fuente: Elaboración propia

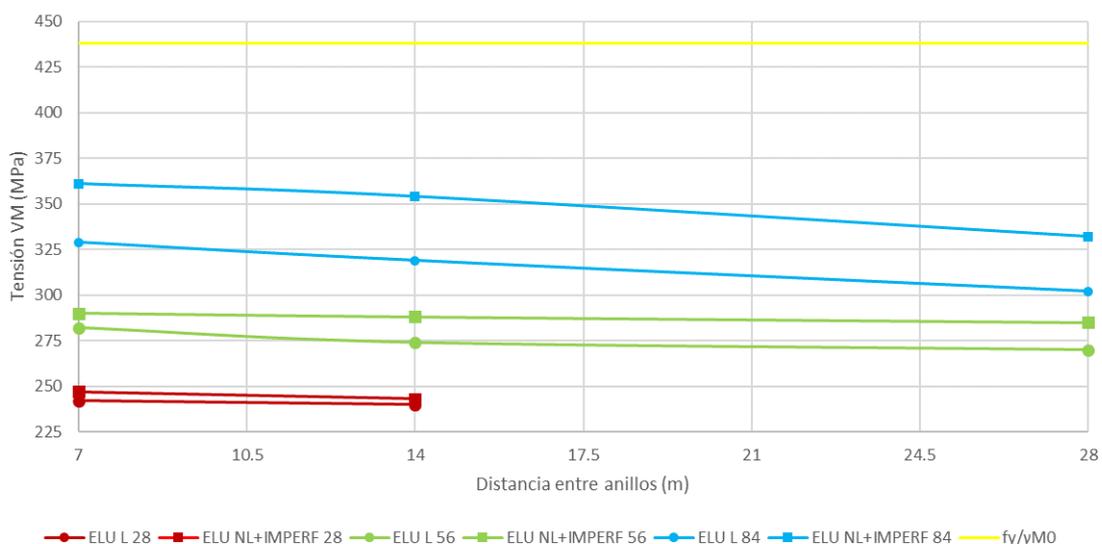


Figura 56. Tensiones de Von Mises en cara superior de la sección del aparato de rigidización central para la combinación de acciones de ELU. Fuente: Elaboración propia

A la vista de los datos expuestos en las gráficas anteriores, tanto en el apoyo como en el anillo central las tensiones aumentan al aumentar la luz del vano central. Todos los valores de las tensiones aumentan a la hora de introducir las imperfecciones, pero este aumento crece de manera prácticamente proporcional a la luz del vano central.

Se aprecia que las tensiones en los casos de estudio serán menores que las de la condición del ELU de resistencia, aunque este valor debería ser revisado debido a que en secciones con espesores elevados se debe considerar un valor inferior del límite elástico. En el caso de aumentar el coeficiente de reducción a un valor de 1.15, la tensión límite de comparación tiene el valor de 400 MPa, aun así, el valor de las tensiones sería menor.

3.5. Recomendaciones de diseño

Una vez realizados los estudios de estado límite de servicio, estados límites últimos de resistencia e inestabilidad, el estudio de las imperfecciones mediante el factor de pandeo y el análisis tensional de las secciones más solicitadas frente a imperfecciones y análisis no lineal P-delta, se aprecia que es posible proyectar viaductos de luces medias formados por tubos autoportantes.

Para luces del vano central de 56 m a 70 m se cumplen los estados límites estudiados. Además, la seguridad frente a inestabilidad para estos valores es aceptable, ya que disponiendo anillos a distancias menores de 7 m los factores de pandeo son mayores que 3. Por último, las tensiones en las secciones más solicitadas son aceptables tanto en el análisis lineal como en el no lineal geométrico con imperfecciones según el primer modo de pandeo, quedando estas en valores inferiores a los 400 MPa.

Para valores de 70 m a 84 m, los factores de pandeo son más bajos, pero disponiendo los anillos rigidizadores a distancias menores de 7 m aumenta el factor de pandeo. Cabe indicar que el comportamiento frente a pandeo para estas configuraciones empieza a mostrar fallos como viga y no como lámina, como sucede en el caso de luz de vano central de 84 m para la acción exclusiva de temperatura. Aunque el factor de pandeo para esa acción sea elevado, para luces mayores puede que se reduzca, teniendo que añadir a la configuración elementos extra que aporten rigidez al sistema para aumentar dicho factor.

4. APLICACIÓN A UN VIADUCTO SOBRE EL RÍO ADAJA

Después del estudio de puentes de hyperloop con diferentes luces del vano central, en este apartado se quiere aplicar a un caso hipotético potencialmente real las conclusiones obtenidas.

Para ello, se va a diseñar un viaducto para salvar el río Adaja, en Olmedo, provincia de Valladolid, localizándose justo en la situación donde actualmente se encuentra el viaducto para el transporte ferroviario de alta velocidad AVE de la línea Madrid-Galicia a su paso por dicha localización.

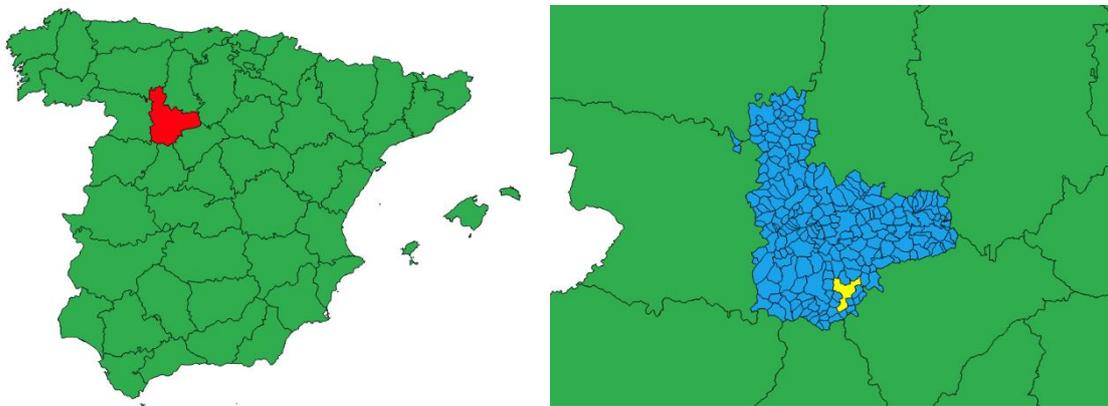


Figura 57. Localización de la provincia de Valladolid (rojo) y del municipio de Olmedo (amarillo). Fuente: Elaboración propia

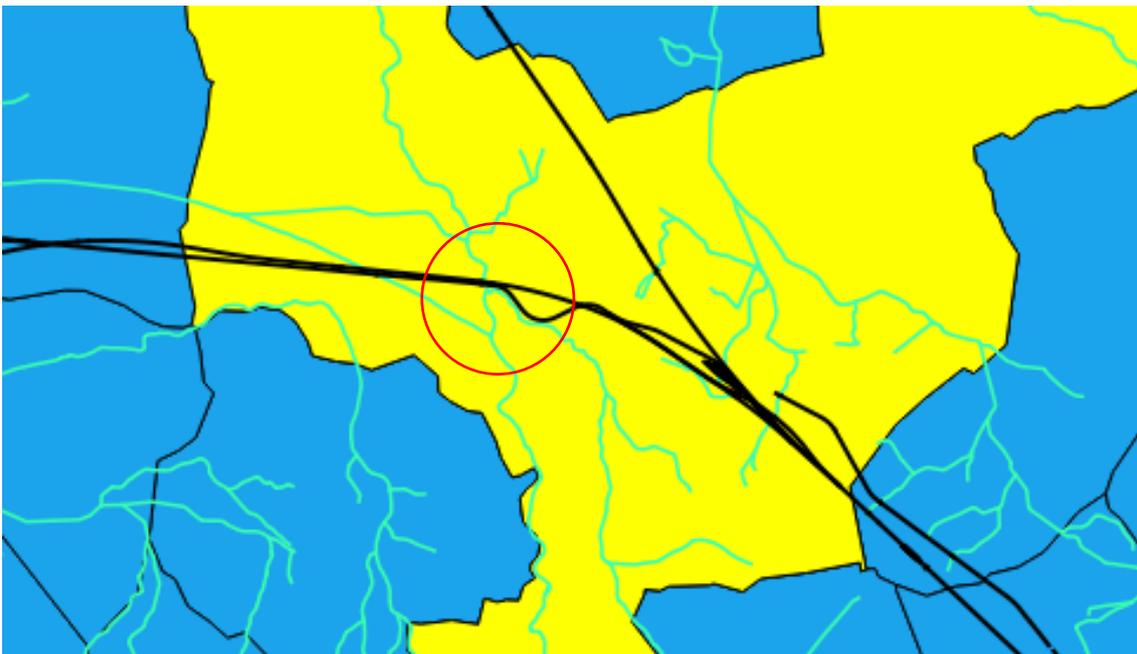


Figura 58. Localización del cruce de la línea de AVE Madrid-Galicia con el río Adaja (Olmedo). Fuente: Elaboración propia

La infraestructura en cuestión salva el río Adaja mediante un viaducto de 4 vanos de 55 m, 63 m, 55 m y 42 m en dirección Galicia-Madrid.

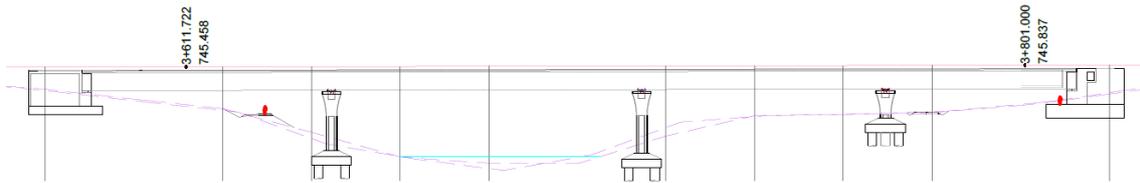


Figura 59. Alzado del viaducto para AVE de la línea Madrid-Galicia en el paso por el río Adaja (Olmedo). Fuente: ADIF

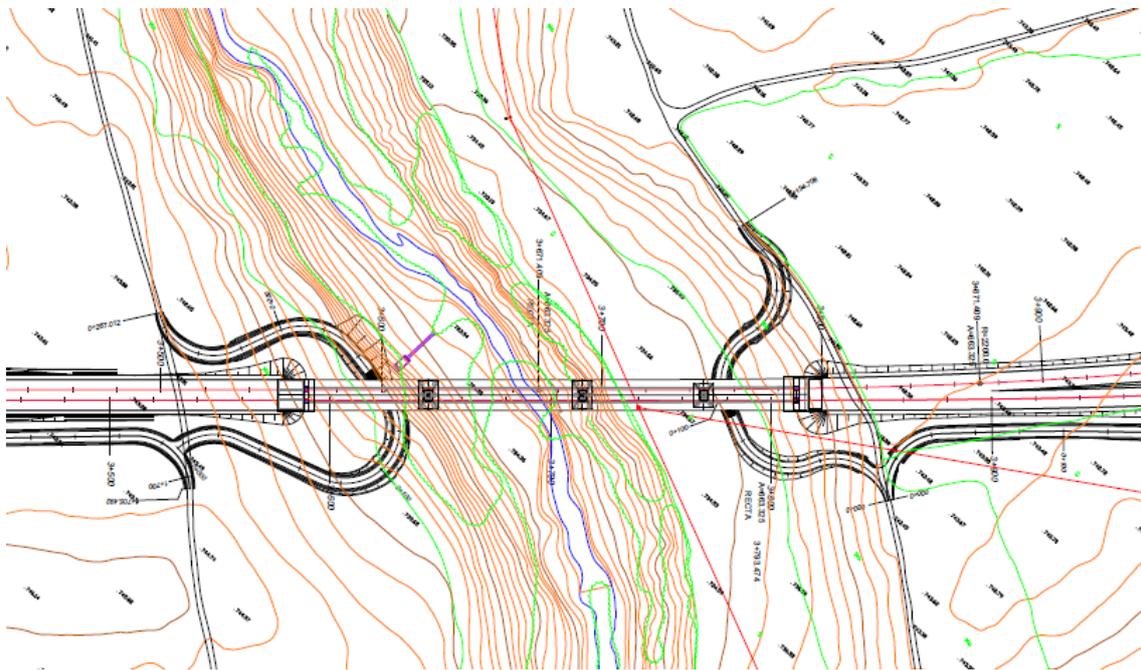


Figura 60. Planta del viaducto para AVE de la línea Madrid-Galicia en el paso por el río Adaja (Olmedo). Fuente: ADIF

4.1. Solución de la infraestructura para el Hyperloop

Basándose en el estudio realizado en los puntos anteriores, en este capítulo se pretende realizar un prediseño de un viaducto para el Hyperloop basado en el paso del AVE por el río Adaja.

4.1.1. Descripción geométrica de la infraestructura

El paso por el río Adaja constará de un total de 10 vanos (ancho del valle) de luces que van desde los 28 m hasta los 63 m del vano central, donde las alturas de las pilas se irán adaptando al terreno, como se muestra en la siguiente figura.

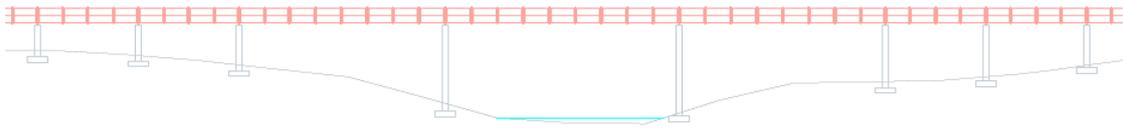


Figura 61. Alzado del viaducto del Hyperloop por el paso del río Adaja. Fuente: Elaboración propia

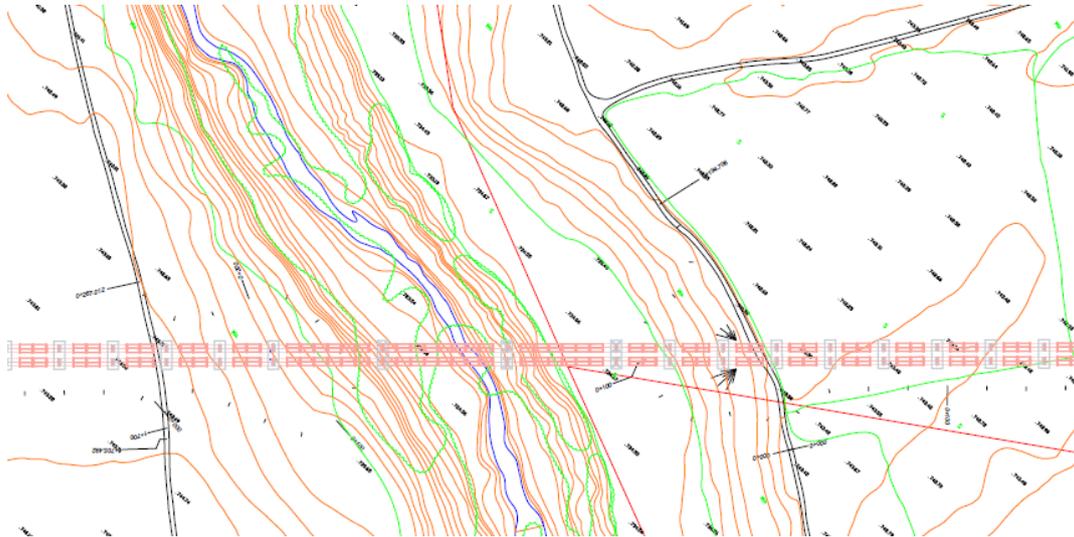


Figura 62. Planta del viaducto del Hyperloop por el paso del río Adaja. Fuente: Elaboración propia

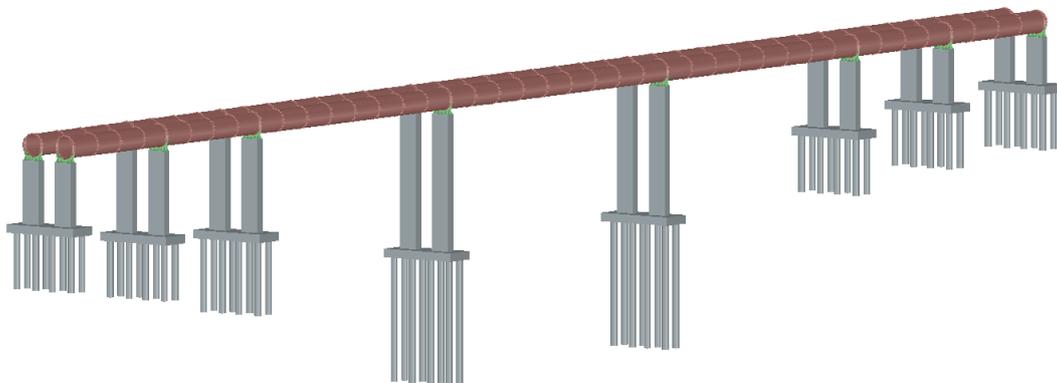


Figura 63. Modelo 3D del viaducto del Hyperloop por el paso del río Adaja. Fuente: Elaboración propia

La infraestructura consta de un tubo de 4 metros de diámetro interior con un espesor de lámina de 25 mm, apoyado sobre unas pilas de sección rectangular de 3.5x1.5 m. En los apoyos existen un aumento del espesor de la lámina de 100 mm, gradual en 0.50 m a cada lado del apoyo, rigidizado por tres anillos de sección rectangular de 50 mm de ancho y 100 mm de alto. La rigidización se apoya sobre el aparato que coacción la expansión del tubo, pero permite el giro en el apoyo en dirección perpendicular al eje del tubo, acercándose su comportamiento a un apoyo simple. Cada 7 metros existirá un aumento del espesor del tubo de 50 mm gradual en 0.40 m. La función de estos anillos es impedir la abolladura del tubo principalmente causadas por las acciones de temperatura y presión de vacío.

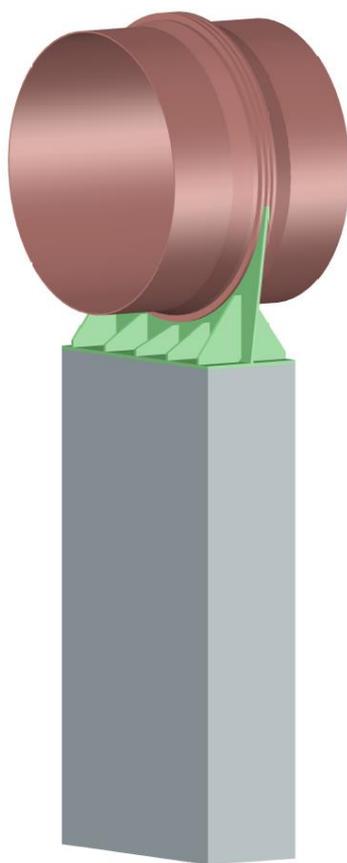


Figura 64. Esquema de la estructura en los apoyos. Fuente: Elaboración propia

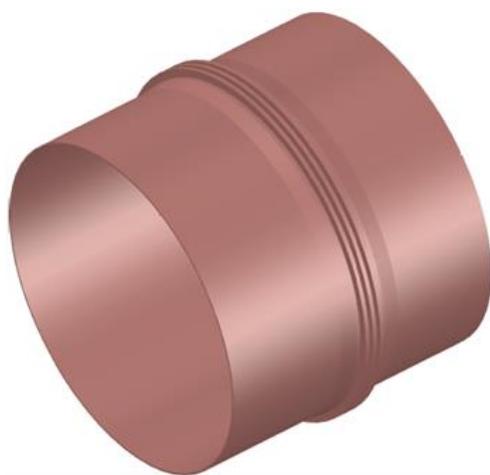


Figura 65. Esquema de la estructura en el anillo rigidizador. Fuente: Elaboración propia

La cimentación del viaducto constará de un encepado de 5.5 m de ancho por 14.5 m de largo con un canto de 1.5 m, que recoge a un total de 8 pilotes de 1.2 m de diámetro con diferentes longitudes en función de la pila a la que sustentan. La cara superior de los encepados se encuentra a una cota de 1.5 m por debajo del nivel del terreno. Esta profundidad se rellenará con escollera de protección para evitar la erosión debida a las crecidas del río. Tanto el encepado como los pilotes estarán formados por un hormigón HA-30.

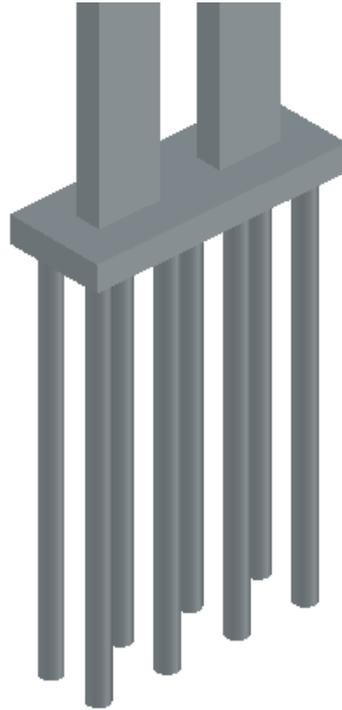


Figura 66. Esquema de la estructura en la cimentación. Fuente: Elaboración propia

Las características geométricas de los elementos tubo, aparato de apoyo, anillo rigidizador, pila, encepado y pilotes se encuentran en los planos del Anejo II del final del documento.

4.1.2. Materiales

El tubo está fabricado con acero Duplex EN14462 con un peso específico de 78.6 kN/m^3 , un coeficiente de expansión térmica $\alpha = 1.3 \cdot 10^{-5} \text{ C}^{-1}$, un módulo de elasticidad de 200 GPa y un límite elástico de 460 MPa .

Las pilas están fabricadas con un hormigón HA-30, con un peso específico de 25 kN/m^3 , un módulo de elasticidad de 33.58 GPa y una resistencia característica a compresión de 30 N/mm^2 .

4.1.3. Acciones

En este apartado se describirán todas las acciones para la comprobación de la estructura. No se ha tenido en cuenta cargas como la carga de nieve, ya que esta supondría menos del 6% de la propia carga de peso propio de la estructura; acciones debidas al terreno o acciones accidentales.

4.1.3.1. Peso Propio y Cargas Muertas

El peso propio será el debido al peso de la estructura, los apoyos y las pilas de hormigón, según los materiales definidos en el apartado anteriormente.

Las cargas muertas se considerarán según el modelo realizado. Para el caso del modelo de barras, las cargas muertas se consideran como el 50% de las acciones de peso propio, mientras que para el caso del modelo lámina se considerará que el tercio inferior del tubo (120° inferiores) con un incremento de carga del 30% de su peso propio.

4.1.3.2. Vehículo

Para la acción del vehículo se va a considerar que la longitud de la cápsula será de 19 m, longitud de un coche del AVE serie 100, con una carga repartida en el centro del vano central (localización más desfavorable). El vehículo tendrá un peso de 100 kN con un coeficiente de impacto de $\eta = 2$, como se define en el artículo (Museros et al. 2021a).

Por lo que el valor repartido en los 19 metros centrales del vano central será:

$$q_F = \frac{2 \cdot 100}{19} = 10.53 \frac{kN}{m}$$

Para el caso del modelo lámina, la carga estará repartida según los tres railes de guiado que se definen en el modelo, de tal forma que:

$$q_{F,raíl} = \frac{q_F}{3} = 3.51 \frac{kN}{m}$$

4.1.3.3. Viento

Para la obtención de la acción de viento se seguirá el procedimiento definido en la IAP-11.

La velocidad básica del viento para un período de retorno de 50 años viene definida por:

$$v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b,0}$$

donde:

- $c_{dir} = c_{season} = 1$
- $v_{b,0}$ es a velocidad fundamental del viento. El valor de este parámetro vendrá definido por su localización: Valladolid, que pertenece a una Zona A donde el parámetro toma un valor de 26 m/s.

$$v_b = 1 \cdot 1 \cdot 26 = 26 \frac{m}{s}$$

Para un período de retorno de 100 años, el valor vendrá dado por:

$$v_b(T) = v_b \cdot c_{prob}$$

donde c_{prob} toma el valor de 1.04.

$$v_b(100) = 26 \cdot 1.04 = 27.04 \frac{m}{s}$$

La velocidad medio del viento viene dada por:

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_0 \cdot v_b(T)$$

donde:

- $c_r(z)$ es un factor de rugosidad según (para el caso de $z > z_{min}$):

$$c_r(z) = k_r \ln \left(\frac{z}{z_0} \right)$$

donde los factores k_r de factor de terreno, z_0 de longitud de rugosidad y z_{min} de altura mínima vienen definidos según el tipo de entorno que tenemos en el lugar. Este caso correspondería al tipo III (forestal) y los valores de los parámetros serán:

$$k_r = 0.216 ; z_0 = 0.30 m ; z_{min} = 5 m$$

El valor de z es la altura del punto de aplicación del empuje del viento respecto del terreno o respecto del nivel mínimo del agua bajo el puente. Se considera que todo el tubo se encuentra a una misma cota sobre el nivel del suelo/río, con valor 26.23 m, cota del eje del tubo a la altura de la pila este del vano central.

$$c_r(26.23 \text{ m}) = 0.216 \cdot \ln\left(\frac{26.23}{0.30}\right) = 0.966$$

- c_0 es un factor de topografía. Como el puente en estudio se encuentra en el valle del río Adaja se tomará un valor de 1.1 por posible encauzamiento del viento.

Por lo tanto:

$$v_m = 0.966 \cdot 1.1 \cdot 27.04 = 28.72 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

El empuje producido por el viento se define según:

$$F_w = \left[\frac{1}{2} \rho v_b^2(T) \right] c_e(z) \cdot c_f \cdot A_{ref}$$

donde:

- $\frac{1}{2} \rho v_b^2(T)$ es la presión de la velocidad básica del viento, con ρ como densidad del aire con valor 1,25 kg/m³ y v_b como la velocidad básica del viento para un período de retorno T, con valor 27.04 m/s.
- c_e es el coeficiente de exposición que depende de la altura z , según:

$$c_e(z) = k_r^2 \left[c_0^2 \ln^2\left(\frac{z}{z_0}\right) + 7 \cdot k_l c_0 \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \right]$$

donde k_l es el factor de turbulencia que se tomará como 1

$$c_e(26.23 \text{ m}) = 0.216^2 \left[1.1^2 \ln^2\left(\frac{26.23}{0.30}\right) + 7 \cdot 1 \cdot 1.1 \cdot \ln\left(\frac{26.23}{0.30}\right) \right] = 2.73$$

- c_f es el coeficiente de fuerza del elemento, que en dicho caso viene definido para una geometría circular con superficie lisa ($\emptyset v_b(T) \sqrt{c_e(z)} > 6 \text{ m}^2/\text{s}$) con un valor de 0.7.
- A_{ref} es el área de referencia que se define como la proyección del área sólida expuesta sobre el plano perpendicular a la dirección del viento. Para este caso se va a considerar como un área rectangular (proyección lateral del tubo de 4 metros) por metro longitudinal, por lo que:

$$A_{ref} = 4 \text{ m}^2/\text{m}$$

Por lo tanto:

$$\frac{F_w}{m} = \left[\frac{1}{2} 1.25 \cdot 27.04^2 \right] 2.73 \cdot 0.7 \cdot 4 = 3499.02 \frac{\text{N}}{\text{m}} = 3.50 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Esta acción debería ser obtenida mediante ensayos de túnel de viento debido a la peculiaridad de su geometría. De todas formas, se va a calcular los empujes del tubo como los definidos para un tablero en la IAP11.

Para el empuje horizontal (dirección Y) provocado por el viento transversal se puede considerar como tablero de alma llena, pero debido a las limitaciones del factor $c_{f,x}$ que define la normativa, se va a considerar el coeficiente que se ha definido anteriormente para una geometría circular, con valor 0.7.

De esta forma para el empuje horizontal provocado por el viento transversal, la fuerza lineal en dirección y serán:

$$q_{w,h} = \frac{F_w}{m} = 3.50 \frac{kN}{m}$$

Para el empuje vertical (dirección Z) provocado por el viento transversal, debido a que en la dirección vertical la geometría tiene la misma sección, todos los coeficiente obtenidos anteriormente para el cálculo de la fuerza horizontal serán iguales, a excepción del coeficiente c_f que en este caso tendrá un valor de 0.9. De esta forma para el empuje vertical provocado por el viento transversal, la fuerza lineal en dirección z serán:

$$q_{w,v} = q_{w,h} = 4.50 \frac{kN}{m}$$

El empuje longitudinal (dirección X) producido por el viento longitudinal será un porcentaje del empuje transversal definido por el 25% y una fracción.

Esta fracción viene dada por:

$$\% = 1 - \left[\frac{7}{c_0 \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) + 7} \right] \phi \left[\frac{L}{L(z)} \right]$$

donde:

- $c_0 = 1.1$
- ϕ es un factor que depende de L y L(z):

$$\phi = 0.230 + 0.182 \ln\left(\frac{L}{L(z)}\right)$$

donde L es la longitud sobre la que actúa el empuje longitudinal, con valor en este caso de 182 m (longitud irregular en el recorrido: 56+70+56) y L(z) es la longitud integral de la turbulencia que para valores entre z_{min} y 200 toma el valor de:

$$L(z) = 300 \left(\frac{z}{200}\right)^\alpha$$

donde α depende del tipo de entorno, que en el caso en estudio es tipo III, con valor de α igual a 0.61

$$L(26.23) = 300 \left(\frac{26.23}{200}\right)^{0.61} = 86.89 \text{ m}$$

y donde el v

$$\phi = 0.230 + 0.182 \cdot \ln\left(\frac{56 + 71 + 56}{86.89}\right) = 0.36$$

Por lo tanto, la fracción será de:

$$\% = 1 - \left(\frac{7}{1.1 \cdot \ln\left(\frac{26.23}{0.3}\right) + 7} \right) \cdot 0.36 = 79\%$$

De esta forma el empuje longitudinal tendrá un valor de:

$$q_{w,l} = \frac{F_w}{m} \cdot \frac{1}{4} \cdot 0.79 = 0.69 \frac{kN}{m}$$

Para las pilas del puente, se considerará el mismo procedimiento descrito para el tubo, pero en este caso solamente se tendrá en cuenta el empuje en sus laterales, es decir, en direcciones X e Y.

Para reducir los cálculos, se va a considerar la altura media de la pila más alta, es decir, 12.12 m y la sección definida como BxH=1.5x3.5 m². Los valores finales de cálculo son:

$$F_{wB} = 76.76 \text{ kN}; q_{wB} = 3.17 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$F_{wH} = 134.34 \text{ kN}; q_{wH} = 5.54 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

4.1.3.4. Temperatura

Siguiendo las directrices de la IAP-11, se va a considerar el tubo como tablero tipo 1 (tablero de acero con sección transversal en cajón) y la acción de la temperatura como dos componentes: la uniforme de temperatura y las de diferencia de temperatura.

En la localización en la que se encuentra el puente se obtienen las siguientes temperaturas máximas y mínimas para un intervalo de temperatura máxima anual del aire entre 42 y 44 °C y una zona de clima invernal 3 con una latitud de 740 m, para un período de retorno de 50 años:

$$T_{m\acute{a}x} = 43 \text{ }^{\circ}\text{C}; T_{min} = -16.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Para un período de retorno de 100 años, las temperaturas serán:

$$T_{m\acute{a}x,p} = 44.6 \text{ }^{\circ}\text{C}; T_{min} = -18.33 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

La componente uniforme de la temperatura o temperatura efectiva se define la temperatura mínima o máxima del emplazamiento para el período de retorno deseado, y un incremento o decremento de temperatura que depende de las características del tablero. Para este caso, se considera que el tubo es un tablero de acero de vigas armadas, por lo que el incremento de temperatura será de -3 °C en ambos casos:

$$T_{e,min} = -21.33 \text{ }^{\circ}\text{C}; T_{e,m\acute{a}x} = 41.66 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

De esta forma la variación de la componente uniforme de la temperatura será de:

$$\Delta T_N = 63 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Para la componente de la diferencia de temperatura vertical producirá un gradiente de temperaturas en la altura de la sección transversal, cuyo valor será de:

$$\Delta T_{M,heat} = 18 \text{ }^{\circ}\text{C}; \Delta T_{M,cool} = 13 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Estos valores se ven afectados por un factor corrector k_{sur} que depende del espesor del tablero. Para un tablero tipo 1 sin impermeabilización ni pavimentación como es el caso los valores del factor serán:

$$k_{sur,sup} = 0.7; k_{sur,inf} = 0.9$$

Por lo tanto, los gradientes verticales quedarán como:

$$\Delta T_{M,heat} = 18 \cdot 0.7 = 12.6 \text{ }^{\circ}\text{C}; \Delta T_{M,cool} = 13 \cdot 0.9 = 11.7 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Para el caso del modelo lámina se considerará los mismos valores de temperatura uniforme y de gradiente vertical.

La temperatura se considerará en las pilas según una diferencia de temperatura con el tablero según:

$$|T_{pilono} - T_{tablero}| \geq 15 \text{ } ^\circ\text{C}$$

De esta forma, para que las pilas cumplan con la condición anterior las temperaturas mínimas y máximas serán, siendo la variación de la componente uniforme de las pilas:

$$T_{e,min} = -6.33 \text{ } ^\circ\text{C} ; T_{e,máx} = 26.66 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_N = 33 \text{ } ^\circ\text{C}$$

4.1.3.5. Diferencia de presión debida al vacío

La diferencia de presión debida al vacío solamente se aplicará en el modelo lámina para la comprobación de imperfecciones. Se tomará como valor la que se define en el artículo de referencia:

$$p = 101 \frac{kN}{m^2}$$

Esta quedará repartida en toda la superficie interna del tubo en dirección al eje del tubo.

4.1.4. Terreno valle del río Adaja

El terreno sobre el que se asienta el viaducto se ha obtenido mediante los datos proporcionados por el mapa geológico de España E 1:50.000 del Instituto Geológico y Minero de España (IGME) en su hoja 428. Concretamente el terreno en estudio se describe en la hoja 16-17 de Julio de 1979 en la localización que llama “PUENTE DEL TREN (RIO ADAJA)”.

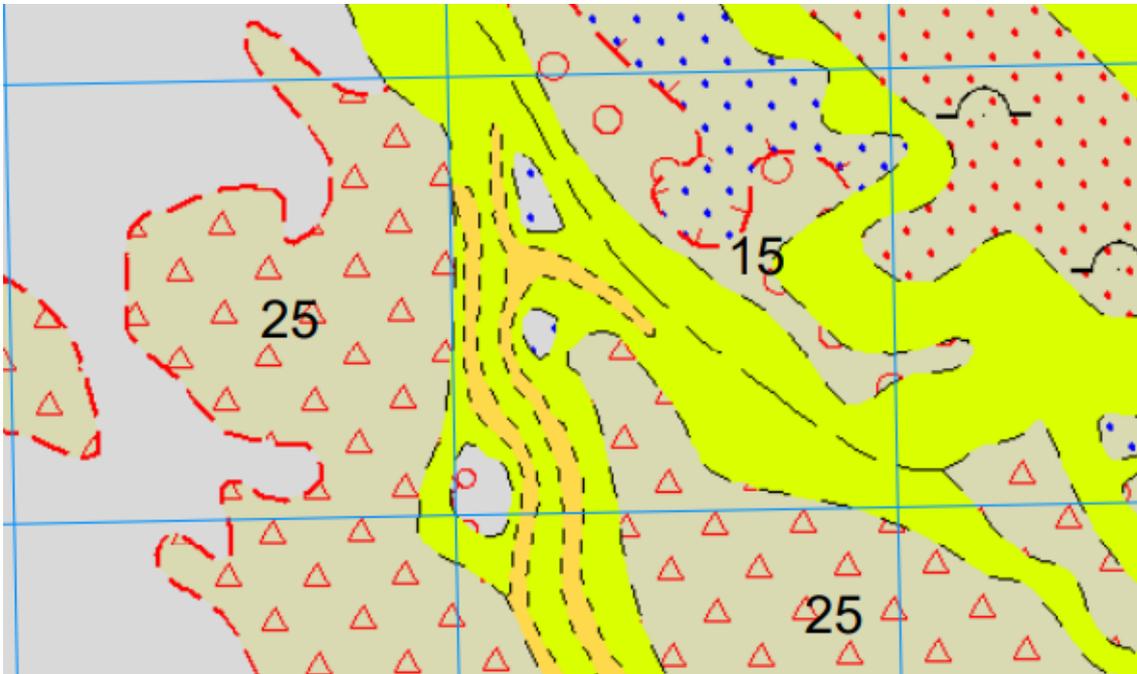


Figura 67. Datos geológicos de la localización del viaducto del Hyperloop en el río Adaja. Fuente: Mapa Geológico Continuo de España a escala 1/50.000

Las diferentes capas de sustratos que se encuentran en la figura son:

Símbolo	Descripción
	Superficie de Coca-Arévalo. Arcosas blanquecinas fluviales con gravilla de cuarzo. Fases de arenas eólicas, intercaladas, con o sin manto eólico superficial. (Cuaternario Pleistoceno Superior)
	Terrazas del sistema Eresma-Adaja-Voltoya. Arcosas rojizas con gravas de cuarzas. (Cuaternario Pleistoceno Inferior)
	Arcosas fangosas ocre y arcosas blanquecina ocasionalmente cementadas por carbonatos. Suelos calcimorfos y calizas palustres. A techo niveles rojizos en la Zona de Coca. (Terciario Neógeno Mioceno Medio Astaraciense Inferior)
	Arcosas fangosas rojizas y gris-verdosas y arcosas. Intercalaciones de arcosas blanquecinas cementadas por carbonatos. (Terciario Neógeno Mioceno Medio Astaraciense Inferior)

Tabla 15. Tabla de estratos de la localización del Hyperloop en el río Adaja. Fuente: Mapa Geológico Continuo de España a escala 1/50.000

Los materiales que se encuentran en la zona serán materiales de tipo fluvial y estarán formados por la alternancia de estratos de arena, limo y arcilla. Se ha supuesto que todos los estratos son horizontales y continuos, delimitándose por la topografía del valle.

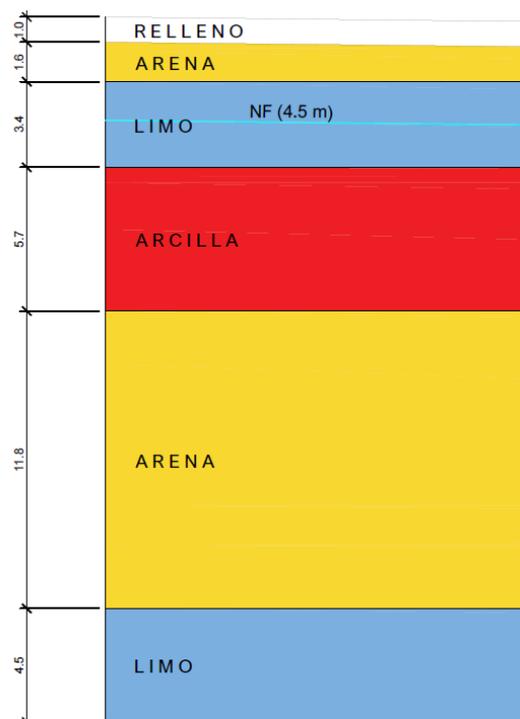


Figura 68. Perfil estratigráfico del suelo. Río Adaja (Olmedo). Fuente: Elaboración propia

A falta de información, se ha supuesto que existe una primera capa de relleno con una profundidad constante en el perfil de 1 metro de profundidad; y que el nivel freático tendrá una profundidad constante respecto a la superficie de 4.1 m, variando su pendiente a la llegada de la lámina de agua del río (choque con el estrato de arena).

Debido a la falta de información acerca de las características del terreno, para la obtención de sus propiedades se han estimado en función a los datos que se muestran para algunos terrenos en la ROM 0.5 en sus tablas 2.4.2. y 2.4.3 y en el texto *Bases para el Diseño de Fundaciones* de Bengt H. Fellenius.

Material	P (m)	γ_d (kN/m^3)	ϕ ($^\circ$)	c (kPa)	c' (kPa)
Relleno	1.0	15	-	-	-
Arena	1.5	20	36	0	0
Limo	3.4	17	30	-	50
Arcilla	5.7	19	28	-	50
Arena	11.8	20	36	0	0
Limo	4.5	17	30	-	50

Tabla 16. Propiedades del suelo. Río Adaja (Olmedo). Fuente: Elaboración propia

4.2. Comprobación estructural

4.2.1. Definición de los modelos

Para el estudio de la solución propuesta se van a elaborar dos modelos, un primer modelo de barras donde se evaluarán los estados límite de servicio y últimos de resistencia e inestabilidad, y otro modelo lámina donde se evaluará la inestabilidad y las tensiones en las secciones más solicitadas. Tanto un modelo como el otro tratan de evaluar el comportamiento de los 7 vanos centrales de la estructura.

El modelo de barras consta de 11 vanos: 4 vanos laterales con luces de 28 m, 2 vanos de 56 m y un vano central de 63 m. cada uno de los vanos irá apoyado en una pila cuya longitud es la que se especifica en la siguiente imagen, donde tanto en la entrada como en la salida del viaducto por el valle se supone que el viaducto tendrá una altura de pilas de 7 m.

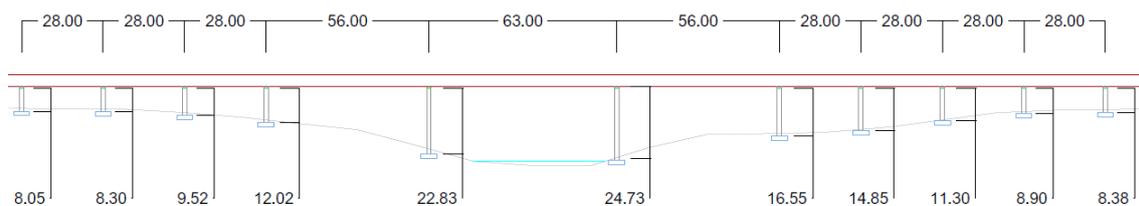


Figura 69. Esquema del viaducto para el hyperloop por su paso por el río Adaja. Altura de las pilas. Fuente: Elaboración propia

En el modelo de barras cabe destacar que el vuelo del eje del tubo con respecto a las pilas respeta los 2 m de radio del tubo y los 0.65 m del aparato de apoyo. La unión entre los elementos permite el giro perpendicular al eje de tubo, impidiendo el desplazamiento longitudinal de este, simulando comportamiento de apoyo simple. Las pilas se encontrarán empotradas en su base. En ambos extremos del modelo se impide la expansión en dirección longitudinal del tubo, incluyéndose una rigidez al giro de la sección con valor $k_\theta = 14077000 \text{ kN} \cdot \text{m}/\text{rad}$. Los elementos que conforman el modelo estarán divididos en 10 subelementos para mejorar su comportamiento.



Figura 70. Modelo de barras del viaducto para el hyperloop por su paso por el río Adaja. Fuente: Elaboración propia

Las acciones a tener en cuenta para el modelo de barras serán las cargas de peso propio, cargas muertas, el efecto dinámico del paso del vehículo, viento, acciones térmicas y nieve, definidas en la siguiente tabla (a excepción del peso propio y las cargas muertas).

Acciones	Tubo	Pila
Vehículo	10.53 kN/m en los 19 m centrales del vano central	-
Viento	Horizontal: 3.50 kN/m Vertical: 4.50 kN/m Longitudinal: 0.69 kN/m	Cara 1.5 m: 3.17 kN/m Cara 3.5 m: 5.54 kN/m
Térmicas	$\Delta T_{M,cool} = 11.7 \text{ } ^\circ\text{C}$ $\Delta T_N = 63 \text{ } ^\circ\text{C}$	$\Delta T_N = 33 \text{ } ^\circ\text{C}$

Tabla 17. Resumen acciones aplicadas en modelo de barras. Fuente: Elaboración propia

Las cargas de viento vertical se aplicarán en dirección negativa por ser el caso más desfavorable para el estudio de ELU de resistencia. El valor de simultaneidad de las acciones térmicas será $\omega_M = 0.75$.

El modelo lámina estará conformado por una geometría tubular que consta de 3 tramos tubulares: uno central de 63 m y otro a cada lado de 28 m con condiciones de simetría a cada lado, unido a una pilas de 22.83 m y 24.73 m mediante unos aparatos de apoyo que permiten el giro en la dirección perpendicular al eje longitudinal del tubo, teniendo un comportamiento de apoyo simple. Estos están conformados por una serie de chapas de 50 mm de espesor con la configuración de las siguientes figuras. En la localización del apoyo existirá un aumento del espesor de la lámina de 100 mm en los 0.40 m centrales, atenuándose en 0.30 m a cada lado hasta conseguir los 25 mm de la lámina del tubo; acompañados por 3 anillos centrales. Además, en la longitud del tubo existirán un conjunto de tres anillos de rigidización cada 7 m acompañados con un aumento de espesor de la lámina de 50 mm en 0.40 m, atenuándose hasta los 25 mm de espesor del tubo en los 0.20 m próximos a cada lado. Tanto los anillos del apoyo como los centrales tendrán una sección rectangular de 0.10 m de alto por 0.05 m. de ancho. Las descripciones geométricas de estos elementos se encuentran en las figuras de los apartados 3.3. y 3.4.

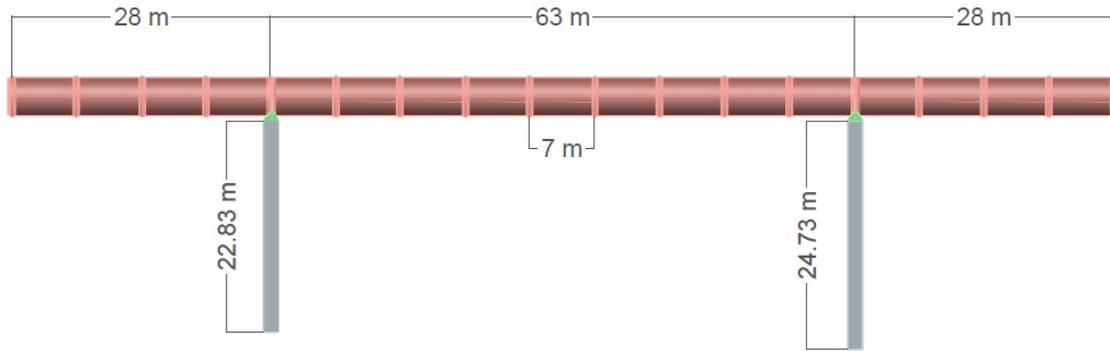


Figura 71. Esquema 3D del modelo lámina de 70 m de luz del viaducto para el hyperloop por su paso por el río Adaja. Fuente: Elaboración propia

Al igual que en el apartado 3.3, los elementos se reparten en el alzado cada 3°, y sus dimensiones varían en función de su cercanía al apoyo. De 0 m a 2.8 m, los elementos tienen una relación de dimensiones 1:1, de 2.8 m a 5.6 m la relación es de 1:1.5, de 5.6 m a 8.4 m la relación es de 1:2, y a partir de los 8.4 m la relación es de 1:3.

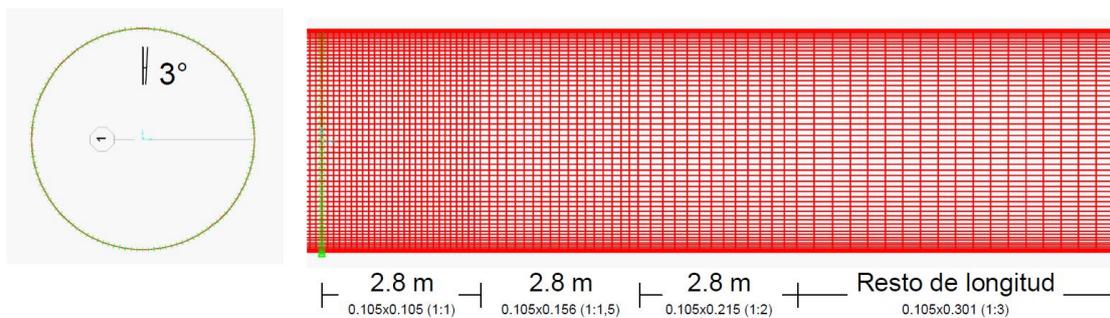


Figura 72. Alzado y perfil del modelo lámina para el caso en estudio. Fuente: Elaboración propia

En las condiciones de contorno en los extremos del modelo se impide el desplazamiento en dirección del eje del tubo y las pilas se encuentran empotradas en su base.

Las acciones a tener en cuenta para el modelo lámina serán las acciones de peso propio, cargas muertas, acciones térmicas y la presión de vacío, definidas en la siguiente tabla (a excepción del peso propio y las cargas muertas). En los estudios siguientes solamente se estudiará el tubo, por lo que las acciones que se tendrán en cuenta serán las aplicadas en el tubo.

Acciones	Tubo
Térmicas	$\Delta T_{M,cool} = 11.7 \text{ } ^\circ\text{C}$
	$\Delta T_N = 63 \text{ } ^\circ\text{C}$
Vacío	$p = 101 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$

Tabla 18. Resumen acciones aplicadas en el modelo lámina. Fuente: Elaboración propia

4.2.2. Estado Límite de Servicio

Para evaluar el estado límite de servicio se va a tomar como referencia el criterio que se especifica en el Anejo A2.4.4.3.2. de *Criterios de flecha para comprobar el confort de los pasajeros* del Eurocódigo 0: Bases de diseño estructural (España Ministerio de Fomento y Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR) 2019), según el gráfico obtenido para velocidades elevadas.

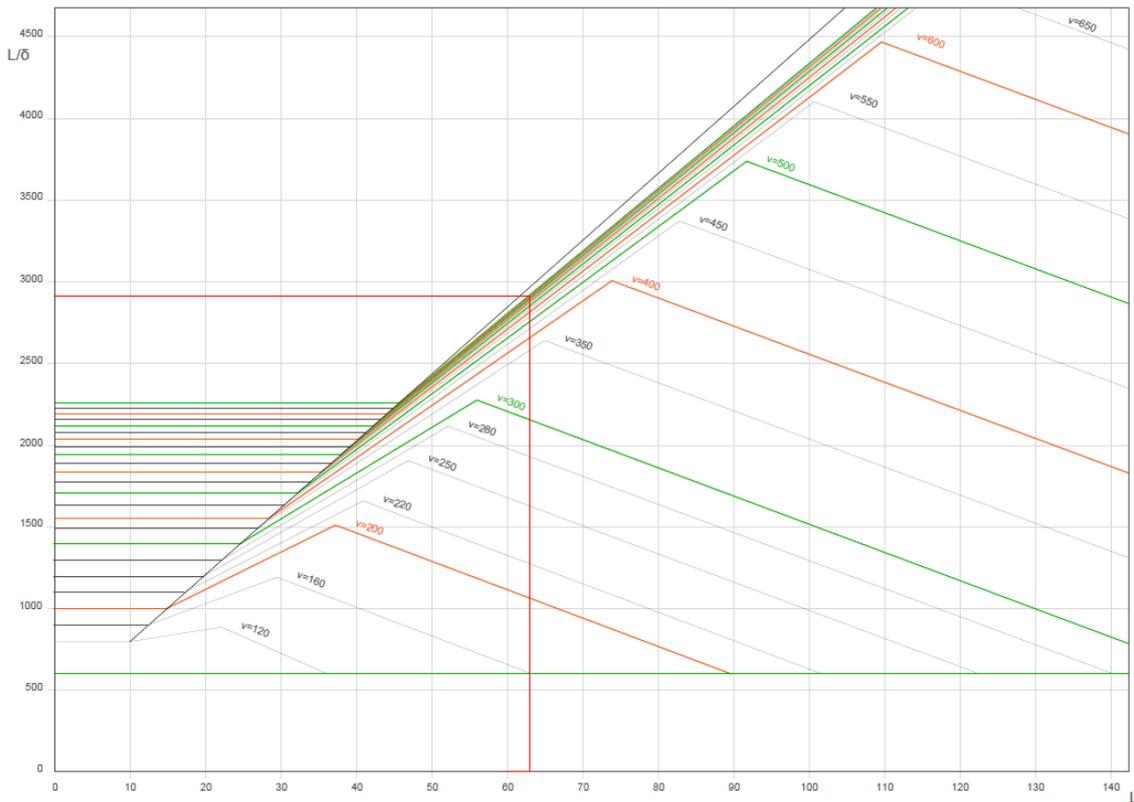


Figura 73. Flecha vertical máxima admisible δ según estudio estadístico basado en la figura A2.3 del Eurocódigo 0, para el caso de 63 m de luz de vano. Fuente: Elaboración propia

El valor de la relación L/δ considerando que la cápsula alcanza los 1000 km/h será de 2910, que multiplicado por el factor de reducción de valor 0.9 para una configuración de viga continua de tres o más vanos, quedará en 2619.

Por lo tanto, la flecha admisible toma un valor de:

$$\delta = \frac{L}{2619} = \frac{63}{2619} = 0.024 \text{ m} = 2.41 \text{ cm}$$

La flecha producida por la acción del vehículo con un factor de impacto $\eta = 2$ tiene un valor de 0.44 cm.

Como se aprecia, el valor obtenido de flecha es muy inferior al valor de la flecha máxima admisible, por lo que se puede indicar que, a falta de un estudio detallado que se centre en la aceleración que soportaría el usuario a velocidades mayores de 300 km/h, el viaducto cumpliría frente al estado límite de servicio propuesto.

4.2.3. Estado Límite Último de Resistencia

Para estudiar los estados límite último de resistencia y de inestabilidad se va a tomar como referencia los métodos definidos en el capítulo IX de *Estados límite últimos* de la Instrucción de acero estructural (EAE) (España Ministerio de Fomento 2011).

La estructura está formada por un tubo de 4 m de diámetro con un espesor de 25 mm. Siguiendo el artículo 20.2. de clasificación de las secciones transversales, más concretamente la tabla 20.3.c. de esbelteces máximas para casos especiales de paneles comprimidos, la sección tubular pertenece a una clase de sección 4, como se demuestra a continuación.

$$C3 \rightarrow d/t \leq 90\varepsilon^2 ; \varepsilon = \sqrt{235/f_y} = 0.71$$

$$d/t = \frac{4000}{25} = 160 ; 90\varepsilon^2 = 90 \cdot 0.51 = 45.98 \rightarrow \frac{d}{t} > 90\varepsilon^2 \rightarrow C4$$

Al igual que se ha hecho en el apartado 3.2.2., se van a realizar los cálculos como si se tratara de una sección de clase 3, para después estudiar el comportamiento más preciso de la sección como lámina frente a las secciones que la solicita.

Las comprobaciones a satisfacer por la estructura en su localización más solicitada serán:

- ELU de Resistencia

$$\sigma_{x,Ed} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M0}}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{c,Rd}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1$$

- ELU de inestabilidad

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1$$

Las características geométricas de la sección son las que se definen a continuación:

$$\begin{aligned} A &= 0.3122 \text{ m}^2 & W_{pl} &= 0.3950 \text{ m}^3 \\ I_{yy} = I_{zz} &= 0.6166 \text{ m}^4 & i &= 1.4054 \text{ m} \\ A_v &= 0.1988 \text{ m}^2 & I_T &= 1.2333 \text{ m}^4 \\ W_{el} &= 0.3083 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Como coeficientes parciales para la resistencia para los estados límite últimos se toman:

$$\gamma_{M0} = \gamma_{M1} = 1.05$$

Las acciones soportadas por el viaducto serán las de peso propio, cargas muertas como la mitad de las cargas de peso propio, viento como una acción vertical de valor 4.5 kN/m, otra horizontal de 3.5 kN/m y otra longitudinal de 0.69 kN/m, acciones térmicas como $T_u + T_a = 60 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_g^+ = 12.6 \text{ }^\circ\text{C}$ con un valor de simultaneidad $\omega_M = 0.75$ y el peso de

la cápsula se considera como una carga repartida en los 19 m centrales del vano central de valor 10.53 kN/m .

La combinación de acciones considerada es la que se muestra a continuación, donde la acción de temperatura se toma como predominante y donde las acciones de viento, peso propio, vehículo y las acciones de temperatura crean esfuerzos de mismo signo:

$$\gamma_{G,g}G_{k,g} + \gamma_{Q,T}Q_{k,T} + \gamma_{Q,w}\psi_{Q,w}Q_{k,w} + \gamma_{Q,F}\psi_{Q,F}Q_{k,F}$$

Los coeficiente de combinación y seguridad son: $\gamma_{G,g} = 1.35$, $\gamma_{Q,i} = 1.50$, $\psi_{Q,w} = 0.6$, $\psi_{Q,F} = 0.8$.

Los esfuerzos a los que estará sometido el viaducto serán los que se muestran en las siguientes figuras, donde solamente se muestran los esfuerzos para los tres vanos centrales.



Figura 74. Diagrama de esfuerzo axiles en los tres vanos centrales del modelo del viaducto para hyperloop de 63 m de vano central. Fuente: Elaboración propia

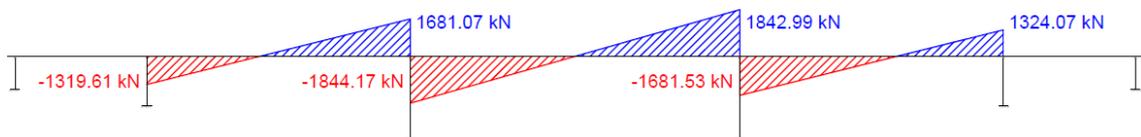


Figura 75. Diagrama de esfuerzo cortantes V_z en los tres vanos centrales del modelo del viaducto para hyperloop de 63 m de vano central. Fuente: Elaboración propia



Figura 76. Diagrama de esfuerzo cortantes V_y en los tres vanos centrales del modelo del viaducto para hyperloop de 63 m de vano central. Fuente: Elaboración propia

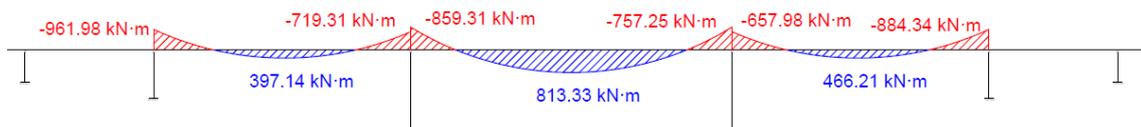


Figura 77. Diagrama de momentos flectores M_z en los tres vanos centrales del modelo del viaducto para hyperloop de 63 m de vano central. Fuente: Elaboración propia

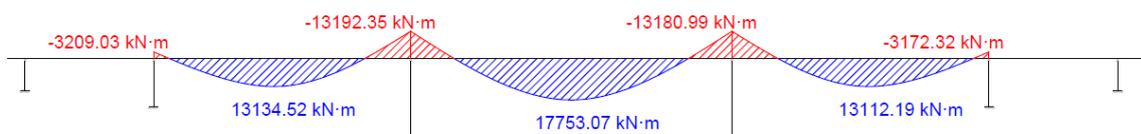


Figura 78. Diagrama de momentos flectores M_y en los tres vanos centrales del modelo del viaducto para hyperloop de 63 m de vano central. Fuente: Elaboración propia

Los esfuerzos de diseño serán los siguientes:

$$\begin{aligned} N_{Ed} &= 77154.53 \text{ kN} & M_{z,Ed} &= 859.31 \text{ kN} \cdot \text{m} \\ V_{z,Ed} &= 1844.17 \text{ kN} & M_{y,Ed} &= 17753.07 \text{ kN} \cdot \text{m} \\ V_{y,Ed} &= 109.47 \text{ kN} \end{aligned}$$

El primer paso que se va a realizar es comprobar si existe una reducción de la resistencia de cálculo a flexión y axil por la interacción flector-cortante-axil, debiéndose cumplir:

$$V_{Ed} < \frac{1}{2} V_{pl,Rd}$$

donde $V_{pl,Rd}$ es la resistencia plástica de cálculo a cortante con valor:

$$\begin{aligned} V_{pl,Rd} &= \frac{A_v (f_y / \sqrt{3})}{\gamma_{M0}} = 50271.39 \text{ kN} \\ 1844.17 &< \frac{1}{2} 50271.39 = 25135.7 \text{ kN} \\ 109.47 &< 25135.7 \text{ kN} \end{aligned}$$

De esta forma no existirá reducción de la resistencia de cálculo a flexión y axil.

Se procede a la comprobación del estado límite último de resistencia:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{c,Rd}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1$$

donde los términos son los siguientes:

- $N_{c,Rd}$ es la resistencia de cálculo de la sección a compresión

$$N_{c,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 136773.3 \text{ kN}$$

- $M_{c,Rd}$ es la resistencia de cálculo de la sección a flexión

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{el} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 135064.8 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Por lo tanto:

$$\frac{77154.53}{136773.3} + \frac{17753.07}{135064.8} + \frac{859.31}{135064.8} = 0.564 + 0.131 + 0.006 = 0.701 < 1$$

En cuanto a la comprobación tensional, la tensión máxima σ_x se localiza en la cara superior de la sección del vano central con valor de:

$$\begin{aligned} \sigma_{x,Ed} &= 301.85 \text{ MPa} \\ \frac{f_y}{\gamma_{M0}} &= \frac{460}{1.05} = 438.10 \text{ MPa} \\ 301.85 \text{ MPa} &< 438.10 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Como se puede apreciar, la estructura de viaducto para el hyperloop con una luz del vano central de 63 m cumpliría para el estudio del estado límite último de resistencia.

4.2.4. Estado Límite Último de Inestabilidad

Se procede a la comprobación del estado límite último de inestabilidad:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1$$

donde los términos son los siguientes:

- N_{Rk}/γ_{M1} es la resistencia de cálculo de la sección a compresión

$$\frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = 136773.3 \text{ kN}$$

- $M_{y,Rk}/\gamma_{M1}$ es la resistencia de cálculo de la sección a flexión en el eje y-y

$$\frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}} = \frac{W_{el} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = 135064.8 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

- $M_{z,Rk}/\gamma_{M1}$ es la resistencia de cálculo de la sección a flexión en el eje z-z

$$\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}} = \frac{W_{el} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = 135064.8 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

- χ_{LT} es el coeficiente de reducción para pandeo lateral, que para el caso de elementos no susceptibles a deformaciones por torsión tiene un valor de 1.
- χ_y, χ_z son los coeficientes de reducción para pandeo por flexión. Estos vienen definidos según las tablas del Anejo IV de la EAE donde se relaciona el coeficiente de reducción respecto a la esbeltez relativa $\bar{\lambda}$ según una curva de pandeo. Esta curva se define en función de la geometría de la sección, en algunos casos de la forma de fabricación del perfil y de la resistencia del material utilizado.

Para este caso, la sección será una sección de perfil hueco con forma tubular y se supondrá que la pieza se ha conformado en frío. Por ello junto con el material del que está hecho S460, la curva utilizada será la curva de pandeo c.

La esbeltez relativa se define como la siguiente relación:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}}$$

donde N_{cr} es el esfuerzo axial crítico elástico para el modo de pandeo considerado, definido como:

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_{cr}^2}$$

donde L_{cr} es la longitud de pandeo en el plano de flexión definida como:

$$L_{cr} = \beta \cdot L$$

donde β es el coeficiente de pandeo que para el caso de una viga biapoyada tiene el valor de 1, y L que es la longitud del tramo estudiado, de valor 56 m.

Por lo tanto:

$$L_{cr} = 1 \cdot 63 = 63 \text{ m}$$

$$N_{cr} = 306677.17 \text{ kN}$$

$$\bar{\lambda} = 0.68$$

A partir del valor de $\bar{\lambda}$ y la curva de pandeo c se obtiene el valor de χ :

$$\chi = 0.73$$

- $k_{yy}, k_{yz}, k_{zy}, k_{zz}$ son los coeficientes de interacción. Estos se han obtenido mediante el Método 2 definido en la tabla 35.3.c (a) de la EAE, donde se definen los coeficientes de interacción k_{ij} para elementos no susceptibles a deformación por torsión. Se definen como:

$$k_{yy} = C_{my} \left(1 + 0.6 \cdot \bar{\lambda}_y \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$$

$$k_{yz} = k_{zz}$$

$$k_{zy} = 0.8 \cdot k_{yy}$$

$$k_{zz} = C_{mz} \left(1 + 0.6 \cdot \bar{\lambda}_z \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$$

donde C_{my} y C_{mz} son los factores para la obtención del momento equivalente definido en la tabla 35.3.c (c) de la EAE. El caso en estudio pertenecerá al segundo supuesto en el eje y-y y al tercer supuesto en el eje z-z, con las condiciones de rango de $\alpha_s = -0.95$, $\alpha_h = -0.73$ y $\psi = 1$, por lo que el valor de estos factores para una acción uniforme será:

$$C_{my} = 0.95 - 0.05 \cdot \alpha_h = 0.91$$

$$C_{mz} = 0.1 - 0.8 \cdot \alpha_s = 0.86$$

$$k_{yy} = 1.20 ; k_{zz} = 1.13 ; k_{zy} = 0.96 ; k_{yz} = 1.13$$

Por lo tanto:

$$\frac{77154.53}{0.73 \cdot 136773.3} + 1.20 \frac{17553.07}{1 \cdot 135064.8} + 1.13 \frac{859.31}{135064.8} = 0.77 + 0.16 + 0.01 = 0.94$$

$$\frac{77154.53}{0.73 \cdot 136773.3} + 0.96 \frac{17553.07}{1 \cdot 135064.8} + 1.13 \frac{859.31}{135064.8} = 0.77 + 0.13 + 0.01 = 0.91$$

Como se puede apreciar, la estructura de viaducto para el hyperloop según la configuración definida con una luz del vano central de 63 m cumpliría para el estudio del estado límite último de inestabilidad.

4.2.5. Estudio Inestabilidad

Para el estudio de la inestabilidad se realiza un estudio del modo del pandeo del tubo para el modelo lámina definido en el apartado 4.2.1., donde cabe destacar la localización de los anillos rigidizadores cada 7 m.

Debido a la fuerte influencia de la temperatura y de la variación de presión, principalmente en los aparatos de apoyo y en los anillos rigidizadores, se va a estudiar el modo de pandeo de los siguientes casos:

- Caso de acciones térmicas
- Caso de acciones térmicas y presión
- Caso de combinación de acciones según ELU

Para poder conocer la influencia de las acciones térmicas y de la diferencia de presión, la combinación del segundo caso se realizará con coeficientes de combinación unidad. En cambio, para el tercer caso, la combinación de acciones se realizará como la del apartado anterior, donde la acción de temperatura se toma como predominante y la acción de presión de vacío se considera como una acción permanente:

$$\gamma_{G,g}G_{k,g} + \gamma_{G,p}G_{k,p} + \gamma_{Q,T}Q_{k,T} + \gamma_{Q,F}\psi_{Q,F}Q_{k,F}$$

donde los coeficientes de combinación y seguridad son: $\gamma_{G,i} = 1.35$, $\gamma_{Q,i} = 1.50$, $\psi_{Q,w} = 0.6$, $\psi_{Q,F} = 0.8$.

A continuación, se muestran el primer modo de pandeo de cada uno de los casos, con su correspondiente factor de pandeo.

Modo de pandeo: Acciones Térmicas

FP=6.55

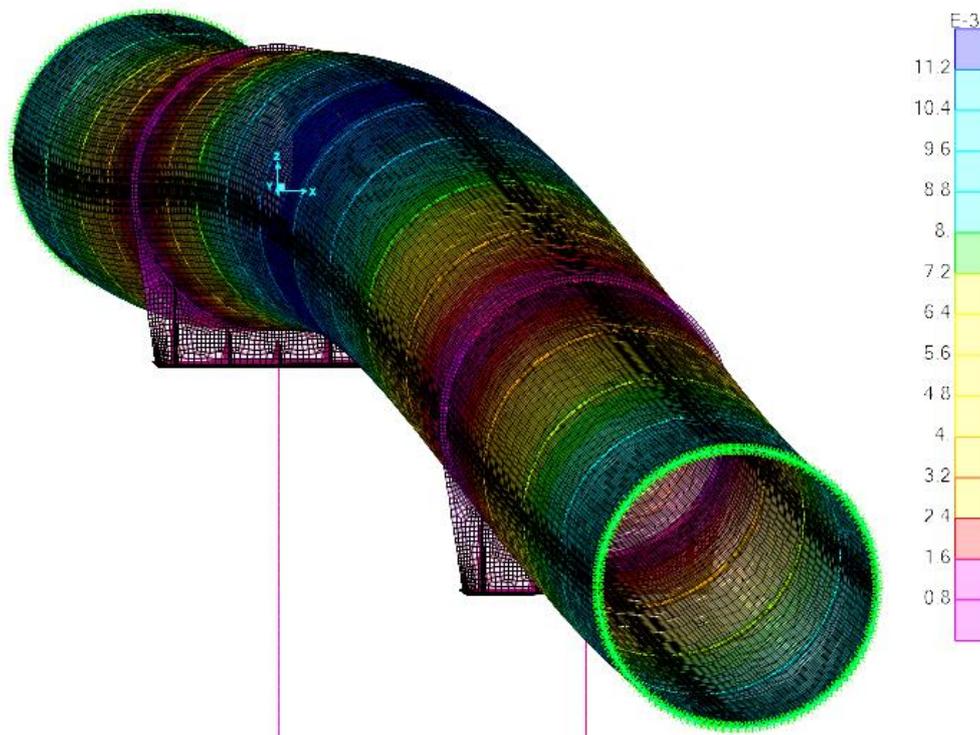


Figura 79. Primer modo de pandeo para el caso de las acciones térmicas. Fuente: Elaboración propia

Modo de pandeo: Acciones Térmicas + Presión

FP=4.71

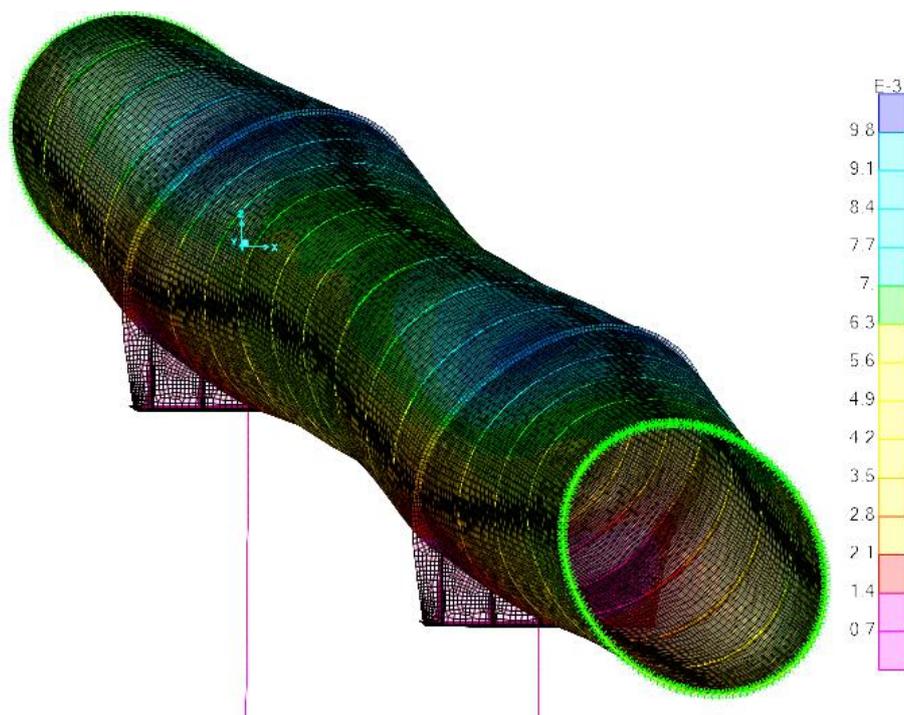


Figura 80. Primer modo de pandeo para el caso de las acciones térmicas y presión.
Fuente: Elaboración propia

Modo de pandeo: Combinación de acciones ELU

FP=3.28

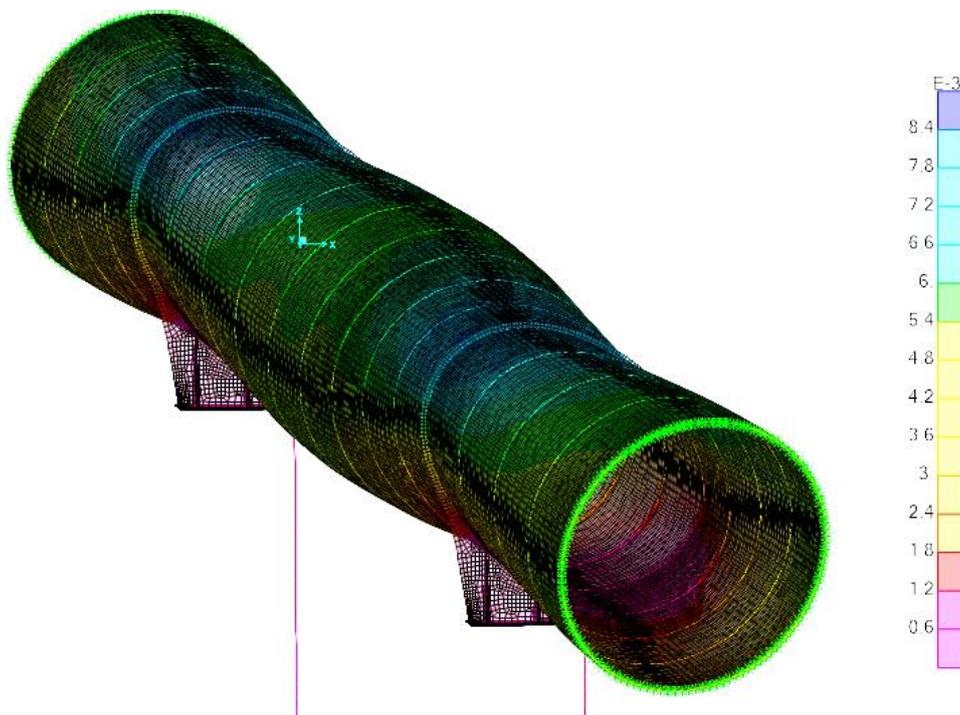


Figura 81. Primer modo de pandeo para el caso de la combinación de acciones ELU.
Fuente: Elaboración propia

El valor del factor de pandeo para el caso de combinación de acciones de estado límite último es de 3.28, superior al valor de 3, por lo que se puede indicar que es un valor aceptable.

4.2.6. Estudio tensional

Como se indicó en el apartado 4.2.3., en este apartado se van a obtener las tensiones en la fibra superior del centro de vano y de la fibra inferior del apoyo frente a la combinación de ELU definido en el apartado anterior, mediante un estudio estático no lineal P-delta en un modelo donde se han introducidos imperfecciones según el primer modo de pandeo.

Para introducir las imperfecciones en el modelo, se ha tomado como referencia el apartado 8 de la Parte 1-6 de Resistencia y estabilidad de láminas del Eurocódigo 3 (España Ministerio de Fomento y Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR) 2013), en el cual se define una amplitud de forma de imperfecciones geométricas equivalentes con respecto a un patrón afín al modo crítico de pandeo. Esta amplitud se define como el máximo entre:

$$\Delta w_{0,eq,1} = \ell_g \cdot U_{n1}$$

$$\Delta w_{0,eq,2} = n_i \cdot t \cdot U_{n2}$$

donde:

- ℓ_g son las longitudes de calibre, definidas en el apartado 8.4.4. de tolerancia de abolladura de este Eurocódigo. Entre los casos que se exponen, el caso en estudio pertenece a los supuestos a) y b) del subapartado (2) ya que existen compresiones de compresión meridionales (a) y compresiones circunferenciales o tensiones tangenciales (b). Las longitudes se definen como:

$$l_{gx} = 4\sqrt{r \cdot t}$$

$$l_{g\theta} = 2.3(l^2 \cdot r \cdot t)^{0.25} \quad l_{g\theta} \leq r$$

donde r es el radio de la lámina (2m), t el espesor de esta (0.025 m) y l es la longitud meridional del segmento laminar (7 m).

- t es el espesor de la pared de la lámina, de valor 0.025 m.
- n_i es un multiplicador de tolerancia, que se recomienda tomar como 25.
- U_{n1}, U_{n2} son los parámetros de amplitud de la imperfección de abolladura que depende de la calidad de tolerancia de fabricación. Se supone una calidad de Clase A o Excelente, donde los valores que toman son 0.010 en ambos casos.

Los valores de las longitudes de calibres serán: l_{gx} toma el valor de 0.894 m y $l_{g\theta}$ el de 2 m, debido a que los valores superan al radio de la lámina. Por lo tanto, el valor de ℓ_g será de 2 m, siendo las amplitudes de forma:

$$\Delta w_{0,eq,1} = 0.02 \text{ m}$$

$$\Delta w_{0,eq,2} = 0.00625 \text{ m}$$

De esta forma, el valor considerado para la amplitud de forma de imperfecciones geométricas equivalente será:

$$\Delta w_{0,eq} = 0.02 \text{ m}$$

Debido a que la acción de la temperatura se considera como predominante y la variación de presión es una acción predominante en las tensiones de las zonas de apoyo y en los anillos de rigidización, las imperfecciones serán proporcionales al primer modo de pandeo del caso de las acciones térmicas y presión obtenido en el apartado anterior.

En las siguientes figuras se muestran los diagramas de tensiones en dirección longitudinal S11, las tensiones en dirección circunferencial S22 y las tensiones de Von Mises, para la fibra inferior del apoyo del vano central y la fibra superior del centro de vano.

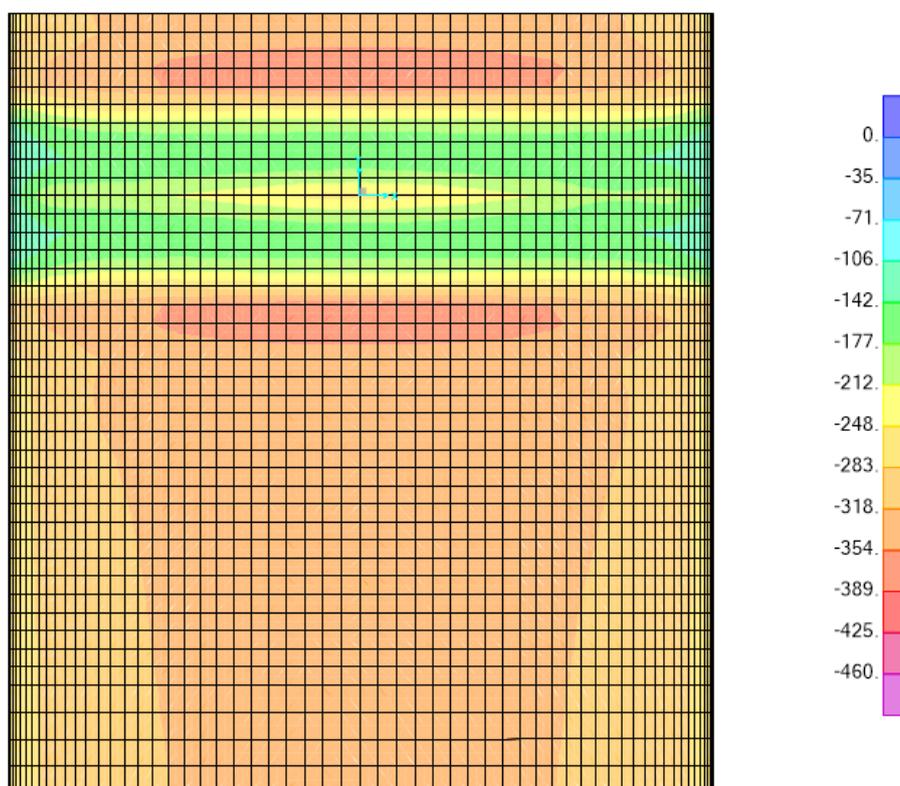


Figura 82. Tensiones longitudinales S11 (MPa) en la fibra inferior del apoyo. Fuente: Elaboración propia

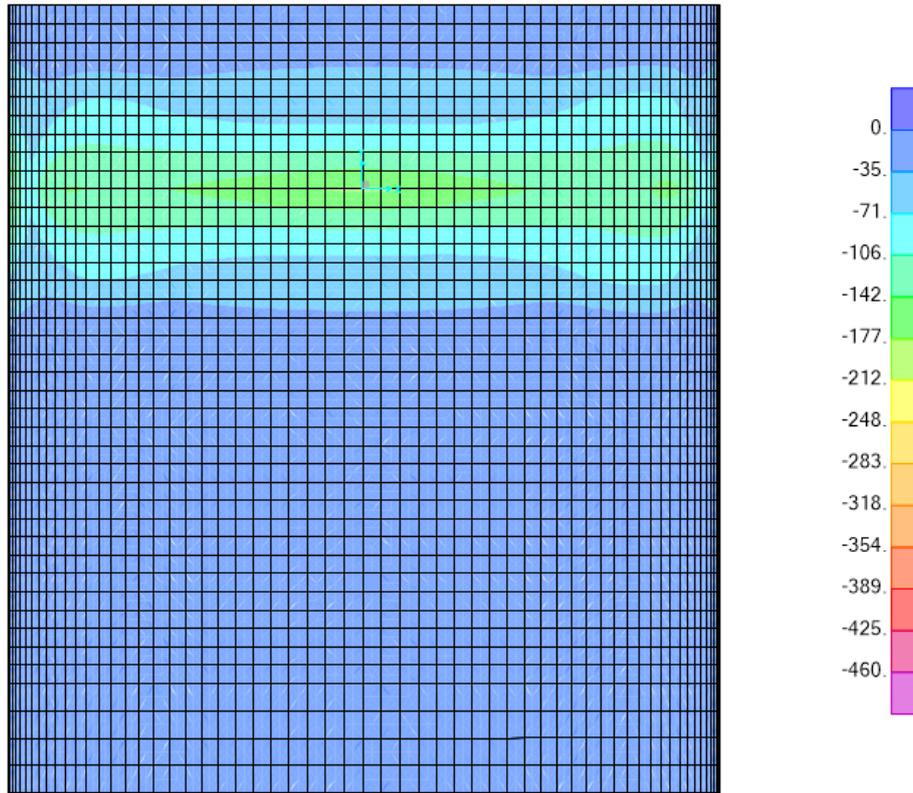


Figura 83. Tensiones circunferenciales S_{22} (MPa) en la fibra inferior del apoyo.
Fuente: Elaboración propia

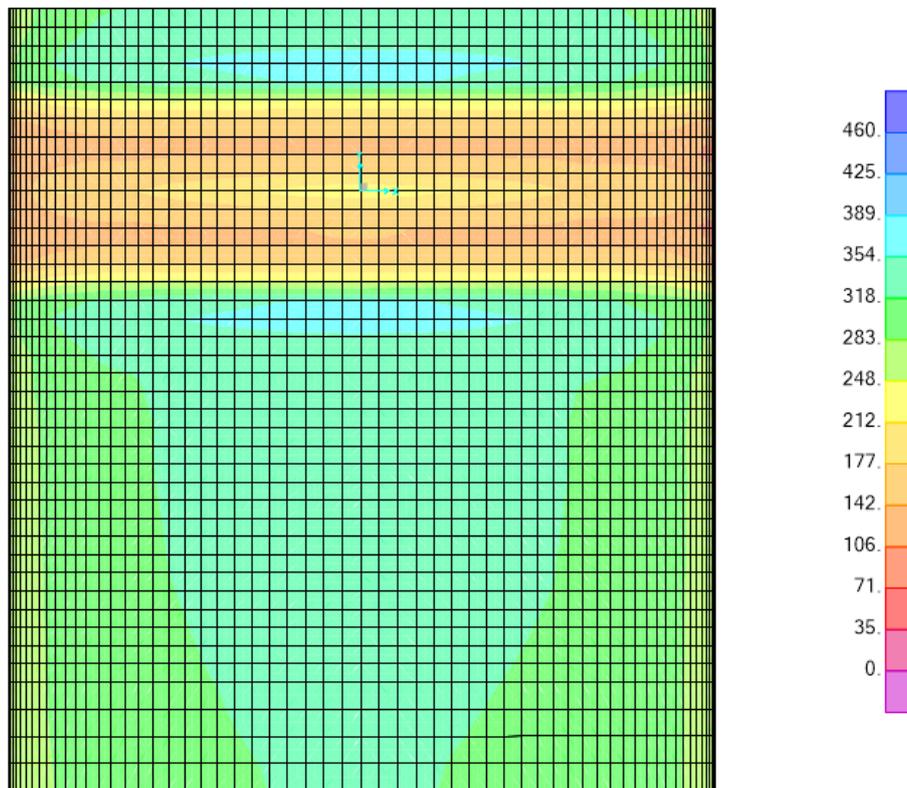


Figura 84. Tensiones de Von Mises SVM (MPa) en la fibra inferior del apoyo. Fuente: Elaboración propia

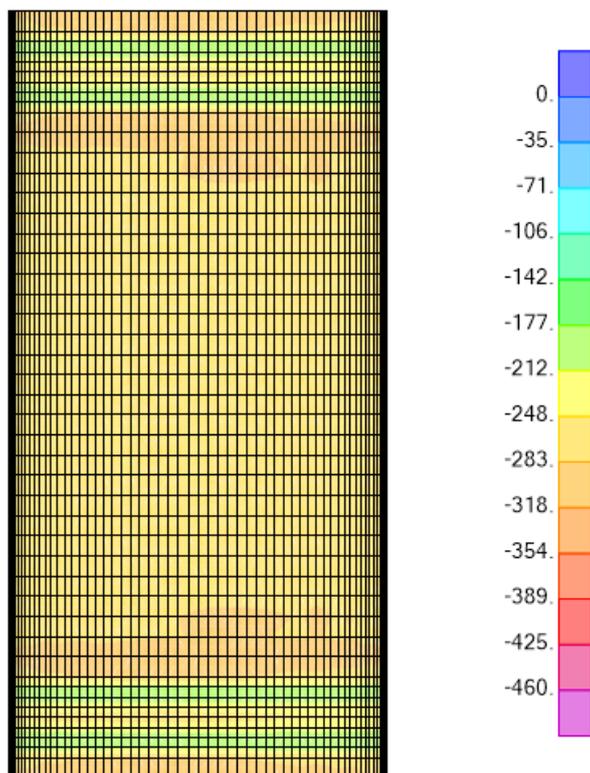


Figura 85. Tensiones longitudinales S_{11} (MPa) en la fibra superior de centro de vano.
Fuente: Elaboración propia

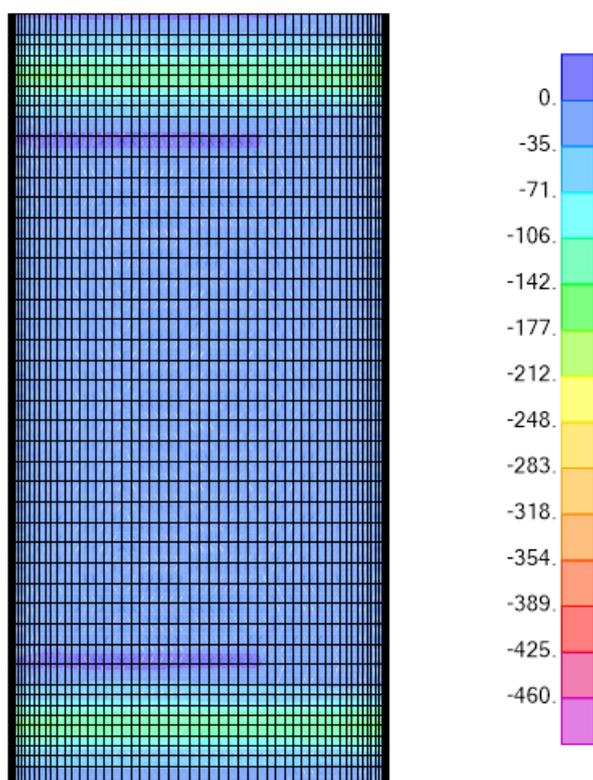


Figura 86. Tensiones circunferenciales S_{22} (MPa) en la fibra superior de centro de vano. Fuente: Elaboración propia

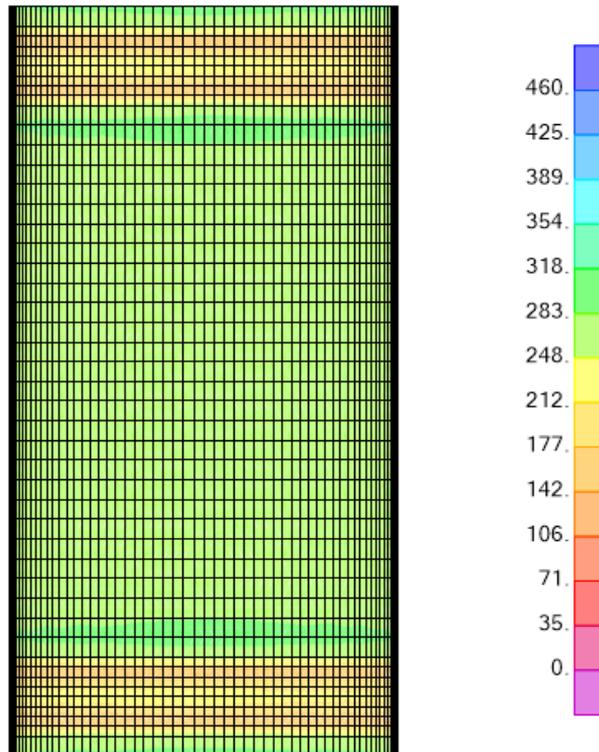


Figura 87. Tensiones de Von Mises SVM (MPa) en la fibra superior de centro de vano.
Fuente: Elaboración propia

Las tensiones de Von Mises en la fibra inferior de los apoyos será de 362 MPa y en la fibra superior de centro de vano será de 284MPa. Como se aprecia de los resultados expuestos y de las figuras anteriores, las tensiones serán mayores cerca de los apoyos. Considerando la condición del ELU de resistencia, donde se limita las tensiones máximas a un valor de límite elástico:

$$\sigma_{x,Ed} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{460}{1.05} = 438.10 \text{ MPa}$$

Se aprecia que las tensiones obtenidas del estudio estático no lineal P-delta con imperfecciones serán menores al valor del límite elástico expuesto anteriormente, aunque este valor debería ser revisado debido a que en secciones con espesores elevados se debe considerar un valor inferior del límite elástico.

4.3. Valoración Económica

En este apartado se va a determinar el valor económico de la obra a proyectar a nivel de anteproyecto para sus dos posibles configuraciones:

- Configuración estándar, en la que los pórticos varían poco en altura y las distancias entre pilas son de 28 m. Se considera una altura de pila de 7 m y una longitud de tramo de 280 m (equivalente a la longitud del viaducto estudiado).
- Configuración viaducto, en la que tanto las alturas de las pilas como las distancias entre pilas varían en función de la luz que se quiera atravesar. Para este caso se va a considerar la configuración que se ha descrito en este apartado, de longitud 287 m.

La valoración se centrará en las partidas básicas y más relevantes de la obra. Para ello, se van a definir las unidades de obra para posteriormente realizar las mediciones de cada unidad, terminando con una valoración total de la obra. Todos los datos de mediciones se van a obtener de forma aproximada sobre planos y los datos económicos se han obtenido de diferentes cuadros de precios.

4.3.1. Unidades de obra

CÓD.	UD	DESCRIPCIÓN	PRECIO €
UO01	m ²	Desbroce y limpieza	0.99
		Desbroce y limpieza con medios mecánicos. Comprende los trabajos de retirar de las zonas previstas pequeñas plantas, maleza, brozas, escombros, basura o cualquier otro material existente, hasta una profundidad no menor que el espesor de la capa de tierra vegetal, carga en camión y transporte a vertedero.	
		NOVENTA Y NUEVE CÉNTIMOS	
UO02	m ³	Excavación en talud	1.86
		Excavación en talud para alcanzar en el terreno la cota de la base de los encepados hasta alcanzar se cota prevista con empleo de medios mecánicos, incluso transporte y acopio en obra.	
		UN EURO CON OCHENTA Y SEIS CÉNTIMOS	
UO03	m ³	Transporte a vertedero de terreno natural	1.12
		Transporte a vertedero de terreno natural procedente del desmonte de tierras hasta una distancia inferior a 30 Km, incluso carga en el camión.	
		UN EURO CON DOCE CÉNTIMOS	
UO04	m ³	Relleno de gravas para drenaje	21.34
		Relleno de gravas para drenaje de los estribos con grava de 20 a 30mm de diámetro con anchura del relleno de 1.5 m y compactación en tongadas sucesivas de 30cm de espesor máximo con medios mecánicos hasta alcanzar una densidad seca no inferior al 95% de la densidad máxima del obtenida en el ensayo Proctor Modificado incluso suministro, colocación y parte proporcional de geotextil.	
		VEINTIÚN EUROS CON TREINTA Y CUATRO CÉNTIMOS	

CÓD.	UD	DESCRIPCIÓN	PRECIO €
UO05	ud	<p>Instalación de sistema de bombeo</p> <p>Instalación de sistema de bombeo para abatimiento del nivel freático, evacuación y canalización de las aguas a una cota superior y a una distancia suficiente, incluso desplazamiento, montaje y desmontaje. Incluye filtros para evitar transporte de finos, accesorios necesarios y la energía de funcionamiento.</p> <p style="text-align: center;">SEIS MIL SEISCIENTOS EUROS CON CERO CÉNTIMOS</p>	6600.00
UO06	m ³	<p>Encepado de grupo de pilotes</p> <p>Encepado de hormigón armado, agrupando cabezas de pilotes descabezados, realizado con hormigón HA-30/B/20/IIa fabricado en central, y vertido desde camión, y acero UNE-EN 10080 B 500 S, con una cuantía aproximada de 80 kg/m³, correspondiente al conjunto de armaduras propias, de espera de los elementos de atado y centrado de cargas a que haya lugar, y de espera del pilar al que sirve de base para transmitir las cargas al pilotaje. El precio incluye la elaboración de la ferralla en taller industrial y el montaje en el lugar definitivo de su colocación en obra y montaje y desmontaje de sistemas de encofrados.</p> <p style="text-align: center;">DOSCIENTOS SESENTA Y CUATRO EUROS CON NOVENTA Y OCHO CÉNTIMOS</p>	264.98
UO07	m	<p>Pilote perforado sin entubación con lodos tixotrópicos</p> <p>Pilote de cimentación de hormigón armado de 120 cm de diámetro, para grupo de pilotes CPI-6 según NTE-CPI. Ejecutado por extracción de tierras mediante sistema mecánico (perforación con cuchara), sin entubación, con lodos tixotrópicos (bentonita) como contención de las paredes y posterior hormigonado continuo sumergido del pilote. Realizado con hormigón HA-30/L/12/IIa fabricado en central, y vertido desde camión a través de tubo Tremie, y acero UNE-EN 10080 B 500 S, con una cuantía aproximada de 6,9 kg/m. El precio incluye el transporte, la instalación, el montaje y el desmontaje del equipo mecánico, la elaboración de la ferralla en taller industrial y el montaje en el lugar definitivo de su colocación en obra</p> <p style="text-align: center;">DOSCIENTOS OCHENTA Y SEIS EUROS CON DIEZ CÉNTIMOS</p>	286.10

UO09	kg	Acero inoxidable dúplex S460			
		Tubo	1517588.95	75%	
		Aparato de apoyo	192712.17	10%	
		Rigidizador	298463.30	15%	
					2008764.42

4.3.3. Valoración económica

4.3.3.1. Configuración estándar

CÓD	UD	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	PRECIO	VALORACIÓN
UO01	m ²	Desbroce y limpieza	5180.00	0.99	5128.20
UO02	m ³	Excavación en talud	2193.13	1.86	4079.21
UO03	m ³	Transporte a vertedero de terreno natural	7373.13	1.12	8257.90
UO04	m ³	Relleno de gravas para drenaje	1315.88	21.34	28080.77
UO05	ud	Instalación de sistema de bombeo	1.00	6600.00	6600.00
UO06	m ³	Encepado de grupo de pilotes	1315.88	264.98	348680.56
UO07	m	Pilote perforado sin entubación con lodos tixotrópicos.	110.00	286.10	31471.00
UO08	m ³	Pila rectangular de hormigón visto	808.50	468.07	378434.60
UO09	kg	Acero inoxidable dúplex S460	1690476.71	10.00	16904767.09
					17715499.32

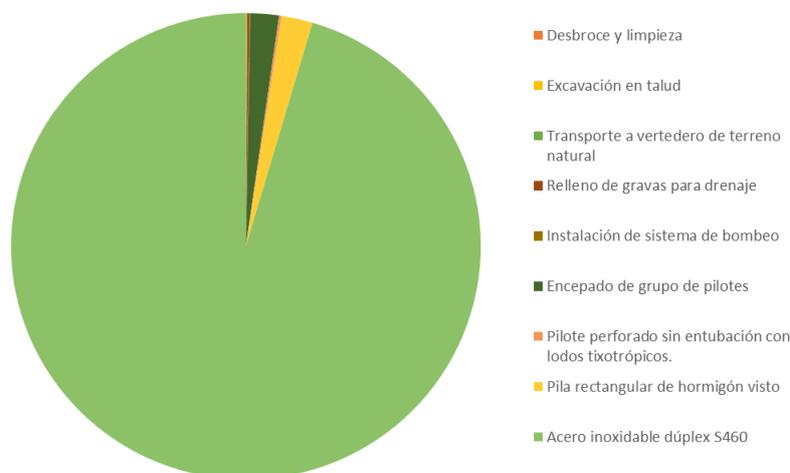


Figura 88. Valoración de ejecución material de la configuración estándar. Fuente: Elaboración propia

4.3.3.2. Configuración viaducto					
CÓD	UD	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	PRECIO	VALORACIÓN
UO01	m ²	Desbroce y limpieza	5309.50	0.99	5256.41
UO02	m ³	Excavación en talud	1595.00	1.86	2966.70
UO03	m ³	Transporte a vertedero de terreno natural	6904.50	1.12	7733.04
UO04	m ³	Relleno de gravas para drenaje	957.00	21.34	20422.38
UO05	ud	Instalación de sistema de bombeo	1.00	6600.00	6600.00
UO06	m ³	Encepado de grupo de pilotes	957.00	264.98	253585.86
UO07	m	Pilote perforado sin entubación con lodos tixotrópicos.	107.00	286.10	30612.70
UO08	m ³	Pila rectangular de hormigón visto	1255.80	468.07	587802.31
UO09	kg	Acero inoxidable dúplex S460	2008764.42	10.00	20087644.16
					21002623.55

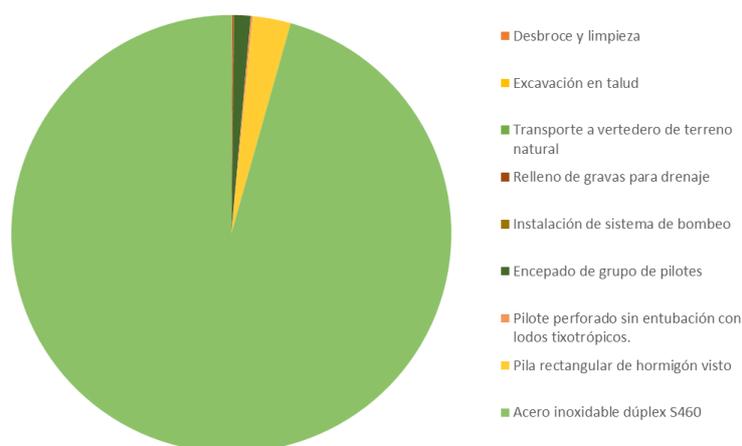


Figura 89. Figura 90. Valoración de ejecución material de la configuración viaducto.
Fuente: Elaboración propia

4.3.4. Conclusiones de la valoración económica

La valoración económica de los casos estudiados asciende a 17715499.32 € para la configuración estándar (63.27 M€/km) y a 21002623.55 € para la configuración viaducto (73.18 M€/km).

Para ambas configuraciones, el peso del valor económico del acero dentro del valor total es de alrededor del 95%, donde el valor del tubo es el 66% y 72%, el del aparato de apoyo el 15% y el 9% y el de los rigidizadores el 15% y 14% (siendo el primer valor el de la configuración estándar y el segundo el de la configuración viaducto). El resto de los pesos son insignificantes en comparación con los del acero, siendo el 2% y el 3% el de las pilas y el 2% y 1% el de los encepados.

Comparando los valores de ejecución material de las configuraciones estudiadas con los comentados en el apartado 2.2.3. de costes del sistema, se aprecia que los valores entran dentro del orden de magnitud estudiado tanto por el documento de Hyperloop One (48-69 M€/km) como por el artículo de Harry et al (30-75 M€/km).

5. CONCLUSIONES

Los avances en el hyperloop indican que la evolución de los medios de transporte tiende a la optimización del tiempo y los recursos, y a la reducción del impacto medio ambiental de la huella humana.

El hyperloop destaca como servicio de pasajeros y como servicio de mercancías dentro de varios aspectos concretos como los tiempos de viaje o entrega, la capacidad, la fiabilidad frente al clima o la interoperabilidad con todos los medios de transportes actuales. Sería una alternativa intermedia entre el transporte aéreo y el marítimo, teniendo como impedimento la fuerte rigidez de la unión entre dos hubs por la infraestructura. Destaca por el rápido transporte de pasajeros y de mercancías y revolucionaría la idea de los viajes de ocio, los trayectos a otras ciudad o a los centros de trabajo, pudiendo hablar de “ciudades dormitorio” alejadas a cientos de kilómetros de los grandes núcleos; y sería un claro ejemplo de evolución hacia un transporte mucho más sostenible que reduciría la huella de carbono drásticamente, debido a la eliminación de rutas por otros medios como el avión o el barco, altamente contaminantes.

La infraestructura es uno de los conceptos que se encuentra en continua evolución conceptual, desde tubos metálicos continuos apoyados sobre pilas a tubos enterrados o en túnel y viaductos de grandes luces. En este documento se ha elaborado un estudio basado en el artículo de Pedro Museros, Carlos Lázaro, Benjamín Pinazo y Salvador Monleón “*Key aspects in the analysis and design of Hyperloop infrastructure under static, dynamic and thermal loads*”, donde se definen diferentes propuestas de dimensionamiento, destacando entre ellas un tubo de 25 mm de espesor y 4 m de diámetro apoyado en pilas equidistantes de entre 20 y 40 m donde se impide el desplazamiento longitudinal. Esta configuración ha sido la base del estudio del documento, donde se han empleado tanto modelos de barras como modelos lámina con configuraciones de viaductos de luces del vano central entre 56 y 84 m.

Del estudio, centrado en los ELU de resistencia e inestabilidad, ELS del confort del usuario, la inestabilidad de la lámina y las tensiones debidas a las cargas teniendo en cuenta las imperfecciones, se obtiene que es posible la configuración de viaductos de luces medias con tubos autoportantes con rigidizadores cada 7 m. Con las configuraciones descritas con anillos rigidizadores cada 7 m, las luces de los vanos centrales podrán llegar hasta los 70 m, siendo el factor de inestabilidad frente a pandeo aceptable (valor mayor que 3) y las tensiones en los puntos más solicitados aceptable (tensiones de Von Mises en fibra superior en centro de vano y fibra inferior en apoyos del vano central menor de 400 MPa). Para configuraciones mayores de 70 m de luz del vano central, el fallo por inestabilidad se produce por comportamiento como barra, por lo que la elección de anillos rigidizadores no será suficiente y se tendrá que añadir elementos extras que aporten rigidez al conjunto y aumente el factor de pandeo.

Tras las recomendaciones de diseño anteriores, se ha llevado a cabo el anteproyecto para un viaducto que cruce el río Adaja (Olmedo, Valladolid) localizando la infraestructura en el paso de la línea del AVE Galicia-Madrid por ese mismo río. Se ha comprobado el buen comportamiento de un viaducto de luz del vano central de 63 m, verificando todos los ítems del estudio que se ha realizado anteriormente para las acciones que lo solicitan, e incluyéndose el dimensionamiento de su cimentación. Finalmente se ha realizado una

valoración económica básica de la construcción, obteniéndose para la configuración estándar un valor alrededor de los 63 M€/km y para la configuración viaducto alrededor de los 73 M€/km. Cabe destacar que el 95% del valor total sería la construcción de los tubos; donde por ejemplo para la configuración estándar el 66% es el tubo en sí, el 15% los aparatos de apoyo y el 15% los anillos de rigidización. Estas valoraciones ponen de manifiesto el orden de magnitud valorado por los documentos de Hyperloop One (48-69 M€/km) como por el artículo de Harry et al (30-75 M€/km).

Este proyecto pone de manifiesto las claras ventajas que el hyperloop tiene frente a otros medio de transporte como el avión, el barco o el tren, en aspecto como la optimización de los recursos energéticos y la utilización de energías limpias, además de otras evidentes ventajas como la reducción de los tiempos de viaje o la fiabilidad del hecho propio del transporte. El estudio se ha centrado en la infraestructura, donde las diferentes configuraciones estudiadas muestran la posibilidad de proyectar viaductos con luces medias de hasta 70 m de luz del vano central con configuraciones simples, donde el comportamiento del tubo como lámina es de suma importancia. Aunque en definitiva la aplicación del hyperloop en la sociedad será una decisión política, fundamentada por el alto coste de la construcción pero apoyada por la gran reducción de la huella de carbono en trayectos de larga distancia, aspecto fundamental para poder alcanzar los objetivos pactados en el Acuerdo de París.

En Valencia, 6 de Septiembre de 2021

El autor:



Fdo. Marín Vilches, Lorenzo

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Comparación tiempos de viaje. Hyperloop frente a otros medios de transporte.	15
Tabla 2. Comparación frecuencia de trayectos. Hyperloop frente a otros medios de transporte.	16
Tabla 3. Comparación comodidad del usuario. Hyperloop frente a otros medios de transporte.	16
Tabla 4. Comparación fiabilidad. Hyperloop frente a otros medios de transporte.....	16
Tabla 5. Comparación capacidad. Hyperloop frente a otros medios de transporte.	17
Tabla 6. Comparación de costes en infraestructuras por modo de transporte	19
Tabla 7. Valores de las tensiones de secciones de apoyo y centro luz del artículo Museros et al. (2021) . Fuente: Artículo Museros et al. (2021)	35
Tabla 8. Valores de las tensiones de secciones de apoyo y centro luz del modelo de barras en estudio. Fuente: Elaboración propia	35
Tabla 9. Valores de flecha U3 (cm) y flecha admisibles δ (cm) en función de la luz del vano central (m). Fuente: Elaboración propia	39
Tabla 10. Esfuerzos de diseño para los casos de 56 a 84 m de luz del vano central. Fuente: Elaboración propia.....	44
Tabla 11. Estados Límite Últimos de Resistencia para los casos de 56 a 84 m de luz del vano central. Fuente: Elaboración propia	45
Tabla 12. Estados Límite Últimos de Inestabilidad para los casos de 56 a 84 m de luz del vano central. Fuente: Elaboración propia	45
Tabla 13. Valores de las tensiones de secciones de apoyo y centro luz del artículo Museros et al. (2021) . Fuente: Artículo Museros et al. (2021)	51
Tabla 14. Valores de las tensiones de secciones de apoyo y centro luz del modelo de láminas en estudio. Fuente: Elaboración propia.....	51
Tabla 15. Tabla de estratos de la localización del Hyperloop en el río Adaja. Fuente: Mapa Geológico Continuo de España a escala 1/50.000.....	71
Tabla 16. Propiedades del suelo. Río Adaja (Olmedo). Fuente: Elaboración propia.....	72
Tabla 17. Resumen acciones aplicadas en modelo de barras. Fuente: Elaboración propia	73
Tabla 18. Resumen acciones aplicadas en el modelo lámina. Fuente: Elaboración propia	74
Tabla 19. Propiedades del suelo. Río Adaja (Olmedo). Fuente: Elaboración propia...	128
Tabla 20. Esfuerzos producidos por las acciones en la cara superior de los pilotes del encepado de las pilas 5. Fuente: Elaboración propia.....	129

Tabla 21. Factores de seguridad de los grupos de pilotos. Fuente: Elaboración propia 132

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Sistema de impulso del ferrocarril atmosférico. Fuente: trainhistory.net	11
Figura 2. Prototipo de tubo neumático del metro de Nueva York. Fuente: scientificamerican.com	12
Figura 3. March of intellect (1820), de William Health. Fuente: Wikimedia commons	13
Figura 4. Comparación de tiempos de recorrido para el trayecto París-Berlín respecto al medio de transporte utilizado. Horizon (2021).....	14
Figura 5. Prototipo de cápsula de carga del hyperloop. Fuente: HHLA (2018).....	19
Figura 6. Ejemplo de impacto paisajístico provocado por el Hyperloop. Fuente: HTT.	20
Figura 7. Infraestructura para la cápsula del Hyperloop Alpha. Fuente: Hyperloop Alpha, Elon Musk	23
Figura 8. Pista de ensayos en el desierto de Nevada. Fuente: Virgin Hyperloop One ...	24
Figura 9. Interior del tubo de la pista de ensayos. Fuente: Virgin Hyperloop One	24
Figura 10. Pista de pruebas de Hyperloop TT en Toulouse. Fuente: HTT.....	25
Figura 11. Válvula de aislamiento del sistema de Hyperloop TT. Fuente: HTT	25
Figura 12. Diseño de la pista de pruebas de Transpod en Droux. Fuente: Transpod	26
Figura 13. Proceso constructivo del módulo del tubo para el modelo propuesto por Zeleros-UPV. Fuente: Zeleros-UPV.....	26
Figura 14. Modelo del caso de estudio del artículo Museros et al. (2021) (m). Fuente: Elaboración propia.....	30
Figura 15. Condiciones de contorno en extremos de modelo. Fuente: Elaboración propia	30
Figura 16. Ejemplos de modelos evaluados en el estudio de número de vanos. Fuente: Elaboración propia.....	31
Figura 17. Leyenda de las localizaciones de datos para la interpretación de gráficos de errores relativos. Fuente: Elaboración propia.....	31
Figura 18. Error relativo del flector M para el caso de acción Permanente. Fuente: Elaboración propia.....	32
Figura 19. Error relativo del flector M para el caso de acción de Temperatura + Tg^+ . Fuente: Elaboración propia.....	32
Figura 20. Error relativo del flector M para el caso de acción de Temperatura + Tg^- . Fuente: Elaboración propia.....	33
Figura 21. Error relativo del flector M para el caso de acción de Viento. Fuente: Elaboración propia.....	33
Figura 22. Error relativo de la flecha U3 para el caso de acción de Vehículo. Fuente: Elaboración propia.....	34

Figura 23. Error relativo de la flecha U3 para el caso de acción de Viento. Fuente: Elaboración propia.....	34
Figura 24. Modelo simplificado de evaluación para viaducto del hyperloop. Luces de vanos de 28 m. Fuente: Elaboración propia	35
Figura 25. Modelo de estudio de variación de la luz del vano central. Fuente: Elaboración propia.....	36
Figura 26. Modelo simplificado de evaluación para viaducto del hyperloop para luces medias. Ejemplo de vano central de 84 m. Fuente: Elaboración propia	36
Figura 27. Flecha vertical máxima admisible δ para puentes ferroviarios con tres o más vanos sucesivos simplemente apoyados correspondientes a una aceleración vertical admisible $bv = 1 \text{ m/s}^2$ en un coche con vehículo V (km/h). Fuente: Eurocódigo 0 (2019)	37
Figura 28. Flecha vertical máxima admisible δ según estudio estadístico basado en la figura A2.3 del Eurocódigo 0. Gráfica 1. Fuente: Elaboración propia.....	38
Figura 29. Flecha vertical máxima admisible δ según estudio estadístico basado en la figura A2.3 del Eurocódigo 0. Gráfica 2. Fuente: Elaboración propia.....	38
Figura 30. Modelo simplificado de evaluación para viaducto del hyperloop para luces medias. Ejemplo de vano central de 56 m.....	40
Figura 31. Diagrama de esfuerzos axiales en los tres vanos centrales del modelo de 56 m de luz. Fuente: Elaboración propia.....	41
Figura 32. Diagrama de esfuerzos cortantes en los tres vanos centrales del modelo de 56 m de luz. Fuente: Elaboración propia.....	41
Figura 33. Diagrama de momentos flectores en los tres vanos centrales del modelo de 56 m de luz. Fuente: Elaboración propia.....	41
Figura 34. Resumen Estados Límite Últimos para los casos de 56 a 84 m de luz del vano central. Fuente: Elaboración propia.....	46
Figura 35. Esquema 3D del modelo lámina de 28 m de luz del vano central. Fuente: Elaboración propia.....	46
Figura 36. Definición geométrica del apoyo tubo-pilar (mm). Fuente: Elaboración propia	47
Figura 37. Definición geométrica del aumento del espesor y los anillos en apoyos (mm). Fuente: Elaboración propia.....	47
Figura 38. Esquema del tubo en apoyo: aumento del espesor y anillos. Fuente: Elaboración propia.....	48
Figura 39. Esquema del aparato de apoyo. Fuente: Elaboración propia	48
Figura 40. Modelo lámina del caso en estudio. Fuente: Elaboración propia.....	48
Figura 41. Alzado y perfil del modelo lámina para el caso en estudio. Fuente: Elaboración propia.....	49
Figura 42. Modelo de introducción de los gradientes de temperatura $Tg +$ y $Tg -$ en el alzado del tubo (°C). Fuente: Elaboración propia.....	49
Figura 43. Diseño interno del tubo de Virgin Hyperloop One en el primer ensayo con	

pasajeros de la cápsula. Fuente: Virgin Hyperloop One	50
Figura 44. Modelo de estudio de vano central de 28 m de luz y tramos laterales de 14 m. Fuente: Elaboración propia.....	52
Figura 45. Modelo de estudio de vano central de 56 m de luz y tramos laterales de 28 m. Fuente: Elaboración propia.....	52
Figura 46. Modelo de estudio de vano central de 84 m de luz y tramos laterales de 28 m. Fuente: Elaboración propia.....	52
Figura 47. Definición geométrica del aumento del espesor y los anillos en rigidizadores (mm). Fuente: Elaboración propia.....	53
Figura 48. Esquema del tubo en rigidizador: aumento del espesor y anillos. Fuente: Elaboración propia.....	53
Figura 49. Modelo de estudio con 28 m de luz del vano central con anillos de rigidización cada 7 m. Fuente: Elaboración propia	54
Figura 50. Modelo de estudio con 56 m de luz del vano central con anillos de rigidización cada 14 m. Fuente: Elaboración propia	54
Figura 51. Modelo de estudio con 84 m de luz del vano central con anillos de rigidización cada 28 m. Fuente: Elaboración propia	54
Figura 52. Factor de pandeo para el caso de las acciones térmicas. Fuente: Elaboración propia.....	55
Figura 53. Factor de pandeo para el caso de las acciones térmicas y la presión de vacío. Fuente: Elaboración propia.....	55
Figura 54. Factor de pandeo para la combinación de acción del ELU. Fuente: Elaboración propia.....	56
Figura 55. Tensiones de Von Mises en cara inferior de la sección de apoyo para la combinación de acciones de ELU. Fuente: Elaboración propia.....	58
Figura 56. Tensiones de Von Mises en cara superior de la sección del aparato de rigidización central para la combinación de acciones de ELU. Fuente: Elaboración propia	58
Figura 57. Localización de la provincia de Valladolid (rojo) y del municipio de Olmedo (amarillo). Fuente: Elaboración propia.....	61
Figura 58. Localización del cruce de la línea de AVE Madrid-Galicia con el río Adaja (Olmedo). Fuente: Elaboración propia	61
Figura 59. Alzado del viaducto para AVE de la línea Madrid-Galicia en el paso por el río Adaja (Olmedo). Fuente: ADIF.....	62
Figura 60. Planta del viaducto para AVE de la línea Madrid-Galicia en el paso por el río Adaja (Olmedo). Fuente: ADIF.....	62
Figura 61. Alzado del viaducto del Hyperloop por el paso del río Adaja. Fuente: Elaboración propia.....	63
Figura 62. Planta del viaducto del Hyperloop por el paso del río Adaja. Fuente: Elaboración propia.....	63
Figura 63. Modelo 3D del viaducto del Hyperloop por el paso del río Adaja. Fuente:	

Elaboración propia.....	63
Figura 64. Esquema de la estructura en los apoyos. Fuente: Elaboración propia	64
Figura 65. Esquema de la estructura en el anillo rigidizador. Fuente: Elaboración propia	64
Figura 66. Esquema de la estructura en la cimentación. Fuente: Elaboración propia....	65
Figura 67. Datos geológicos de la localización del viaducto del Hyperloop en el río Adaja. Fuente: Mapa Geológico Continuo de España a escala 1/50.000.....	70
Figura 68. Perfil estratigráfico del suelo. Río Adaja (Olmedo). Fuente: Elaboración propia	71
Figura 69. Esquema del viaducto para el hyperloop por su paso por el río Adaja. Altura de las pilas. Fuente: Elaboración propia.....	72
Figura 70. Modelo de barras del viaducto para el hyperloop por su paso por el río Adaja. Fuente: Elaboración propia.....	73
Figura 71. Esquema 3D del modelo lámina de 70 m de luz del viaducto para el hyperloop por su paso por el río Adaja. Fuente: Elaboración propia	74
Figura 72. Alzado y perfil del modelo lámina para el caso en estudio. Fuente: Elaboración propia.....	74
Figura 73. Flecha vertical máxima admisible δ según estudio estadístico basado en la figura A2.3 del Eurocódigo 0, para el caso de 63 m de luz de vano. Fuente: Elaboración propia.....	75
Figura 74. Diagrama de esfuerzo axiles en los tres vanos centrales del modelo del viaducto para hyperloop de 63 m de vano central. Fuente: Elaboración propia	77
Figura 75. Diagrama de esfuerzo cortantes Vz en los tres vanos centrales del modelo del viaducto para hyperloop de 63 m de vano central. Fuente: Elaboración propia	77
Figura 76. Diagrama de esfuerzo cortantes Vy en los tres vanos centrales del modelo del viaducto para hyperloop de 63 m de vano central. Fuente: Elaboración propia	77
Figura 77. Diagrama de momentos flectores Mz en los tres vanos centrales del modelo del viaducto para hyperloop de 63 m de vano central. Fuente: Elaboración propia.....	77
Figura 78. Diagrama de momentos flectores My en los tres vanos centrales del modelo del viaducto para hyperloop de 63 m de vano central. Fuente: Elaboración propia.....	77
Figura 79. Primer modo de pandeo para el caso de las acciones térmicas. Fuente: Elaboración propia.....	81
Figura 80. Primer modo de pandeo para el caso de las acciones térmicas y presión. Fuente: Elaboración propia.....	82
Figura 81. Primer modo de pandeo para el caso de la combinación de acciones ELU. Fuente: Elaboración propia.....	82
Figura 82. Tensiones longitudinales S11 (MPa) en la fibra inferior del apoyo. Fuente: Elaboración propia.....	84
Figura 83. Tensiones circunferenciales S22 (MPa) en la fibra inferior del apoyo. Fuente: Elaboración propia.....	85
Figura 84. Tensiones de Von Mises SVM (MPa) en la fibra inferior del apoyo. Fuente:	

Elaboración propia.....	85
Figura 85. Tensiones longitudinales S11 (MPa) en la fibra superior de centro de vano. Fuente: Elaboración propia.....	86
Figura 86. Tensiones circunferenciales S22 (MPa) en la fibra superior de centro de vano. Fuente: Elaboración propia.....	86
Figura 87. Tensiones de Von Mises SVM (MPa) en la fibra superior de centro de vano. Fuente: Elaboración propia.....	87
Figura 88. Valoración de ejecución material de la configuración estándar. Fuente: Elaboración propia.....	93
Figura 89. Figura 90. Valoración de ejecución material de la configuración viaducto. Fuente: Elaboración propia.....	94
Figura 91. Vuelos de la unión entre la pila y el encepado, en metros. Fuente: Elaboración propia.....	127
Figura 92. Distribución de pilotes en la cara inferior del encepado, en metros. Fuente: Elaboración propia.....	128
Figura 93. Información de los encepados con el terreno en el que apoyan. Fuente: Elaboración propia.....	128

REFERENCIAS

- Museros, Pedro, Carlos Lázaro, Benjamín Pinazo, y Salvador Monleón. 2021. «Key Aspects in the Analysis and Design of Hyperloop™ Infrastructure under Static, Dynamic and Thermal Loads». *Engineering Structures* 239 (julio): 112177. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112177>.
- Train History. 2021. «Atmospheric Railway - History, Development and Facts». 2021. <http://www.trainhistory.net/railway-history/atmospheric-railway/>.
- The economist. 2013. «No loopy idea | The Economist». 17 de agosto de 2013. <https://www.economist.com/science-and-technology/2013/08/17/no-loopy-idea>.
- Elon Musk, 2013. «Hyperloop Alpha». Tesla Motors. https://www.tesla.com/sites/default/files/blog_images/hyperloop-alpha.pdf.
- HORIZON. 2021. «Paris to Berlin in an hour by train? Here's how it could happen. | Research and Innovation». 22 de abril de 2021. <https://ec.europa.eu/research-and-innovation/en/horizon-magazine/paris-berlin-hour-train-heres-how-it-could-happen>.
- Dudnikov, E.E. 2019. «Structure of Hyperloop Systems with Intermediate Station». En *2019 Twelfth International Conference «Management of Large-Scale System Development» (MLSD)*, 1-3. Moscow, Russia: IEEE. <https://doi.org/10.1109/MLSD.2019.8911040>.
- Alex Konrad. 2016. «Leaked Hyperloop One Docs Reveal The Startup Thirsty For Cash As Costs Will Stretch Into Billions». Forbes. 25 de octubre de 2016. <https://www.forbes.com/sites/alexkonrad/2016/10/25/hyperloop-one-seeks-new-cash-amid-high-costs/?sh=8329711125cc>.
- Harris, Wesley L., y Jarunee Wonglimpiyarat. 2021. «SpaceX Hyperloop: A Future Technology Disruption of the Transportation System?» *Foresight* 23 (5): 528-43. <https://doi.org/10.1108/FS-08-2020-0077>.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. 9 de agosto de 2021. *Grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático: El cambio climático es generalizado, rápido y se está intensificando* [Comunicado de prensa] https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2021/08/IPCC_WGI-AR6-Press-Release-Final_es.pdf.
- Zhou, Diana. Virgin Hyperloop One. 2018. *A look inside a new mode. Virgin Hyperloop One*. Virgin Hyperloop One. <http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/trnews/trnews314hyperloop.pdf>.
- España Ministerio de Fomento. 2011. *EAE. Instrucción de acero estructural: con comentarios de los miembros de la Comisión Permanente de Estructuras de Acero*. 1ª, 2ª, 3ª ed. Madrid: Ministerio de Fomento.
- España Ministerio de Fomento, y Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). 2019. *UNE-EN 1990:2019 - Eurocódigos. Bases de cálculo de estructuras*. Normativas. Madrid.

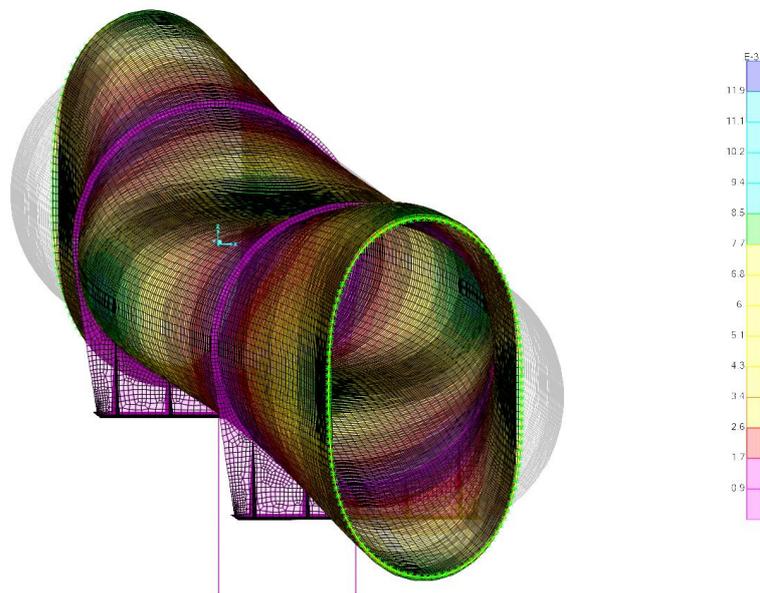
-
- España Ministerio de Fomento, y Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). 2013. *UNE-EN 1993-1-6:2013 - Eurocódigo 3: Proyecto de estructuras de acero. Parte 1-6: Resistencia y estabilidad de láminas*. Normativas. Madrid.
- España Ministerio de Fomento. 2012. *Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera*. Madrid: Ministerio de Fomento.
- España Ministerio de Ciencia e Innovación. Instituto Geológico y Minero de España IGME. 2009. *MAPA GEOLÓGICO DE ESPAÑA. Escala 1:50.000, . Carta 428 Olmedo*. Madrid: Ministerio de Ciencia e Innovación.
- España Ministerio de Ciencia e Innovación. Instituto Geológico y Minero de España IGME. 2009. *MAPA GEOLÓGICO DE ESPAÑA. Escala 1:50.000, . Hoja y Memoria 428 Olmedo*. Madrid: Ministerio de Ciencia e Innovación.
- España Ministerio de Fomento. 2009. *Guía de cimentaciones en obras de carretera*. Madrid: Ministerio de Fomento.

ANEJO I: Primer modo de pandeo de los casos de estudio de inestabilidad

- Luz del vano central: 28 m; separación de anillos: 28 m

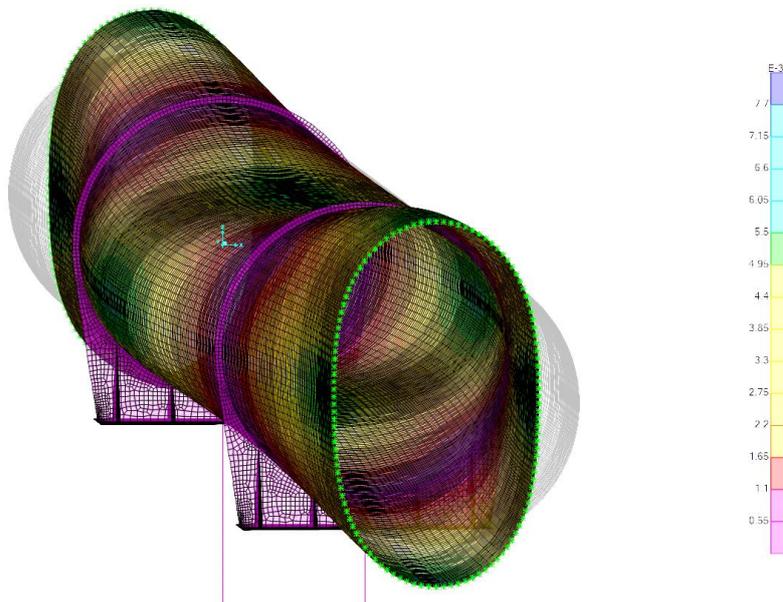
Modo de pandeo: Acciones Térmicas

FP=6.11



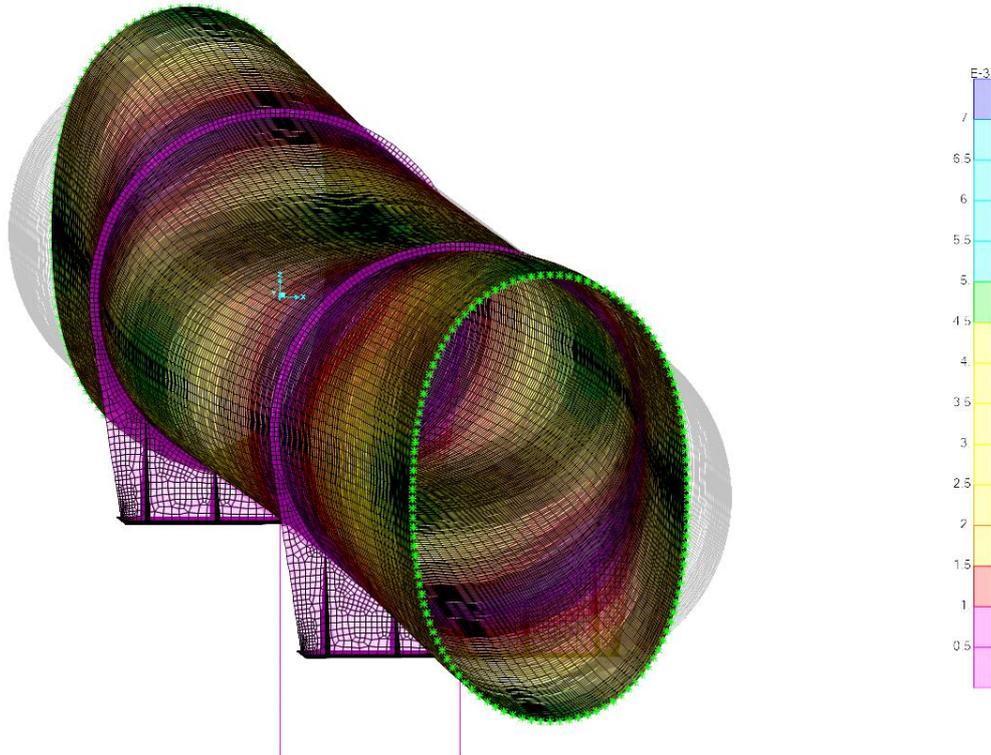
Modo de pandeo: Acciones Térmicas + Presión

FP=2.15



Modo de pandeo: Combinación de acciones ELU

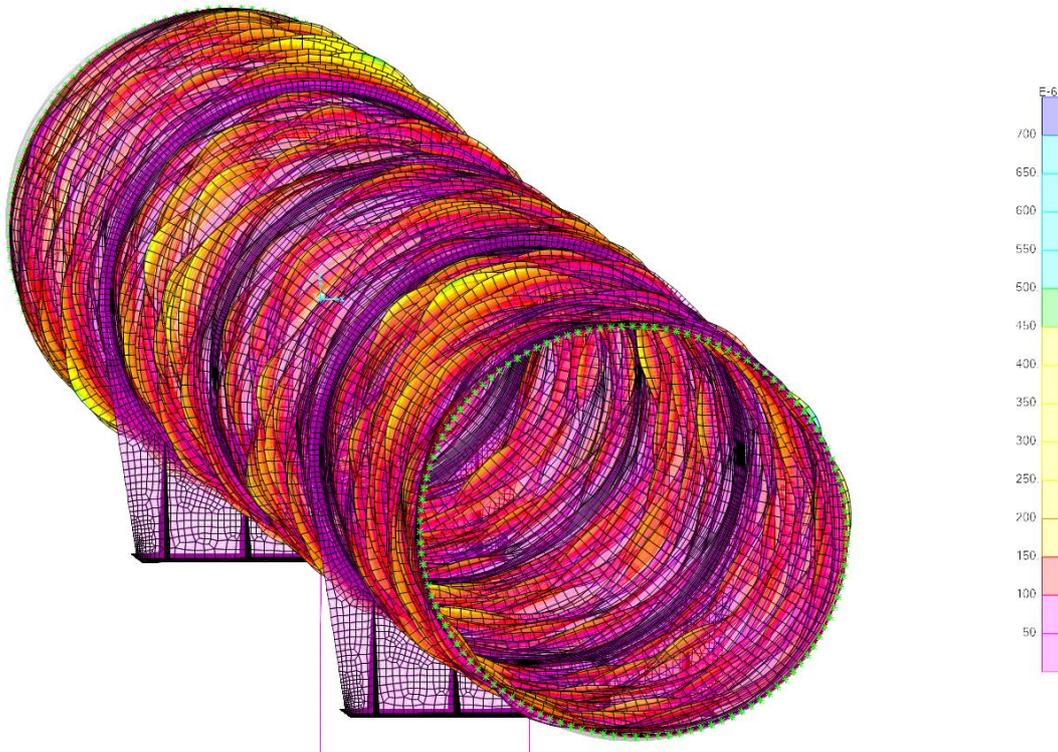
FP=1.44



- Luz del vano central: 28 m; separación de anillos: 14 m

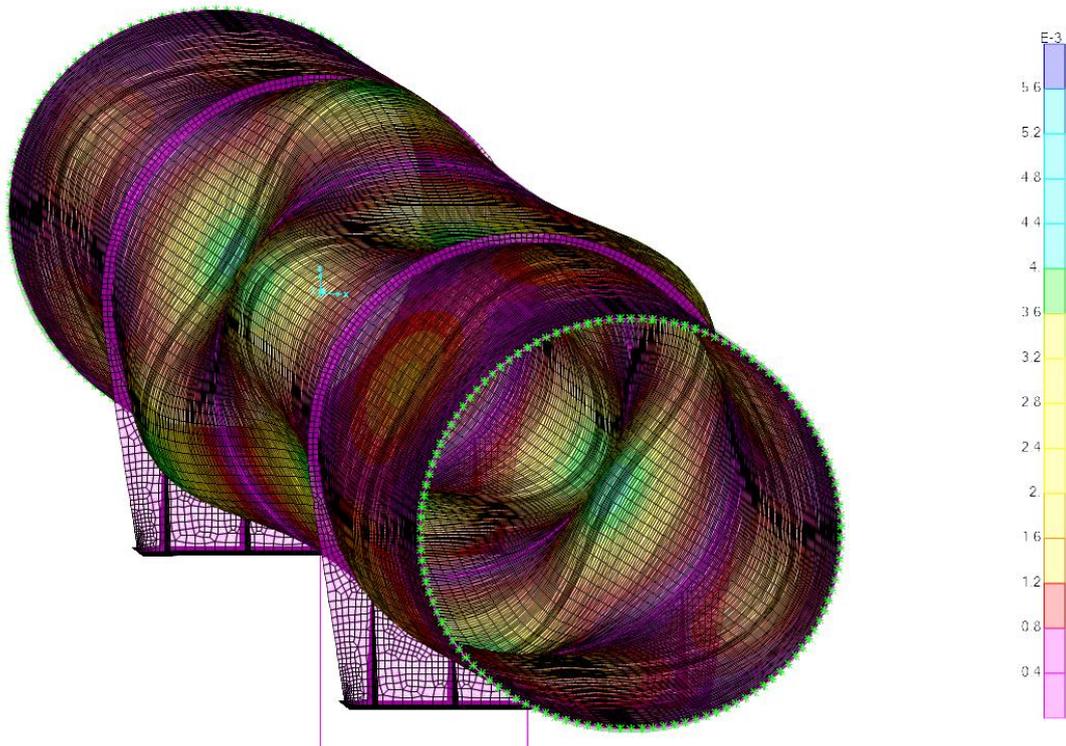
Modo de pandeo: Acciones Térmicas

FP=9.54



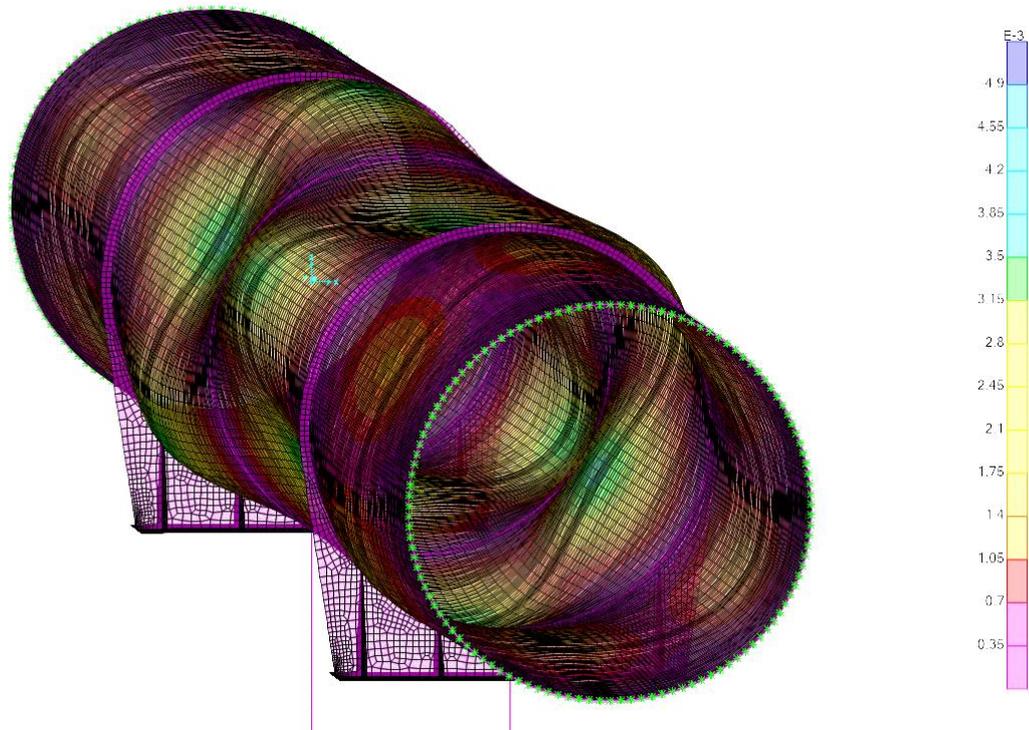
Modo de pandeo: Acciones Térmicas + Presión

FP=3.45



Modo de pandeo: Combinación de acciones ELU

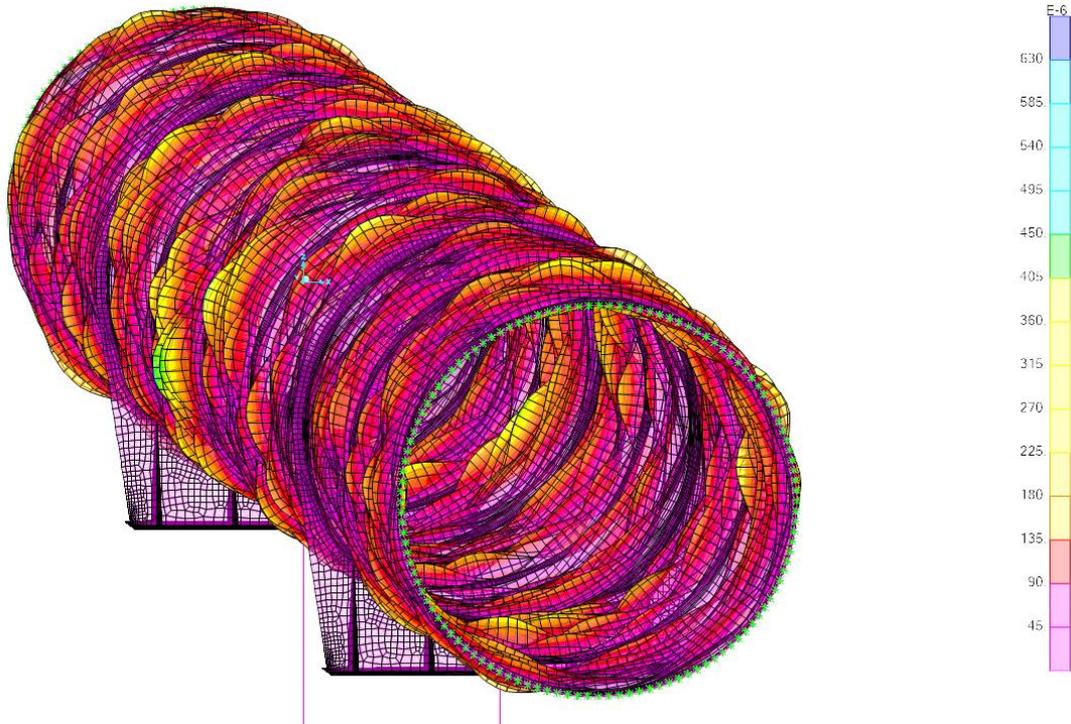
FP=2.46



- Luz del vano central: 28 m; separación de anillos: 7 m

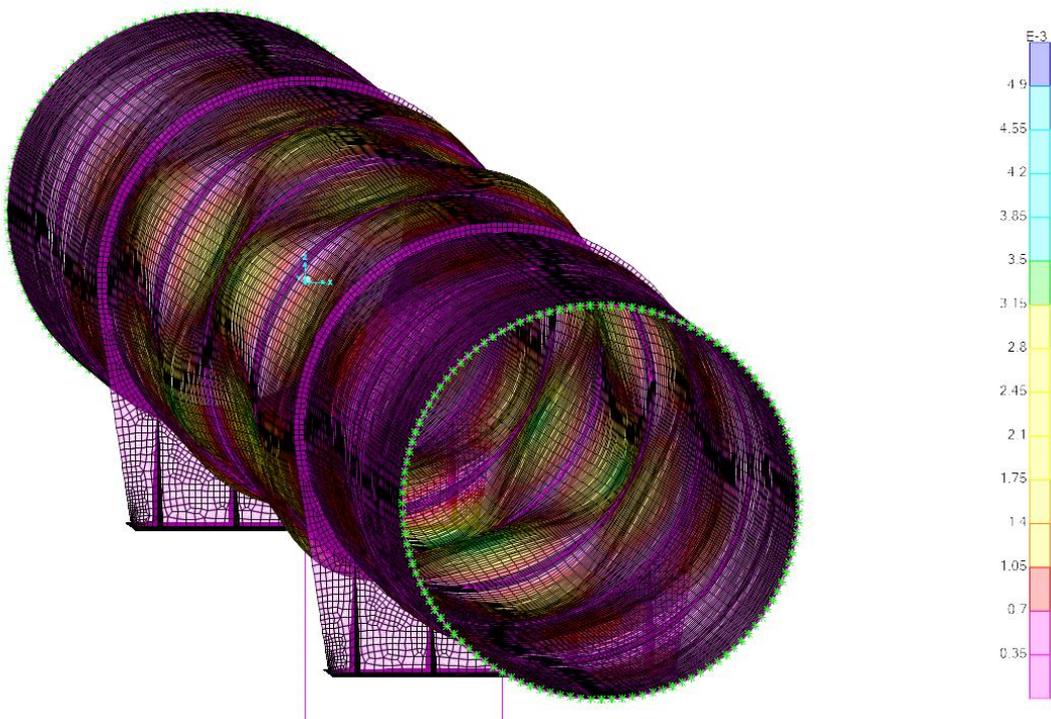
Modo de pandeo: Acciones Térmicas

FP=9.29



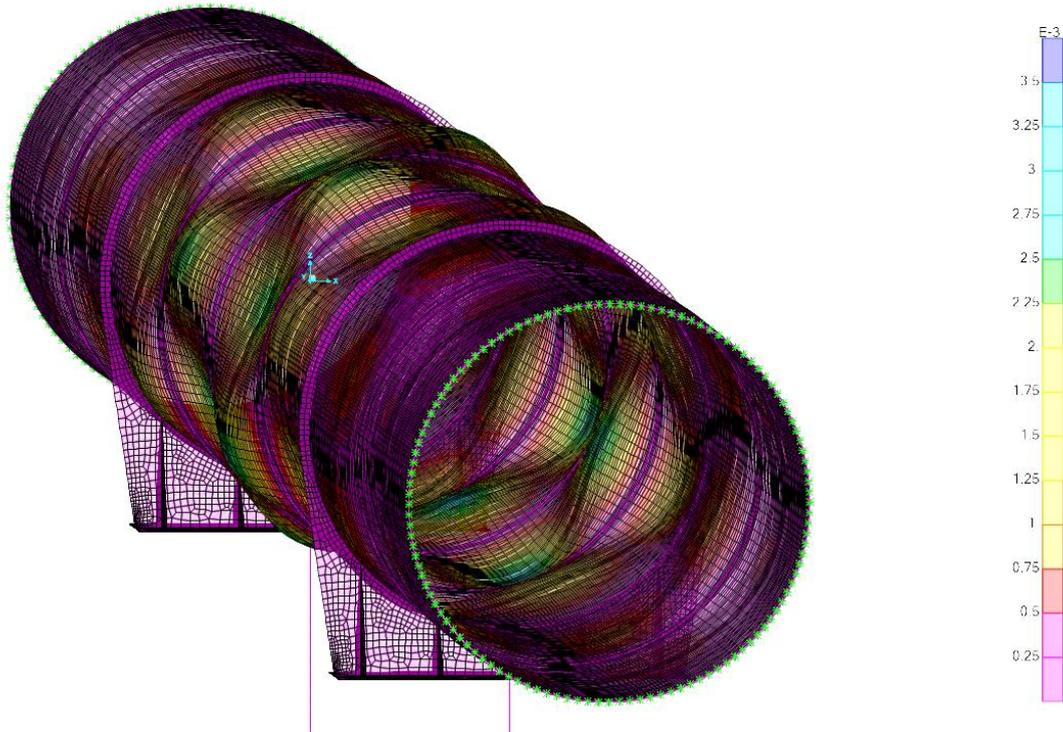
Modo de pandeo: Acciones Térmicas + Presión

FP=5.04



Modo de pandeo: Combinación de acciones ELU

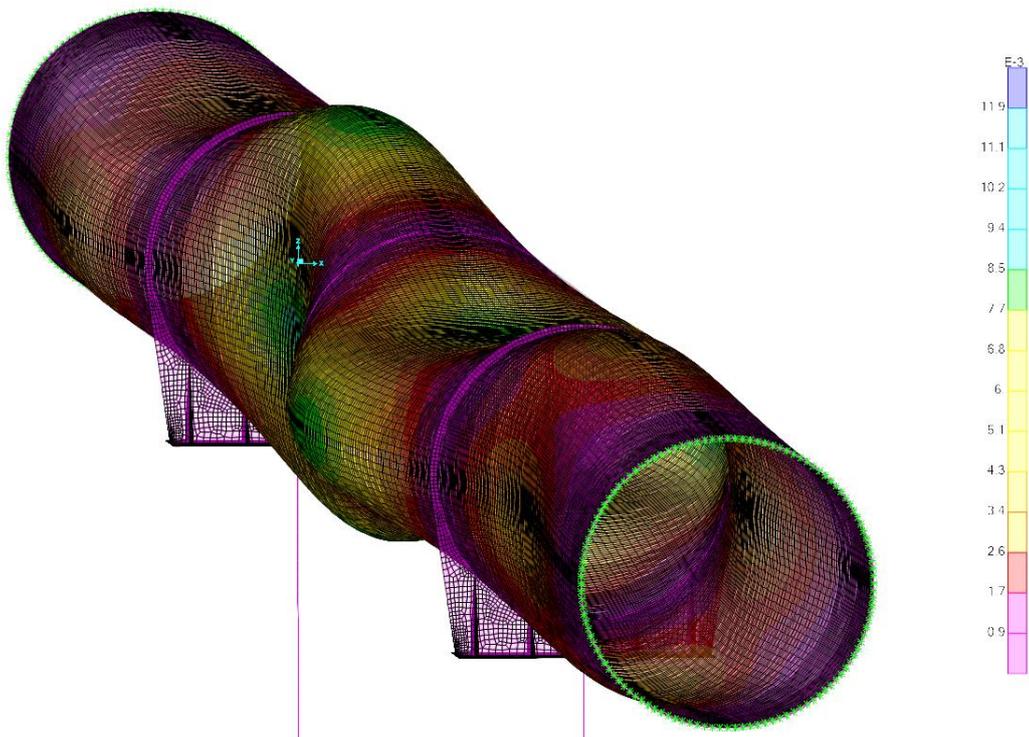
FP=3.52



- Luz del vano central: 56 m; separación de anillos: 28 m

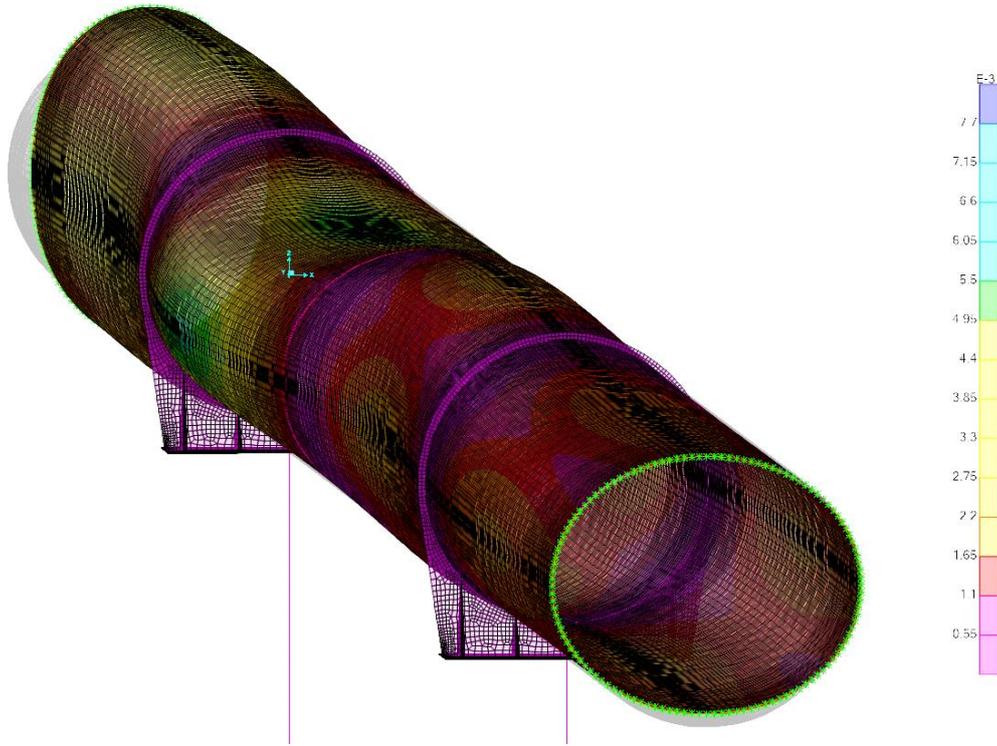
Modo de pandeo: Acciones Térmicas

FP=6.52

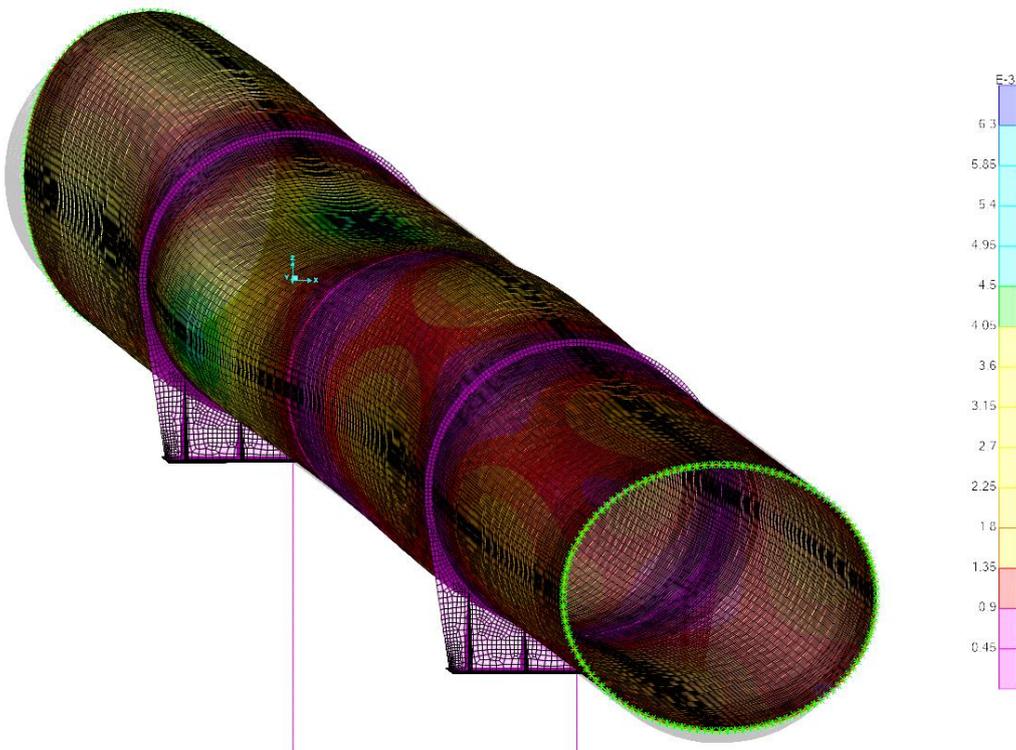


Modo de pandeo: Acciones Térmicas + Presión

FP=2.17

Modo de pandeo: Combinación de acciones ELU

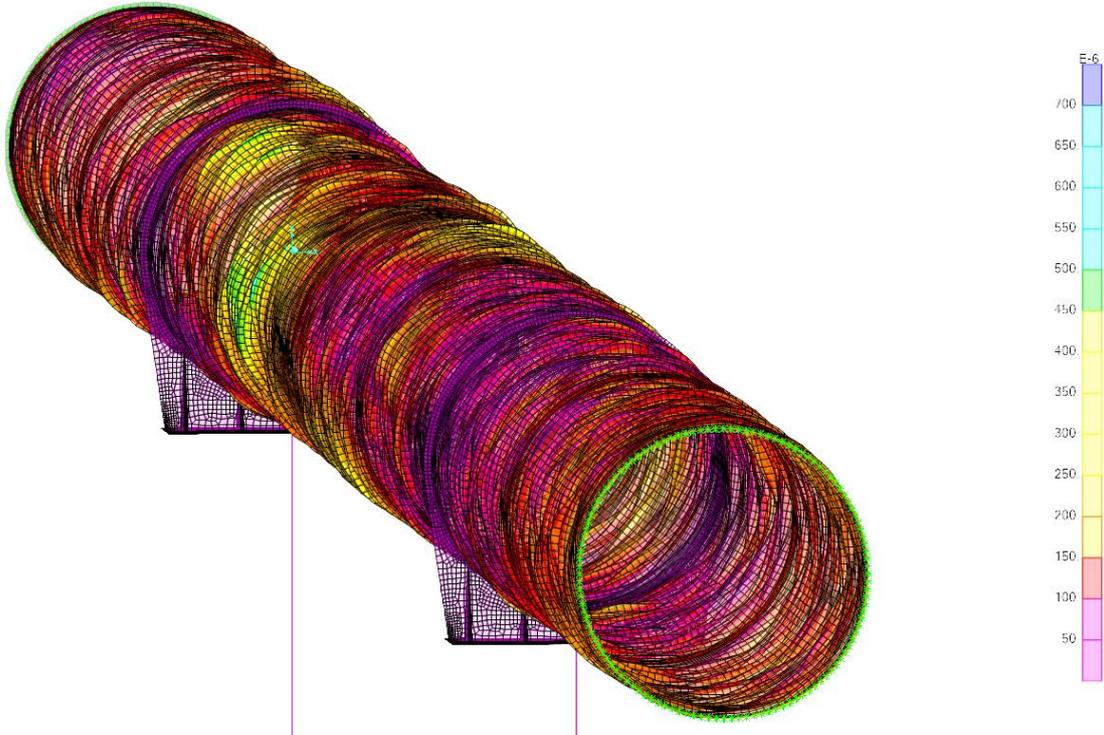
FP=1.47



- **Luz del vano central: 56 m; separación de anillos: 14 m**

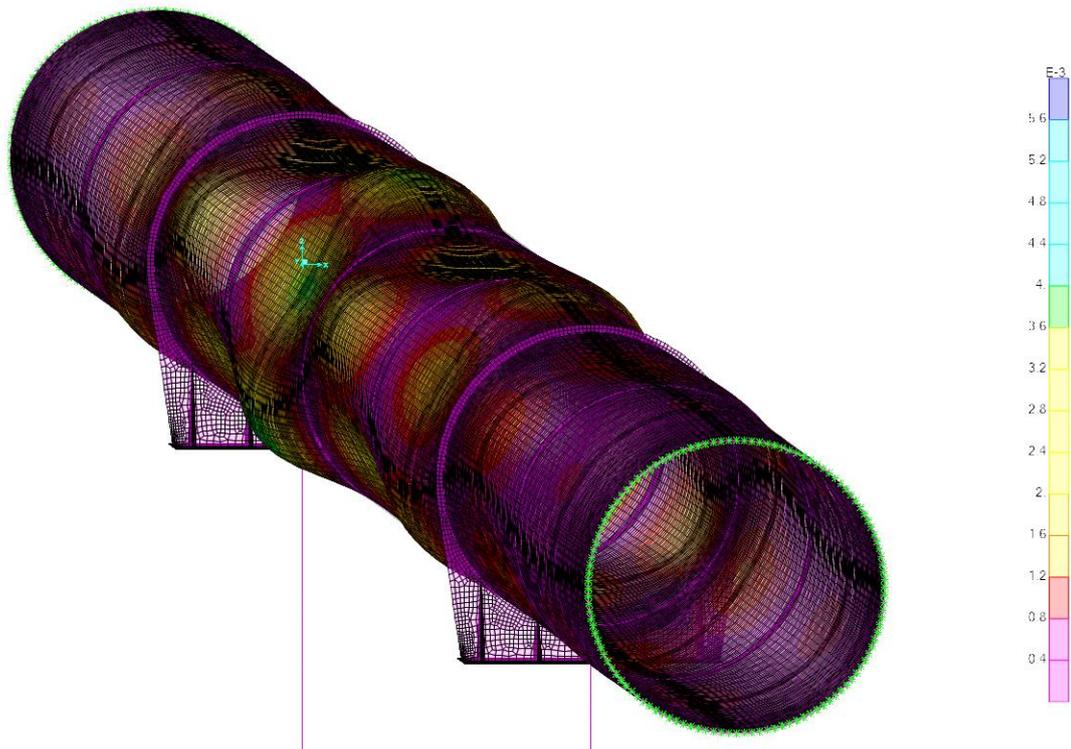
Modo de pandeo: Acciones Térmicas

FP=9.63



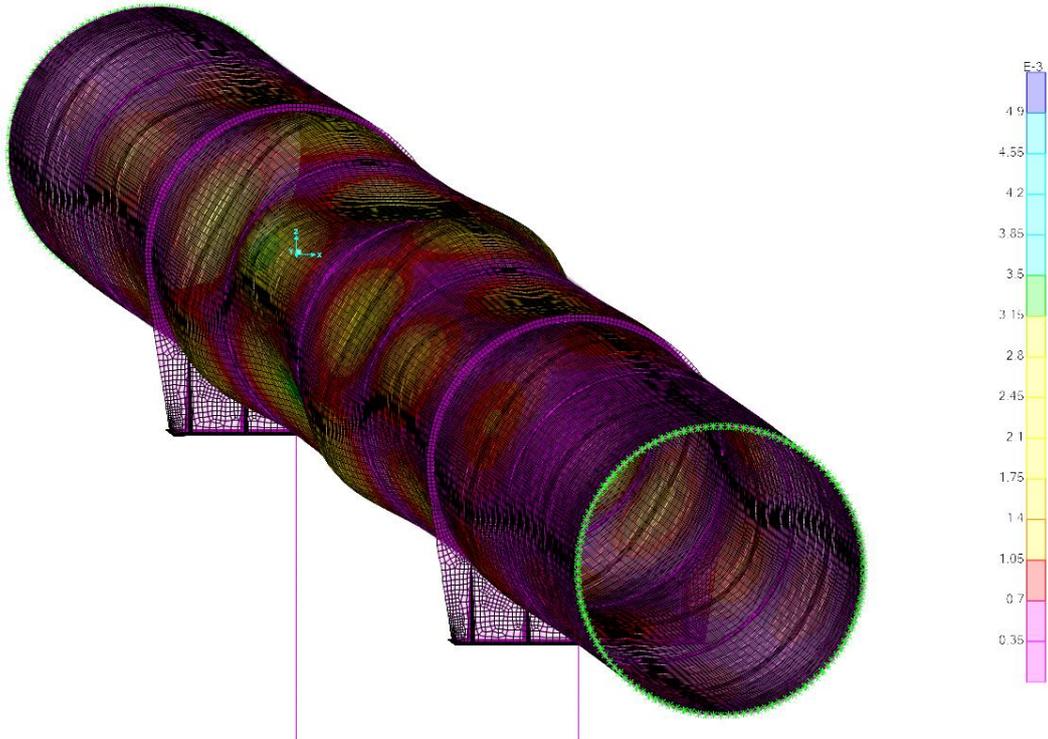
Modo de pandeo: Acciones Térmicas + Presión

FP=3.23



Modo de pandeo: Combinación de acciones ELU

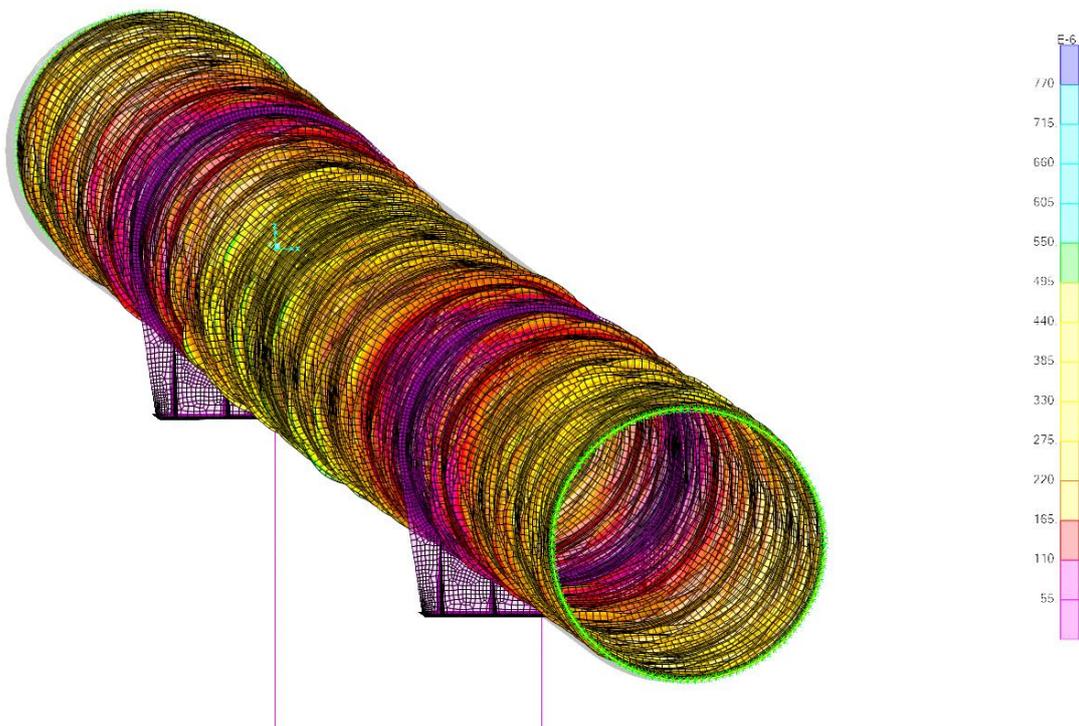
FP=2.30



- Luz del vano central: 56 m; separación de anillos: 7 m

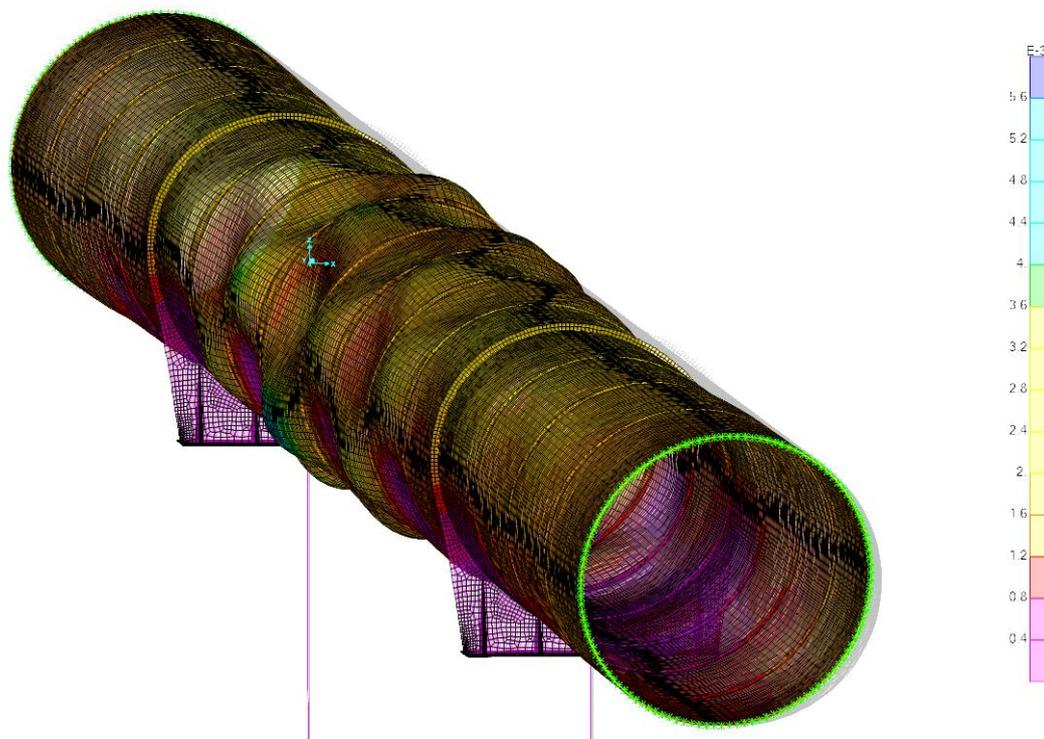
Modo de pandeo: Acciones Térmicas

FP=9.37



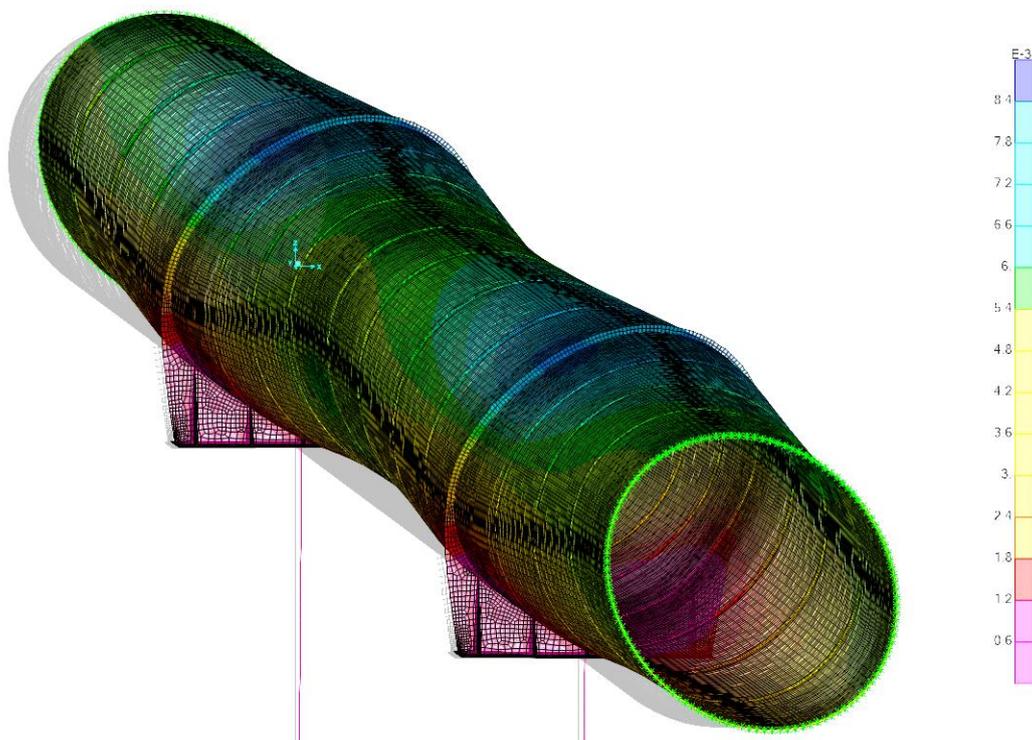
Modo de pandeo: Acciones Térmicas + Presión

FP=4.91



Modo de pandeo: Combinación de acciones ELU

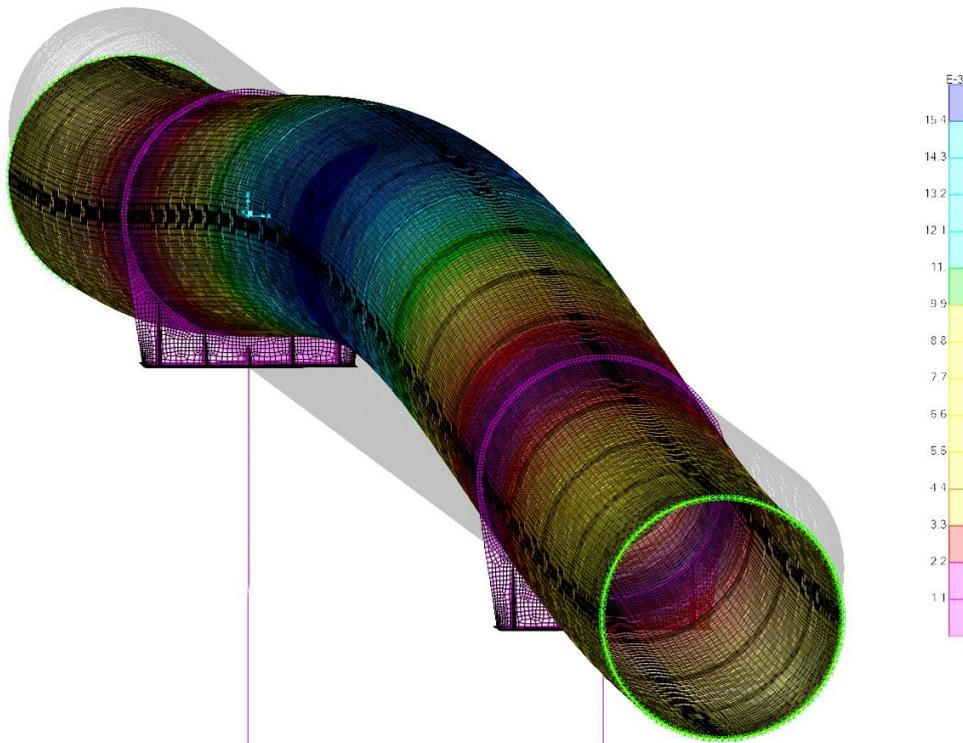
FP=3.40



- Luz del vano central: 84 m; separación de anillos: 28 m

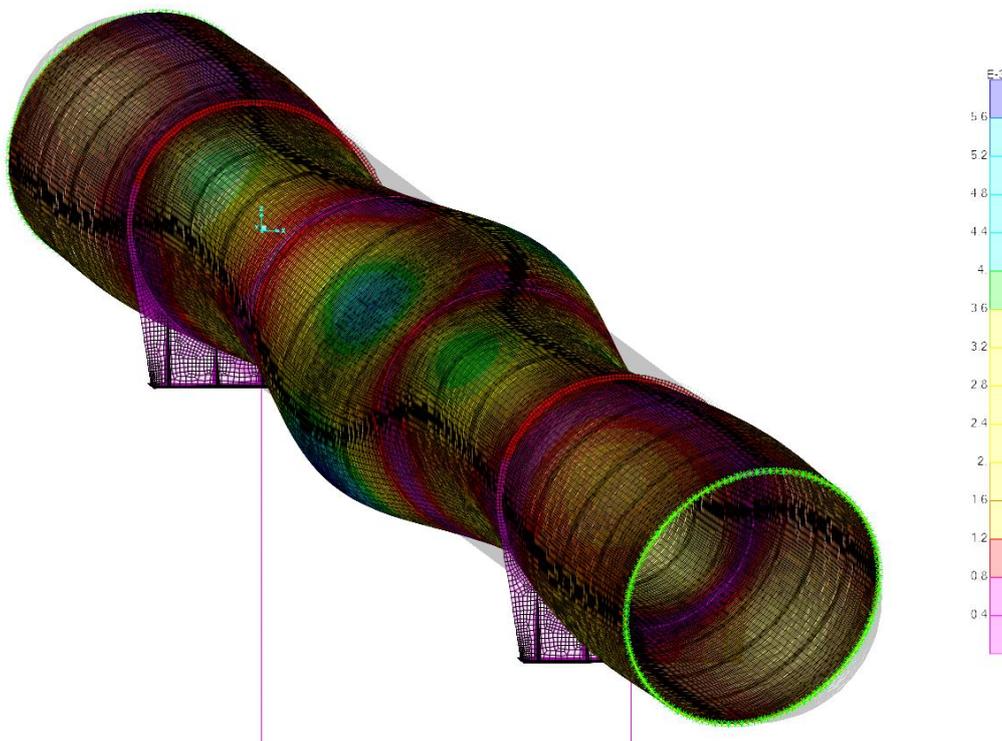
Modo de pandeo: Acciones Térmicas

FP=5.04



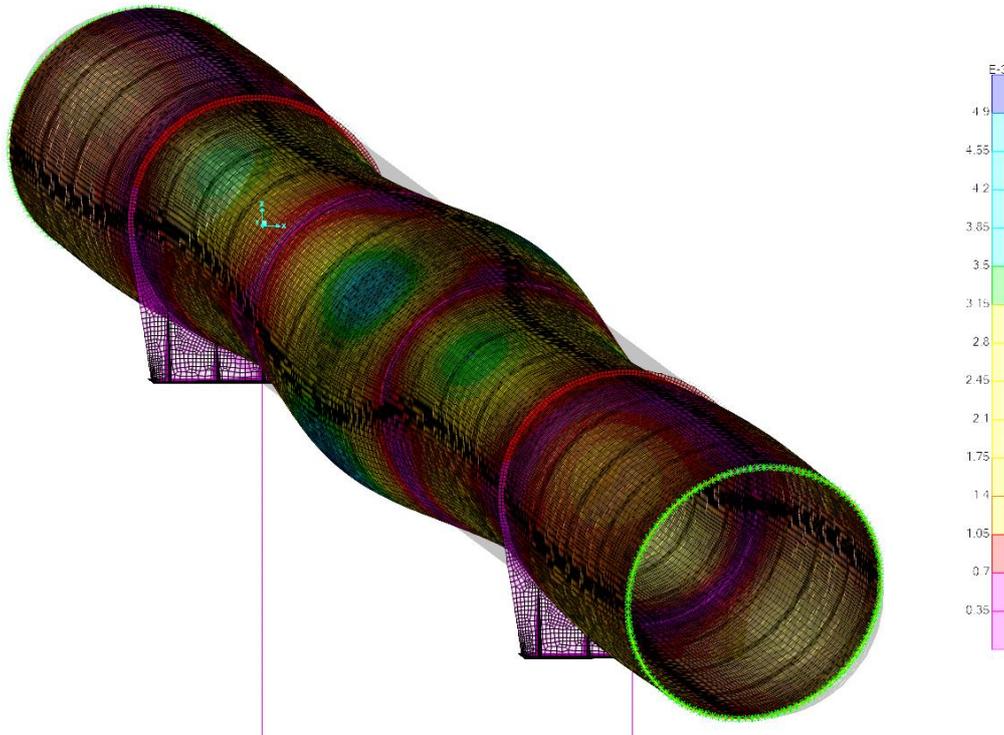
Modo de pandeo: Acciones Térmicas + Presión

FP=2.13



Modo de pandeo: Combinación de acciones ELU

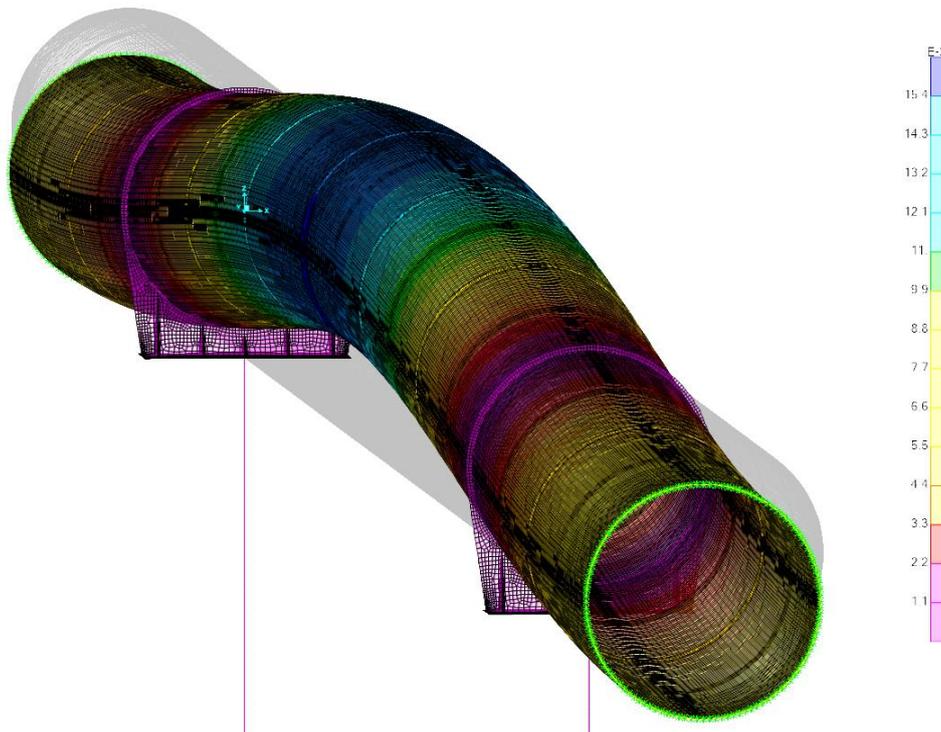
FP=1.53



- Luz del vano central: 84 m; separación de anillos: 14 m

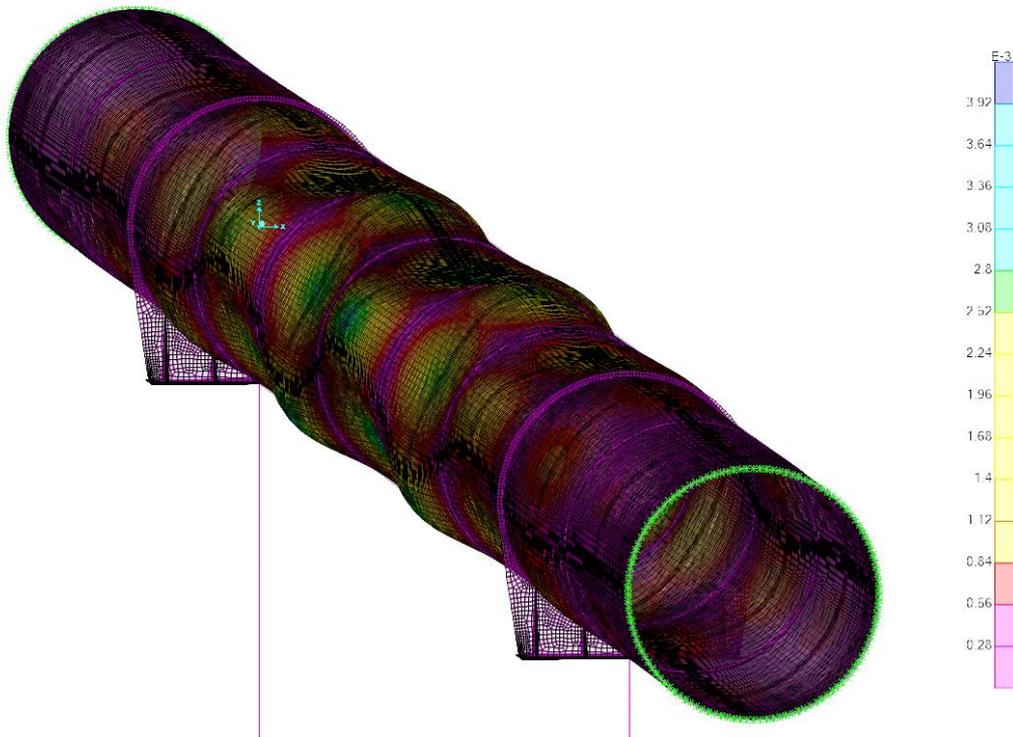
Modo de pandeo: Acciones Térmicas

FP=5.03

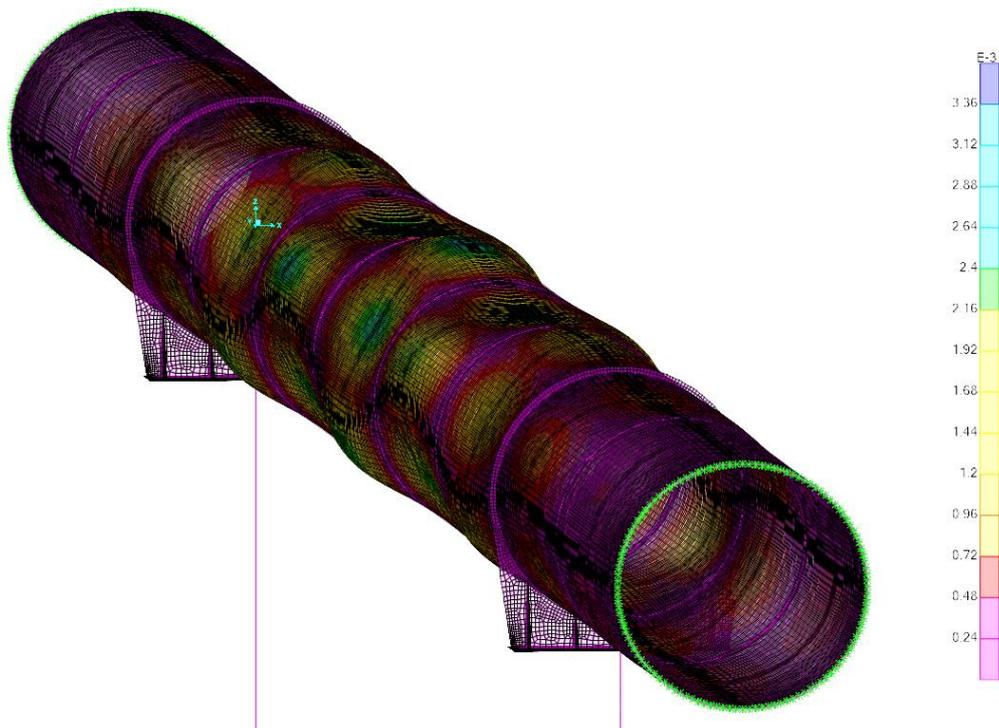


Modo de pandeo: Acciones Térmicas + Presión

FP=3.18

Modo de pandeo: Combinación de acciones ELU

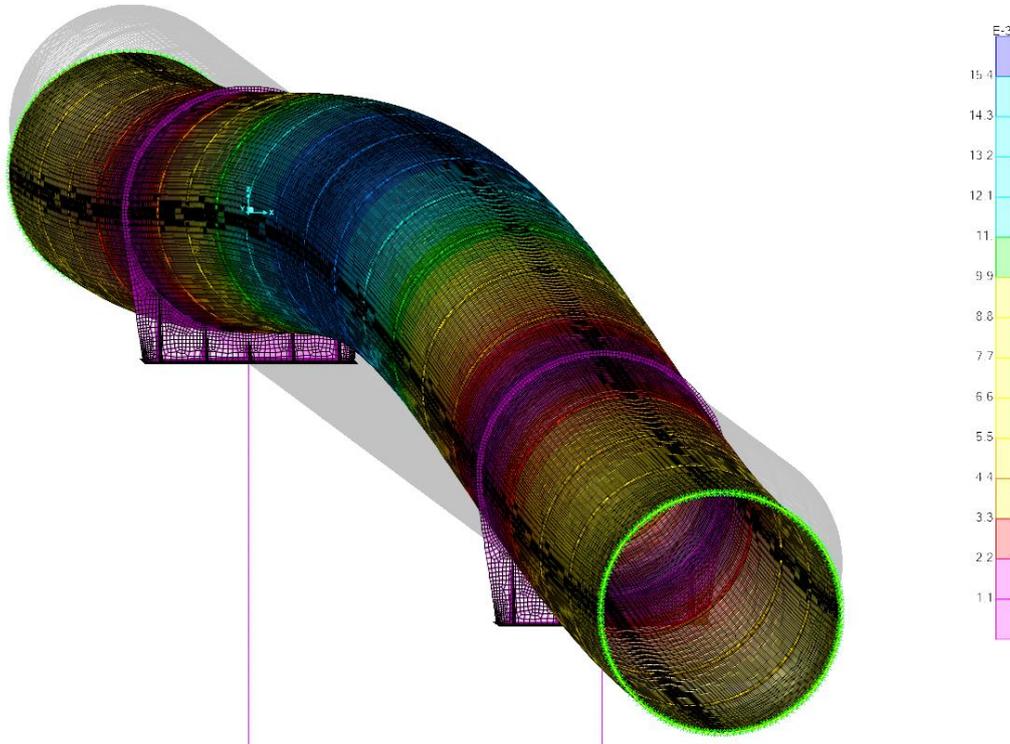
FP=2.26



- **Luz del vano central: 84 m; separación de anillos: 7 m**

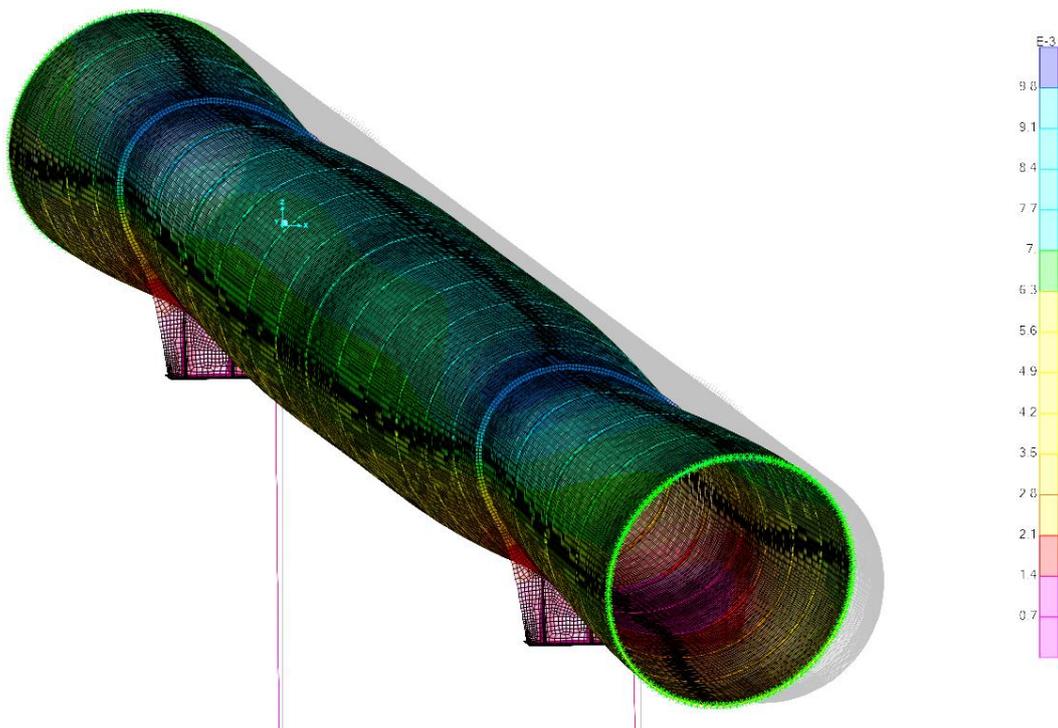
Modo de pandeo: Acciones Térmicas

FP=5.01



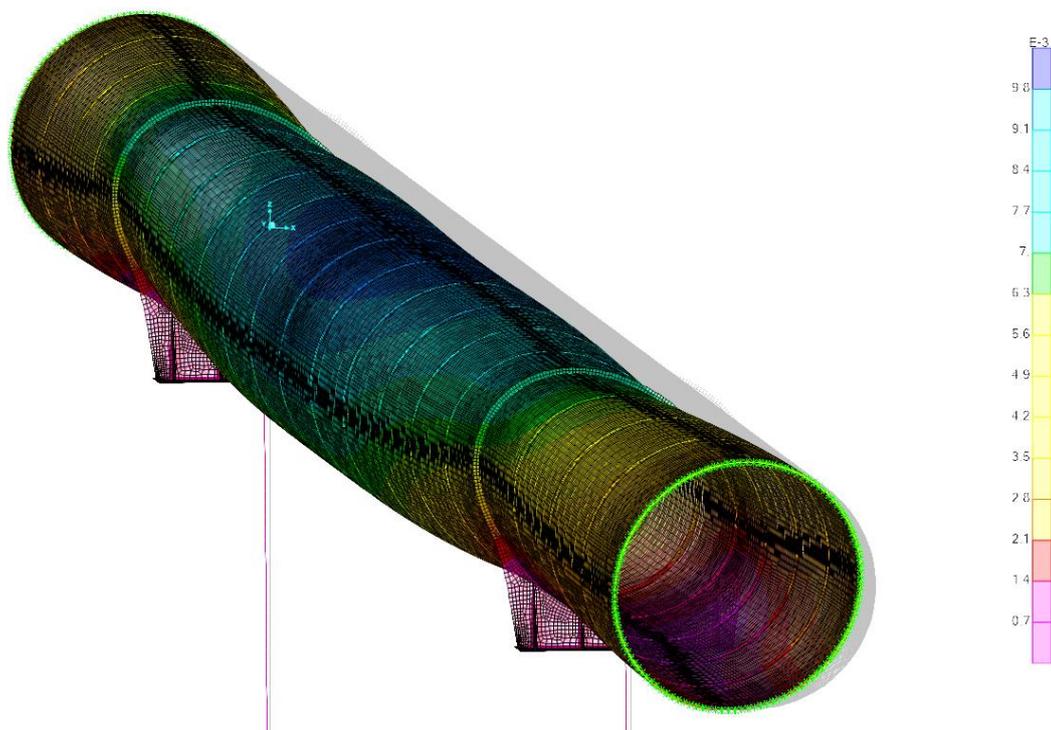
Modo de pandeo: Acciones Térmicas + Presión

FP=4.31



Modo de pandeo: Combinación de acciones ELU

FP=2.96



- Luz del vano central: 28 m;
separación de anillos: 14 m

Modo de pandeo: Acciones Térmicas

FP=9.54



- Luz del vano central: 28 m;
separación de anillos: 7 m

Modo de pandeo: Acciones Térmicas

FP=8.75



- Luz del vano central: 56 m;
separación de anillos: 14 m

Modo de pandeo: Acciones Térmicas

FP=9.63



- Luz del vano central: 56 m;
separación de anillos: 7 m

Modo de pandeo: Acciones Térmicas

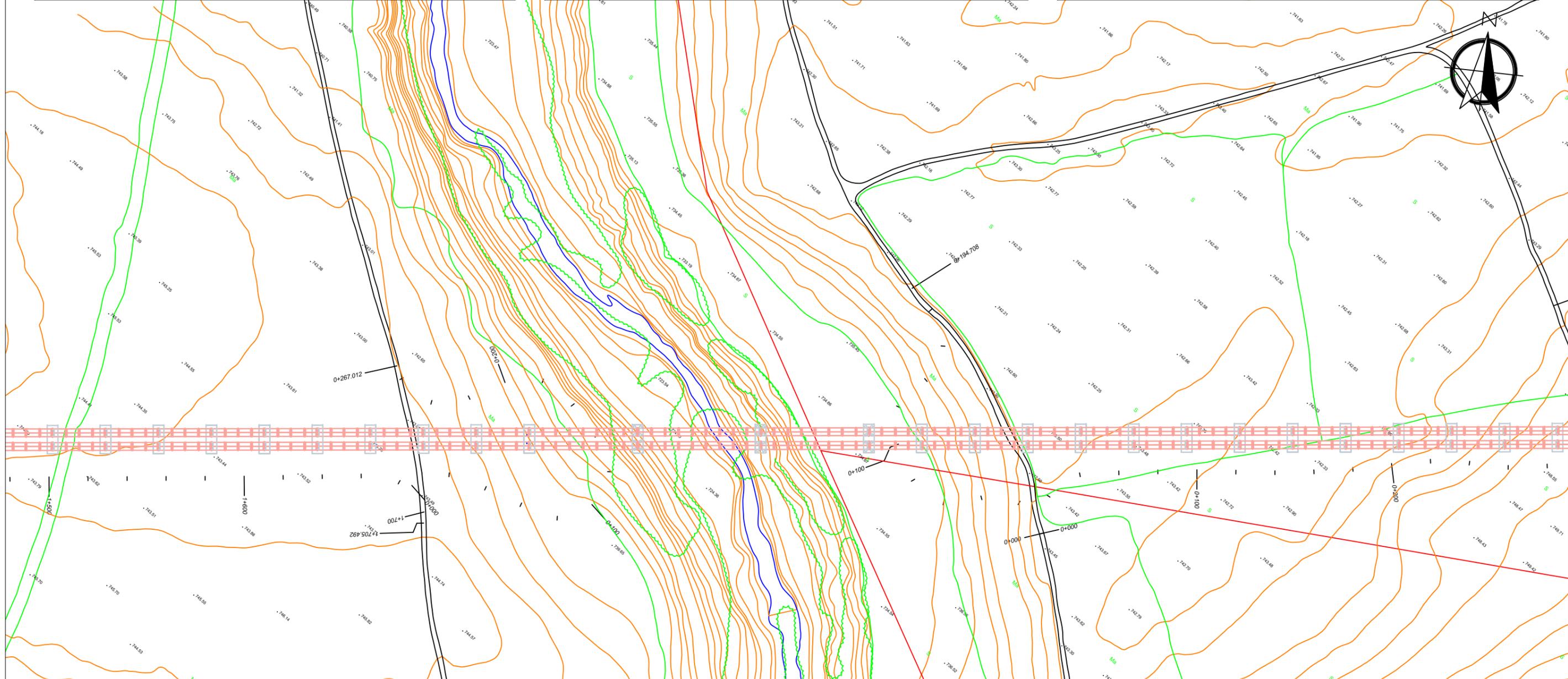
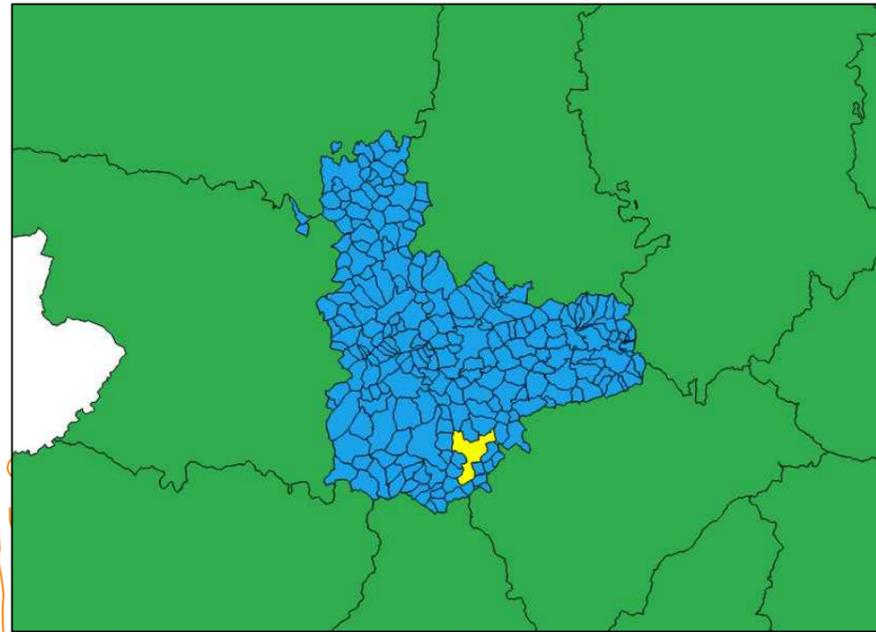
FP=9.37



ANEJO II: Planos del viaducto para el Hyperloop sobre el río Adaja (Olmedo, Valladolid)

ÍNDICE DE PLANOS:

- Plano I: Plano de situación y emplazamiento
- Plano II: Plano de planta, alzado y sección del viaducto
- Plano III: Plano de planta y alzado de la cimentación y las pilas
- Plano IV: Plano de detalle del aparato de apoyo
- Plano V: Plano de detalle del tubo en apoyo y anillo rigidizador



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



TÍTULO:
"Diseño estructural de viaductos de luces medias en líneas de Hyperloop. Aplicación a un viaducto sobre el río Adaja en el T.M. de Olmedo (Valladolid)"

AUTOR:

Marín Vilches, Lorenzo

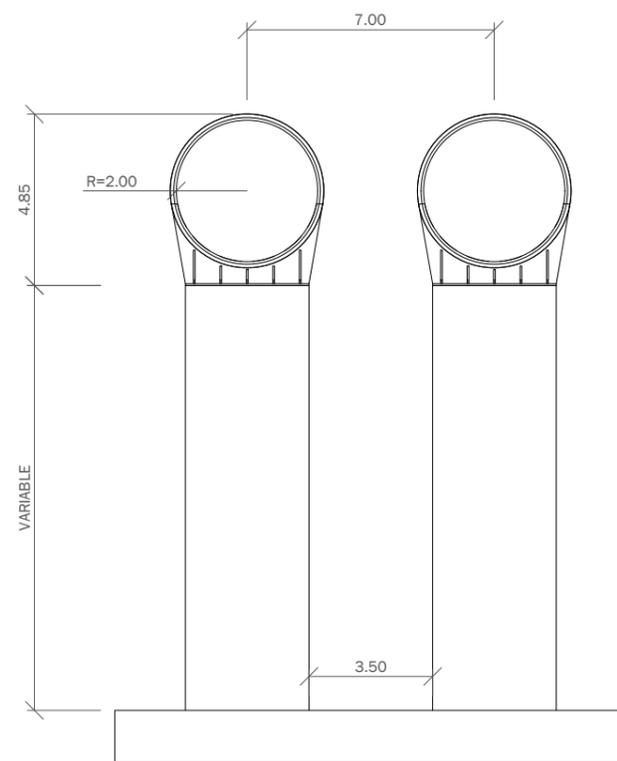
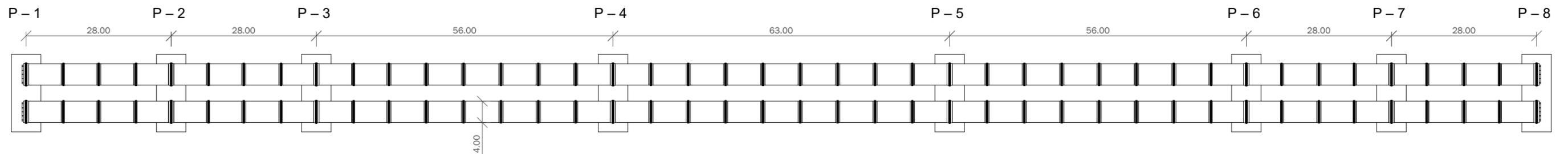
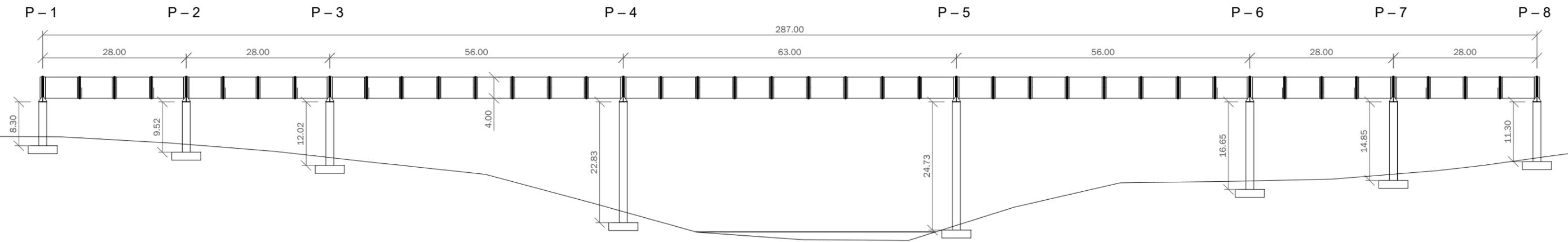
TUTORES:
Museros Romero, Pedro
Lázaro Fernández, Carlos Manuel

TÍTULO DEL PLANO:
SITUACIÓN Y EMPLAZAMIENTO

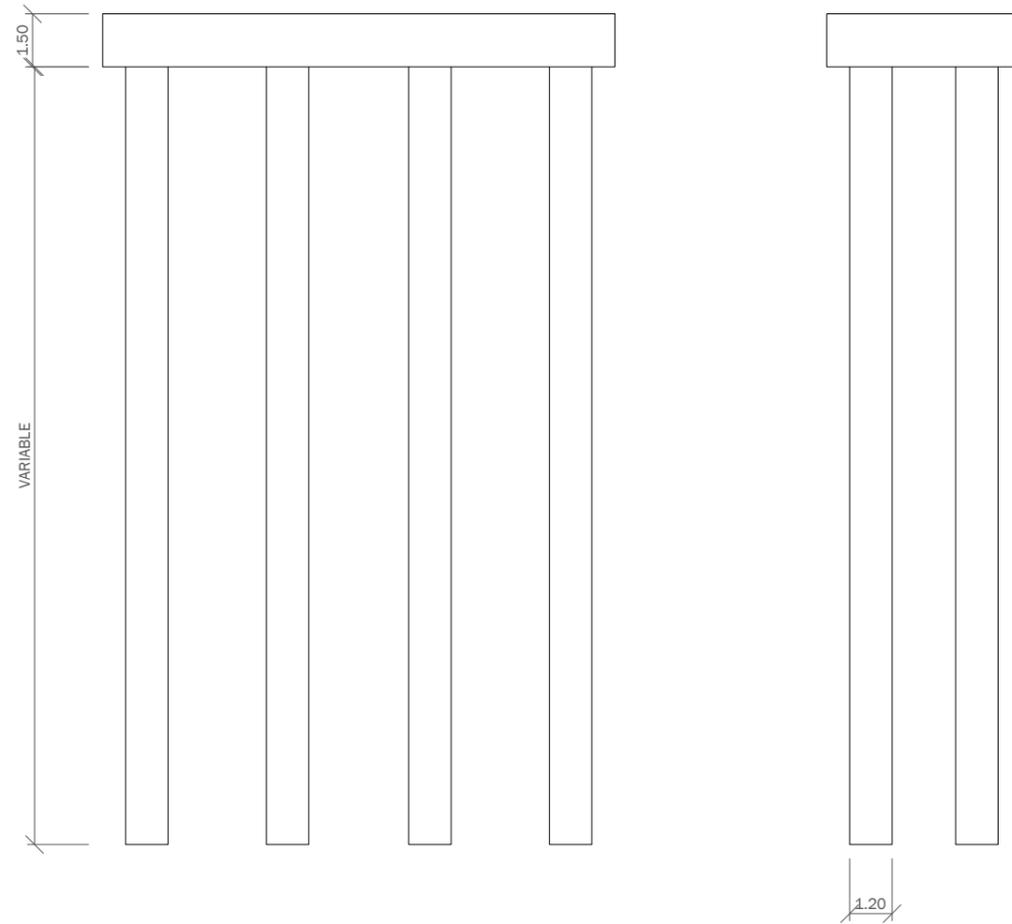
ESCALA:
1:2000

FECHA:
Septiembre
2021

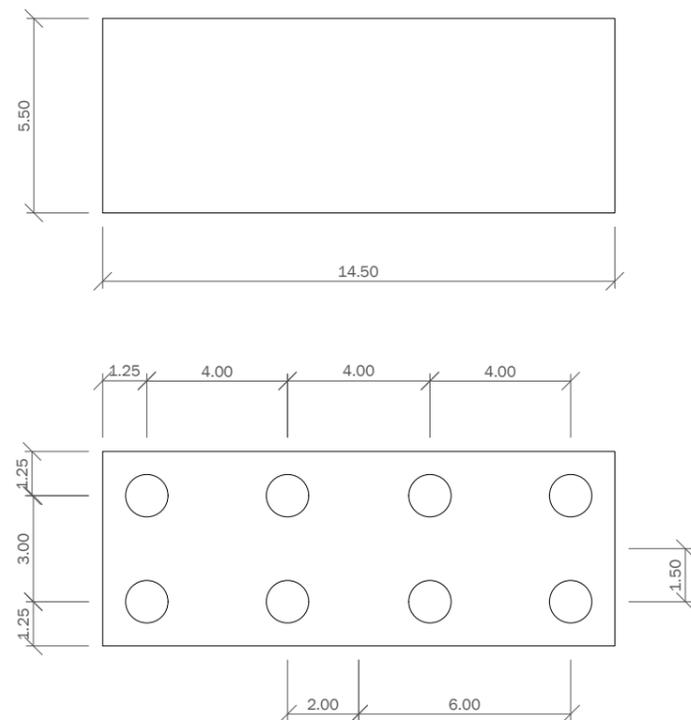
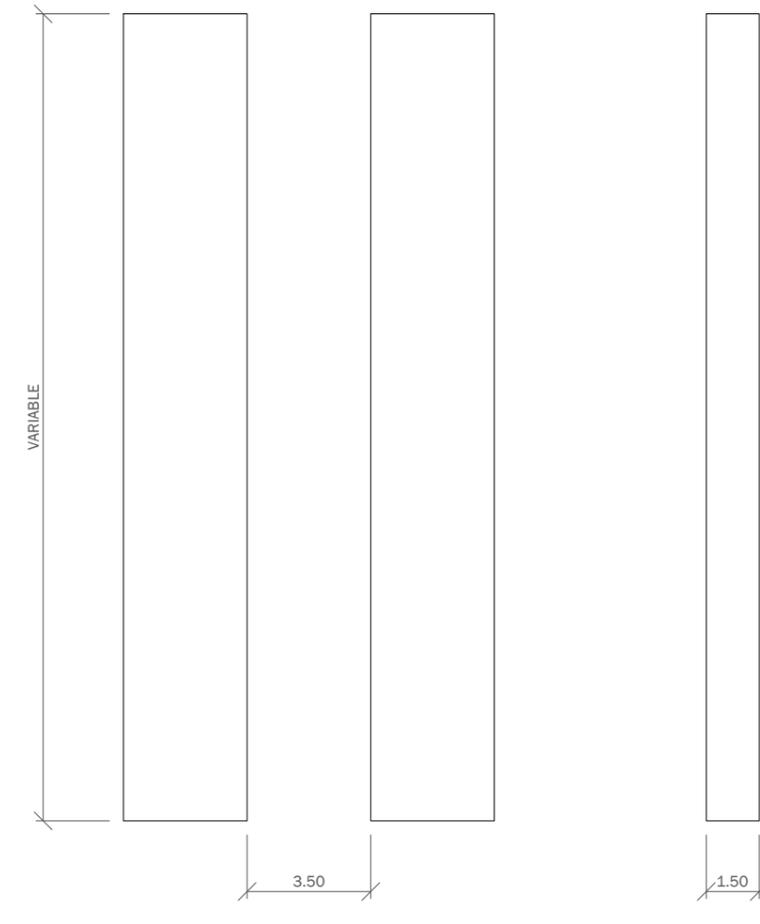
Nº DE PLANO:
I
Hoja 1 de 5



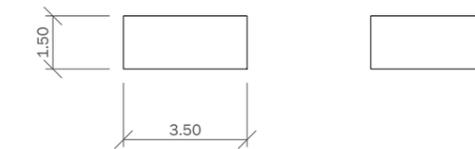
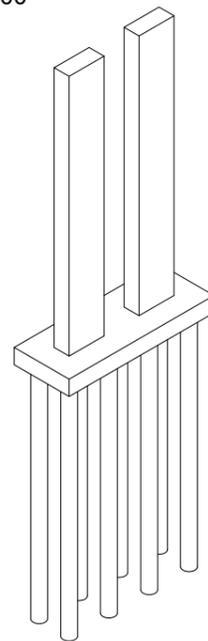
E 1:200



E 1:200



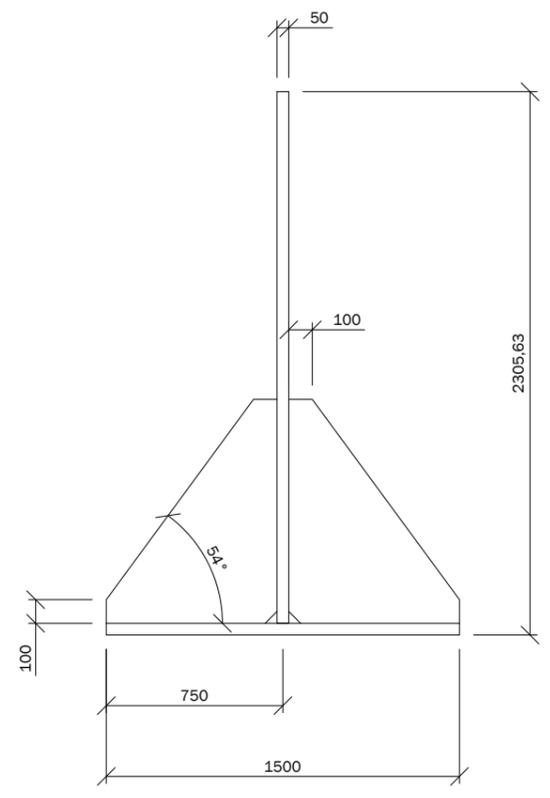
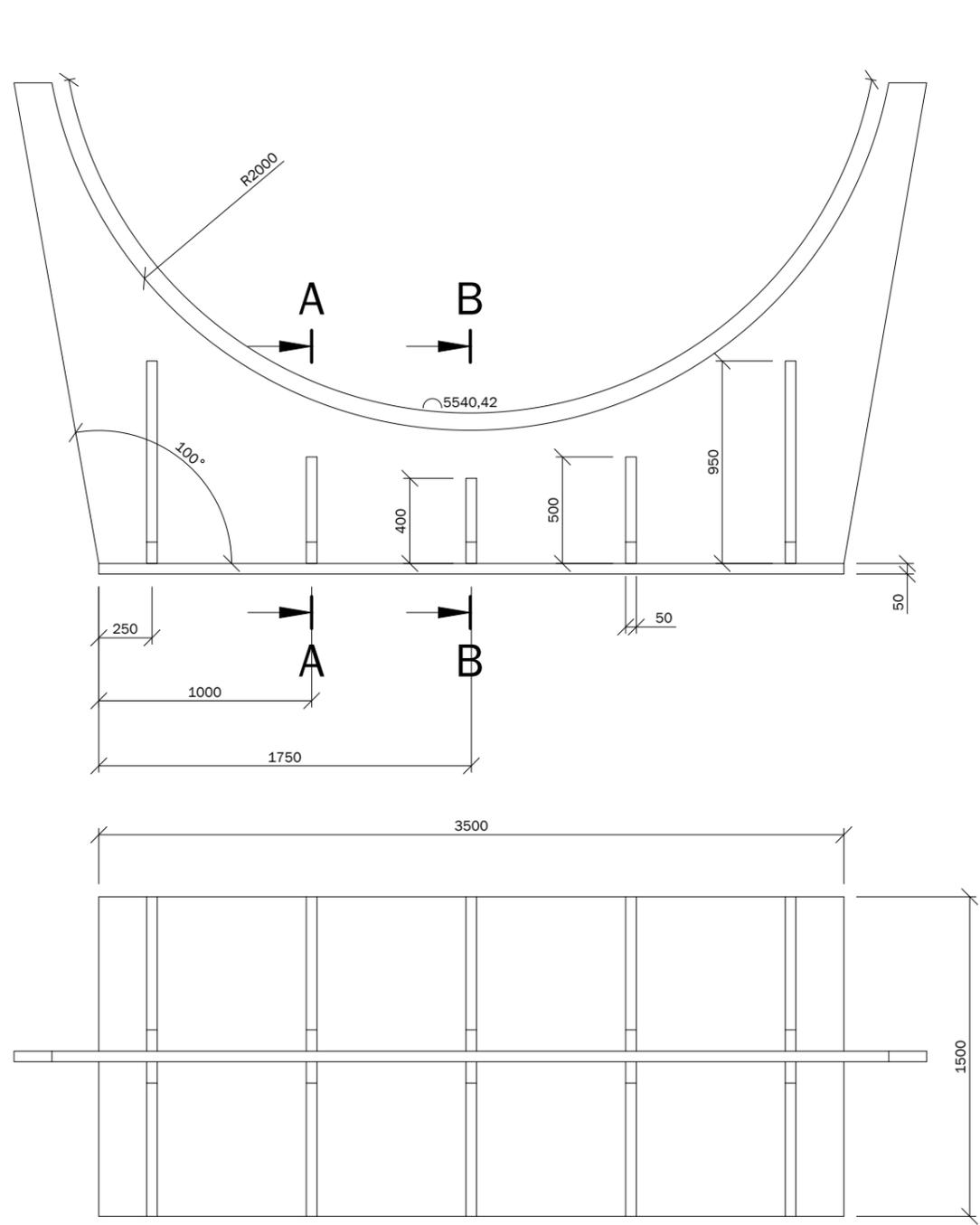
E 1:500



	Altura pila (m)	Profundidad pilotes (m)
P - 1	8.30 m	10 m
P - 2	9.52 m	10 m
P - 3	12.02 m	10 m
P - 4	22.83 m	22 m
P - 5	24.23 m	22 m
P - 6	16.55 m	13 m
P - 7	14.85 m	10 m
P - 8	11.30 m	10 m

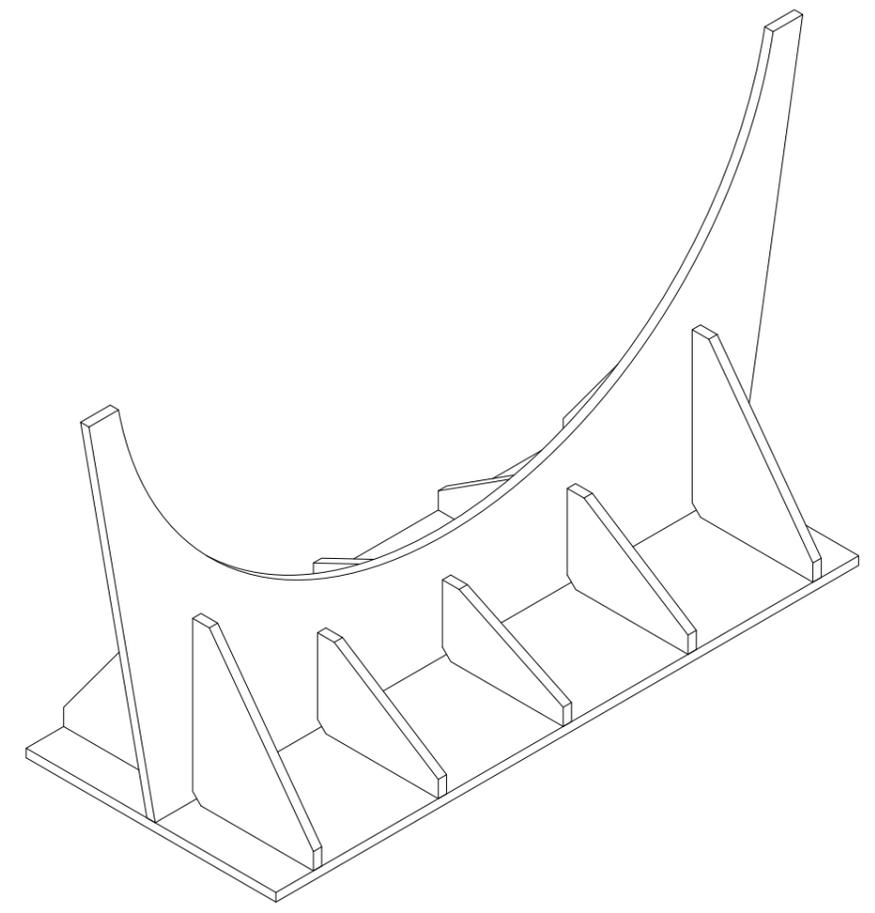
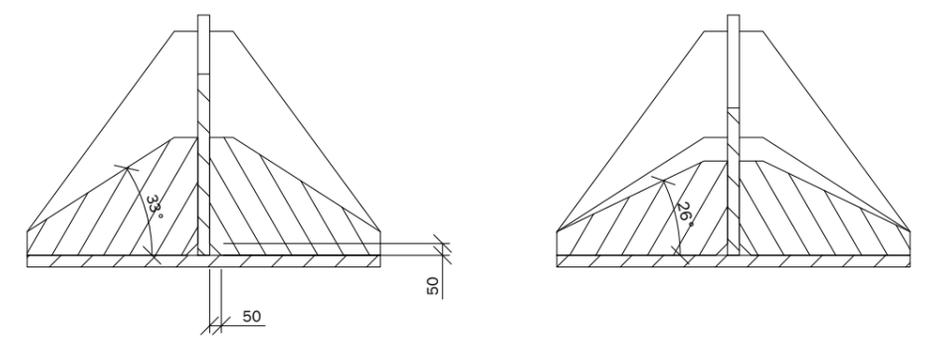
CUADRO DE MATERIALES

ELEMENTO ESTRUCTURAL	MATERIAL	DESIGNACIÓN	NIVEL DE CONTROL	RESISTENCIA CARACTERÍSTICA	COEFICIENTE DE SEGURIDAD
PILAS Y CIMENTACIÓN	Hormigón estructural	C30/35 XC4	Intenso	30 N/mm ²	1.5
	Acero para armar	B500S	Intenso	500 N/mm ²	1.15



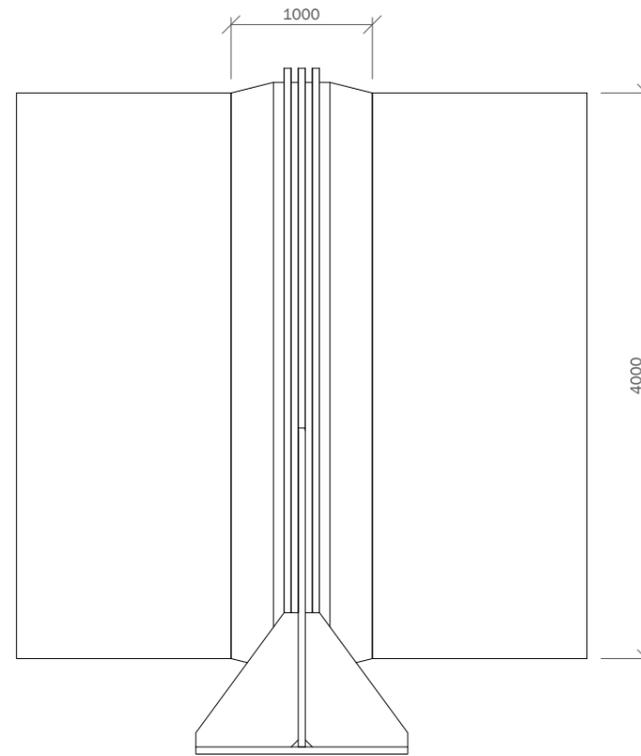
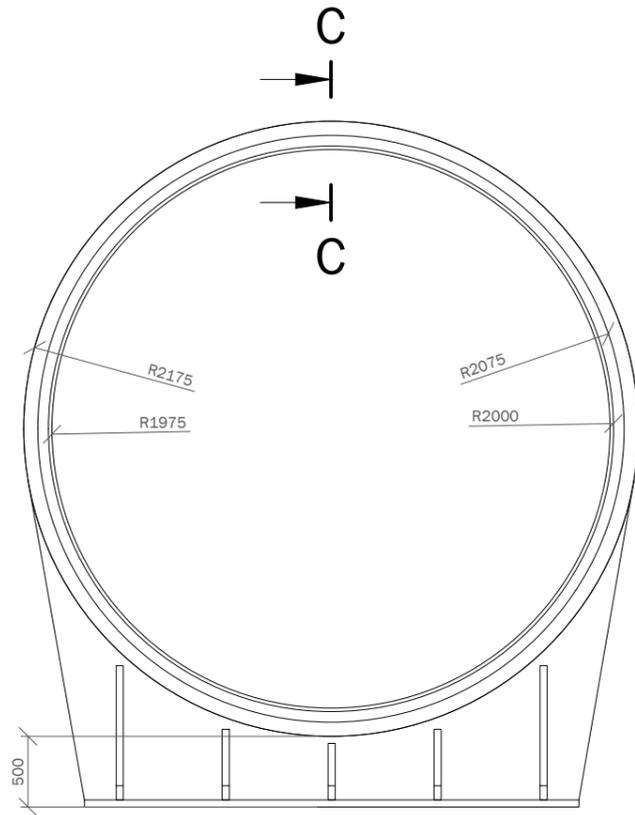
A-A (1:30)

B-B (1:30)

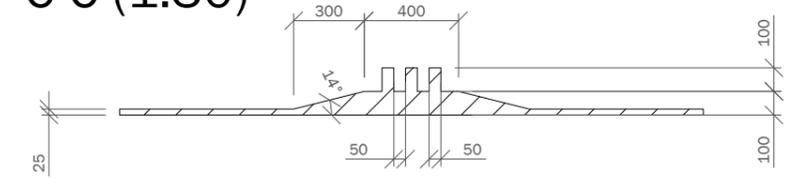


CUADRO DE MATERIALES

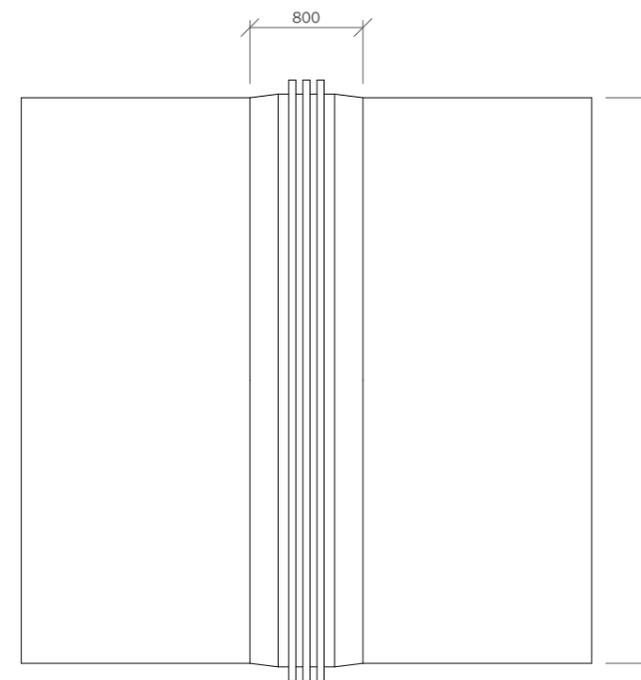
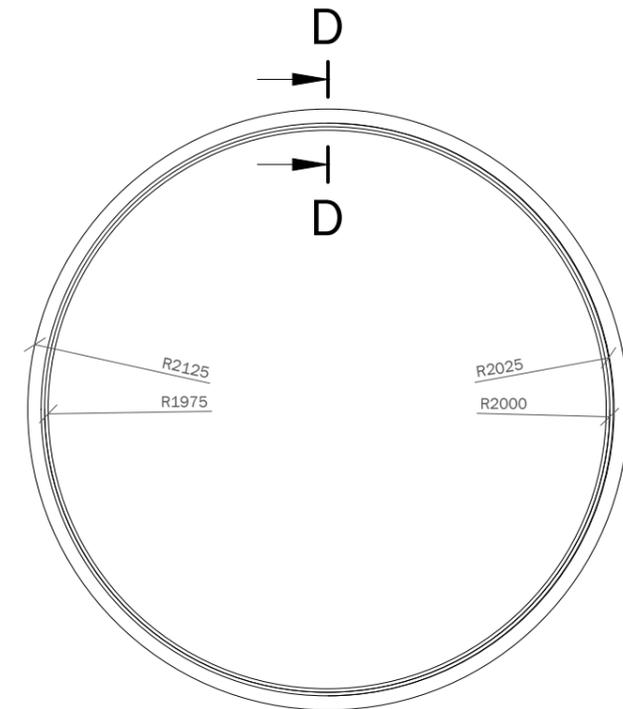
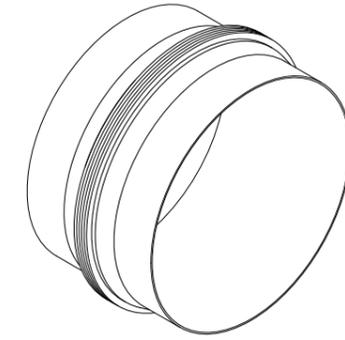
ELEMENTO ESTRUCTURAL	MATERIAL	DESIGNACIÓN	NIVEL DE CONTROL	RESISTENCIA CARACTERÍSTICA	COEFICIENTE DE SEGURIDAD
APARATO DE APOYO	Acero Estructural	S460 Duplex EN14462	Intenso	460 N/mm ²	1.05



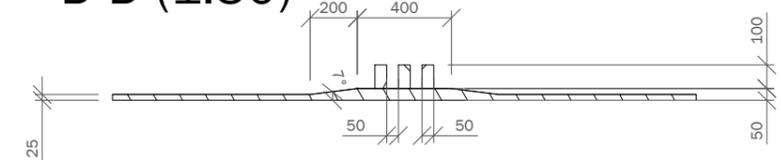
C-C (1:30)



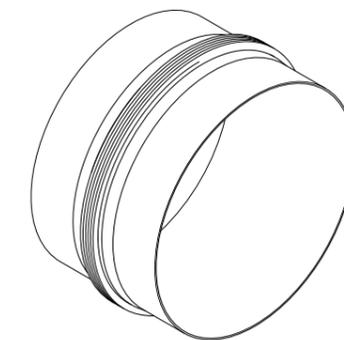
E 1:100



D-D (1:30)



E 1:100



CUADRO DE MATERIALES

ELEMENTO ESTRUCTURAL	MATERIAL	DESIGNACIÓN	NIVEL DE CONTROL	RESISTENCIA CARACTERÍSTICA	COEFICIENTE DE SEGURIDAD
TUBO	Acero Estructural	S460 Duplex EN14462	Intenso	460 N/mm ²	1.05

ANEJO III: Dimensionamiento de encepados y pilotes

Como ejemplo de cálculo para el resto de los encepados, se va a dimensionar y calcular el caso más desfavorable de ellas, es decir, la cimentación de la pila P-5 del vano central de 63 m, cuya longitud de pila es de 22 m.

Al igual que en el caso de las pilas, se estudiarán las cimentaciones necesarias para los siete vanos centrales. Cada uno de los encepados constará de unas dimensiones de 5.5 m de ancho por 14.5 m de largo con un canto de 1.5 m, recogiendo a las dos pilas del viaducto (un tubo por sentido de marcha) y transmitiendo al terreno las cargas mediante 8 pilotes de 1.2 m de diámetro. Todos los encepados se encontrará enterrados a 1.5 m de profundidad, cubiertos de una protección de escollera cuyo peso específico es de $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$.

El material utilizado para el encepado y para los pilotes será el mismo que para las pilas, un hormigón HA-30, donde la resistencia de cálculo se considera del 30% de la resistencia característica.

$$f_{cd} = 0.3 \cdot f_{ck} = 9 \text{ MPa}$$

Las pilas se distribuyen en la cara superior del encepado dejando 2 m de luz a cada lado de la pila y un espacio central entre las caras de las pilas del viaducto de 3.5 m, dejando espacio suficiente para que se puedan realizar tareas de mantenimiento mediante una cesta elevadora.

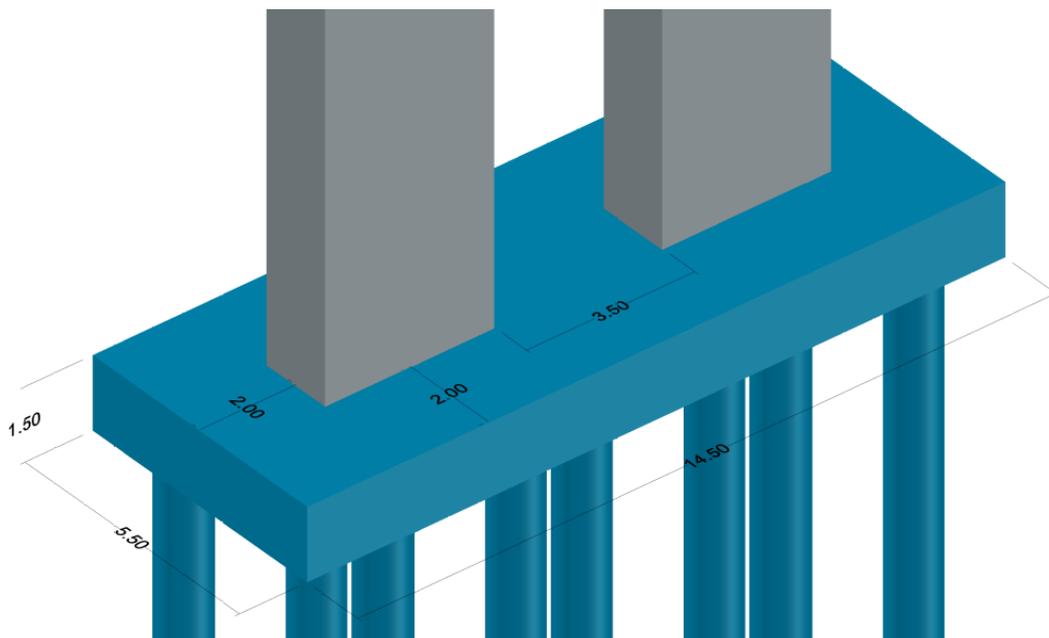


Figura 91. Vuelos de la unión entre la pila y el encepado, en metros. Fuente: Elaboración propia

Los pilotes se distribuyen en la cara inferior del encepado como se muestra en la siguiente figura, donde se ha tenido en cuenta que el vuelo sobre el encepado mínimo sea de 0.6 m (radio del pilote) y el vuelo entre pilotes mínimo sea de 0.6 m (radio del pilote).

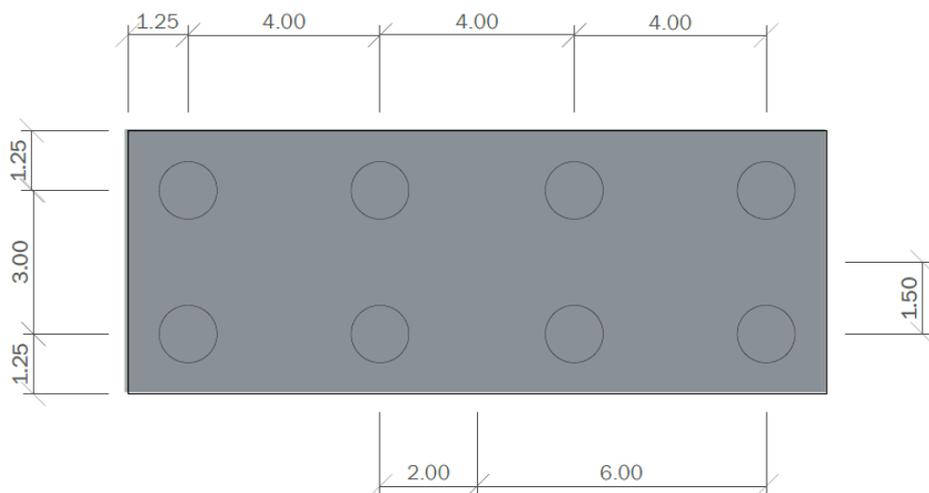


Figura 92. Distribución de pilotes en la cara inferior del encepado, en metros. Fuente: Elaboración propia

Los diferentes estratos del terreno se han obtenido del mapa geológico de España E 1:50.000 del Instituto Geológico y Minero de España (IGME) en su hoja 428. Concretamente el terreno en estudio se describe en la hoja 16-17 de Julio de 1979 en la localización que llama “PUENTE DEL TREN (RIO ADAJA)”.

En la figura siguiente se recoge los terrenos en los que apoya cada uno de los encepados. La leyenda de la imagen sería la siguiente: el color amarillo corresponde a la arena, el color azul al limo y el rojo a la arcilla.

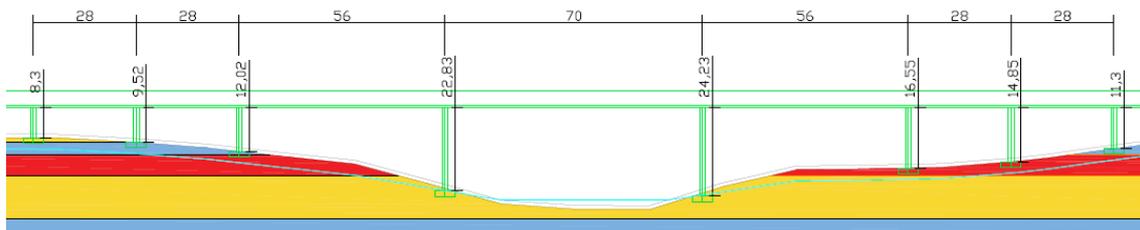


Figura 93. Información de los encepados con el terreno en el que apoyan. Fuente: Elaboración propia

Debido a la falta de información acerca de las características del terreno, para la obtención de sus propiedades se han estimado en función a los datos que se muestran para algunos terrenos en la ROM 0.5 en sus tablas 2.4.2. y 2.4.3 y en el texto *Bases para el Diseño de Fundaciones* de Bengt H. Fellenius.

Material	P (m)	γ_d (kN/m^3)	ϕ ($^\circ$)	c (kPa)	c' (kPa)
Relleno	1.0	15	-	-	-
Arena	1.5	20	36	0	0
Limo	3.4	17	30	-	50
Arcilla	5.7	19	28	-	50
Arena	11.8	20	36	0	0
Limo	4.5	17	30	-	50

Tabla 19. Propiedades del suelo. Río Adaja (Olmedo). Fuente: Elaboración propia

Al igual que en el caso de las pilas, la situación más desfavorable de acciones es aquella en la que el vehículo se encuentra justo en la cabeza de la pila, teniéndose en cuenta el efecto lazo explicado en el anejo anterior. En la siguiente tabla se recogen los esfuerzos causados por las acciones mayoradas según los coeficiente utilizados para el caso de estudio del estado límite último de este documento, con la localización de cada pilote con respecto al centro del encepado. En ella se ha tenido en cuenta tanto las acciones del viaducto como los pesos propios de la protección de escollera y el peso propio del encepado.

Pilote	X(m)	Y(m)	N (kN)	H _x (kN·m)	H _y (kN·m)
P1	5.75	1.25	3522.52	63.09	19.31
P2	5.75	-1.25	3415.29	63.09	19.31
P3	-5.75	1.25	2627.06	63.09	19.31
P4	-5.75	-1.25	2519.83	63.09	19.31
P5	1.92	1.25	3224.04	63.09	19.31
P6	1.92	-1.25	3116.80	63.09	19.31
P7	-1.92	1.25	2925.55	63.09	19.31
P8	-1.92	-1.25	2818.32	63.09	19.31
TOTAL			24169.41	504.72	154.44

Tabla 20. Esfuerzos producidos por las acciones en la cara superior de los pilotes del encepado de las pilas 5. Fuente: Elaboración propia

Para la comprobación de los pilotes se va a realizar las comprobaciones definidas para cimentaciones profundas en la Guía de cimentaciones en obras de carretera (España Dirección General de Carreteras y España Ministerio de Fomento 2011). Las comprobaciones serán las siguientes:

- Comprobación de seguridad frente al hundimiento
- Comprobación de seguridad frente al arranque
- Comprobación de seguridad frente a la rotura del terreno por empujes horizontales

La longitud de los pilotes del encepado de la pila 5 es de 22 m (25 m bajo la cota del terreno).

I. Comprobación de seguridad frente al hundimiento

El axil máximo soportado por un pilote es:

$$N_{Ed} = 3522.52 \text{ kN}$$

El tope estructural del pilote estudiado es:

$$Q_{tope} = f_{cd} \cdot A_p = \frac{9}{1000} \cdot \pi \cdot \frac{1.2^2}{4} = 10178.76 \text{ kN}$$

Para los cálculos de las resistencia por fuste y por punta, se va a utilizar el método basado en ls parámetros resistentes del modelo de Mohr-Coulomb, recogidos en la Guía de Cimentaciones de obras de carretera.

La resistencia unitaria por fuste del pilote sigue:

$$\tau_f = c + K_0 \cdot tg \delta \cdot \sigma'_v \leq 90 \text{ kPa}$$

donde:

- c es la cohesión del nivel estudiado, en este caso todo será sumergido por lo que $c = c'$, tomando los valores definidos en la tabla de propiedades del terreno.
- K_0 es el coeficiente de empuje en reposo, que se tomará como valor 1.
- δ es el ángulo de fricción del contacto pilote-terreno, que se considera como el ángulo de rozamiento del material, definido en la tabla de propiedades del terreno.
- σ'_v es la presión vertical efectivo al nivel considerado.

Para el caso en estudio, se pone los valores característicos de la ley de resistencia unitaria por fuste del pilote:

$$\tau_f(4.75 \text{ m}) = 0 + 1 \cdot tg(36) \cdot (4.75 \cdot (20 - 10)) = 34.51 \text{ kPa}$$

$$\tau_f(5.75 \text{ m}) = 34.51 + (50 + 1 \cdot tg(30) \cdot (1 \cdot (17 - 10))) = 90 \text{ kPa}$$

El valor de la resistencia por fuste del pilote de longitud 24 m es:

$$R_{fk} = \sum \tau_f \cdot A_f = \left(\left(\frac{1}{2} 34.51 \cdot 4.75 \right) + (90 \cdot (22 - 4.75)) \right) \cdot \pi \cdot 1.2 = 6161.78 \text{ kN}$$

La capacidad resistente por punta viene dada por:

$$q_p = N_q \cdot \sigma'_{vo} + N_c \cdot c$$

donde:

- σ'_{vo} es la presión vertical efectiva al nivel de la punta del pilote
- $$\sigma'_{vo}(22 \text{ m}) = 4.75 \cdot (20 - 10) + (22 - 4.75) \cdot (17 - 10) = 168.25 \text{ kPa}$$
- c es la cohesión del nivel estudiado, en este caso todo será sumergido por lo que $c = c'$, tomando los valores definidos en la tabla de propiedades del terreno.
 - N_c, N_q son los factores de capacidad de carga para cimentaciones profundas, dados por:

$$N_q = 1.5 \cdot \frac{1 + \text{sen } \phi}{1 - \text{sen } \phi} \cdot e^{\pi \text{tg } \phi} \cdot f_D \quad N_c = \frac{N_q - 1}{\text{tg } \phi}$$

donde f_D es el efecto del diámetro del pilote que viene dado por:

$$f_D = 1 - \frac{D}{3} \geq \frac{2}{3} \rightarrow f_D = \frac{2}{3}$$

$$N_q = 18.40 \quad N_c = 30.14$$

Por lo tanto, la capacidad resistente por punta es:

$$q_p = 18.40 \cdot 168.25 + 30.14 \cdot 50 = 4602.97 \text{ kPa}$$

El valor de la resistencia por punta del pilote de longitud 24 m es:

$$R_{pk} = A_p \cdot q_p = \pi \cdot \frac{1.2^2}{4} \cdot 4602.97 = 5205.84 \text{ kN}$$

Debido a que las acciones consideradas se han considerado mediante la combinación casi permanente, el coeficiente de seguridad frente al hundimiento se considera como:

$$\gamma_R = 3$$

La resistencia por hundimiento del pilote será:

$$R_{cd} = \frac{R_{fk} + R_{pk}}{\gamma_R} = \frac{6161.78 + 5205.84}{3} = 3789.21 \text{ kN}$$

Por lo que la carga admisible de hundimiento del pilote aislado será el siguiente:

$$R_{cd} = \min(Q_{tope}; R_{cd}) = \min(10178.76 \text{ kN}; 3789.21 \text{ kN}) = 3789.21 \text{ kN}$$

El coeficiente de seguridad frente al hundimiento es:

$$F_{Hund} = \frac{3789.21 \text{ kN} \cdot 3}{3522.52 \text{ kN}} = 3.23 > 3$$

Para la comprobación del pilote como grupo de pilotes, se va a utilizar el método del pilote equivalente, siendo el diámetro equivalente del pilote:

$$D_{eq} = \sqrt{\frac{\left(1.2 + 2 \cdot \left(\frac{5.5}{2} - 0.6 - 1.2\right)\right) \cdot \left(1.2 + 2 \cdot \left(\frac{14.5}{2} - 0.6 - 1.2\right)\right)}{\pi}} \cdot 2$$

$$D_{eq} = 6.91 \text{ m}$$

Realizando los mismos cálculos anteriores de resistencia por fuste y por punta se obtienen:

$$R_{cd,Deq} = \frac{35485.72 + 172657.41}{3} = 69381.04 \text{ kN}$$

El coeficiente de seguridad frente al hundimiento del grupo es:

$$F_{Hund,grupo} = \frac{69381.04 \cdot 3}{24169.41} = 8.61 > 3$$

II. Comprobación de seguridad frente al arranque

La resistencia a tracción del pilote en cuestión será de:

$$T_{rotura} = 0.7 \cdot Q_f = 0.7 \cdot \frac{6161.78}{\pi \cdot 1.2} = 1144.12 \text{ kN}$$

En este estudio ninguno de los pilotes se encuentra a tracción.

III. Comprobación de seguridad frente a la rotura del terreno por empujes horizontales

Para comprobar la rotura del terreno por empujes horizontales, el estudio se va a basar según el método de carga de rotura horizontal del terreno para terreno puramente granular.

Debido a falta de información en las propiedades del terreno, se va a considerar que el terreno es puramente granular, considerando como coeficiente de fricción y peso específico el promedio del de los estratos del terreno que atraviese el pilote. También se va a suponer que la fuerza horizontal se ejerce en la cara superior del encepado.

De esta forma, para el caso del pilote en estudio, los valores de las propiedades serán:

$$\phi = 31.25^\circ \quad \gamma = 17.61 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \quad e = 1.5 \text{ m}$$

Los ítems de entrada en el gráfico 5.14. de la guía en cuestión son:

$$\frac{L}{D} = \frac{22}{1.2} = 18.33; \frac{e}{L} = \frac{1.5}{22} = 0.07 \rightarrow \frac{H}{\gamma \cdot K_p \cdot D^3} \approx 140$$

$$\frac{H}{\gamma \cdot K_p \cdot D^3} = \frac{H}{17.61 \cdot tg^2 \left(45 + \frac{31.25}{2}\right) \cdot 1.2^3} = 140 \rightarrow H = 13445.42 \text{ kN}$$

Por lo tanto:

$$\{V_{long} = 154.44 \text{ kN}; V_{trans} = 504.72 \text{ kN}\} < H$$

IV. Resumen de las comprobaciones del resto de cimentaciones

A continuación, se muestran para el resto de encepados los factores de comprobación de seguridad frente al hundimiento, frente al arranque y frente a la rotura del terreno por empujes horizontales, donde se incluyen las alturas de las pilas, el diámetro de los pilotes de cada encepado y la profundidad del pilote teniendo como referencia la cara inferior del encepado.

Pilar	h pilar (m)	D (m)	h pilote (m)	Factor Hundimiento		Factor Arranque	Factor Rotura Horizontal	
				Unitario	Grupal		Lateral X	Lateral Y
P-1	8.30	1.20	10.00	3.55	12.50	NO	51.62	12.92
P-2	9.52	1.20	10.00	3.50	9.57	NO	48.98	14.41
P-3	12.02	1.20	10.00	3.51	11.41	NO	39.09	8.88
P-4	22.83	1.20	22.00	3.27	8.92	NO	87.84	25.43
P-5	24.23	1.20	22.00	3.23	8.61	NO	82.74	25.32
P-6	16.55	1.20	13.00	3.55	15.35	NO	49.10	14.07
P-7	14.85	1.20	10.00	3.55	10.27	NO	34.94	15.94
P-8	11.30	1.20	10.00	3.69	11.64	NO	35.24	13.07

Tabla 21. Factores de seguridad de los grupos de pilotes. Fuente: Elaboración propia

Con estos resultados se indica que las dimensiones que se han tenido en cuenta para los pilotes de la cimentación del viaducto son correctas.

ANEJO IV: Relación del TFM con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030

Grado de relación del trabajo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

Objetivos de Desarrollo Sostenibles	Alto	Medio	Bajo	No Procede
ODS 1. Fin de la pobreza.		X		
ODS 2. Hambre cero.				X
ODS 3. Salud y bienestar.		X		
ODS 4. Educación de calidad.				X
ODS 5. Igualdad de género.				X
ODS 6. Agua limpia y saneamiento.				X
ODS 7. Energía asequible y no contaminante.	X			
ODS 8. Trabajo decente y crecimiento económico.	X			
ODS 9. Industria, innovación e infraestructuras.	X			
ODS 10. Reducción de las desigualdades.		X		
ODS 11. Ciudades y comunidades sostenibles.		X		
ODS 12. Producción y consumo responsables.				X
ODS 13. Acción por el clima.	X			
ODS 14. Vida submarina.				X
ODS 15. Vida de ecosistemas terrestres.			X	
ODS 16. Paz, justicia e instituciones sólidas.				X
ODS 17. Alianzas para lograr objetivos.	X			

Descripción de la alineación del TFM con los ODS con un grado de relación más alto.

ODS 1. Fin de la pobreza y ODS 3: Salud y bienestar
 Debido a la alta velocidad del hyperloop y, por lo tanto, a la realización de viajes de altas distancias en tiempos reducidos, hace que poblaciones aisladas lejanas de las grandes ciudades puedan comunicarse con ellas y tener accesos a mejores servicios básicos, tecnología y recursos naturales.

Además, mejora la cobertura de las personas pobres y hace que tengan las mismas oportunidades de acceso a dichos servicios, ya que en un viaje corto (menor de 1 hora) pueden disfrutar cualquier servicio que no exista en su lugar de residencia. Se mejoraría la cobertura sanitaria, aspecto muy importante en algunos países donde mueren miles de personas al año por muchas enfermedades desatendidas por falta de medios. Se reduciría el número de accidentes de tráfico producidos en trayectos de largo recorrido (distracciones, falta de descanso, etc.) y, por ende, también reduciría la contaminación.

Todos estos aspectos garantizarían una vida más sana, mejorando las economías de los países ya que las personas sanas son la base de las economías saludables.

ODS 7. Energía asequible y no contaminante y ODS 13. Acción por el clima.

Una de las características que exponen casi todas las empresas dedicadas al desarrollo del Hyperloop, es la cobertura de paneles solares que cubre el tubo en todo su recorrido. De esta forma se utilizaría cerca del 80% de la superficie del tubo para captar toda la energía solar posible desde el amanecer hasta el ocaso.

El uso de esta tecnología reduce la utilización de combustibles altamente contaminantes para la obtención de energía necesaria para este medio de transporte, como el carbón o el petróleo, principales materias primas impulsoras del cambio climático, mayormente utilizado en países en desarrollo. Esto reduciría la utilización de estas materias primas en dichos países, ayudando a la reducción de contaminantes en el ambiente, alcanzándose así los objetivos pactados en el Acuerdo de París.

ODS 8. Trabajo decente y crecimiento económico y ODS 10. Reducción de las desigualdades

Además de la introducción de nuevos puestos de trabajo al mercado: servicios, industrias, construcción, mantenimiento, etc., el hyperloop ayudará a encontrar empleos de calidad a toda la población. El personal contratado por cualquier empresa ya no tendrá que ser local, sino que también podrá ser provincial o incluso externo a su propia comunidad autónoma, aumentando la posibilidad de los empleos en las zonas rurales más alejadas de los ámbitos urbanos, reduciendo por ejemplo la despoblación de la España vaciada.

Otros aspectos son la oportunidad de obtener un empleo de calidad, acorde a su formación, para jóvenes, población adulta y población migrante; la promoción del turismo sostenible en poblaciones rurales, aumento del emprendimiento y la innovación por la creación de empresas en ciudades como el poblaciones rurales; etc.

ODS 9. Industria, innovación e infraestructura.

Desde la presentación de Elon Musk del renacimiento conceptual del hyperloop, numerosas empresas han iniciado la carrera en la investigación de este medio de transporte. Todo este desarrollo ha fomentado la aparición de tecnologías secundarias y de todo tipo de conceptos nuevos como estaciones intermodales de hyperloop, maneras de construcción de los tubos, etc., incluso ha fomentado a la competición entre universidades para el desarrollo de tecnologías como la de la propia cápsula o de tuneladoras más rápidas.

ODS 11. Ciudades y comunidades sostenibles.

La implementación del hyperloop en las grandes ciudades y los grandes núcleos comerciales (como los puertos) es un asunto crucial para la reducción de la contaminación y el crecimiento de las comunidades sostenibles.

Su introducción reducirá el número de desplazamientos por otros medios de transporte (como coches, camiones, barcos y/o aviones), pudiendo aprovechar el espacio que dejan para la construcción de vías verdes o la implementación de medios más sostenibles como el autobús o el metro en las grandes ciudades. Este es el caso de los puertos, donde la implementación del hyperloop reduciría la ocupación de los contenedores en los espacios portuarios, pudiendo introducirse estos en el interior del territorio, incluso siendo este mismo espacio para varios puertos cercanos (o no tan cercanos).

La tecnología permitirá el acceso de la población a hogares más sostenibles alejados de las grandes ciudades, permitirá acceder a servicios básicos más adecuados, facilitará el acceso a zonas verdes más rápidamente, reducirá el impacto ambiental de las ciudades en la calidad del aire y por la gestión de residuos.

ODS 15. Vida ecosistemas terrestres.

La aplicación de la infraestructura del hyperloop en sus tramos intermedios entre paradas será elevado (en la definición de este proyecto). De esta forma la afección al medio natural será menor que otros medios de transporte como los medios por carretera o el tren, cuyas afecciones son cruciales en sitios como los parques naturales (atropello de animales, incendios por accidentes, deterioro del medio por basuras, etc.).

Esta tecnología reduce la contaminación del ser humano en aspectos como los gases de efecto invernadero, las basuras por paso de vehículos, la contaminación acústica, el corte o barrera producido por infraestructuras como la ferroviaria, entre otros, que aumentan la degradación de las tierras y reducen la biodiversidad de las zonas donde pasan.

ODS 17. Alianza para lograr objetivos.

La introducción del hyperloop en la vida de la sociedad tiene un alto valor en el desarrollo de la vida del planeta, como se han comentado en todos los ODS anteriores. Para conseguir todos los objetivos de desarrollo sostenibles se necesita colaboración entre países, en aspectos administrativos, judiciales, políticos, etc., de todas las competencias de todas las instituciones. El Hyperloop permitirá la conexión de poblaciones a distancias entre 800 y 1000 km (y posiblemente más), actualizando la manera de transportar tanto personas como mercancías, llegando a modificar incluso la organización urbanística de las ciudades y la idea de los viajes de ocio o los trayectos a ciudades o centros de trabajo; además de que ayudarían a conseguir los objetivos pactados de huella de carbono dictados en el Acuerdo de París.