



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos,  
Canales y Puertos

Estudio de alternativas para la infraestructura tubular de  
Hyperloop UPV

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Civil

AUTOR/A: Espinar Hernández, Beatriz de Silva

Tutor/a: Cuadrado Tarodo, Álvaro

Cotutor/a: Castro Bugallo, María Carmen

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024





## **AGRADECIMIENTOS**

*A mis padres y mi abuela, por no haber dudado nunca de lo que podía llegar a conseguir y apoyarme siempre.*

*A mis amigos de clase, que hasta en los días más difíciles estaban ahí para hacerlos mejores.*

*A todos mis chicos de Hyperloop UPV, que han estado conmigo al pie del cañón desde el minuto uno confiando en todo lo grande que podíamos conseguir juntos.*



## **RESUMEN**

Hyperloop es el ya considerado quinto medio de transporte que combina la velocidad del avión con la comodidad y la frecuencia del tren en un entorno de vacío. Es un sistema que consiste en cápsulas capaces de viajar levitando a través de una infraestructura tubular, es decir, se evita cualquier tipo de rozamiento tanto con el aire como con la superficie, consiguiendo un medio de transporte que desafía los límites de la movilidad sostenible.

Para poder conseguir este hito, este medio de transporte debe ir dotado de una infraestructura capaz de soportar las condiciones para las que el vehículo ha sido diseñado. De esta manera, la infraestructura deberá soportar las cargas ejercidas durante el viaje de la cápsula y la baja presión.

A lo largo de este trabajo se van a proponer cuatro alternativas diferentes de diseño de infraestructuras válidas para el actual vehículo de Hyperloop UPV.

En la primera parte, tras comentar los requerimientos de diseño y el modelo genérico, se expondrán los cálculos de resistencia de las diferentes alternativas.

Seguidamente, los diferentes casos serán evaluados en base a distintos criterios para seleccionar el más adecuado para el equipo, siendo los aspectos más importantes la fiabilidad y el coste de ejecución.

Después, se comentarán los estados de las simulaciones de elementos finitos para asegurar el buen comportamiento estructural.

Finalmente, se explicará la importancia de la investigación de estas nuevas formas de movilidad en base a los medios de transporte ya existentes.

Palabras clave: infraestructura; acero; hormigón; hyperloop; vehículo; vacío.





## **ABSTRACT**

Hyperloop is now being considered the fifth means of transport, combining the speed of the airplane with the comfort and frequency of the train in a low-pressure environment. It is a system that consists of capsules that levitate through a tubular infrastructure, avoiding friction with the air and any kind of surface, achieving a means of transport that challenges the limits of sustainable mobility.

To achieve this milestone, this mode of transportation must be equipped with an infrastructure capable of supporting the conditions for which the vehicle has been designed. In this way, the infrastructure must withstand the loads exerted during the journey and the vacuum.

Throughout this project, four suitable alternatives for the design of the infrastructure for the current Hyperloop UPV vehicle will be proposed.

In the first part, the resistance calculations for the different alternatives will be presented after discussing the design requirements and the generic model.

Following this, a rigorous evaluation process will be undertaken, considering various criteria to identify the most suitable alternative. The key factors under scrutiny will be reliability and cost.

After that, the status of finite element simulations will be discussed to ensure good structural performance.

Finally, the critical importance of researching these new modes of mobility will be underscored, particularly in the context of existing transportation methods. This emphasis serves to highlight the urgency and significance of the topic at hand.

Keywords: infrastructure; steel; concrete; hyperloop; vehicle; vacuum.





# ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>13</b>
A. ANTECEDENTES.....	14
B. MOTIVACIÓN DEL TRABAJO .....	16
C. OBJETIVOS .....	16
<b>2. ESTADO DEL ARTE.....</b>	<b>17</b>
A. ORIGEN .....	17
B. HYPERLOOP UPV .....	19
C. EUROPEAN HYPERLOOP WEEK.....	20
D. PROYECTOS Y ANTECEDENTES .....	20
E. HYPELOOP EN LA REALIDAD.....	20
F. HYPERLOOP Y EL MEDIO AMBIENTE.....	21
<b>3. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>23</b>
A. PRINCIPALES RETOS .....	23
B. VEHÍCULO HYPERLOOP .....	23
<i>Chasis .....</i>	<i>23</i>
<i>Guiados horizontales y verticales.....</i>	<i>25</i>
<i>Frenos .....</i>	<i>25</i>
<i>Sistemas para la levitación .....</i>	<i>25</i>
<i>Propulsión.....</i>	<i>26</i>
<b>4. INFRAESTRUCTURA TUBULAR .....</b>	<b>28</b>
SISTEMAS A IMPLEMENTAR EN EL DISEÑO .....	28
<input type="checkbox"/> <i>Raíl.....</i>	<i>28</i>
<input type="checkbox"/> <i>Sistema lateral.....</i>	<i>28</i>
<input type="checkbox"/> <i>Booster .....</i>	<i>29</i>
<input type="checkbox"/> <i>Tecnología de vacío.....</i>	<i>30</i>
<b>5. POR QUÉ ESCOGER HYPERLOOP COMO MEDIO DE TRANSPORTE .....</b>	<b>31</b>
<b>6. METODOLOGÍA .....</b>	<b>37</b>
A. VARIANTES DE LOS MATERIALES DE LA INFRAESTRUCTURA.....	37
B. MODELO GENÉRICO.....	37
C. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES .....	39
<i>Hormigón HA-50 .....</i>	<i>39</i>
<i>Hormigón con camisa de chapa.....</i>	<i>39</i>
<i>Hormigón de ultra alta resistencia .....</i>	<i>39</i>
<i>Acero S355.....</i>	<i>40</i>
D. ANÁLISIS ESTRUCTURAL .....	40
<i>Acciones .....</i>	<i>40</i>
<b>7. SIMULACIONES MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (FEM).....</b>	<b>42</b>
ACCIONES.....	42
DIFERENCIA DE PRESIÓN.....	42
<b>8. EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS .....</b>	<b>44</b>
DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....	53
<b>9. PROYECCIÓN DE FUTURO.....</b>	<b>55</b>
<b>10. CONCLUSIONES .....</b>	<b>57</b>





<b>ANEXO 1</b> .....	<b>58</b>
<b>ANEXO 2</b> .....	<b>60</b>
<b>ANEXO 3</b> .....	<b>64</b>
<i>Dimensionamiento estructura de hormigón</i> .....	64
<i>COMPROBACIÓN DE ARMADURAS</i> .....	76
<i>Dimensionamiento hormigón con camisa de chapa</i> .....	82
<i>Dimensionamiento hormigón UHPC</i> .....	86
<i>Dimensionamiento estructura de acero</i> .....	88
<b>ANEXO 4</b> .....	<b>94</b>
<b>ANEXO 5</b> .....	<b>105</b>
A.    COSTE DEL MATERIAL.....	105
<b>ANEXO 6</b> .....	<b>108</b>
<b>ANEXO 7</b> .....	<b>128</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>135</b>



# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

ILUSTRACIÓN 1 - INFRAESTRUCTURA TUBULAR DE ACERO ATLAS DE HYPERLOOP UPV 2023 - FUENTE: HYPERLOOP UPV .....	14
ILUSTRACIÓN 2 - DEMOTUBO - FUENTE: EUROTUBE.ORG .....	15
ILUSTRACIÓN 3 - CENTRO R&D DE HYPERLOOP TT EN TOULOUSE - FUENTE: HYPERLOOP TT.COM .....	15
ILUSTRACIÓN 4 - FERROCARRIL ATMOSFÉRICO DE SAINT-GERMAIN DE PARÍS - FUENTE: AFERIOJA .....	17
ILUSTRACIÓN 5 - SECCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE LA VÁLVULA DE SAMUDA EN EL FERROCARRIL ATMOSFÉRICO DE LONDRES - FUENTE: TRATADO DE SAMUDA .....	18
ILUSTRACIÓN 6 - EL FERROCARRIL DE ALFRED ELY BEACH, 1870 - FUENTE: CABOVOLO BLOG .....	18
ILUSTRACIÓN 7 - EQUIPO ACTUAL DE HYPERLOOP UPV - FUENTE: HYPERLOOP UPV .....	19
ILUSTRACIÓN 8 - VEHÍCULO VÈSPER - FUENTE: HYPERLOOP UPV .....	23
ILUSTRACIÓN 9 - BOGIE - FUENTE: HYPERLOOP UPV .....	24
ILUSTRACIÓN 10 - CÁPSULA - FUENTE: HYPERLOOP UPV .....	24
ILUSTRACIÓN 11 - GUIADOS - FUENTE: HYPERLOOP UPV .....	25
ILUSTRACIÓN 12 - HEMS - FUENTE: HYPERLOOP UPV .....	26
ILUSTRACIÓN 13 - EMS - FUENTE: HYPERLOOP UPV .....	26
ILUSTRACIÓN 14 - DOBLE MOTOR DE INDUCCIÓN LINEAL - FUENTE: HYPERLOOP UPV .....	26
ILUSTRACIÓN 15 - EXPLOSIONADO DE LOS SISTEMAS DESCRITOS - FUENTE: HYPERLOOP UPV .....	27
ILUSTRACIÓN 16 - RAÍL - FUENTE: HYPERLOOP UPV .....	28
ILUSTRACIÓN 17 - SISTEMA LATERAL - FUENTE: HYPERLOOP UPV .....	29
ILUSTRACIÓN 18 - SECCIÓN BOOSTER - FUENTE: HYPERLOOP UPV .....	30
ILUSTRACIÓN 19 - BOMBA SOGEVAC SV 300B DE LEYBOLD - FUENTE: LEYBOLD.COM .....	30
ILUSTRACIÓN 20 - DIAGRAMA GENÉRICO DE CARGAS Y CONDICIONES DE CONTORNO - FUENTE PROPIA .....	38
ILUSTRACIÓN 21 - ESQUEMA DE INTEGRACIÓN DE LA CÁMARA DE VACÍO EN LA INFRAESTRUCTURA - FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA .....	55
ILUSTRACIÓN 22 - MAPA DE ISOTACAS PARA LA OBTENCIÓN DE LA VELOCIDAD BÁSICA FUNDAMENTAL DEL VIENTO – FUENTE: IAP 11 .....	60
ILUSTRACIÓN 23 - SECCIÓN DE HORMIGÓN - FUENTE PROPIA .....	64
ILUSTRACIÓN 24 - VALOR D EN BASE AL RECUBRIMIENTO - FUENTE PROPIA .....	68
ILUSTRACIÓN 25 - DETERMINACIÓN DE ARMADO EN BASE A LA ARMADURA MÍNIMA - FUENTE PROPIA .....	72
ILUSTRACIÓN 26 - ARMADO DE LA ESTRUCTURA - FUENTE PROPIA .....	72
ILUSTRACIÓN 27 - ESQUEMA DE LA OBTENCIÓN DE LOS INCREMENTOS DE ÁREA DE LA ALTERNATIVA 1 .....	77
ILUSTRACIÓN 28 - ENUMERACIÓN DE LAS ARMADURAS PARA EL ESTUDIO - FUENTE PROPIA .....	78
ILUSTRACIÓN 29 - ESQUEMA DE LA OBTENCIÓN DE LAS DEFORMADAS EN BASE A LAS ARMADURAS - FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA .....	79
ILUSTRACIÓN 30 - SECCIÓN HORMIGÓN CON DOBLE CAMISA DE CHAPA - FUENTE PROPIA .....	83
ILUSTRACIÓN 31 - ESQUEMA DE LOS INCREMENTOS DE ÁREA PARA LA ALTERNATIVA 2 - FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA .....	84
ILUSTRACIÓN 32 - SECCIÓN DE LA ALTERNATIVA DE HORMIGÓN DE ULTRA ALTA RESISTENCIA - FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA .....	86
ILUSTRACIÓN 33 - DISTRIBUCIÓN DE ARMADO DE LA ALTERNATIVA DE HORMIGÓN DE ULTRA ALTA RESISTENCIA - FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA .....	87
ILUSTRACIÓN 34 - SECCIÓN ACERO - FUENTE PROPIA .....	88
ILUSTRACIÓN 35 - RENDER EN ANSYS DE HA-50 - FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA .....	108
ILUSTRACIÓN 36 - RENDER EN ANSYS DE HORMIGÓN CON CAMISA DE CHAPA - FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA .....	109
ILUSTRACIÓN 37 - RENDER EN ANSYS DE HORMIGÓN DE ULTRA ALTA RESISTENCIA - FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA .....	109
ILUSTRACIÓN 38 - RENDER EN ANSYS DE ACERO - FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA .....	110
ILUSTRACIÓN 39 - MALLADO ANSYS HA-50 - FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA .....	111
ILUSTRACIÓN 40 - MALLADO ANSYS CAMISA DE CHAPA - FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA .....	113



ILUSTRACIÓN 41 - MALLADO ANSYS HORMIGÓN DE ULTRA ALTA RESISTENCIA - FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA .....	115
ILUSTRACIÓN 42 - MALLADO ANSYS ACERO - FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA .....	117
ILUSTRACIÓN 43 - DEFORMACIÓN TOTAL HA-50 - FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	120
ILUSTRACIÓN 44 - DEFORMACIÓN TOTAL POR VACÍO HA-50 - FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA .....	120
ILUSTRACIÓN 45 - DEFORMACIÓN TOTAL POR VACÍO CAMISA DE CHAPA - FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA ....	122
ILUSTRACIÓN 46 - DEFORMACIÓN TOTAL CAMISA DE CHAPA - FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	122
ILUSTRACIÓN 47 - DEFORMACIÓN TOTAL UHPC - FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA .....	124
ILUSTRACIÓN 48 - DEFORMACIÓN TOTAL POR VACÍO UHPC - FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	124
ILUSTRACIÓN 49 - DEFORMACIÓN TOTAL POR VACÍO EN ACERO - FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	125
ILUSTRACIÓN 50 - DEFORMACIÓN TOTAL ACERO - FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA .....	127

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1 - COMPARATIVA DE LOS DISTINTOS MEDIOS DE TRANSPORTE FRENTE A HYPERLOOP - FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA .....	31
TABLA 2 - ACCIDENTALIDAD Y VÍCTIMAS MORTALES DEL TRANSPORTE ESPAÑOL - FUENTE: OTLE, 2022 .....	35
TABLA 3 - CARACTERÍSTICAS GENERALES - FUENTE PROPIA .....	38
TABLA 4 - PROPIEDADES DE LOS MATERIALES DE LA ALTERNATIVA 1 - FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA .....	39
TABLA 5- PROPIEDADES DE LOS MATERIALES DE LA ALTERNATIVA 3 - FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	39
TABLA 6- PROPIEDADES DE LOS MATERIALES DE LA ALTERNATIVA 4 - FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	40
TABLA 7 - CARGAS ACTUANTES EN LAS DISTINTAS ALTERNATIVAS - FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA .....	41
TABLA 8 - DEFORMACIONES RESULTANTES DE LA SIMULACIÓN - FUENTE: ANSYS WORKBENCH .....	42
TABLA 9 - DISTRIBUCIÓN DE PUNTOS EN BASE A LOS CRITERIOS ESTABLECIDOS PARA LAS DISTINTAS ALTERNATIVAS - FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA .....	51
TABLA 10 - PESOS PONDERADOS PARA SELECCIONAR LA ALTERNATIVA DEFINITIVA - FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA .....	52
TABLA 11 - VALORES DE LA ACCIÓN DEL VIENTO - FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA .....	63
TABLA 12 - CLASIFICACIÓN ESTRUCTURAL DEL DISEÑO - FUENTE: .....	75
TABLA 13 - POSICIÓN DE LAS BARRAS DE ARMADO EN X - FUENTE PROPIA.....	79
TABLA 14 - VALORES DE CÁLCULO PARA LA ALTERNATIVA DE HORMIGÓN CON DOBLE CAMISA DE CHAPA - FUENTE PROPIA.....	83
TABLA 15 - ESFUERZOS DE CÁLCULO DE LA ALTERNATIVA 3 - FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA .....	86
TABLA 16 - COMBINACIÓN DE ACCIONES ESTRUCTURA DE ACERO - FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA .....	89
TABLA 17 - PRECIOS DE LAS DISTINTAS ALTERNATIVAS SEGÚN GRANTA EDUPACK POR KG - FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA .....	107
TABLA 18 - MALLADO HA-50 – FUENTE: ANSYS WORKBENCH.....	111
TABLA 19 - CONTROL DE MALLADO HA-50 – FUENTE: ANSYS WORKBENCH.....	112
TABLA 20 - MALLADO CAMISA DE CHAPA – FUENTE: ANSYS WORKBENCH.....	113
TABLA 21 - CONTROL DE MALLADO CAMISA DE CHAPA – FUENTE: ANSYS WORKBENCH .....	114
TABLA 22 - MALLADO UHPC – ANSYS WORKBENCH.....	115
TABLA 23 - CONTROL DE MALLADO UHPC – FUENTE: ANSYS WORKBENCH.....	116
TABLA 24 - MALLADO ACERO – ANSYS WORKBENCH.....	117
TABLA 25 - CONTROL DE MALLADO ACERO – FUENTE: ANSYS WORKBENCH.....	118
TABLA 26 - RESULTADOS SIMULACIÓN HA-50 – FUENTE: ANSYS WORKBENCH.....	119
TABLA 27 - DEFORMACIÓN TOTAL HA-50 – FUENTE: ANSYS WORKBENCH.....	119
TABLA 28 - FACTOR DE SEGURIDAD PARA VACÍO HA-50 - FUENTE: ANSYS WORKBENCH.....	120
TABLA 29 - DEFORMACIÓN ELÁSTICA PRINCIPAL MÁXIMA HA-50 - FUENTE: ANSYS WORKBENCH.....	120
TABLA 30 - TENSIÓN EQUIVALENTE HA-50 - FUENTE: ANSYS WORKBENCH .....	121
TABLA 31 - RESULTADOS SIMULACIÓN CAMISA DE CHAPA - FUENTE: ANSYS WORKBENCH.....	121
TABLA 32 - DEFORMACIÓN TOTAL CAMISA DE CHAPA - FUENTE: ANSYS WORKBENCH.....	121



TABLA 33 - FACTOR DE SEGURIDAD PARA VACÍO CAMISA DE CHAPA - FUENTE: ANSYS WORKBENCH .....	122
TABLA 34 - DEFORMACIÓN ELÁSTICA PRINCIPAL MÁXIMA CAMISA DE CHAPA - FUENTE: ANSYS WORKBENCH	122
TABLA 35- TENSIÓN EQUIVALENTE CAMISA DE CHAPA - FUENTE: ANSYS WORKBENCH .....	122
TABLA 36 - RESULTADOS SIMULACIÓN UHPC - FUENTE: ANSYS WORKBENCH .....	123
TABLA 37 - DEFORMACIÓN TOTAL UHPC - ANSYS WORKBENCH.....	123
TABLA 38 - FACTOR DE SEGURIDAD PARA VACÍO UHPC - FUENTE: ANSYS WORKBENCH .....	124
TABLA 39 - DEFORMACIÓN ELÁSTICA PRINCIPAL MÁXIMA UHPC - FUENTE: ANSYS MECHANICAL .....	124
TABLA 40- TENSIÓN EQUIVALENTE UHPC - FUENTE: ANSYS WORKBENCH.....	125
TABLA 41 - DEFORMACIÓN TOTAL POR VACÍO EN ACERO - FUENTE: ANSYS WORKBENCH.....	125
TABLA 42 - FACTOR DE SEGURIDAD PARA VACÍO EN ACERO - FUENTE: ANSYS WORKBENCH .....	125
TABLA 43 - RESULTADOS SIMULACIÓN ACERO - FUENTE: ANSYS WORKBENCH .....	125
TABLA 44 - DEFORMACIÓN TOTAL ACERO - FUENTE: ANSYS WORKBENCH .....	126
TABLA 45 - DEFORMACIÓN ELÁSTICA PRINCIPAL MÁXIMA ACERO - FUENTE: ANSYS WORKBENCH.....	127
TABLA 46- TENSIÓN EQUIVALENTE ACERO - FUENTE: ANSYS WORKBENCH.....	127



# 1. INTRODUCCIÓN

La necesidad de la movilidad, del transporte, siempre ha ido ligada a la evolución de la especie humana y a su vez al desarrollo social, económico y cultural. Desde los primeros nómadas que se desplazaban constantemente para su supervivencia buscando siempre las mejores condiciones de vida, hasta los primeros asentamientos que promovieron las primeras rutas de transporte para intercambiar productos. Esto evolucionó hacia las rutas comerciales de las antiguas civilizaciones, como, por ejemplo, Egipto o China, quienes, aparte de desarrollar rutas terrestres, comenzaron con la navegación tanto fluvial como marítima para facilitar el comercio e intercambio de sus bienes. Todo esto siempre ha ido de la mano de evoluciones en los medios de transporte, como fue la invención de la rueda en Mesopotamia, permitiendo que las personas se pudiesen mover de forma más cómoda y eficiente, o como también fue la mejora de las técnicas de navegación y la creación de los primeros mapas.

El siglo XIX trajo consigo la revolución industrial, que permitió el desarrollo y la implementación del ferrocarril, todo un hito para el transporte de grandes cantidades de personas a distancias medias y largas. Pero, aunque en el siglo XX no se hable de revolución, el transporte dio un vuelco drástico con la aparición de los primeros automóviles, que permitían el transporte individual, y con la invención de los aviones, creando una red de transporte capaz de conectar cualquier parte del mundo en cuestión de horas.

No cabe duda de que el siglo XXI traerá consigo un cambio que llevará el transporte que conocemos hoy día un paso más allá. Hyperloop está considerado como el quinto medio de transporte, constituido por una cápsula que levita en vacío a través de una infraestructura tubular, bien de acero u hormigón, combinando la velocidad del avión con la comodidad y frecuencia del tren. El hecho de estar en vacío hace que las pérdidas de energía sean mínimas, ya que no tiene rozamiento ni con el aire ni con ningún tipo de estructura, lo que lo hace un transporte totalmente sostenible que apenas consume energía eléctrica durante su funcionamiento.

Para empezar con este cambio, un equipo de estudiantes de la Universidad Politécnica de Valencia ya ha comenzado a desarrollar esta tecnología, habiendo conseguido un vehículo que roza la realidad. Pero qué es esta realidad sin su infraestructura, sin el medio por el que viajará a cualquier parte del mundo. En este proyecto se van a estudiar distintas alternativas para ese vehículo que servirán como modelo preliminar de lo que algún día podrá ser su infraestructura, ya que, en estos instantes, lo más importante es la investigación, el prototipado y la innovación.



## A. ANTECEDENTES

Un vehículo hyperloop viajará a través de una infraestructura tubular que puede ser de diversos materiales y que además contendrá todos los elementos que harán posible la levitación, permitiendo la adaptación de la cápsula al entorno para generar un viaje cómodo.

Cabe destacar, que la gran mayoría de estudios que se conocen a día de hoy sobre la infraestructura de hyperloop contempla estructuras de acero, algo que en España supone una ventaja dados los altos niveles de industrias siderúrgicas con las que se cuenta. Mirando hacia un nivel más escalable en el que la infraestructura siga una continuidad entre sus destinos de una forma que todos los países involucrados puedan tener sus infraestructuras propias, empresas como EuroTube han optado por el desarrollo de estructuras de hormigón, siendo un material que puede obtenerse, principalmente, en la mayoría de los países europeos sin necesidad de largos transportes y costes.

Para poner un poco en contexto, a continuación, se van a mostrar algunas de las infraestructuras que ya se han desarrollado en los últimos años, incluyendo la de Hyperloop UPV, una infraestructura tubular de acero que es capaz de soportar el vacío a pequeña escala.



*Ilustración 1 - Infraestructura tubular de acero Atlas de Hyperloop UPV 2023 - Fuente: Hyperloop UPV*



*Ilustración 2 - Demotubo - Fuente: eurotube.org*

La empresa Eurotube se ha decantado por la fabricación de una tubería de hormigón postesado recubierto tanto en su interior como su exterior de chapa de acero, similar a la que se utiliza en aeronáutica.



*Ilustración 3 - Centro R&D de Hyperloop TT en Toulouse - Fuente: hyperlooptt.com*

Hyperloop TT, en cambio, optó por una infraestructura puramente de acero.

El hecho de crear una infraestructura que además de soportar vacío tenga que soportar una carga dinámica de la envergadura de un tren de alta velocidad es toda una motivación para este proyecto. Es una forma de hacer ver al mundo que los ingenieros realmente cambian la vida de las personas, y que lo que hoy en día parece impensable, algún día llegará a estar al alcance de todos.



## B. MOTIVACIÓN DEL TRABAJO

Podría decirse que el tiempo es el bien máspreciado de todo ser humano. El tiempo es lo que permite disfrutar de la vida, cada uno a su manera, experimentando todas aquellas cosas que parecen importantes para ser felices. Para qué perder el tiempo cuando puedes ahorrártelo. El desplazamiento de usuarios a través de los medios de transporte es lo que conecta distintas realidades en una sola, y es por esto que hyperloop va a revolucionar la movilidad tal y como se conoce hoy en día para llevarla hacia una más cercana, rápida, cómoda, eficiente, y, sobre todo, segura. El concepto hyperloop quiere transmitir la tranquilidad de que la alta velocidad y la comodidad pueden ir de la mano, y es bien sabido que un sistema bien estructurado genera confianza en los usuarios que vayan a utilizarlo. El desarrollo de esta tecnología va avanzando a pasos de gigante, motivo por el que en este trabajo se va a desarrollar un concepto que va a acercar más a la realidad de este medio de transporte a todos sus lectores: una infraestructura tubular que permita el desplazamiento.

## C. OBJETIVOS

- Generar diseños preliminares para la infraestructura de Hyperloop UPV para su actual vehículo
- Comparación de la idoneidad del sistema frente a otros materiales
- Generar un diseño de alternativas de hormigón armado
- Conseguir un diseño inicial escalable
- Mantener el vacío en la infraestructura para evitar pérdidas de presión





## 2. ESTADO DEL ARTE

### A. ORIGEN

Aunque simplemente la palabra hyperloop suene futurista, este concepto y sus primeros avances se remontan a siglos atrás. George Medhurst es el primer ingeniero conocido que propuso la idea del transporte a través de diferencias de presión. Su vida como inventor giró en torno a estas ideas, y fue en el año 1799 cuando patentó una bomba de viento que comprimía el aire para obtener energía motriz, siendo al año siguiente, en el 1800, cuando presentó el primer motor eólico que utilizaba aire comprimido para propulsar vehículos. De aquí se desencadenó la idea del tren atmosférico en 1812, proponiendo que el mismo vehículo haría de pistón dentro de una tubería de hierro fundido. Sus conceptos se quedaron en simples ideas que años más adelante Jacob Samuda y Samuel Clegg llevarían a la realidad en Londres, consiguiendo que la idea se esparciese por Dublín o París-Saint Germain. Finalmente, los proyectos terminaron dejándose a un lado tanto por problemas técnicos como por la aparición de las máquinas de vapor, lo que les presionó para centrarse en una tecnología más potente y factible.

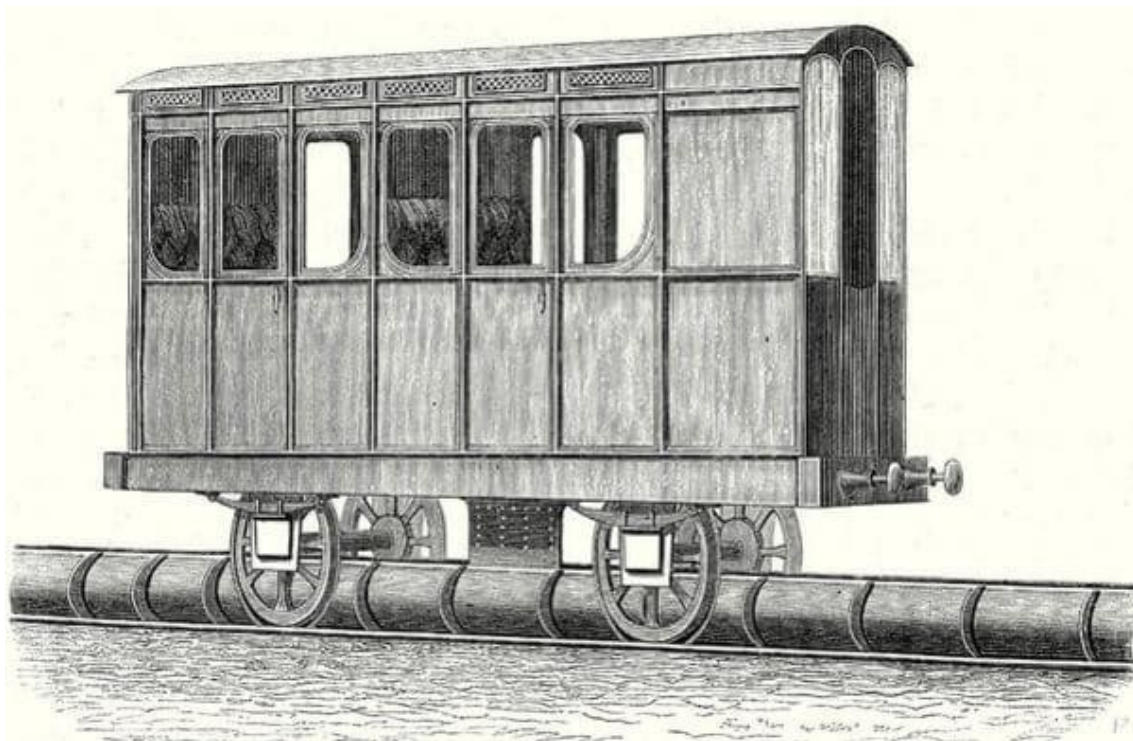


Ilustración 4 - Ferrocarril atmosférico de Saint-Germain de París - Fuente: Aferioja

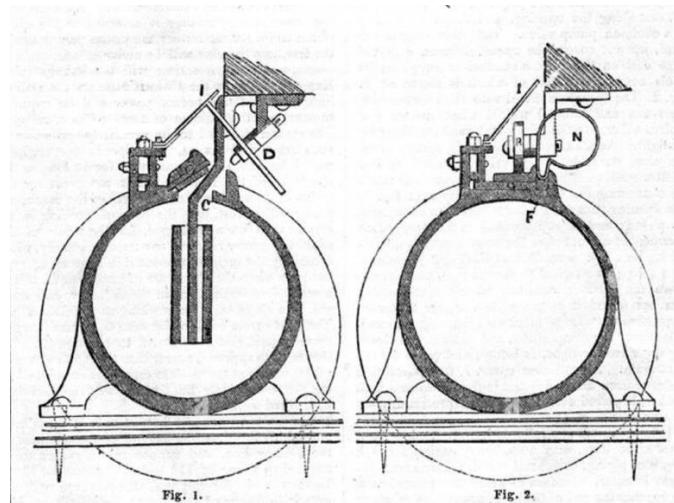


Ilustración 5 - Sección del funcionamiento de la válvula de Samuda en el ferrocarril atmosférico de Londres - Fuente: Tratado de Samuda

A finales del siglo XIX, en 1870, Alfred Ely Beach inauguró un ferrocarril subterráneo propulsado por aire a presión, aunque lo hizo en secreto al no concederle los permisos necesarios. Presentó su idea en 1867 en una feria de Nueva York con un tubo de madera de 1,80 m de diámetro y 30 metros de longitud, suspendido del techo, portando un vagón capaz de mover a 10 personas. Esta demostración fue todo un éxito, lo que le impulsó a su puesta en realidad. Tras conseguir los permisos, los intereses por construir metros y este nuevo transporte en la ciudad se desvanecieron, por lo que tres años más tarde de su inauguración el proyecto cayó en el olvido.

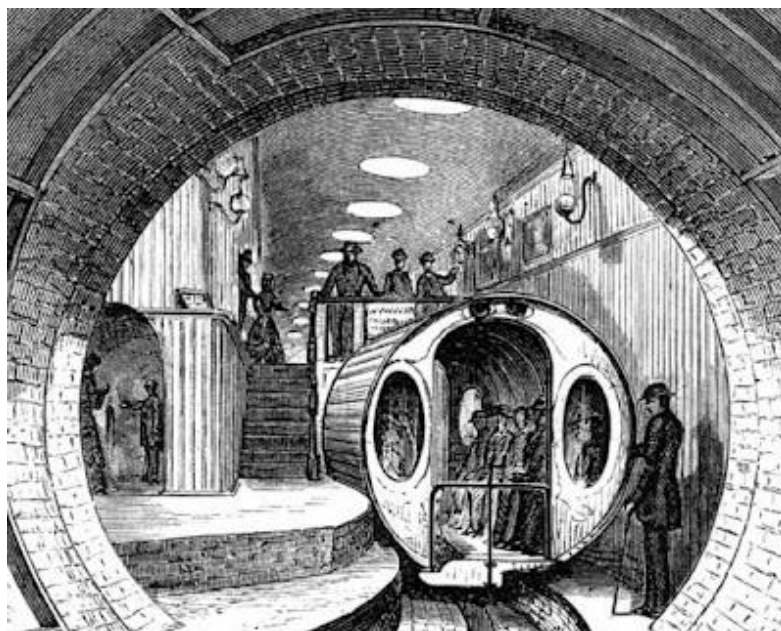


Ilustración 6 - El ferrocarril de Alfred Ely Beach, 1870 - Fuente: Cabovolo blog



## B. HYPERLOOP UPV

Hyperloop UPV es un equipo del programa de Generación Espontánea de la Universidad Politécnica de Valencia que lucha por cambiar el futuro del transporte. Elon Musk publicó en 2013 un paper, el Hyperloop Alpha, donde retomaba la idea de este vehículo tras su descontento con la red de ferrocarriles de alta velocidad que se iba a implantar en California, Estados Unidos, por esas fechas, lanzando así dos años más tarde un reto para los estudiantes de las universidades del mundo: desarrollar hyperloop. Lo hizo a través de una competición, la Hyperloop Design Week, donde se podían presentar diseños conceptuales de esta temática. Fue en 2016 cuando cinco estudiantes de la UPV decidieron adentrarse en este gran universo, yendo a dicha competición y volviendo a casa con dos premios, los cuales les impulsaron a crear Hyperloop UPV. El equipo comenzó a desarrollar un prototipo por año para poder participar en dicha competición, pasando primero por Atlantic, el primer prototipo que se desarrolló junto con la universidad de Purdue, y siguiendo con Valentia, el primer prototipo que desarrolló Hyperloop UPV en solitario, haciéndole honor con su nombre a nuestra ciudad, Valencia. A día de hoy, el equipo lleva nueve años trabajando en cambiar la vida de las personas, con vehículos tan potentes que han revolucionado la historia, habiendo conseguido presentar en 2023 el primer vehículo universitario que se desplaza levitando en vacío del mundo, y consiguiendo en 2024 el primer premio en la competición.



*Ilustración 7 - Equipo actual de Hyperloop UPV - Fuente: Hyperloop UPV*



## C. EUROPEAN HYPERLOOP WEEK

La European Hyperloop Week (EHW) es una competición internacional que Hyperloop UPV fundó junto con otros tres equipos: Swissloop (Suiza), Delft Hyperloop (Países Bajos) y HYPED (Escocia), teniendo lugar por primera vez en nuestra ciudad, en Valencia, en 2021. Cada año el equipo trabaja para poder presentar una nueva propuesta a la competición, demostrando así el desarrollo de la tecnología hyperloop y poniendo en común todos los avances con estudiantes y empresas de más de 30 países.

## D. PROYECTOS Y ANTECEDENTES

Diseñar una infraestructura de transporte para hyperloop es todo un reto para los ingenieros de caminos. Actualmente, los ingenieros civiles y de caminos son capaces de diseñar, construir y operar distintas infraestructuras de transporte como son los aeropuertos, estaciones de ferrocarriles, carreteras, todo aquello que es capaz de acercar a las personas de un lugar a otro, por lo que la infraestructura de hyperloop no se va a quedar atrás. Hay diversas opiniones sobre el material del que se puede construir esta infraestructura, ya sea de hormigón, de acero, de madera, pero es aún un enigma saber cuál será el futuro de esta infraestructura. Es por esto que en este Trabajo de Fin de Grado se va a desarrollar una aproximación a lo que sería una infraestructura hyperloop en Europa a pequeña escala.

## E. HYPELOOP EN LA REALIDAD

Otra de las cosas que se cuestionan mucho en relación con la infraestructura de hyperloop es su ubicación en el espacio e integración urbanística. El hecho de hacerla de hormigón no es un simple capricho. La idea de comenzar a darle forma a esta estructura ayudará a simplificar problemas posteriores de implementación, ya que la infraestructura se enfrentará a diversos paisajes de diferentes características, tolerancias, capacidad de carga, estabilidad, ...

Un dato a destacar es que el tubo podrá ir tanto en superficie como bajo tierra. Todo esto dependerá de los factores urbanísticos y paisajísticos que influyen en la decisión de ubicarlo de una forma u otra. En países como Estados Unidos, donde hay grandes distancias entre ciudad y ciudad, y donde hay extensos campos sin urbanizar, se puede permitir que la infraestructura vaya en superficie dado que todo el impacto que esta pueda causar ahí será mínimo. Hay que subrayar que el hacerlo en superficie abarataría los costes de construcción al no involucrar grandes movimientos del terreno. De igual manera, la orografía también es un reto. Se sabe que hyperloop va a tener un diseño lineal similar al del ferrocarril. Esto



quiere decir que, al ir a tan alta velocidad, se necesitarán tramos muy largos y con un radio de curvatura para el giro de gran extensión, de kilómetros. La implementación de la infraestructura en superficie tiene que enfrentarse a otros retos como son la conservación de las aves y la posible destrucción de hábitats por las vibraciones, así como los apoyos de las pilas de soporte. La estética del tubo debería ser opaca para no provocar efectos ópticos que causen fatigas o mareos, aunque siempre ha sonado bien la idea de hacerlo de materiales como el metacrilato, además de estar a una altura adecuada en la que no moleste al entorno y al funcionamiento normal del ecosistema.

Si ahora se contempla un país europeo, como puede ser España o Alemania, dada la distribución urbanística y toda la orografía del continente, se espera que la construcción de este medio de transporte sea casi completamente subterránea, salvaguardando las zonas montañosas o poco urbanizadas. El problema de esto serían los grandes movimientos de tierra y el contraproyecto que ayude a aprovechar todo ese material extraído, además de ver las zonas de vertedero que se puedan utilizar. Al fin y al cabo, la construcción de este tubo es similar a la de una línea de metro o túneles de alta velocidad. Ahora mismo puede parecer difícil imaginarse, pero no se debe olvidar que un día se pensó lo mismo del ferrocarril o del avión.

## F. HYPERLOOP Y EL MEDIO AMBIENTE

Uno de los aspectos más importantes a considerar a la hora de la implementación de un nuevo medio de transporte es su relación e impacto en el medio ambiente, ya que se pretende que las nuevas tecnologías vayan de la mano de la sostenibilidad.

Para hacer una visión global, un vuelo Barcelona – París genera 153 *kg* de dióxido de carbono por pasajero que transporta, que, multiplicado por una media de 170 pasajeros, hace un total aproximado de 26.010 *kg* de  $CO_2$  por trayecto (Ràfols, 2024). Visto así, parece un número relativamente alto. Es cierto que aún no se ha hecho un estudio exhaustivo que determine las emisiones de  $CO_2$  que produciría un viaje en hyperloop, pero sí que se puede asegurar que los resultados serán mucho menores. Para empezar, esto es debido a que funciona principalmente con energía eléctrica, además de añadir el vacío, lo que hace que el consumo energético a su vez sea reducido. Aparte, los nuevos desarrollos se inclinan hacia la implementación de placas solares en el perímetro del tubo o en sus zonas cercanas para poder abastecer al vehículo con energía solar. Por estos motivos, se puede determinar que la generación de gases de efecto invernadero por parte de este nuevo medio de transporte serían principalmente indirectos.



Otro dato a tener en cuenta a la hora de decantarse por hyperloop es el bajo grado de contaminación acústica en comparación con los medios de transporte actuales. Se debe a que los tubos a baja presión aíslan el sonido, evitando que se propaguen hacia el exterior. Además de esto, se puede destacar que hyperloop está pensado para viajar a una velocidad justo por debajo del límite de la velocidad del sonido, evitando el boom sónico, un fenómeno que se genera cuando las ondas que se producen al pasar esta barrera chocan con el aire, produciendo un estruendo similar al de una explosión.

Por otro lado, puede estudiarse el impacto que tendría la implementación de estos tubos o viaductos en los ecosistemas. Comparándolo con el tren o con los transportes por carretera, hyperloop garantiza cierta seguridad para los animales del entorno, ya que, al ir cubierto, se evitan los atropellos y las colisiones. Además, los estudios de impacto ambiental de proyecto serían prácticamente similares a los que se harían en la implementación de puentes, viaductos y túneles, aunque a esto se le puede sumar la posibilidad de reutilización de vías en desuso y túneles ya existentes.

## 3. MARCO TEÓRICO

### A. PRINCIPALES RETOS

- Diseño simplificado del modelo en estático
- Estudio de distintas alternativas de infraestructura
- Verificación del sistema
- Comparativa e interacción de materiales
- Resistencia del sistema al vacío
- Facilidad de fabricación

### B. VEHÍCULO HYPERLOOP

Para poder entender las características de diseño, es importante entender las necesidades del vehículo que va a circular por su interior. Para ello, se van a explicar los distintos sistemas esenciales que se han tenido en cuenta a la hora de considerar las condiciones iniciales tanto de contorno como de geometría. Las dimensiones iniciales de la infraestructura están adaptadas a Vèsper, el actual vehículo de Hyperloop UPV.

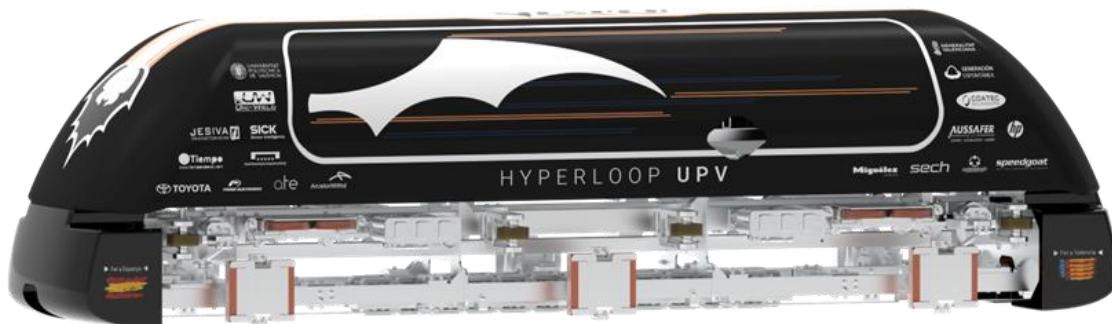
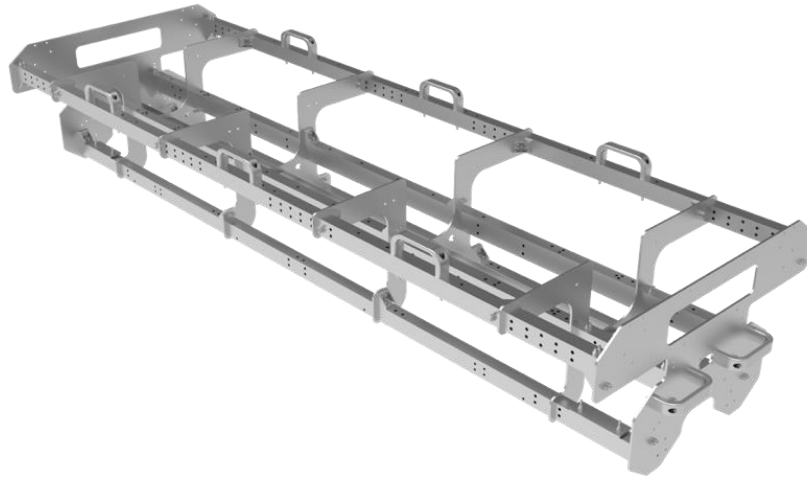


Ilustración 8 - Vehículo Vèsper - Fuente: Hyperloop UPV

### Chasis

Se le llama chasis a la combinación del bogie y de la cápsula, es decir, los sistemas que integran todo lo necesario para darle forma y funcionalidad a la cápsula de levitación.

- El bogie es la parte inferior del chasis, donde se integran todos los elementos mecánicos y electromagnéticos, algo que se empezó a hacer en el séptimo año del equipo para ganar espacio y generar una primera visión de un vehículo hyperloop que se acerque a la realidad.



*Ilustración 9 - Bogie - Fuente: Hyperloop UPV*

- La cápsula se trata de un sistema presurizado en la parte superior del chasis que consiste en una piel reforzada con cuadernas y perfiles que permiten la estanqueidad de la presión atmosférica dentro de un ambiente de vacío. Esto es así dado que en su interior se implementa la cabina de pasajeros o mercancías, como en cualquier medio de transporte.



*Ilustración 10 - Cápsula - Fuente: Hyperloop UPV*



## Guiados horizontales y verticales

Se les conoce por ser unas ruedas que impiden que el vehículo se pegue al tubo y/o raíles. Sobresalen de las unidades de levitación unos milímetros para que, en caso de fallo, no haya desplazamientos indeseados que den lugar a problemas de comportamiento. En azul se muestran los guiados verticales y en naranja los horizontales.

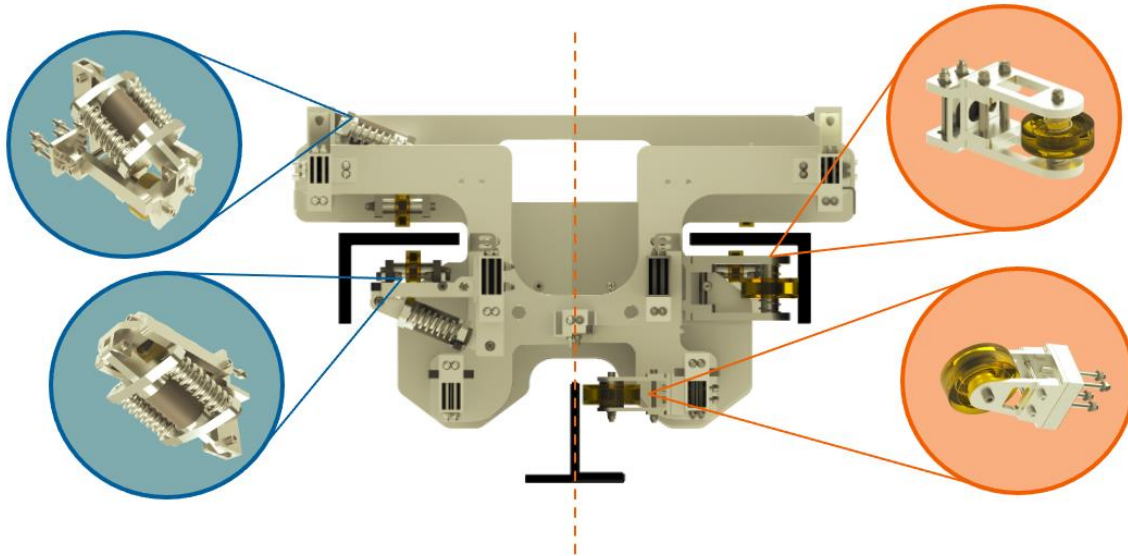


Ilustración 11 - Guiados - Fuente: Hyperloop UPV

## Frenos

El vehículo puede frenar por sí solo con el motor, pero, en caso de emergencia, lleva cuatro actuadores que funcionan con aire a presión distribuido por un sistema neumático. Al abrirse estos frenos, el vehículo queda apoyado en las paredes de la infraestructura tubular de manera brusca. La extensión del brazo de frenada será tomada en cuenta a la hora de determinar el diámetro de las tuberías.

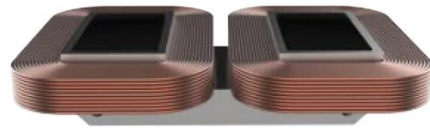
## Sistemas para la levitación

- Unidades de levitación y guiado

Para generar la levitación de la cápsula se utilizan unas unidades de levitación que van integradas en la misma. Estas unidades consisten en unas bobinas imantadas que al generar corriente crean un campo electromagnético, permitiendo así la estabilidad magnética. Hay dos tipos de unidades de levitación:

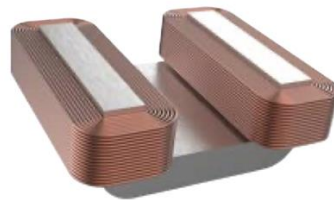


- Unidades de levitación vertical: llamados HEMS, en este caso se trata de unos imanes híbridos, como los de las neveras, lo que hace que al inducirles corriente sean capaces de generar hacia arriba la misma fuerza que ejerce el vehículo en el sentido de la gravedad, es decir, generan el peso del vehículo en sentido contrario para conseguir la estabilidad.



*Ilustración 12 - HEMS - Fuente: Hyperloop UPV*

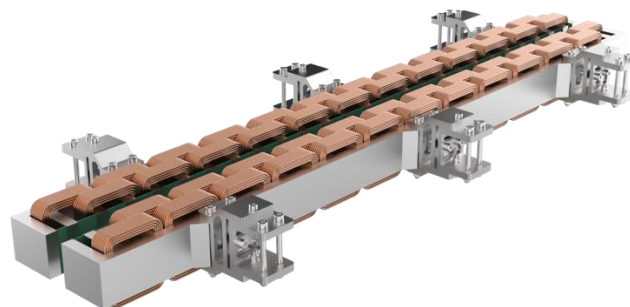
- Unidades de levitación horizontal: EMS, se caracterizan por ser unos imanes electromagnéticos que al inducirles corriente generan una fuerza capaz de controlar la distancia horizontal entre la cápsula y el tubo.



*Ilustración 13 - EMS - Fuente: Hyperloop UPV*

## **Propulsión**

El vehículo se propulsa con un doble motor de inducción lineal puesto en paralelo uno del otro.

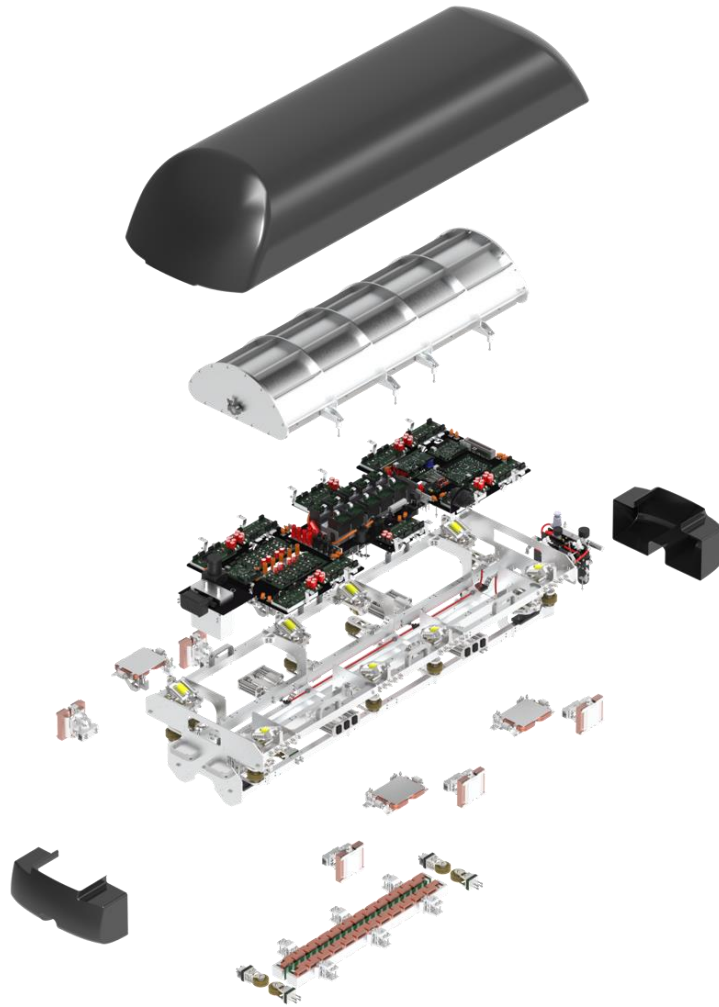


*Ilustración 14 - Doble motor de inducción lineal - Fuente: Hyperloop UPV*

Todos los sistemas mecánicos y electromagnéticos, además de la integración eléctrica y el carenado, de los que no se va a hablar en este documento, quedan recogidos como se indica



en la *Ilustración 15* para conformar lo que es el vehículo de la novena generación de Hyperloop UPV.



*Ilustración 15 - Explosionado de los sistemas descritos - Fuente: Hyperloop UPV*



## 4. INFRAESTRUCTURA TUBULAR

Una vez se ha explicado un poco su funcionamiento para entender el comportamiento que va a tener, se puede pasar a contemplar las características que debe tener la infraestructura por la cual el vehículo viajará. Dados los sistemas mecánicos y electromagnéticos vistos, el interior del tubo quedará condicionado a la forma de la cápsula y las fuerzas y acciones que esta genere en su interior durante el movimiento y la levitación tanto en estático como en dinámico.

### Sistemas a implementar en el diseño

- **Raíl**

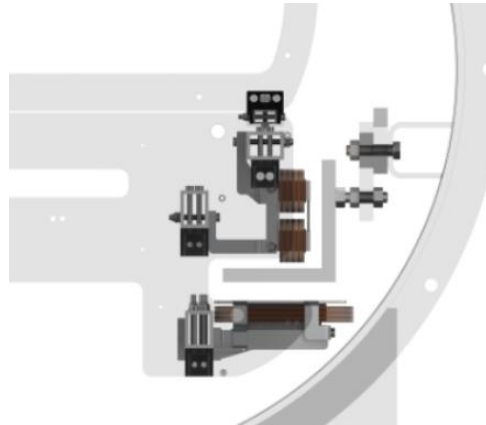
En la parte inferior de la infraestructura tubular debe ir un perfil de aluminio en forma de T invertida de 100x100x10 mm. Este perfil sirve de raíl para el vehículo, de tal forma que se queda ubicado entre las dos caras del doble motor de inducción lineal.



Ilustración 16 - Raíl - Fuente: Hyperloop UPV

- **Sistema lateral**

Las unidades de levitación pueden ajustar la posición del vehículo a través de unos perfiles en L que se colocan en los laterales de la infraestructura, pasando por encima de los HEMS. De esta manera, los EMS controlan la levitación horizontal a la altura que el perfil le deja, mientras que los HEMS se regulan en distancia con la parte voladiza del perfil horizontal.



*Ilustración 17 - Sistema lateral - Fuente: Hyperloop UPV*

- **Booster**

El booster es un motor externo con el que se puede generar la levitación sin necesidad de un motor on-board y las baterías. Este sistema va implementado en el track exterior, que está dividido en tres partes:

- **Zona de aceleración:** los tres primeros metros del track están comprendidos de un motor externo que ayudará a la impulsión de la cápsula para poder avanzar de manera eficiente.
- **Zona de velocidad crucero:** como ya se ha mencionado, no hay nada que frene a hyperloop, por lo que con ese impulso inicial el vehículo es capaz de mantener su velocidad sin necesidad de seguir emitiendo corriente, por lo que termina la zona de motor externo y comienzan 44 metros de track liso.
- **Zona de frenada:** se vuelve a encontrar un motor externo en los últimos 3 metros del track para conseguir parar el vehículo.

Este sistema se alimenta por placas solares, ya que las baterías pesan mucho y al ser de litio contaminan demasiado, algo que no se quiere ligar a la tecnología hyperloop. Estas placas solares están implementadas a los laterales del booster track, y con la ayuda de supercondensadores se puede obtener la energía necesaria para accionar la cápsula. Aunque este sistema no será estudiado en este proyecto para su implementación, sí que es necesario explicarlo para entender las líneas futuras de este estudio.

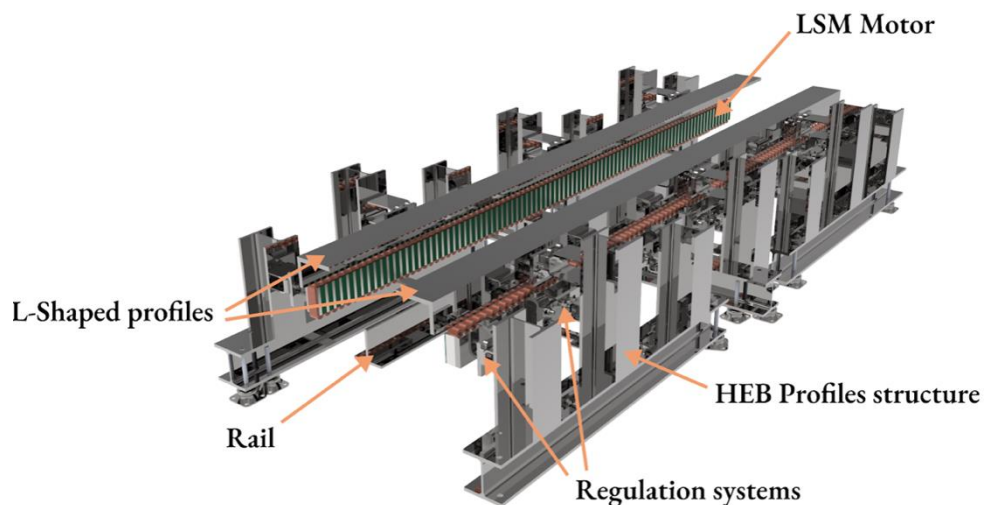


Ilustración 18 - Sección booster - Fuente: Hyperloop UPV

- **Tecnología de vacío**

La infraestructura a diseñar deberá ser capaz de soportar la baja presión que el vacío genera, además de todas las cargas que se indicarán más adelante. La presión establecida es de 100 mbar. Para esto, se utiliza una bomba SOGEVAC SV 300B de Leybold, que es capaz de generar un flujo de  $300 \text{ m}^3/\text{h}$  (Leybold, s.f.).



Ilustración 19 - Bomba SOGEVAC SV 300B de Leybold - Fuente: leybold.com



## 5. POR QUÉ ESCOGER HYPERLOOP COMO MEDIO DE TRANSPORTE

Todavía se hace algo difícil de imaginar la posibilidad de que este medio de transporte llegue a la vida cotidiana, pero para eso hay empresas y equipos universitarios, que cuentan con el apoyo de un gran número de empresas, tanto del sector como de las implicadas durante su futuro desarrollo, que están trabajando para concienciar y acercar esta tecnología. Por ello, se va a plantear una comparativa con algunos de los actuales medios de transporte – avión, Maglev, coche, taxi, tren– frente al hyperloop.

Tabla 1 - Comparativa de los distintos medios de transporte frente a hyperloop - Fuente: Elaboración propia

	Avión	Maglev	Coche	Taxi	Tren	Hyperloop
<i>Duración del trayecto</i>	Baja	Baja	Alta	Alta	Media	Baja
<i>Coste del trayecto</i>	Bajo	Medio	Medio	Alto	Bajo	Bajo
<i>Velocidad de trayecto</i>	Alta	Alta	Media	Media	Media	Alta
<i>Capacidad</i>	Alta	Alta	Baja	Baja	Alta	Media
<i>Coste de la infraestructura</i>	-	Alto	Bajo	Bajo	Medio	Medio
<i>Integración con el entorno</i>	Media	Media	Baja	Baja	Media	Alta
<i>Intermodalidad</i>	Media	Media	Alta	Alta	Alta	Media
<i>Problemas externos</i>	Bajo	Bajo	Alto	Alto	Bajo	Bajo
<i>Comodidad</i>	Media	Media	Alta	Alta	Media	Alta
<i>Seguridad</i>	Alta	Alta	Baja	Baja	Media	Alta

### - Duración del trayecto

Como ya se ha mencionado a lo largo del documento, el tiempo es uno de los bienes más preciados por el ser humano. Para tener un orden de magnitud para valorar este apartado, se ha planteado un trayecto Valencia – Madrid, que consta de 361 km, según Google Maps.



- Coche - 3h 27 min
- Tren - 2h 5 min
- Taxi - 3h 27 min
- Avión - 1h 10 min
- Maglev - 50 min
- Hyperloop - 20 min

- Coste del billete

El factor económico siempre juega un factor clave. La variación de precios en los billetes determina las oportunidades entre los distintos grupos socioeconómicos de realizar un determinado trayecto. Es uno de los enclaves del tridente que tiende a determinar la elección de un medio de transporte u otro – coste, comodidad y tiempo.

- Coche – considerando un coche diésel, a un precio medio de 1,60€/l, supone un gasto de 35€ en el trayecto.
- Taxi – las tarifas encontradas oscilan entre los 0,80€/km y 1,20€/km, por lo que se ha cogido un valor medio de 1€/km para hacer la estimación. El trayecto planteado supondría un coste medio de 361€.
- Avión – las tarifas varían poco entre Air Europa, que normalmente ofrece billetes a 30-35€, e Iberia, que oscila entre los 40-60€.
- Tren – según los viajes que ofrece RENFE, un billete puede salir por aproximadamente 40€ en un día normal, aunque se han sumado a la red ferroviaria nuevas empresas como Iryo u Ouigo, que ofrecen viajes a partir de 15€.
- Maglev – En Japón, un billete de ida y vuelta cuesta 10,20€ para un trayecto de 60 km, por lo que, extrapolando, en el trayecto planteado supondrían 61,37€.
- Hyperloop – según Musk, un billete de Los Ángeles a San Francisco podría costar 20\$ (Musk, 2013). Este trayecto está comprendido entre 560 km, por lo que el precio por km en euros es de 0,0332€/km. Para el trayecto establecido de 361 km, el precio del billete asciende a los 11,99 €.





- *Integración con el entorno*

Las infraestructuras de carreteras suponen un mayor impacto tanto visual como de integración. Ocupan grandes áreas de suelo y contribuyen a la contaminación de las ciudades. La red ferroviaria puede ser algo menos invasiva que una red de carreteras convencional dado que su planificación tiende a ser más específica por la implantación de las vías, aunque tienen a favor que la mayoría de los trenes en España ya son eléctricos. Los aviones requieren grandes extensiones de terreno, pero suelen localizarse en zonas medianamente alejadas de las urbes para evitar otros tipos de contaminación. El resto del trayecto en avión no genera problemas en la integración con el entorno. En cambio de todo esto, hyperloop puede mitigar varios de estos impactos, principalmente por su facilidad de soterramiento, o sus pasos elevados, además de que se está diseñando para ocupar menores extensiones de terreno.

El ruido puede afectar a los ecosistemas circundantes, alterando sus formas de vida y afectando a la salud de las personas. Los coches convencionales producen ruido por distintas vías – motor, tubo de escape, neumáticos. Los aviones producen ruidos aún más intensos al despegar y aterrizar. Sin embargo, el hyperloop, aunque aún no se tengan datos concretos, está pensado para producir un menor impacto acústico, al reducir los ruidos por fricción con la infraestructura, además de que la necesidad de la evolución en las nuevas tecnologías hace que la implementación de este medio de transporte requiera beneficios ante los sistemas actuales.

- *Velocidad de trayecto*

Para ello, a la hora de escoger un medio de transporte u otro, se tiende a escoger aquel que te aporte el mayor ahorro de tiempo posible, que suele ir ligado a una mayor comodidad, haciéndolo un transporte más atractivo

- Coche – 120 km/h
- Taxi – 120 km/h
- Avión – Boeing 787-9: 920km/h
- Tren – 222 km/h
- Maglev – 600 km/h



- Hyperloop – 1200 km/h

En este punto se puede destacar que la velocidad del coche y el taxi es significativamente más baja que la del resto de medios de transporte al venir limitada por la Dirección General de Tráfico. Estas velocidades de diseño no son a veces alcanzadas dadas las paradas que hay que realizar a lo largo de los trayectos, lo que no ocurre con el avión ni con hyperloop. Últimamente, las nuevas rutas de tren de alta velocidad entre Madrid – Valencia no contemplan paradas durante el recorrido.

- *Problemas externos*

La congestión es uno de los factores que se pretenden mitigar con los medios de transporte de alta capacidad. Los coches, taxis o autobuses se ven afectados frecuentemente a lo largo de sus recorridos por atascos, factores climatológicos, corte de carreteras. Por otro lado, los otros medios de transporte objeto del estudio no tienen problemas con la congestión, aunque pueden tenerlo con climatologías extremas. Hyperloop destaca entre ellos al estar aislado de todos estos factores, ya que al estar cubierto en el interior de la infraestructura tubular puede protegerse de cualquier perturbación.

- *Intermodalidad*

Las estaciones hyperloop llevan varios años siendo objeto de estudio para ver su integración con el resto de los medios de transporte. Hoy en día, la opción más aceptada es la similitud con las estaciones de metro. Este pasado julio, durante la European Hyperloop Week, se destinó un día entero al brainstorming de ideas que ayudasen a la integración de estas estaciones en las áreas urbanas, así como para mejorar la rapidez de embarque y desembarque. Una de las ideas fue la de generar packs de transportes, como en los aeropuertos, donde al comprar tu billete hyperloop haya la opción de contratar el siguiente medio de transporte, por ejemplo, bus o taxi, que lleve al usuario a su destino final. El resto de los medios de transportes mencionados tienen una alta intermodalidad, ya que puedes tener parkings cerca de cada estación, además de la facilidad de los carriles de transporte público que aceleran la llegada a destino.



- Coste de la infraestructura
  - Coche: 4,06 M€/km (Ministerio de Transportes, 2021)
  - Taxi: 4,06 M€/km (Ministerio de Transportes, 2021)
  - Avión: -
  - Tren: 17,7 M€/km (MTMS, 2023)
  - Maglev: 115 M€/km (Palau, 2015)
  - Hyperloop: 11 M€/km (Musk, 2013)

- Comodidad

Es destacable que el coche y/o el taxi proporcionan el mayor grado de confort entre los vehículos, aportando una total flexibilidad de horarios y que todo el espacio disponible se tiene a disposición del usuario propietario, a diferencia del resto de transportes donde el equipaje está limitado, así como el espacio en los asientos y los procesos de embarque y de llegada y salida de las estaciones/aeropuertos. Aunque el hyperloop se está fijando en ofrecer la mejor experiencia, no se desligará de este segundo grupo.

- Seguridad

De acuerdo con el Portal del Observatorio del Transporte y la Logística en España, OTLE, del Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible del Gobierno de España, en 2022 se dieron los siguientes casos:

*Tabla 2 - Accidentabilidad y víctimas mortales del transporte español - Fuente: OTLE, 2022*

<i>Transporte</i>	<i>Accidentabilidad</i>	<i>Víctimas mortales</i>
<i>Carretera</i>	97.916	1.746
<i>Ferrocarril</i>	175	21
<i>Aéreo</i>	34	0
<i>Marítimo</i>	7.392	193



- Capacidad

La capacidad de estos vehículos se ha de tener en cuenta por diversos motivos. Uno de ellos es la economía, ya que los transportes masivos son capaces de transportar mayores volúmenes de personas, por lo que suelen reducir las tarifas en el mismo trayecto. Además, el transportar muchas personas a la vez reduce las emisiones de carbono, ya que, por ejemplo, los coches, suelen emitir más CO<sub>2</sub> por persona que los aviones o trenes de alta velocidad. Para este estudio, se han establecido capacidades medias de los distintos medios de transporte.

- Coche: 5 personas
- Taxi: 4+1 personas
- Avión: 170 personas
- Tren: 350 personas
- Maglev: 440 personas
- Hyperloop: 30 personas (Musk, 2013)



## 6. METODOLOGÍA

### A. VARIANTES DE LOS MATERIALES DE LA INFRAESTRUCTURA

En este estudio se va a hacer una comparativa de materiales para obtener el óptimo para el objetivo descrito.

- Variante 1: Hormigón HA-50

Es la alternativa más estándar, ya que puede terminar diseñándose para prefabricados y conseguir una estructura que cualquier empresa pueda hacer fácil y rápido para el año de competición.

- Variante 2: Hormigón con camisa de chapa

Combina las ventajas de ambos materiales, acero y hormigón, lo que proporciona una mayor fiabilidad y protege el hormigón del colapso por succión del vacío.

- Variante 3: Hormigón de Ultra Alta Resistencia

Su dimensionamiento no difiere de una alternativa de hormigón corriente, pero, en este caso, las propiedades del hormigón de ultra alta resistencia pueden ser claves a la hora de mantener el vacío en la infraestructura y evitar las fugas.

- Variante 4: Acero S355

Es similar a la infraestructura actual del equipo, por lo que se ha recalculado y redimensionado para conseguir un mayor grado de detalle de su comportamiento. Es la opción que menos pruebas necesita para poder utilizarse de inmediato tras su manufactura, aportando flexibilidad al equipo y el funcionamiento a corto plazo requerido.

### B. MODELO GENÉRICO

Independientemente de la alternativa que se esté estudiando, las cargas y fuerzas actuarán siempre de la misma manera. Por ello, el modelo tendrá las siguientes características de manera simplificada:

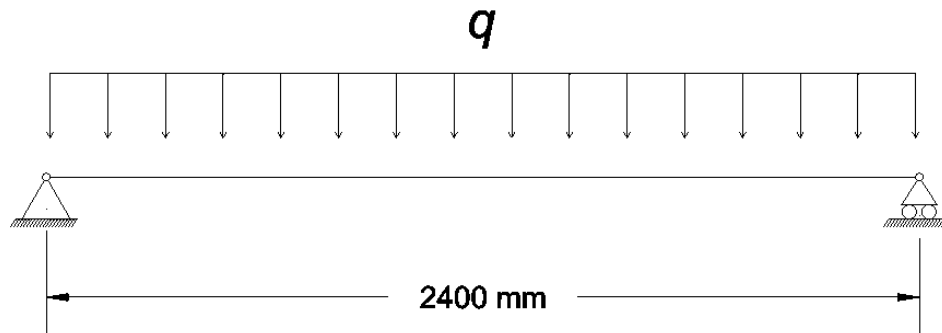


Ilustración 20 - Diagrama genérico de cargas y condiciones de contorno - Fuente propia

A la izquierda se proporciona un apoyo fijo para asegurar la estabilidad estructural y el soporte de la infraestructura, para así evitar movimientos verticales. Por otro lado, se ha escogido un apoyo deslizante en respuesta a las expansiones o contracciones longitudinales que pueda tener el diseño, aunque, en concreto, los cambios de temperatura no van a ser analizados en este TFG. De esta manera, en un estudio inicial no se compromete la integridad de la estructura.

En este trabajo se va a desarrollar una comparación de cuatro variantes, por lo que el modelo se ha simplificado para poder tener un análisis estático, ya que el análisis dinámico se sale de las materias impartidas durante estos cuatro años de grado, pero será objeto de estudio en los próximos años. Al ser una simplificación igualitaria en ambas variantes, la solución obtenida en cuanto a la mejor opción para la fabricación del tubo no debe diferir en el momento en el que se apliquen estas cargas omitidas, aunque los valores generales sí que lo hagan.

El análisis se realizará a un segmento de tubo que actúa como una viga, facilitando así el análisis de las cargas y tensiones aplicadas, obteniendo un orden de magnitud claro, sencillo y sin complicaciones. Además, al ser un estudio preliminar de un tema del que aún no se sabe mucho, se pueden aplicar las normas de construcción ya conocidas, en este caso, principalmente, los Eurocódigos, en su forma genérica.

Las características iniciales para el estudio serán las expuestas en la siguiente Tabla:

Tabla 3 - Características generales - Fuente propia

$l_{tubo}$	2,4	m
$\varnothing_{interior}$	0,865	m



$w_{vehículo}$	250	kg
$l_{vehículo}$	2,4	m

La longitud de la sección de tubo se ha establecido a 2,4 m, longitud del vehículo, para simplificar las cargas y convertirla en una repartida uniforme, a la vez que se supera el mínimo de longitud de 2 m de longitud establecido en la norma UNE 127916:2020. El diámetro toma el valor de 0,865 m para favorecer el efecto pistón.

## C. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

Se describen las propiedades básicas trabajadas de los distintos materiales empleados.

### Hormigón HA-50

Tabla 4 - Propiedades de los materiales de la Alternativa 1 - Fuente: Elaboración propia

<i>Propiedad</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidad</i>
<i>Módulo de elasticidad</i>	$E$	37.000	MPa
<i>Densidad</i>	$\rho$	2500	Kg/m <sup>3</sup>
<i>Esfuerzo de diseño</i>	$f_{ck}$	50	MPa
<i>Esfuerzo último</i>	$f_y$	435	MPa
<i>Coefficiente de dilatación térmica</i>	$\alpha$	$10 \cdot 10^{-6}$	K <sup>-1</sup>

### Hormigón con camisa de chapa

Combina las características de la tabla para HA-50 y Acero.

### Hormigón de ultra alta resistencia

Tabla 5- Propiedades de los materiales de la Alternativa 3 - Fuente: Elaboración propia

<i>Propiedad</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidad</i>
<i>Módulo de elasticidad</i>	$E$	50.000	MPa
<i>Densidad</i>	$\rho$	2500	Kg/m <sup>3</sup>
<i>Esfuerzo de diseño</i>	$f_{ck}$	150	MPa



<i>Esfuerzo último</i>	$f_y$	435	MPa
<i>Coefficiente de dilatación térmica</i>	$\alpha$	$1,1 * 10^{-5}$	$K^{-1}$

## Acero S355

Tabla 6- Propiedades de los materiales de la Alternativa 4 - Fuente: Elaboración propia

<i>Propiedad</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidad</i>
<i>Módulo de elasticidad</i>	$E$	210.000	MPa
<i>Densidad</i>	$\rho$	7850	kg/m <sup>3</sup>
<i>Esfuerzo de diseño</i>	$f_y$	355	MPa
<i>Esfuerzo último</i>	$f_u$	490	MPa
<i>Coefficiente de dilatación térmica</i>	$\alpha$	$12 * 10^{-6}$	$K^{-1}$

## D. ANÁLISIS ESTRUCTURAL

### Acciones

- *Peso Propio*

Se asume como una distribuida en el modelo de viga, que representa el peso de la propia infraestructura. De esta forma, el valor se calcula de la siguiente manera:

$$p_p = A_{tubo} * \rho$$

Donde  $p_p$  es el peso propio,  $A_{tubo}$  el área del tubo y  $\rho$  la densidad del material.

- *Cargas Muertas*

Representa las acciones que no varían en el tiempo pero que van a tener que ser soportadas por la infraestructura. En este caso, las cargas muertas van a suponer la mitad del peso propio (Museros, Lázaro, Pinazo, & S., 2021).





- *Sobrecarga de Uso*

Se toma como sobrecarga de uso al efecto del vehículo de manera estática. De esta forma, se ha conseguido simplificar el modelo de tal forma que la sección diseñada mida lo mismo que el vehículo, para así asumirlo como una carga uniformemente repartida por la sección. El peso total del vehículo es de 250 kg y una longitud de 2,4 metros.

- *Acción del viento*

Los valores para la acción del viento se van a calcular de acuerdo con lo especificado en la IAP-11 y con los datos de la ciudad de Valencia.

Las acciones para las distintas alternativas quedan reflejadas en la siguiente tabla, donde se indica además en qué dirección se producen las cargas:

Tabla 7 - Cargas actuantes en las distintas alternativas - Fuente: Elaboración propia

	<b>INFORMACIÓN BÁSICA</b>	<b>Hormigón</b>	<b>Camisa de chapa</b>	<b>UHPC</b>	<b>Acero</b>	<b>Eje</b>
<b>Permanente</b>	Peso propio (KN/m)	7,138	6,972	5,537	2,160	Gravedad
	Cargas muertas (KN/m)	3,569	3,486	2,769	1,089	Gravedad
<b>Variable</b>	Sobrecarga de uso (KN/m)	1,022	1,022	1,022	1,022	Gravedad
	Acción del viento 1 (KN/m)	0,967	0,934	0,922	0,794	Z
	Acción del viento 2 (KN/m)	1,244	1,199	1,185	1,021	Gravedad
	Acción del viento 3 (KN/m)	0,162	0,156	0,154	0,130	X



## 7. Simulaciones Método de Elementos Finitos (FEM)

Se ha utilizado el software Ansys para determinar las deformaciones que tendrían las estructuras bajo las cargas estudiadas. De esta manera, se han obtenido los siguientes resultados, expuestos en el *Anexo 6*:

Tabla 8 - Deformaciones resultantes de la simulación - Fuente: Ansys Workbench

	<i>Deformación total (mm)</i>	<i>Deformación por vacío (mm)</i>
<i>HA-50</i>	6,329e-6	8,8016e-7
<i>Camisa de chapa</i>	6,8329e-6	8,1578e-7
<i>UHPC</i>	5,2857e-6	6,9909e-7
<i>Acero</i>	4,7358e-6	1,7638e-7

### Acciones

Las acciones descritas en la Tabla 5, además de la presión de vacío, generan flexiones en las tuberías. Como se puede apreciar, la tubería que menos deformación sufre es la de acero, con  $4,7358 \cdot 10^{-6}$  mm. En general, los valores obtenidos son bastante similares, aunque dan una aproximación de qué alternativa tendría más deformaciones a gran escala. La alternativa de hormigón armado de 50 MPa de resistencia es en la que más cambios se producen junto con la alternativa de camisa de chapa, lo que tiene sentido al tener un módulo de elasticidad mayor, y que el hormigón tiene menor resistencia a flexión. La chapa puesta en la segunda alternativa es bastante delgada, por lo que sería digno de estudio el aportar un aumento de grosor a esa chapa y valorar los cambios. La alternativa de hormigón de ultra alta resistencia es la que más se acerca al acero, pero no deja de lado las propiedades básicas del hormigón convencional. Indiscutiblemente, estos valores no son preocupantes para la posible fabricación de cualquiera de las alternativas.

### Diferencia de presión

Uno de los aspectos más importantes a considerar es la deformación que puede producir el vacío en el interior de la tubería hacia la misma, ya que las bajas presiones hacen un efecto de succión que pueden dañar las estructuras. De nuevo, las deformaciones son bastante bajas, casi inapreciables, aunque se puede dilucidar que la primera alternativa es la que más



deformación presenta y la de acero la que menos. En este apartado se ha considerado el factor de seguridad, que es el factor por el que se multiplican las cargas actuantes para llegar al límite de resistencia de la estructura hasta su fractura. Este valor ha salido en todas las ocasiones como 15. Esto se debe a que, en este software, la escala con la que trabaja va de 0 a 15, siendo 15 el máximo y significando que la estructura es altamente resistente. Seguramente, al saber que las estructuras están sobredimensionadas, el factor de seguridad esté muy por encima de este valor, por lo que el programa lo deja en el tope. Esto sirve también para asegurar que las deformaciones obtenidas no son importantes y no comprometen la seguridad e integridad de las soluciones.



## 8. EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS

Se van a detallar los distintos criterios determinados para la evaluación de las distintas alternativas, explicando su significado y enunciando la valoración considerada para cada una de ellas.

### Escalabilidad

El modelo diseñado debe ser capaz de adaptarse a distintos casos. Este trabajo se considera un estudio genérico, que, aunque esté calculado en base a las cargas y al vehículo de Hyperloop UPV, puede ser extrapolado al resto de vehículos de los distintos equipos de la competición, donde se destaca que ninguno es igual a otro. El estudio debe ser viable para distintas secciones de tubo, adaptándose a las necesidades de cada entidad.

#### **Valoración:**

- 1: no es posible producirlos a gran escala
- 3: pueden producirse a gran escala, pero con restricciones
- 5: puede producirse a gran escala sin problemas

### Coste general

Se toman los valores del *Anexo 5: Costes*, tomando el valor más bajo como el mejor.

#### **Valoración:**

- 1: >400€
- 3:  $100 < x < 400$ €
- 5: <100€



### Resistencia a la corrosión

El acero es más vulnerable ante la exposición al salitre, lo que termina oxidándolo con facilidad. Para ello, es necesario hacerle un tratamiento, como puede ser el galvanizado, o la utilización de aceros inoxidable, que mejoren su resistencia. En cambio, las estructuras de hormigón armado tienen una buena resistencia a la corrosión gracias a su carbonatación, además de haber sido diseñado para este tipo de exposiciones, protegiendo así las barras de acero corrugado que se encuentran en su interior.

#### **Valoración:**

- 1: se corroe rápidamente
- 2: necesita protección adicional
- 3: medidas de protección moderadas
- 4: alta resistencia, pero con necesidad de algún mantenimiento
- 5: buen comportamiento ante la corrosión

### Mantenimiento

Por lo general, el acero necesita más mantenimiento que el hormigón, ya que hay que protegerlo de la corrosión. En cambio, hay que vigilar el hormigón por si le salen fisuras, por el motivo que sea, y evitar el deterioro.

#### **Valoración:**

- 1: mantenimiento intensivo y frecuente
- 2: mantenimiento frecuente y caro
- 3: mantenimiento moderado
- 4: bajo mantenimiento
- 5: mantenimiento mínimo



### Resistencia al fuego

El hormigón tiene un mejor comportamiento que el acero ante el fuego y las temperaturas extremas. Mientras que el hormigón tiene una baja conductividad térmica, lo que hace que el calor tarde más en penetrar dentro de la estructura, el acero no es un buen aislante térmico, ya que hace que el calor se propague de rápidamente por la estructura, perdiendo su resistencia y deformándose ante la exposición al fuego. El acero ha de ser tratado para mejorar su resistencia al fuego, lo que incrementa los costes de producción. Del lado de la seguridad, se busca que la infraestructura sea lo más durable y segura posible, habiéndose dado casos de poca importancia en los que las placas del vehículo han salido ardiendo.

#### **Valoración:**

- 1: protección mínima, se degrada con rapidez
- 3: requiere una protección adicional
- 5: buena resistencia al fuego

### Rigidez estructural

El hormigón armado tiene una mayor rigidez que el acero, con alta resistencia a compresión, beneficioso para la estabilidad estructural. Al tratarse de un vehículo experimental, las vibraciones pueden ser absorbidas por la estructura de hormigón. En cambio, el acero tiene mayor resistencia a tracción, lo que favorece a las cargas dinámicas.

#### **Valoración:**

- 1: alta flexibilidad, deformable
- 3: adecuada
- 5: alta rigidez estructura



### Impacto ambiental

Según la Environmental Protection Agency, la producción de acero genera más del doble de dióxido de carbono por tonelada que el hormigón, siendo la del acero  $694 \text{ kg CO}_2/\text{tonelada}$  y  $265 \text{ kg CO}_2/\text{tonelada}$  de hormigón producido (Dini, 2022). Sin embargo, hay que tener en cuenta que el hormigón contiene cemento, que es el responsable de alrededor del 8% de las emisiones de  $\text{CO}_2$  a nivel mundial, produciéndose cuando la materia prima es calentada a altas temperaturas, lo mismo que pasa con la producción de acero. Además, el hormigón armado combina las emisiones de ambos componentes al llevar barras de acero embebidas. Alternativamente, el acero puede ser reciclado en casi su 90%, lo que reduce el impacto ambiental a largo plazo.

#### **Valoración:**

- 1: alto impacto negativo
- 3: impactos gestionables o recuperables
- 5: bajo impacto en procesos y materiales

### Regulación térmica

Es bien sabido que el acero es un alto conductor térmico, es decir, traspasa fácilmente el calor del exterior al interior de la tubería, algo que puede ser perjudicial para las pruebas de la cápsula ya que no puede estar expuesta a muy altas temperaturas. Además, los raíles del interior de la estructura han de estar nivelados, y las contracciones y expansiones del acero puede afectar al comportamiento del estas. Por otro lado, el hormigón tiene capacidad de almacenar el calor, impidiendo que se traspase al interior de la infraestructura.

#### **Valoración:**

- 1: deja pasar el calor del exterior al interior
- 3: retiene algo de calor, impidiendo que pase al interior en su totalidad
- 5: excelente comportamiento ante la exposición a temperaturas extremas



### Peso

Hay que tener en cuenta que estas secciones de tubo serán manipuladas por estudiantes, no por operarios ni personal cualificado. El hormigón supone un aumento de peso de casi tres veces el peso del tubo de acero. Actualmente, las secciones de tubo de acero se manipulan con un apilador eléctrico capaz de elevar hasta 800 kg, con un rango de elevación de 1,5 metros. Si se cambiase a hormigón, sería necesario obtener una máquina que maneje mayores pesos.

#### **Valoración:**

- 1: >1500 kg
- 3:  $800 < x < 1500$  kg
- 5: <800 kg

#### - *Transporte*

La infraestructura será movida de la universidad al sitio de la competición. La estructura de hormigón deberá ir bien protegida durante su traslado para evitar fisuraciones. Es un material más frágil ante los golpes. Normalmente, el equipo utiliza un camión tráiler de lona de 11x2,5x3,15 m de 24 toneladas, en el que las secciones van paletizadas.

#### **Valoración:**

- 1: no cabe en este camión, dificultad de embalaje
- 3: con el embalaje adecuado, podría llegar a destino aunque a riesgo de sufrir algunos daños
- 5: el camión se adecúa perfectamente a la infraestructura

En este apartado ha de verse la disposición en el caso de que se transportasen más de 1 sección, además de la forma de colocación para aportar el hueco necesario a los demás sistemas a transportar en el camión – se prueba con 10 secciones.





### Accesibilidad a los recursos

Uno de los principales motivos por los que se ha estudiado esta iniciativa es la unificación de la infraestructura teniendo en cuenta las posibilidades y capacidades de cada país. Según la World Steel Association, el único país que se encuentra en el top 10 de productores de acero es Alemania, en séptimo lugar, con una producción de 36,8 millones de toneladas. Sin embargo, este continente sí que es uno de los mayores importadores de acero, que en el 2022 importó 48,1 millones de toneladas (Pérez, 2024). El hormigón, en cambio, está compuesto de cemento, arena, grava y agua, que están presentes en la gran mayoría de las regiones del continente. De esta manera, no se depende de las importaciones como pasa con el acero. Igualmente, hay que destacar que en España hay una tradición siderúrgica importante, especialmente en las regiones del norte del país dados los recursos naturales de los que disponen, siendo el tercer productor europeo (López R. , 2021). Por ello, la facilidad de construcción en los distintos países apunta al hormigón como el mejor material para la construcción de una fabricación a gran escala. Se sabe que en países de centro Europa no hay muchos profesionales de la siderurgia, pero, en cambio, sí hay mano de obra que trabaje con hormigón, lo que también reduce costes económicos, bien por la abundancia de profesionales, así como por quitar la necesidad de la importación de materias primas a esos países.

#### **Valoración:**

- 1: muy difícil – materiales raros o muy especializados
- 3: posible con algunos recursos restringidos, por ejemplo, aditivos
- 5: fácilmente escalable con recursos disponibles localmente

### Tiempo de construcción

Generalmente, una tubería de acero tardaría menos tiempo en construirse que una sección de hormigón. El proceso del acero, como ya se ha mencionado anteriormente, consiste en el virolado de la chapa de acero y su posterior soldado para conformar el tubo. En cambio, la estructura de hormigón necesita algo más de tiempo para secarse y curarse, además de para



colocar las barras de armado en su correcta posición, como se menciona en el proyecto. La idea es que las piezas sean prefabricadas.

**Valoración:**

- 1: producción muy lenta: >1 mes
- 3: tiempos asequibles: 5-25 días
- 5: producción rápida: 1-5 días

Momento resistente último

Se comparan los distintos valores resistentes calculados en el dimensionamiento de las alternativas:

**Valoración:**

- 1: <100 kN/m
- 3: 100<x<500 kN/m
- 5: >500 kN/m

Deformación total ante las cargas

Valorar las deformaciones mostradas en el apartado de simulaciones para ver cuáles son más restrictivas. Cabe destacar que las deformaciones de las cuatro alternativas son ínfimas.

**Valoración:**

- 1: deformación inaceptable, fisuración o colapso de la estructura
- 3: deformación controlada pero perceptible
- 5: mínima deformación bajo la totalidad de cargas



Factor de seguridad

El safety factor aportado por el programa Ansys da una magnitud de la calidad del diseño ante las cargas soportadas.

**Valoración:**

- 1: el factor de seguridad está por debajo de los requisitos
- 3: el factor de seguridad es adecuado, pero genera limitaciones
- 5: el factor de seguridad proporciona la fiabilidad estructural necesaria

Tabla 9 - Distribución de puntos en base a los criterios establecidos para las distintas alternativas - Fuente: Elaboración propia

	<i>Hormigón HA-50</i>	<i>Hormigón doble camisa chapa</i>	<i>Hormigón de ultra alta resistencia</i>	<i>Acero estructural S355</i>
<i>Escalabilidad</i>	5	5	5	3
<i>Coste</i>	5	3	1	1
<i>Mantenimiento</i>	4	3	5	2
<i>Resistencia a la corrosión</i>	4	4	5	2
<i>Resistencia al fuego</i>	5	3	5	3
<i>Rigidez estructural</i>	5	5	5	5
<i>Impacto ambiental</i>	1	3	3	5
<i>Regulación térmica</i>	3	5	5	1
<i>Peso</i>	3	3	1	5
<i>- Transporte</i>	3	5	3	5
<i>Accesibilidad a los recursos</i>	5	3	3	3



*Estudio de alternativas para la infraestructura tubular de Hyperloop UPV*

<i>Tiempo de construcción</i>	5	3	3	5
<i>Momento resistente</i>	3	5	3	5
<i>Deformación total</i>	5	5	5	5
<i>Factor de seguridad</i>	5	5	5	5

Para la tabla ponderada, se han establecidos distintos pesos dependiendo del grado de importancia del criterio valorado.

*Tabla 10 - Pesos ponderados para seleccionar la alternativa definitiva - Fuente: Elaboración propia*

	<i>Peso</i>	<i>Hormigón HA-50 Pond</i>	<i>Hormigón doble camisa chapa Pond</i>	<i>Hormigón de ultra alta resistencia Pond</i>	<i>Acero estructural S355 Pond</i>
<i>Escalabilidad</i>	10%	0,5	0,5	0,5	0,3
<i>Coste</i>	12%	0,6	0,36	0,12	0,12
<i>Mantenimiento</i>	2%	0,08	0,06	0,1	0,04
<i>Resistencia a la corrosión</i>	1%	0,04	0,04	0,05	0,02
<i>Resistencia al fuego</i>	4%	0,2	0,12	0,2	0,12
<i>Rigidez estructural</i>	8%	0,4	0,4	0,4	0,4
<i>Impacto ambiental</i>	8%	0,08	0,24	0,24	0,4
<i>Regulación térmica</i>	4%	0,12	0,2	0,2	0,04
<i>Peso</i>	8%	0,24	0,24	0,08	0,4



- Transporte	4%	0,12	0,4	0,12	0,4
Accesibilidad a los recursos	5%	0,25	0,15	0,15	0,15
Tiempo de construcción	8%	0,4	0,24	0,24	0,4
Momento resistente	14%	0,42	0,7	0,42	0,7
Deformación total	6%	0,3	0,3	0,3	0,3
Factor de seguridad	6%	0,3	0,3	0,3	0,3
<b>Total</b>		4,05	4,25	3,42	4,09

## DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

La alternativa que ha obtenido la mayor puntuación es la de hormigón con doble camisa de chapa. El coste de la estructura es algo elevado en comparación con las demás, pero es cierto que ese coste a la larga se traduce en una mayor resistencia y un menor mantenimiento. Aunque en presencia de fuego la estructura resistiría al estar dotada de hormigón y de otra capa externa de acero que retendría la estructura, la propagación de la llama sí que sería importante de no ser que el acero esté tratado correctamente. La alternativa presenta una buena resistencia estructural capaz de soportar las cargas en vacío sin provocar deformaciones significativas.

Con esta elección, parte del impacto ambiental producido durante la construcción de la infraestructura puede ser contrarrestado con el reciclaje del acero y el uso de aditivos y hormigones más amigables con el medio ambiente. Es cierto que ya se ha hablado de la disponibilidad de recursos en distintas zonas de Europa, sabiendo que el acero en la mayoría de los países es importado. Esta huella puede ser reducida con la disponibilidad local de los recursos para el resto de las actuaciones para conformar la estructura.



Por otro lado, a diferencia de un hormigón convencional, que necesitaría de unos cinco días para el conformado de la sección, el tiempo de fabricación de esta tubería podría ascender hasta los 7 o 10 días, ya que habría que preparar la pieza de hormigón, al igual que en la alternativa de HA-50, además de las dos chapas de acero, incluyendo el virolado y las soldaduras, así como el enganche de los pernos a la estructura, terminando con el curado final.

La estructura sería algo más compleja de manejar que una de acero convencional, pero esto al fin y al cabo solo supone un cambio en la maquinaria a utilizar para su manipulación. Normalmente, el equipo trabaja con equipos patrocinados para este tipo de trabajo, por lo que la empresa portadora no pondrá objeción en cambiar la máquina a una que pueda manejar mayores pesos.

Ya se ha visto la resistencia que pueden tener estas secciones en los apartados anteriores, por lo que su paletizado para el camión no debe suponer un problema. En la alternativa de hormigón, el mayor problema durante el transporte es la probabilidad de que se golpee o dañe la estructura, pero, en este caso, la estructura va protegida por la camisa de chapa, lo que supone una mayor seguridad.

La alternativa seleccionada parece ser la más adecuada en base a los requerimientos establecidos tanto de diseño como de explotación.



## 9. PROYECCIÓN DE FUTURO

Este proyecto ha servido de estudio preliminar para ver cuál es el material más óptimo para la fabricación de la infraestructura del medio de transporte hyperloop. Está claro que son muchos los aspectos a mejorar mirando al futuro.

Dentro del desarrollo de la infraestructura, siguiendo estas líneas, cabe mencionar la integración del booster dentro de la infraestructura. Como ya se mencionó al principio del documento, este año se ha comenzado con el diseño de un booster que sirva de motor externo para el vehículo, evitando así el uso del motor on-board y erradicar el peso de las baterías, que suponen un alto porcentaje del peso de la cápsula. La implementación de este booster dentro de la infraestructura es uno de los primeros pasos que se tomarán de cara a los futuros avances de este estudio, considerando el alto peso que esto supone.

De igual manera, es objeto de estudio la implementación de un tramo de esclusa para simular el paso de la estación, en este caso, del track exterior, al interior de la infraestructura de vacío, contemplando la diferencia de presión de un lado a otro. Este sistema irá integrado en la unión de dos secciones de tubo para generar una cámara de vacío, como se muestra en la figura.

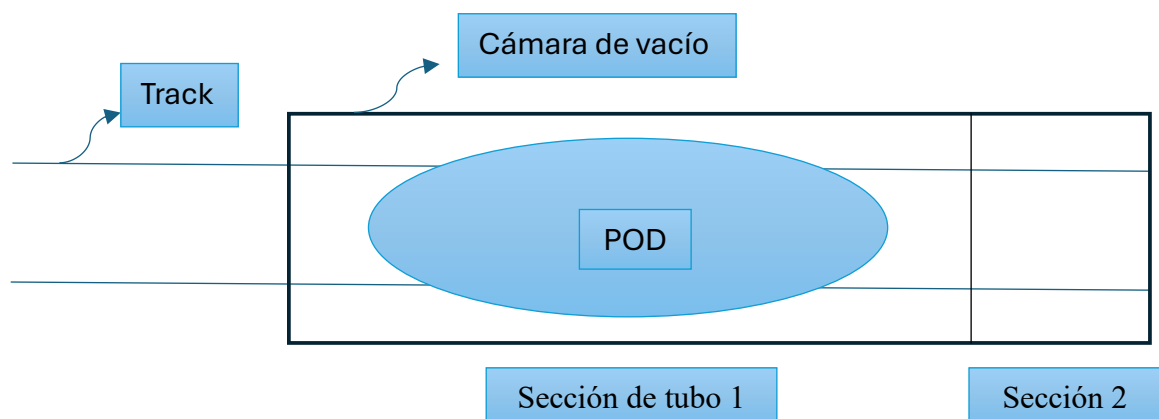


Ilustración 21 - Esquema de integración de la cámara de vacío en la infraestructura - Fuente: Elaboración propia



Hablando de la infraestructura en sí, una de las líneas a seguir es la mejora de diseño a la hora de la fabricación. En este estudio se han simplificado algunos aspectos para hacer su fabricación más sencilla, ya que no influía en los resultados en base a las cargas aplicadas, como lo es la distribución de las barras de acero dentro de la estructura de hormigón. La idea futura para este diseño de hormigón sería su fabricación en serie, es decir, generar una matriz que sea capaz de reproducir esta estructura de manera más rápida y eficiente, lo que reduciría los costes a medida que se vayan construyendo más secciones de tubo, lo que lo hace una solución más escalable y que no necesita de trabajo minucioso por parte de los operarios.

Además de esto, sería interesante valorar distintos tipos de hormigón, o incluso estudiar variantes para generar un hormigón de alta resistencia con baja porosidad basado en materiales o cementos reciclables que reduzcan la huella de carbono que supone el fabricar estructuras de hormigón, ya que la mayor parte de  $CO_2$  de la industria de la construcción se genera en los procesos de generación de cemento.

Finalmente, en base al equipo Hyperloop UPV, se podría valorar la opción de hacer una sección de tubo más grande para permitir cambios de un año a otro, ya que, actualmente, se fabrica una nueva estructura aproximadamente cada dos años para afrontar los nuevos avances del vehículo, que no suelen ser compatibles con la infraestructura de años anteriores.





## 10. CONCLUSIONES

La innovación significa cambio. A lo largo de este trabajo se ha podido ver la importancia de estudiar la misma idea desde diferentes ángulos. Se han presentado cuatro alternativas diferentes para una solución singular, resultado todas de una combinación o mejora de los materiales estudiados: hormigón y acero.

Para poder empezar, se ha diseñado un modelo de viga estática que represente una sección de tubo sobre la que actúan distintas cargas, considerando inicialmente las condiciones de diseño que el mismo vehículo impone.

Estas secciones han superado satisfactoriamente los requisitos de estado límite, consiguiendo cuatro estructuras que deben ser valoradas sobre más factores para determinar la más adecuada para el equipo. De esta manera, aunque ya se había visto que la alternativa de hormigón con doble camisa de chapa era la más resistente de todas, la media de los criterios valorados ha respondido favorablemente a este enunciado, dejando la Alternativa 2 como la mejor.

Todo esto ha servido para determinar que, con algo de tiempo, se pueden llegar a soluciones más viables que las que se presentan actualmente en competición, aunque el tiempo siempre es el factor sorpresa.

Además de esto, cabe destacar que este trabajo no es simplemente por un equipo universitario. El transporte es una parte más de la vida cotidiana de las personas, y aquellos medios de transporte motorizados generan altos grados de contaminación que, en una sociedad tan avanzada como la de hoy día, hay que mitigar.



## ANEXO 1

### Relación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible

Objetivos de Desarrollo Sostenible	Alto	Medio	Bajo	No Procede
ODS 1. Fin a 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 los objetivos		X		

ODS 7- ENERGÍA ASEQUIBLE Y NO CONTAMINANTE – hyperloop está diseñado para ser un medio de transporte con pérdidas de energía muy bajas, de tal manera que la infraestructura deber ser un sistema energético consolidado para poder abastecer al vehículo de la energía necesaria para la operación, interviniendo así con la meta 7.a, que pretende facilitar el acceso a la investigación hacia las energías y tecnologías limpias. La infraestructura de hyperloop está pensada para portar paneles solares para captar la energía necesaria para el funcionamiento. En el caso de Hyperloop UPV, se piensa en el almacenamiento de la energía en supercondensadores para conseguir la energía suficiente para las pruebas de levitación en estático y dinámico, y en futuro dejar de depender de las baterías de litio.



ODS 8 – TRABAJO DECENTE Y CRECIMIENTO ECONÓMICO – Este estudio preliminar de materiales para la infraestructura acerca a la realidad el concepto de este nuevo medio de transporte, llevando más allá la investigación y una futura implementación de la infraestructura, lo que generará puestos de empleo tanto para su construcción a nivel global como en su etapa de operación y mantenimiento. Además, la conectividad con hyperloop entre dos puntos puede hacer que la economía de zonas menos desarrolladas pueda potenciarse.

ODS 9 – INDUSTRIA, INNOVACIÓN E INFRAESTRUCTURA – podría decirse que este es el ODS con el que más tiene que ver este proyecto. La primera meta describe a la perfección el objetivo de la misma, ya que describe el primer objetivo como aquel que desarrolle infraestructuras fiables, sostenibles, resilientes y de calidad para apoyar tanto el desarrollo económico como el bienestar humano. La implementación de hyperloop significa una modernización de las infraestructuras de transporte hacia unas más sostenibles y hacia un medio de transporte que rompa con las barreras contaminantes hasta ahora conocidas. Para ello, es necesario seguir investigando y mejorando los sistemas hasta ahora obtenidos, potenciando la innovación en distintos ámbitos y sectores.

ODS 11 – CIUDADES Y COMUNIDADES SOSTENIBLES – hyperloop es un medio de transporte rápido eficiente que servirá tanto para pasajeros como para mercancías, por lo que su uso puede suponer una reducción en la congestión y los accidentes relacionados con ella, de tal manera que se reduzca el uso de vehículos contaminantes como los barcos, los camiones o el avión, así como una accesibilidad rápida y asequible, facilitando así las nuevas oportunidades para la sociedad en tiempos reducidos.

ODS 13 – ACCIÓN POR EL CLIMA – como se ha mencionado anteriormente, hyperloop está impulsado principalmente por energías renovables, en este caso, la energía solar, lo que puede contribuir a la reducción de las emisiones de los gases de efecto invernadero producidos por el tráfico. La reducción del carbono en la atmósfera se puede combatir con el desarrollo de medios de transporte sostenible.

## ANEXO 2

### CÁLCULO DE LA ACCIÓN DEL VIENTO

Se va a realizar el primer cálculo para el modelo de acero. Primero, se determina la velocidad básica fundamental del viento  $v_b$  para un periodo de retorno de 50 años, dado por la siguiente ecuación:

$$v_b = c_{dir} * c_{season} * v_{b0}$$

Donde el factor direccional del viento y el factor estacional toman el valor de  $c_{dir} = c_{season} = 1$ , y  $v_{b0}$  es la velocidad básica fundamental del viento, que, al estar la localidad de Valencia en Zona A, tiene un valor de 26 m/s.



Ilustración 22 - Mapa de Isotacas para la obtención de la velocidad básica fundamental del viento – Fuente: IAP 11

Con esto, se determina que:

$$v_b = 1 * 1 * 26 = 26 \text{ m/s}$$

En cambio, para un periodo de retorno  $T$  de 100 años, la velocidad básica del viento será:



$$v_b(T) = v_b * c_{prob}$$

Donde el factor de probabilidad  $c_{prob}$  equivale a 1,04 para el periodo de retorno adoptado según la norma. Por tanto,

$$v_b(100) = 26 * 1,04 = 27,04 \text{ m/s}$$

La velocidad media del viento  $v_m(z)$  a una altura  $z$  del terreno se determina de la siguiente manera:

$$v_m(z) = c_r(z) * c_o * v_b(T)$$

Donde el factor de topografía  $c_o$  es igual a 1,0 como carácter general, y el factor de rugosidad  $c_r(z)$  se calcula como:

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

Dado que  $z < z_{min}$ , siendo  $z$  la altura del punto de aplicación del empuje de viento respecto del terreno, en este caso 1,2 m. Los valores  $k_r$ ,  $z_{min}$  y  $z_0$  se obtienen de la tabla de coeficientes según el tipo de entorno aportada en la norma. Se considera un entorno tipo IV, que corresponde a una zona urbana en la que al menos el 15% de la superficie está edificada y la altura media de los edificios excede los 15 m. Se ha optado por este tipo ya que el emplazamiento será dentro del campus de la politécnica. Por tanto, los valores son  $k_r = 0,235$ ,  $z_{min} = 10 \text{ m}$  y  $z_0 = 1 \text{ m}$ .

$$c_r(10) = 0,235 * \ln\left(\frac{10}{1}\right) = 0,541$$

El empuje horizontal del viento se calcula mediante la expresión

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

Donde la densidad del aire  $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$ , el coeficiente de exposición  $c_e(z)$  equivale a

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

Porque  $z < z_{min}$ , con  $k_l$  como factor de turbulencia igual a 1.



$$c_e(z_{min}) = 0,235^2 * [1^2 * \ln^2 \frac{10}{1} + 7 * 1 * 1 * \ln \frac{10}{1}] = 1,183$$

El coeficiente de fuerza  $c_f$  tiene un valor de 0,7 al tratarse de una sección circular con superficie lisa.

El área de referencia del tubo  $A_{ref}$  se toma como una sección de área rectangular en planta equivalente a

$$A_{ref} = D * L = 0,895 * 2,4 = 2,15 \text{ m}^2$$

Con estos datos, se puede obtener que

$$F_{w,h} = \left[ \frac{1}{2} * 1,25 * 27,04^2 \right] * 1,183 * 0,7 * 2,1 = 0,794 \text{ KN/m}$$

La componente vertical se calcula de la misma manera, salvo el coeficiente de fuerza, que adopta un valor de 0,9 en este caso. Por tanto,

$$F_{w,v} = \left[ \frac{1}{2} * 1,25 * 27,04^2 \right] * 1,183 * 0,9 * 2,1 = 1,021 \text{ KN/m}$$

El empuje longitudinal es una fracción, en este caso del 25%, del empuje transversal, multiplicado por un coeficiente reductor dado por la expresión:

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

Siendo

$$\Phi * \frac{L}{L(z)} = 0,230 + 0,182 * \ln \left[ \frac{L}{L(z)} \right]$$

Donde  $L$  es la longitud total de la sección, 2,4 m, y  $L(z)$  la longitud integral de la turbulencia que

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



*Estudio de alternativas para la infraestructura tubular de Hyperloop UPV*

Para  $z < z_{min}$ , donde  $\alpha = 0,67$  por el tipo de entorno.

Resolviendo,

$$L(z) = 300 \left( \frac{10}{200} \right)^{0,67} = 0,75 \text{ m}$$

$$\Phi * \frac{L}{L(z)} = 0,230 + 0,182 * \ln \left[ \frac{2,4}{0,75} \right] = 0,44$$

$$\% = 1 - \left[ \frac{7}{1 * \ln \frac{10}{1} + 7} \right] * 0,44 = 66,89\%$$

Finalmente, la componente longitudinal  $F_{w,l}$  es

$$F_{w,l} = 0,794 * 0,25 * 0,67 = 0,13 \text{ KN/m}$$

Para el resto de alternativas se sigue el mismo procedimiento, cambiando las áreas de referencia para cada una de ellas.

*Tabla 11 - Valores de la acción del viento - Fuente: Elaboración propia*

	<b>HA-50</b>	<b>Camisa de chapa</b>	<b>UHPC</b>	<b>Acero</b>	<b>Eje</b>
<i>Acción del viento 1 (KN/m)</i>	0,967	0,934	0,922	0,794	Z
<i>Acción del viento 2 (KN/m)</i>	1,244	1,199	1,185	1,021	Gravedad
<i>Acción del viento 3 (KN/m)</i>	0,162	0,156	0,154	0,130	X



## ANEXO 3

### CÁLCULOS DE LAS ALTERNATIVAS

#### Dimensionamiento estructura de hormigón

Se parte de un diámetro interior de 0,865 m y se selecciona un espesor inicial de 0,1 m orientativamente.

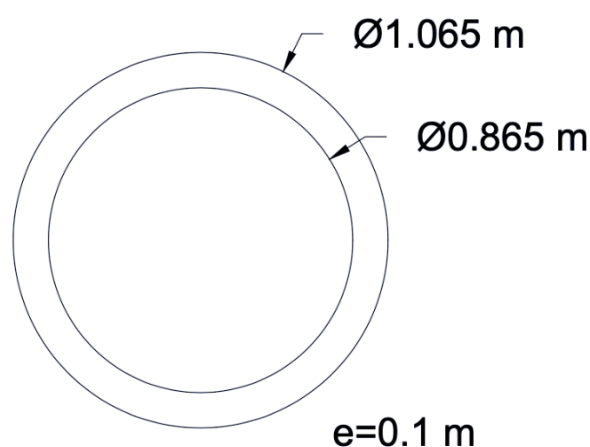


Ilustración 23 - Sección de hormigón - Fuente propia

#### Estado límite último

Propiedades brutas de la sección:

$$A = 0,3032 \text{ m}^2$$

$$I_y = I_z = 0,03567 \text{ m}^4$$

Se utiliza una combinación característica para proyecto persistente tal como:

$$\Sigma \gamma_{g,j} G_{k,j} + \gamma_{q,1} Q_{k,1} + \Sigma \gamma_{Q,j} \psi_{o,1} Q_{k,j}$$

Donde  $\psi_{0-viento} = 0,6$  y  $\psi_{0-scu} = 0,75$ .





Para la acción predominante, el viento, se obtiene que:

$$N_{Ed} = 1,5 * 0,162 * 2,4 = 0,5832 \text{ kN}$$

$$V_{Ed} = 1,5 * 0,8065 = 1,2097 \text{ kN}$$

$$M_{yEd} = 1,35 * (5,458 + 2,728) + 1,5 * 0,896 + 1,5 * 0,75 * 0,736 = 13,222 \text{ kNm}$$

$$M_{zEd} = 1,5 * 0,696 = 1,044 \text{ kNm}$$

Para calcular la resultante total de los esfuerzos, se determina que:

$$q = A + B\theta$$

Siendo:

$$q = 0,896 \text{ kN/m con } \theta = 0$$

$$q = 1,224 \text{ kN/m con } \theta = \frac{\pi}{2}$$

De esta forma:

$$0,896 = A + B * 0$$

$$1,224 = A + B * \frac{\pi}{2}$$

$$A = 0,896 \frac{\text{kN}}{\text{m}}; B = 0,222 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Sustituyendo:

$$q = 0,896 + 0,222\theta$$

Dividiendo en componentes:



$$q_y = q * \cos\theta$$

$$q_z = q * \sin\theta$$

Integrando, se obtiene que las resultantes en y y z toman los valores de:

$$R_y = \int_0^{\frac{\pi}{2}} (0,896 + 0,222\theta) \cos\theta * 0,5325 d\theta = 0,5444 \text{ kN}$$

$$R_z = \int_0^{\frac{\pi}{2}} (0,896 + 0,222\theta) \sin\theta * 0,5325 d\theta = 0,5950 \text{ kN}$$

Finalmente, la resultante total es:

$$R_{tot} = \sqrt{R_y^2 + R_z^2} = 0,8065 \text{ kN}$$

Con este valor se calcula el  $V_{ed}$ , que toma un valor de  $1,044 \text{ kN/m}$ .

Para ver si la sección fisura, se tiene que cumplir que  $\sigma_{\min} \leq f_{ct,m,fl}$ . Para ello, es necesario saber cuál es el punto más traccionado y cuál el más comprimido dentro de la sección. En base a la resultante obtenida, se sabe que:

$$y^2 + z^2 = 0,5325^2$$

$$\frac{z}{y} = \tan 47,59^\circ$$

De lo que se obtiene que el punto más traccionado tiene las coordenadas  $y = -0,3634 \text{ m}$ ,  $z = -0,3892 \text{ m}$ , y el punto más comprimido se hallará en las mismas coordenadas de signo opuesto. Sabiendo esto, la tensión se calcula según la fórmula:



$$\sigma = \frac{N}{A} + \frac{M_y}{I_y} z - \frac{M_z}{I_z} y$$

Sustituyendo:

$$\sigma_{\min} = 154,316 \text{ kPa}$$

$$\sigma_{\max} = -158,163 \text{ kPa}$$

Finalmente, como  $154,316 \text{ kPa} < 4200 \text{ kPa}$ , se comprueba que la sección no fisura.

### *Dimensionamiento de la armadura pasiva*

Como la fibra neutra se ha obtenido en un supuesto de flexión esviada, que queda fuera de los conocimientos de grado, y al estar estudiándose una sección simétrica, se ha girado la sección para que la fibra neutra se quede en el eje  $y'$ , con lo que se obtiene un momento total en  $y'$ :

$$M_{\text{tot}} = M_{y'Ed} = \sqrt{M_{yEd}^2 + M_{zEd}^2} = 13,264 \text{ kNm}$$

Siguiendo el Eurocódigo 2 para el cálculo de áreas de armaduras máximas y mínimas, no se debe disponer de un área de armadura longitudinal de tracción menor que  $A_{s,\min}$ , siendo este valor:

$$A_{s,\min} = 0,26 * \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} * b_t * d$$

Donde  $f_{ctm} = 4,2 \text{ MPa}$ ,  $f_{yk} = 500 \text{ MPa}$ ,  $b_t$  la anchura media de la zona de tensión, que en este caso será de 200 mm, del lado de la seguridad, considerando que el espesor del tubo es de 100 mm, y  $d$  tomará un valor de 1.015 mm.

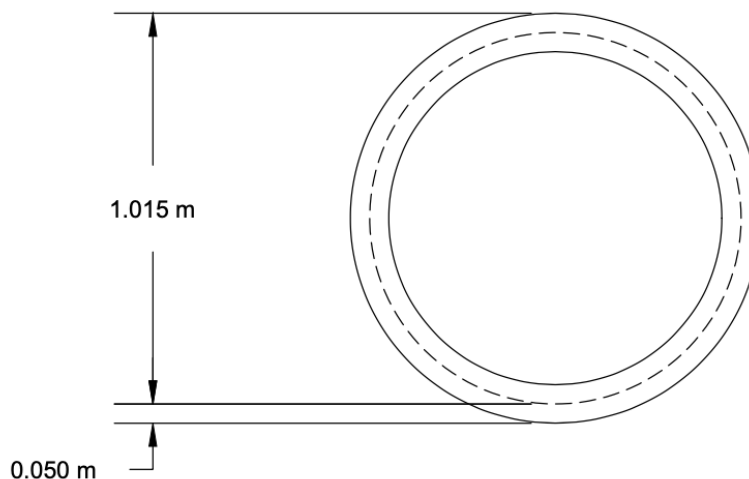


Ilustración 24 - Valor  $d$  en base al recubrimiento - Fuente propia

$$A_{s,mín} = 443,35 \text{ mm}^2$$

La armadura máxima,  $A_{s,máx}$ , según el Eurocódigo 2, se recomienda que sea 0,04 veces la armadura de compresión.

$$A_{s,máx} = 12126,56 \text{ mm}^2$$

Como se puede observar, este valor toma un valor demasiado elevado, llevando a concluir que la estructura es bastante resistente para las cargas soportadas.

La armadura de cortante se determina:

$$\rho_w = \frac{A_{sw}}{s * b_w * \text{sen}\alpha}$$

Donde se toma  $\alpha = 90^\circ$ ,  $b_w = 200 \text{ mm}$  y  $\rho_w$ :



$$\rho_{w,\min} = \frac{0,08 * \sqrt{f_{ck}}}{f_{yk}} = 1,1314 * 10^{-3}$$

Por tanto:

$$\frac{A_{sw}}{s} \geq 1,1314 * 10^{-3} * 200 = 0,2263 \frac{mm^2}{mm}$$

Para calcular la separación máxima longitudinal entre armaduras de cortante, se debe obtener el valor de  $s_{l,m\acute{a}x}$ . Este valor ha de ser mayor al de la separación.

$$s_{l,m\acute{a}x} = 0,75 * d * (1 + cot\alpha)$$

Como se sabe que el valor de  $cot\alpha \in [1, 2'5]$ , se optará por el valor de 1 del lado de la seguridad, de tal manera que:

$$s_{l,m\acute{a}x} = 0,75 * 1015 * (1 + 1) = 1522,5 \text{ mm}$$

Una vez obtenido el valor máximo, se pasa a calcular la separación longitudinal. Siguiendo la norma, se seguirá un criterio de:

$$V_{ed} - V_{ccd} - V_{td} \leq \frac{1}{5} V_{Rd,m\acute{a}x}$$

Ya que se cumple que:

$$s_{l,m\acute{a}x} \leq 0,75d(1 + cot\alpha) \leq 600 \text{ mm}$$

Para ello, se sabe que  $V_{Rd,m\acute{a}x}$  es:

$$V_{Rd,m\acute{a}x} = \alpha_{cw} * v_1 * f_{cd} * b_{w,nom} * z * (cot\alpha + cot\theta) * sen^2\theta$$

Donde



- $\alpha_{cw} = 1$
- $v_1 = v = 0,6 * \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) = 0,48$
- $f_{cd} = \frac{50}{1,5} = 33,33 \text{ MPa}$
- $b_{w,nom} = 200 \text{ mm}$
- $z = 0,9 * d = 0,9 * 1015 = 913,5 \text{ mm}$
- $\cot\alpha = 0$
- $\cot\theta = 1$ , del lado de la seguridad, siendo  $\theta = 45^\circ$

Finalmente,

$$V_{Rd,m\acute{a}x} = 1461,6 \text{ kN}$$

Para determinar la separaci3n maxima de las barras longitudinales se va a tener en cuenta lo especificado en el apartado 9.2.3 de Armaduras de torsi3n en el Euroc3digo 2. Aunque en este caso no se encuentre torsi3n en la pieza, se ha optado por utilizar este criterio debido a la distribuci3n de las barras para esta secci3n.

Seguidamente, el área mínima de armadura adherente para el control de la fisuraci3n en áreas donde se esperen tracciones en vigas en caj3n vendrá determinado por:

$$A_{s,min}\sigma_s = k_c * k * f_{ct,eff} * A_{ct}$$

Donde:

- $k = 0,65$  para almas con  $h \geq 800 \text{ mm}$
- $k_c$ , para secciones en caj3n sometidas a flexi3n simple o compuesta es

$$k_c = 0,4 * \left[1 - \frac{\sigma_c}{k_1 * \frac{h}{h^*} * f_{ct,eff}}\right] \leq 1$$

Que se ha estimado como 0,4 ya que:



$$\sigma_c = \frac{N_{Ed}}{A} = \frac{583,2}{0,3032 * 10^{-6}} = 1,923 * 10^{-3} \text{ MPa}$$

Siendo este un valor ínfimo a la hora de calcular el coeficiente de distribución de tensiones.

Por tanto:

$$A_{s,min} \geq 331,055 \text{ mm}^2$$

Una vez obtenidas las armaduras mínimas, se procede a determinar la cuantía de armadura a disponer en la estructura. Anteriormente, se ha calculado que la armadura mínima de tracción es de  $443,35 \text{ mm}^2$ . La parte traccionada corresponde a la mitad inferior de la sección, por lo que se dispone en la mitad de la longitud de la misma.

$$R_{medio} = \frac{0,965}{2} = 0,4825 \text{ m}$$

$$P_{medio} = \frac{2 * \pi * 482,5}{2} = 1515,82 \text{ mm}$$

Donde  $R_{medio}$  es el radio desde el centro de la sección hasta el centro de la barra de armado, y  $P_{medio}$  el valor del perímetro en la mitad inferior de la sección.

Con estos datos, se ha determinado que la mejor selección de armado es poner 10 barras de diámetro  $10 \text{ mm}$  -  $10\phi 10$ .

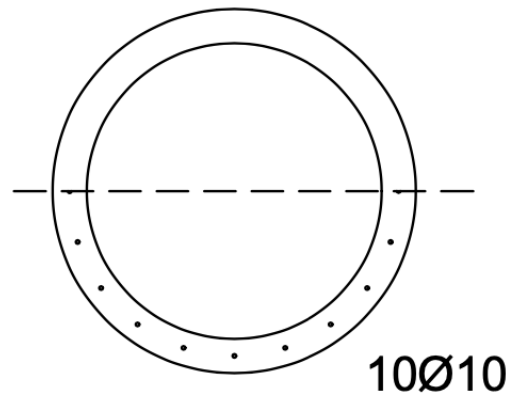


Ilustración 25 - Determinación de armado en base a la armadura mínima - Fuente propia

Las condiciones para la distribución de estas barras establecían una separación mínima de  $100\text{ mm}$ , y una máxima de  $350\text{ mm}$ . Con esta disposición, la separación media entre barras es de  $151,6\text{ mm}$ .

Como se ha mencionado en los párrafos anteriores, la pieza va a seguir una distribución de armado uniforme para la simplificación del problema. Es por esto, que la armadura de la parte comprimida será igual a la de la parte traccionada, utilizando el mismo diámetro y la misma separación. De esta manera, se queda una pieza armada al completo, incluyendo los puntos críticos, con un total de 20 barras de  $10\text{ mm}$  de diámetro.

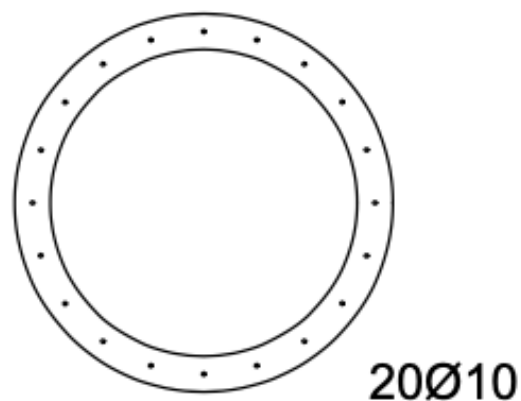


Ilustración 26 - Armado de la estructura - Fuente propia





Por otro lado, para la armadura mínima de cortante se ha determinado que  $\frac{A_{sw}}{s} \geq 0,2263 \frac{mm^2}{mm}$ , siendo  $A_{sw} = 2 * \pi * r$ , donde 2 es el número de ramas en las que se divide el cortante, que, por simplificación del problema, se ha calculado como en una sección cuadrada/rectangular para no derivar la fórmula.

$$\frac{2 * \pi * r^2}{s} \geq 0,2263 \frac{mm^2}{mm}$$

Para este supuesto se hacen dos propuestas:

- $\phi = 8 \text{ mm}$

Con un radio de 4 mm, la separación quedaría tal que:

$$s \leq 444,24 \text{ mm}$$

Este valor es más que aceptable, pero, dado a que las barras de diámetro 8 no son comunes de fabricar en España, se ha optado por una segunda opción que proporciona más viabilidad en su futura fabricación

- $\phi = 6 \text{ mm}$

En este caso, la separación queda como:

$$s \leq 249,88 \text{ mm} \approx 245 \text{ mm}$$



## COMPROBACIÓN DE DURABILIDAD

Dentro de los criterios de durabilidad se encuentra el recubrimiento, es decir, la distancia desde la armadura hasta su superficie más próxima. De aquí, se sabe que el recubrimiento nominal ( $c_{nom}$ ) será de:

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev}$$

Donde  $\Delta c_{dev}$  toma un valor general de 10 mm según las recomendaciones del Eurocódigo 2, a menos que se especifique lo contrario. El recubrimiento mínimo,  $c_{min}$ , es el que influye en la transmisión de las tensiones de adherencia y la compactación del hormigón  $c_{min,b}$ , la protección contra la corrosión  $c_{min,dur}$  y la protección contra incendios. Se obtiene siguiendo la siguiente condición:

$$c_{min} = \max \left\{ \begin{array}{l} c_{min,b} \\ c_{min,dur} + \Delta c_{dur,\gamma} - \Delta c_{dur,st} - \Delta c_{dur,add} \\ 10 \text{ mm} \end{array} \right.$$

Donde

$\Delta c_{dur,\gamma}$  es el término de seguridad adicional

$\Delta c_{dur,st}$  es el término de reducción por uso de acero inoxidable

$\Delta c_{dur,add}$  es el término por uso de protección adicional

La tabla 4.2 del Eurocódigo 2 recoge que el recubrimiento mínimo  $c_{min,b}$  toma un valor de 10 mm.

Para el recubrimiento que protege de la corrosión:



Tabla 12 - Clasificación estructural del diseño - Fuente:

Clasificación estructural											
Clase exposición	X0	XC1	XC2	XC3	XC4	XD1	XS1	XD2	XS2	XD3	XS3
Vida útil de referencia: 50 años	S4	S4	S4	S4	S4	S4	S4	Requiere estudio específico comprobación E.L. Durabilidad	S4	Requiere estudio específico comprobación E.L. Durabilidad	
Vida de 100 años	subir 2 clases	subir 2 clases	subir 2 clases	subir 2 clases	subir 2 clases	subir 2 clases	subir 2 clases		subir 2 clases		
$f_{ck} \geq 40$ MPa	bajar 1 clase	bajar 1 clase	bajar 1 clase	bajar 1 clase	bajar 1 clase	no modifica	no modifica		no modifica		
Cemento adecuado y 100 años	no modifica	no modifica	bajar 1 clase	bajar 1 clase	bajar 1 clase	bajar 4 clases	bajar 4 clases		bajar 4 clases		
Cemento adecuado y 50 años	no modifica	no modifica	bajar 1 clase	bajar 1 clase	bajar 2 clases	bajar 3 clases	bajar 3 clases		bajar 3 clases		

De donde se empieza con una clase 4 en exposición XS1, con una supuesta vida útil de 50 años por ser una estructura de hormigón experimental. La resistencia característica no supone ningún cambio, y asumiendo un cemento adecuado se reduce en 3 clases. Por lo tanto:

$$4 - 3 = 1$$

La clase estructural es una S1.

Para obtener el valor de  $c_{min,dur}$ , se estudia la tabla AN/3, 4.4N y 4.5N de la EN 1992-1-1:2004, de donde se obtiene un recubrimiento para S1 en XS1 de 30 mm.

La tabla AN/4 de la misma norma, expone que para el  $\Delta c_{dur,\gamma}$  en XS1 para hormigón armado con cemento adecuado suma 0.

La tabla AN/5 da un valor de 0 mm para el  $\Delta c_{dur,st}$  para la exposición de estudio.

El  $\Delta c_{dur,add}$  viene dado por la tabla AN/6, que vuelve a tomar un valor de 0 mm.

Finalmente se obtiene:



$$c_{min} = \max \begin{cases} 30 \text{ mm} \\ 30 \text{ mm} \\ 10 \text{ mm} \end{cases} \rightarrow c_{min} = 30 \text{ mm}$$

$$c_{nom} = 30 + 10 = 40 \text{ mm}$$

Como se ha optado desde un momento por un recubrimiento de 50 mm para simplificar tanto los cálculos como su futura ejecución, se comprueba que el recubrimiento escogido cumple con los requerimientos mínimos establecidos por la norma.

## COMPROBACIÓN DE ARMADURAS

Para proceder a la comprobación de las armaduras, se ha estimado la fuerza resultante de los incrementos de área para determinar la posición de la fibra neutra en la que se produce el axil de cálculo obtenido inicialmente.

Para realizar este cálculo, se ha creado una hoja Excel en la que se resuelve este caso - *Anexo 4*. Se ha partido de la base de cálculo que se tiene de las secciones rectangulares, en las que, para obtener el axil, se determina el área total del hormigón multiplicado por el  $f_{cd}$ , que es la fuerza total de hormigón. A ese resultado se le quita la parte de las armaduras traccionadas o se le suman las armaduras comprimidas. Para una sección circular, se ha ideado un cálculo por incrementos de área, es decir, se han recorrido pequeños trozos en base a un incremento  $y$ . Ese incremento ha tomado el valor de 0,0005 m, tanto por comodidad del Excel para buscar los datos como para ser tan precisos como sea posible. Se podría haber aumentado más, pero, al ser una hoja de cálculo, no se ha querido agrandar. Como se puede observar en el extracto, se le ha dado el valor 0 a la primera posición del círculo desde  $X$ , es decir, -0,5325 m desde el centro de la sección. El último valor de  $y$  corresponde a la posición 0,5325, la última de la sección.



Para obtener la posición desde  $X$ , primero se ha partido de que, para hormigones de resistencia  $f_{ck} = 50MPa$ , el área comprimida corresponde a  $0,8x$  de la posición de la fibra neutra  $X$ . Por tanto, la posición en  $0,8x$  será la de la posición en  $y$  más el radio de la sección,  $0,5325$ , dando lugar a la posición final en  $X$  como el resultado de la división de esa cifra entre  $0,8$ .

Una vez obtenidas las posiciones donde se necesitaba, hay que obtener los incrementos de área en base a ellas tanto en el círculo interior como en el exterior, que se ha determinado a partir de la ecuación del círculo  $x^2 + y^2 = r^2$ .

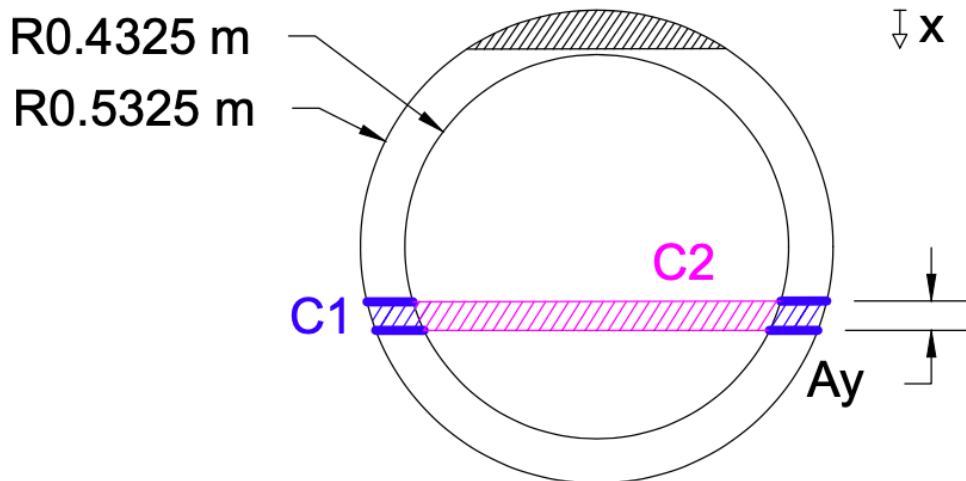


Ilustración 27 - Esquema de la obtención de los incrementos de área de la Alternativa 1

$$x^2 + y^2 = 0,5325^2 \rightarrow x = \sqrt{0,5325^2 - y^2} \rightarrow \Delta x = 2\sqrt{0,5325^2 - y^2}$$

$$dA_{c1} = dy * \Delta x \rightarrow dA_{c1} = 2\sqrt{0,5325^2 - y^2} dy$$

Integrando:

$$\Delta A_{c1} = 2\sqrt{0,5325^2 - y^2} \Delta y$$



Siguiendo el mismo procedimiento para el círculo interior, se queda un incremento de área de:

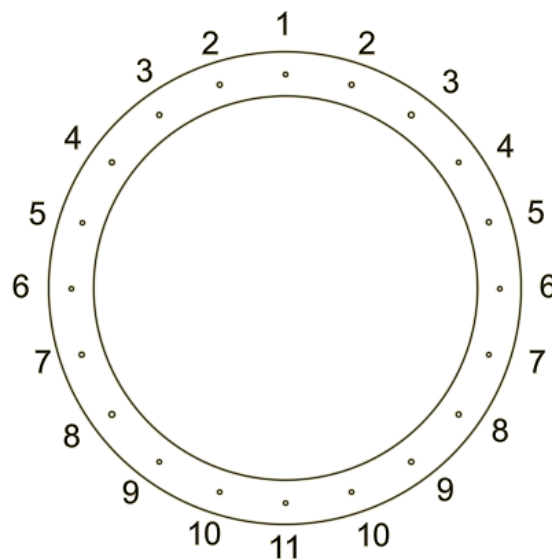
$$\Delta A_{c_2} = 2\sqrt{0,4325^2 - y^2}\Delta y$$

De estos incrementos de área se ha obtenido la acumulada para saber el incremento real en cada posición desde  $X=0$ , es decir, se obtiene el área de la sección desde el punto más hacia arriba hasta el escogido. Seguidamente, ya se puede conocer el valor de área comprimida, siendo ésta la diferencia entre el área acumulada del círculo interior y el interior.

Como ya se ha mencionado, para calcular la fuerza de compresión del hormigón se hace:

$$F_c = A_c * f_{cd}$$

Una vez obtenida esta fuerza, ya se pueden calcular las deformaciones de las diferentes armaduras, siendo estas divididas como en el siguiente esquema:



*Ilustración 28 - Enumeración de las armaduras para el estudio - Fuente propia*



Para iniciar este cálculo, se han obtenido las posiciones de las barras en base a X, como el resto del problema planteado.

Tabla 13 - Posición de las barras de armado en X - Fuente propia

Posiciones en X de las barras (m)	
dAs1	0,05
dAs2	0,073615231
dAs3	0,1421493
dAs4	0,248893616
dAs5	0,3833993
dAs6	0,5325
dAs7	0,6816007
dAs8	0,816106384
dAs9	0,9228507
dAs10	0,991384769
dAs11	1,015

La deformada se ha obtenido a partir de:

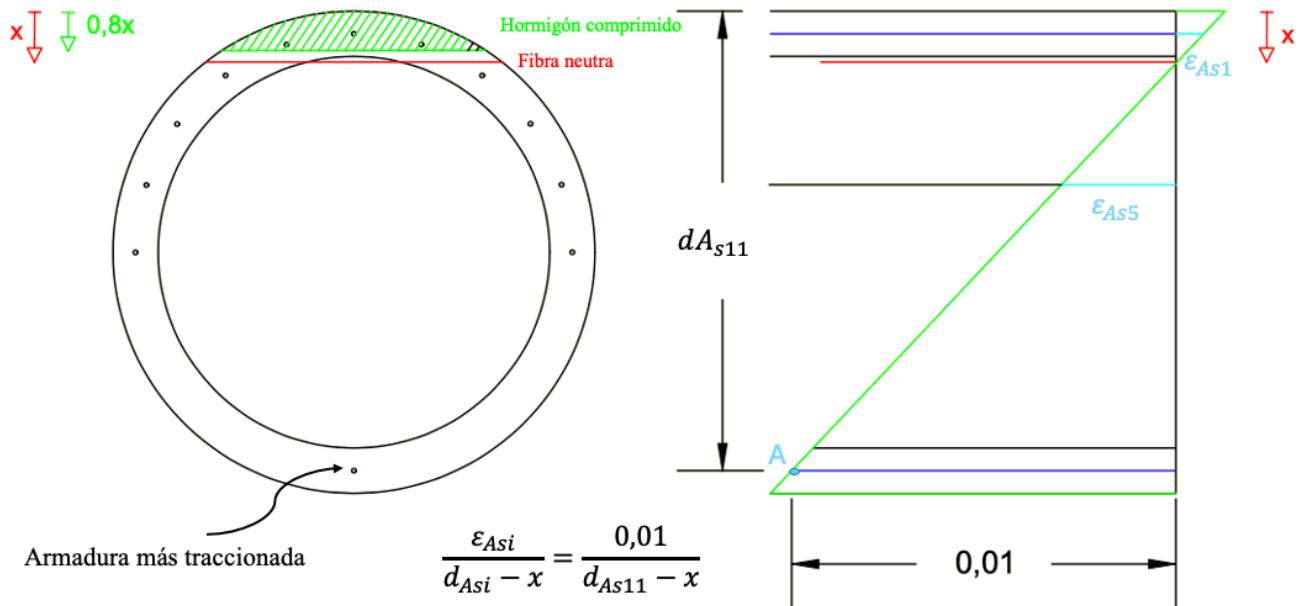


Ilustración 29 - Esquema de la obtención de las deofrmadas en base a las armaduras - Fuente: Elaboración propia



Donde el subíndice  $i$  indica la armadura en la que se está realizando el cálculo, y donde  $x$  corresponde al valor de posición inicial de la columna  $X$ .

Una vez obtenidas las deformadas de las once barras, se pueden obtener las tensiones  $\sigma_s$  en base a estos enunciados:

- Si  $\sigma_s > f_{yd} \rightarrow \sigma_s = f_{yd}$
- Si  $\sigma_s < f_{yd} \rightarrow \sigma_s = E_s * \varepsilon_s$

Donde  $E_s = 200000 \text{ MPa}$ , y  $\varepsilon_s$  es el valor de la deformada en cada distancia  $X$ .

De las tensiones se pueden obtener las fuerzas de todas las situaciones del armado:

$$F_{Asi} = \sigma_{Asi} * \pi * r^2$$

Para obtener la fuerza total en cada situación, se hace el sumatorio de todas las fuerzas de las barras. Es en este momento cuando hay que encontrar el supuesto que se relaciona con la fuerza axial que se ha calculado inicialmente, en este caso,  $0,583 \text{ KN}$ . Como los valores están hechos por incrementos, se ha llegado a una posición de la fibra neutra que toma aproximadamente el valor de  $0,03447$  en  $X$ .

De igual manera, para calcular el momento resistente, primero se ha calculado el incremento de fuerza de cada incremento de área del hormigón:

$$\Delta F_{\Delta A} = \Delta A * f_{cd}$$

Posteriormente, la distancia al cdg bruto, que prácticamente coincide con la posición en  $y$ :

$$d_{cdg,b} = 0,5325 - ((Y - 1) * \Delta y + \frac{\Delta y}{2})$$





Por tanto, el incremento de momento cada incremento de área de hormigón es:

$$\Delta M_{\Delta A_{horm}} = \Delta F_{\Delta A} * d_{cdg,b}$$

El momento resistente es la suma de los incrementos de momento cada incremento de área de hormigón en la fila en la que el axil de cálculo coincide con el sumatorio de las fuerzas, que toma un valor de aproximadamente  $150,70 \text{ kN/m}$ . A este valor, se le suma el momento que genera el armado pasivo en ese punto de la fibra neutra, que se calcula combinando la fuerza de cada armado en su respectiva posición en  $X$  sobre el eje  $y'$ . El momento resistente último es de:

$$M_{resist,últ} = 187,60 \text{ kN/m}$$



## Dimensionamiento hormigón con camisa de chapa

Para establecer el espesor inicial del hormigón, se ha seguido una recomendación de la instrucción del Instituto de Eduardo Torroja en la que se señala que para hormigones revestidos con camisa de chapa puede ser suficiente con tener un espesor de 0,075 m de espesor (Torroja, 2007). Al estar en un supuesto en el que se inducirá vacío, se ha hecho el diseño con una doble camisa de chapa para evitar colapsos en el interior de la infraestructura.

El estudio realizado en este apartado se ha hecho siguiendo principalmente la normativa RPX, donde se establecen las condiciones de cálculo para estructuras de hormigón con camisa de chapa.

El espesor de las chapas se ha determinado de igual manera que en el apartado de la sección de acero, donde:

$$d \leq 90t \sqrt{\frac{235}{f_y}}$$

Donde  $d = 150 \text{ mm}$ , ya que el espesor del hormigón es de  $75 \text{ mm}$ . De aquí, se despeja que  $t \geq 2,048 \text{ mm}$ , por lo que se opta por una chapa de  $3 \text{ mm}$ .

Con esto, se obtiene que los nuevos radios son:

- $R_{ext,horm} = 510,5 \text{ mm}$
- $R_{int,horm} = 435,5 \text{ mm}$

Finalmente, el diseño preliminar queda de la siguiente manera:

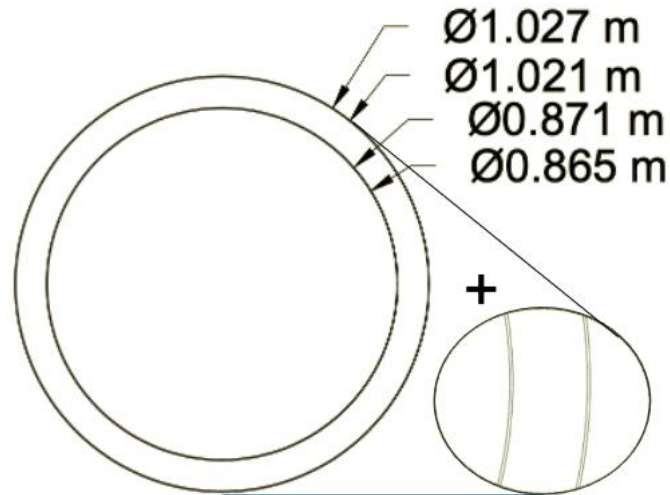


Ilustración 30 - Sección hormigón con doble camisa de chapa - Fuente propia

Se supone desde un principio que la sección es compacta, es decir, que el momento resistente corresponde a una plastificación completa de la sección.

Una vez obtenida la sección, se han recalculado las cargas y posteriormente los esfuerzos de diseño, obteniéndose:

Tabla 14 - Valores de cálculo para la alternativa de hormigón con doble camisa de chapa - Fuente propia

$N_{ed}$	0,562 kN
$V_{ed}$	0,517 kN
$M_{yed}$	12,187 kNm
$M_{zed}$	1,009 kNm

Se ha seguido con el mismo procedimiento que en la alternativa de hormigón HA-50 para calcular el momento resistente último. Para ello, en esta ocasión, se han dividido los incrementos de área en cuatro, ya que se necesitaba pasar del acero al hormigón, y del hormigón al acero de nuevo. Por tanto, la distribución de incrementos se establece de la siguiente manera:

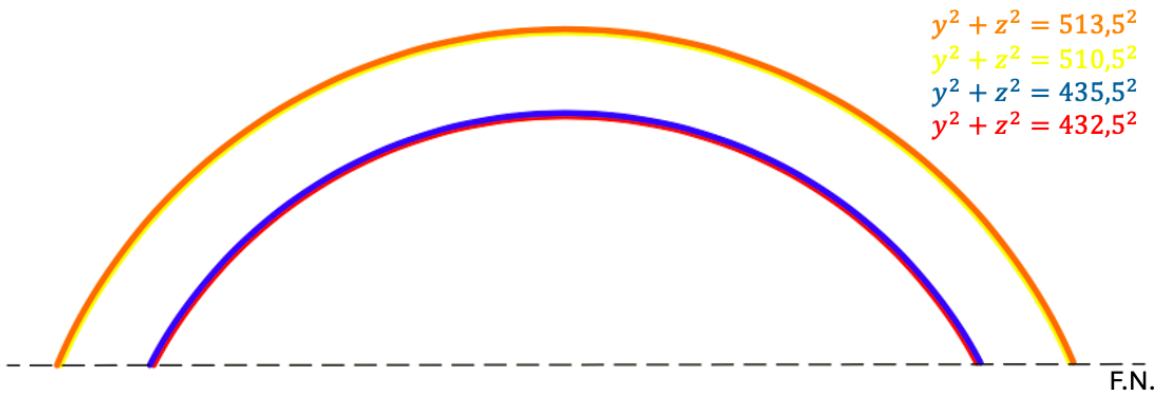


Ilustración 31 - Esquema de los incrementos de área para la Alternativa 2 - Fuente: Elaboración propia

La obtención del momento último se ha desarrollado siguiendo las especificaciones de la sección 6.3.4.2.1. de la norma RPX. Se ha obtenido un momento resistente último de  $2292,70 \text{ kN/m}$ . En esta alternativa, como la parte de acero resiste tanto la tracción como la compresión, y la parte del hormigón sólo resiste a compresión, el momento resistente último considera toda la estructura, y no solo la parte que trabaja a compresión del hormigón.

- Conexión acero-hormigón

Se debe asegurar que los dos materiales puestos en esta alternativa trabajen en conjunto. Para ello, se deben poner conectadores que aseguren la transmisión de esfuerzos que se generan en la superficie de contacto del acero y del hormigón.

Se parte de la indicación de que la separación máxima  $s$  entre pernos ha de ser  $200 \text{ mm}$ . Se han de determinar los pernos tanto para la sección longitudinal como para la sección circular.

$$N_{\text{pernos,long}}^{\circ} = \frac{l_{\text{tubería}}}{s} = \frac{2,4}{0,200} = 12$$



$$N_{\text{pernos,circ,ext}}^{\circ} = \frac{P_{\text{circ,ext}}}{s} = \frac{\pi * 1,021}{0,200} = 16$$

$$N_{\text{pernos,circ,int}}^{\circ} = \frac{P_{\text{circ,int}}}{s} = \frac{\pi * 0,871}{0,200} = 13$$

El total de pernos necesarios para la parte exterior será  $12 * 16 = 192$ .

Para la parte interior, el total será  $12 * 13 = 156$ .

Según este apartado, el diámetro nominal de los pernos no debe ser superior a 2,5 veces el espesor de la chapa a la que van a ser soldados. Por tanto:

$$2,5 * 3 = 7,5 \text{ mm}$$

Se escogen unos pernos de métrica M6 para no rebasar el máximo impuesto. Estos pernos son fáciles de soldar a chapas así de delgadas sin debilitarla. Como la longitud de los pernos debe coger adecuadamente la estructura de hormigón y acero a la vez, se ha escogido una longitud de 30 mm.



## Dimensionamiento hormigón UHPC

El dimensionamiento de esta estructura apenas difiere de la alternativa de hormigón HA-50. El principal cambio durante el cálculo es la resistencia a compresión, que asciende a los 150 MPa. Estos datos se han obtenido de la normativa para UHPC.

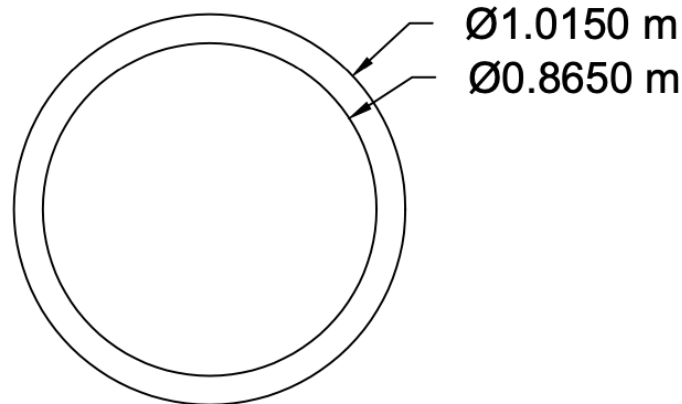


Ilustración 32 - Sección de la alternativa de hormigón de ultra alta resistencia - Fuente: Elaboración propia

Los esfuerzos de cálculo han dado unos resultados bastante similares a los anteriores:

Tabla 15 - Esfuerzos de cálculo de la Alternativa 3 - Fuente: Elaboración propia

$N_{ed}$	0,554 kN
$V_{ed}$	0,1,134 kN
$M_{yed}$	10,207 kNm
$M_{zed}$	0,996 kNm

La disposición del armado corresponde con la mínima establecida en el apartado de HA-50.

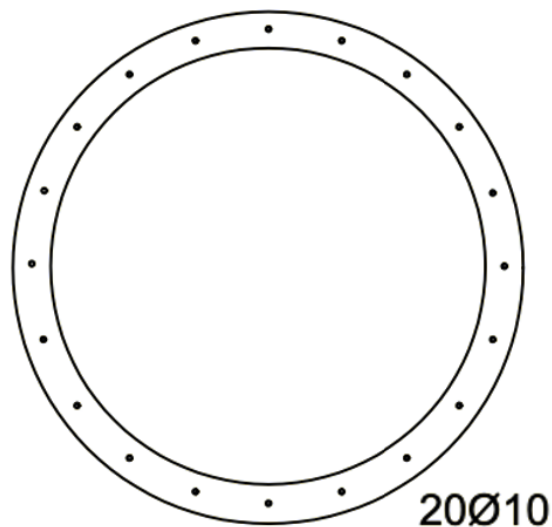


Ilustración 33 - Distribución de armado de la alternativa de hormigón de ultra alta resistencia - Fuente: Elaboración propia

Cambiando estos datos básicos, el momento resistente último queda comprendido entre los valores del sumatorio de fuerza de 0,1233 y 0,8918  $kN$ , que no se han desarrollado más por complejidad de lectura de la hoja Excel. El momento resistente total, sumándole el de la armadura pasiva, queda:

$$M_{rest,últ} = 158,86 \text{ kN/m}$$



## Dimensionamiento estructura de acero

### Estado Límite Último

Siguiendo la Tabla 20.3.c de la EAE para Esbelteces máximas para casos especiales de paneles comprimidos, se procede a determinar la clase de la sección flectada y comprimida. De esta manera, comprobando la clase 3:

$$\frac{d}{t} \leq 90\varepsilon^2$$

Y  $\varepsilon$  toma un valor de 0,81 para un acero S355, siendo  $\varepsilon^2$  0,66.

$$\frac{0,865}{t} \leq 90 * 0,66 \rightarrow 0,015 \text{ m} \leq t$$

El espesor de la sección se tomará de 0,015 m, lo que deja a la sección con una clase 3. Se podría haber reducido la sección a 0,010 m, pero dejaría una clase 4 que complicaría demasiado los cálculos para este estudio, quedando fuera de las competencias atribuidas en grado.

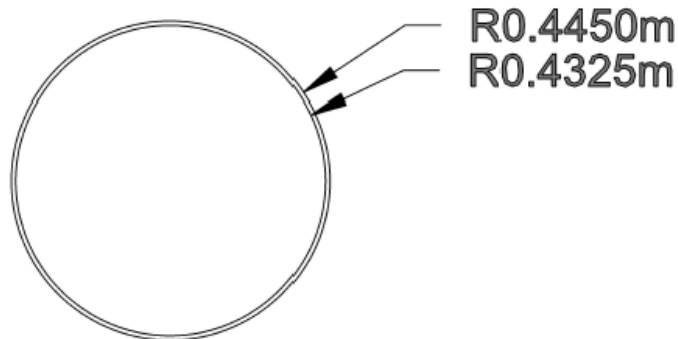


Ilustración 34 - Sección acero - Fuente propia

Las características geométricas de la sección son las siguientes:

$$\begin{aligned} A &= 0,0415 \text{ m}^2 \\ I_{yy} &= I_{zz} = 0,00389 \text{ m}^4 \\ W_{el} &= 0,0087 \text{ m}^3 \end{aligned}$$





$$W_{pl} = 0,0129 \text{ m}^3$$

Los coeficientes parciales para la resistencia son  $\gamma_{M0} = \gamma_{M1} = 1,05$ .

Las acciones soportadas son las descritas en la *Tabla 5*, de la que se saca una combinación de acciones tal como:

$$\Sigma\gamma_{g,j}G_{k,j} + \gamma_{q,1}Q_{k,1} + \Sigma\gamma_{Q,j}\psi_{o,1}Q_{k,j}$$

Donde los coeficientes de combinación y seguridad se definen así:  $\gamma_{g,j} = 1,35$ ,  $\gamma_{q,1} = 1,50$ ,  $\psi_{Q,w} = 0,7$ ,  $\psi_{Q,scu} = 0,6$ , como en los casos anteriores.

Con estos valores, se obtienen los resultados finales de la combinación de acciones.

*Tabla 16 - Combinación de acciones estructura de acero - Fuente: Elaboración propia*

$N_{ed}$	0,468kN
$V_{ed}$	0,858 kN
$M_{yed}$	5,870 kN/m
$M_{zed}$	0,858 kN/m

### *ELU de resistencia de secciones*

Con el método simplificado:

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

Aunque debería considerarse la posible aparición de momentos flectores adicionales por la variación de la fibra neutra.

En la ecuación anterior, el valor  $N_{Rd}$  corresponde a la resistencia de cálculo de la sección a compresión:

$$N_{c,Rd} = \frac{A * f_y}{\gamma_{m0}} = \frac{0,027 * 355}{1,05} = 14030,95 \text{ KN}$$

Mientras que  $M_{y,Rd}$  y  $M_{z,Rd}$  son la resistencia de cálculo de la sección a flexión.



$$M_{y,Rd} = M_{z,Rd} = \frac{W_{el} * f_y}{\gamma_{m0}} = \frac{0,006 * 355}{1,05} = 2941,429 \text{ KNm}$$

Finalmente,

$$\frac{0,468}{14030,95} + \frac{5,870}{2941,429} - \frac{0,858}{2941,429} = 1,737 * 10^{-3} \leq 1$$

El esfuerzo axial de tracción  $N_{Ed}$  deberá cumplir que:

$$N_{Ed} \leq N_{t,Rd}$$

Donde la resistencia de cálculo de la sección a tracción  $N_{t,Rd}$  en esta ocasión equivale a al valor de la resistencia de cálculo a compresión  $N_{c,Rd}$ , y lo mismo pasa al comprobar el esfuerzo axial a compresión. Este criterio se cumple.

El valor del momento flector  $M_{c,Rd}$  deberá ser:

$$M_{Ed} \leq M_{c,Rd}$$

Donde:

$$M_{c,Rd} = W_{el,min} * \frac{f_y}{\gamma_{M0}}$$

El momento resistente toma un valor de 2941,429 kN/m, cumpliéndose el enunciado establecido.

El esfuerzo cortante  $V_{Ed}$  deberá cumplir que:

$$V_{Ed} \leq V_{c,Rd}$$

Donde, al no haber torsión,  $V_{c,Rd} = V_{pl,Rd}$ , siendo la resistencia plástica equivalente a:

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v \left( \frac{f_y}{\sqrt{3}} \right)}{\gamma_{m0}}$$



Siendo  $A_v$  el área de cortante, que para una sección de perfil hueco circular es:

$$A_v = \frac{2A}{\pi} = \frac{2 * 0,0415}{\pi} = 0,0264 \text{ m}^2$$

Por tanto:

$$V_{pl,Rd} = \frac{0,0264 * \left(\frac{355}{\sqrt{3}}\right)}{1,05} = 5157,11 \text{ KN} \geq V_{Ed}$$

Teniendo ahora en cuenta la aparición de los momentos flectores adicionales, la tensión máxima calculada debe cumplir:

$$\sigma_{x,Ed} \leq \frac{f_y}{\gamma_{m0}}$$

$$\sigma_{x,Ed} = 2,296 \text{ MPa}$$

$$\frac{f_y}{\gamma_{m0}} = \frac{355}{1,05} = 338,095 \text{ MPa}$$

#### Estado límite de inestabilidad

Como se indica en el apartado 35.5 de la norma EAE, al encontrarse esta parte del trabajo en materia de un elemento con sección hueca circular no susceptible a deformaciones por torsión, deberá hacerse un análisis frente a su estabilidad al estar sometida tanto a compresión como a flexión. Para ello, deberá verificarse la siguiente condición:

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

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

Donde :



- La resistencia de cálculo a compresión viene dada por

$$\frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}} = \frac{A * f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0,0415 * 355}{1,05} = 14030,95 \text{ kN}$$

- La resistencia de cálculo a flexión en el eje y-y es

$$\frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}} = \frac{W_{el} * f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0,0087 * 355}{1,05} = 2941,43 \text{ kNm}$$

- La resistencia de cálculo a flexión del eje z-z es

$$\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}} = \frac{W_{el} * f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0,0087 * 355}{1,05} = 2941,43 \text{ kNm}$$

- $\chi_y$  y  $\chi_z$  son los coeficientes de reducción para pandeo por flexión en ambos ejes, que vienen definidos en el punto 35.1.2 de curvas de pandeo en la EAE, de donde

$$\lambda = \sqrt{\frac{A_{ef} * f_y}{N_{cr}}}$$

Donde el esfuerzo axial crítico elástico para el pandeo viene definido por

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 * E * I}{L_{cr}^2}$$

Siendo  $L_{cr}$  la longitud de pandeo en el plano de flexión.

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

Donde el coeficiente pandeo  $\beta$  es 1 al ser una viga biapoyada, y  $L$  la longitud del tramo, 2,4 m. Entonces:

$$L_{cr} = 1 * 2,4 = 2,4 \text{ m}$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 * 2 * 10^8 * 0,00389}{2,4^2} = 1333081,98 \text{ kN}$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{0,0415 * 355000}{1333081,98}} = 0,105$$



Al estar en una sección de perfil hueco circular, y suponiendo que se ha conformado en frío, se determina una curva de pandeo  $c$ , con un valor de coeficiente de imperfección  $\alpha = 0,49$ . Así:

$$\Phi = 0,5[1 + \alpha(\lambda - 0,2) + \lambda^2] = 0,5[1 + 0,49(0,105 - 0,2) + 0,105^2] = 0,482$$

Finalmente, el valor de  $\chi$  resulta

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \lambda^2}} = \frac{1}{0,482 + \sqrt{0,482^2 - 0,105^2}} = 1,049 \approx 1,0$$

- El coeficiente  $\chi_{LT}$  de reducción para pandeo lateral en elementos sin torsión toma un valor de 1,0.
- Los coeficientes  $k_{yy}$ ,  $k_{zz}$ ,  $k_{yz}$  y  $k_{zy}$  se obtendrán según el Método 2 para elementos no susceptibles a deformaciones por torsión.

$$k_{yy} = 0,95; k_{yz} = 0,452; k_{zy} = 0,76; k_{zz} = 0,452$$

Finalmente:

$$\frac{0,468}{14030,95} + 0,95 * \frac{5,870}{2941,43} + 0,452 * \frac{-0,858}{2941,43} = 1,797 * 10^{-3}$$

$$\frac{0,468}{14030,95} + 0,76 * \frac{5,074}{2941,43} + 0,452 * \frac{-0,858}{2941,43} = 1,418 * 10^{-3}$$

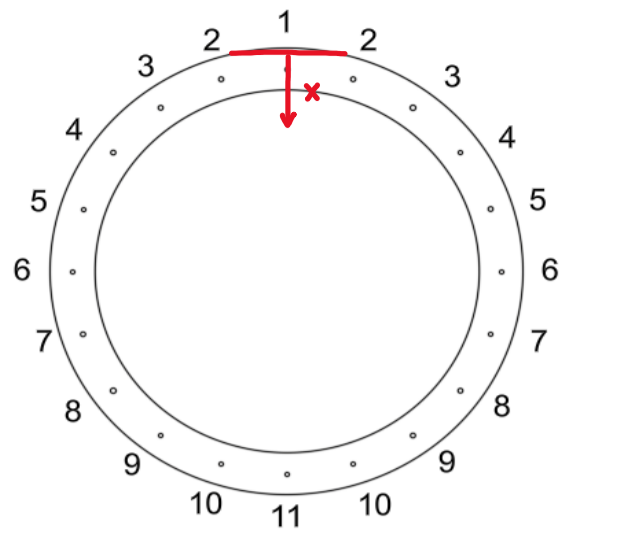
Con esta comprobación, se puede concluir que el diseño cumple para el estado límite último de inestabilidad.



## ANEXO 4

### CÁLCULO DEL MOMENTO ÚLTIMO RESISTENTE

	Mpa	Kpa
fck	50	50000
fcd	33,33333333	33333,3333
fyk	500	500000
fyd	434,782609	434782,609
Es	200000	200000000



Posiciones en X de las barras (m)	Radio (mm)
dAs1	0,05
dAs2	0,073615231
dAs3	0,1421493
dAs4	0,248893616
dAs5	0,3833993
dAs6	0,5325
dAs7	0,6816007
dAs8	0,816106384
dAs9	0,9228507
dAs10	0,991384769
dAs11	1,015

Gamma,c	1,5
Gamma,s	1,15

Incremento Y	0,000032	m
--------------	----------	---

Valores de Y	Círculo exterior				Círculo interior				KN	Def. As											Mpa								
	m	m	m	m	m2	m2	m2	m2		Fuerza compresión hormigón	Def. As1	Def. As2	Def. As3	Def. As4	Def. As5	Def. As6	Def. As7	Def. As8	Def. As9	Def. As10	Def. As11	Ten. As1	Ten. As2	Ten. As3	Ten. As4	Ten. As5	Ten. As6	Ten. As7	Ten. As8
0	-0,5325	0	0	0	0	0	0	0	0	-0,000492611	-0,00072527	-0,00140049	-0,00245215	-0,00377733	-0,00524631	-0,00671528	-0,00804046	-0,00909213	-0,00976734	-0,01	-98,5221675	-145,054642	-280,097143	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609
1	-0,532468	4E-05	3,2E-05	3,73614E-07	3,73614E-07	0	0	3,7361E-07	0,012453803	-0,000492236	-0,00072491	-0,00140015	-0,00245186	-0,00377709	-0,00524612	-0,00671515	-0,00804038	-0,00909209	-0,00976733	-0,01	-98,4472294	-144,981538	-280,029361	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609
2	-0,532436	8E-05	6,4E-05	5,28362E-07	9,01976E-07	0	0	9,0198E-07	0,030065875	-0,000491861	-0,00072454	-0,00139981	-0,00245156	-0,00377684	-0,00524593	-0,00671502	-0,0080403	-0,00909205	-0,00976732	-0,01	-98,3723855	-144,908428	-279,961574	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609
3	-0,532404	0,00012	1,2E-04	6,47099E-07	1,54918E-06	0	0	1,5491E-06	0,051635846	-0,000491487	-0,00072418	-0,00139947	-0,00245126	-0,00377664	-0,00524574	-0,00671489	-0,00804023	-0,00909202	-0,00976731	-0,01	-98,2973356	-144,835312	-279,893781	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609
4	-0,532372	0,00016	0,000128	7,47194E-07	2,29627E-06	0	0	2,2963E-06	0,07654233	-0,000491112	-0,00072381	-0,00139913	-0,00245096	-0,00377635	-0,00524556	-0,00671476	-0,00804015	-0,00909198	-0,0097673	-0,01	-98,2223799	-144,762191	-279,825983	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609
5	-0,53234	0,0002	0,00016	8,35376E-07	3,13165E-06	0	0	3,1316E-06	0,104388206	-0,000490737	-0,00072345	-0,00139879	-0,00245067	-0,00377611	-0,00524537	-0,00671463	-0,00804007	-0,00909195	-0,00976729	-0,01	-98,1474182	-144,689064	-279,758179	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609
6	-0,532308	0,00024	0,000192	9,15095E-07	4,04674E-06	0	0	4,0467E-06	0,134891377	-0,000490362	-0,00072308	-0,00139845	-0,00245037	-0,00377586	-0,00524518	-0,0067145	-0,00803999	-0,00909191	-0,00976728	-0,01	-98,0724506	-144,615931	-279,690371	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609
7	-0,532276	0,00028	0,000224	9,88401E-07	5,03514E-06	0	0	5,0351E-06	0,167838072	-0,000489987	-0,00072271	-0,00139811	-0,00245007	-0,00377562	-0,00524499	-0,00671437	-0,00803982	-0,00909187	-0,00976727	-0,01	-97,9974777	-144,542792	-279,622556	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609
8	-0,532244	0,00032	0,000256	1,05663E-06	6,09177E-06	0	0	6,0918E-06	0,203059041	-0,000489612	-0,00072235	-0,00139777	-0,00244977	-0,00377537	-0,00524481	-0,00671424	-0,00803964	-0,00909184	-0,00976726	-0,01	-97,9224971	-144,469647	-279,554737	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609
9	-0,532212	0,00036	0,000288	1,12071E-06	7,21248E-06	0	0	7,2125E-06	0,240415959	-0,000489238	-0,00072198	-0,00139743	-0,00244948	-0,00377513	-0,00524462	-0,00671411	-0,00803976	-0,0090918	-0,00976726	-0,01	-97,8475124	-144,396497	-279,486912	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609
10	-0,53218	0,0004	0,00032	1,18131E-06	8,39379E-06	0	0	8,3938E-06	0,279793016	-0,000488863	-0,00072162	-0,0013971	-0,00244918	-0,00377488	-0,00524443	-0,00671398	-0,00803968	-0,00909177	-0,00976725	-0,01	-97,7725212	-144,323341	-279,419082	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609
11	-0,532148	0,00044	0,000352	1,23895E-06	9,63274E-06	0	0	9,6327E-06	0,321091401	-0,000488488	-0,00072126	-0,00139676	-0,00244888	-0,00377463	-0,00524424	-0,00671385	-0,00803961	-0,00909173	-0,00976724	-0,01	-97,697524	-144,250179	-279,351246	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609
12	-0,532116	0,00048	0,000384	1,29402E-06	1,09268E-05	0	0	1,0927E-05	0,36422551	-0,000488113	-0,00072089	-0,00139642	-0,00244858	-0,00377439	-0,00524406	-0,00671372	-0,00803955	-0,00909169	-0,00976723	-0,01	-97,622521	-144,177012	-279,283405	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609
13	-0,532084	0,00052	0,000416	1,34684E-06	1,22736E-05	0	0	1,2274E-05	0,409120238	-0,000487738	-0,00072052	-0,00139608	-0,00244828	-0,00377414	-0,00524387	-0,00671359	-0,00803943	-0,00909166	-0,00976722	-0,01	-97,547512	-144,103838	-279,215559	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609
14	-0,532052	0,00056	0,000448	1,39766E-06	1,36713E-05	0	0	1,3671E-05	0,4575709	-0,000487362	-0,00072015	-0,00139574	-0,00244799	-0,0037739	-0,00524368	-0,00671346	-0,00803938	-0,00909162	-0,00976721	-0,01	-97,4724971	-144,030659	-279,147708	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609
15	-0,53202	0,0006	0,00048	1,44674E-06	1,5118E-05	0	0	1,5118E-05	0,503932225	-0,000486987	-0,00071979	-0,0013954	-0,00244769	-0,00377365	-0,00524349	-0,00671333	-0,0080393	-0,00909159	-0,0097672	-0,01	-97,3974763	-143,957474	-279,079851	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609
16	-0,531988	0,00064	0,000512	1,49412E-06	1,66121E-05	0	0	1,6612E-05	0,553736209	-0,000486612	-0,00071942	-0,00139506	-0,00244739	-0,00377341	-0,00524331	-0,00671321	-0,00803922	-0,00909155	-0,00976719	-0,01	-97,3224496	-143,884283	-279,011988	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609
17	-0,531956	0,00068	0,000544	1,54008E-06	1,81522E-05	0	0	1,8152E-05	0,605072209	-0,000486237	-0,00071906	-0,00139472	-0,00244709	-0,00377316	-0,00524312	-0,00671308	-0,00803914	-0,00909152	-0,00976718	-0,01	-97,247417	-143,811087	-278,944121	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609
18	-0,531924	0,00072	0,000576	1,58471E-06	1,97369E-05	0	0	1,9737E-05	0,657895723	-0,000485862	-0,00071869	-0,00139438	-0,0024468	-0,00377292	-0,00524293	-0,00671295	-0,00803907	-0,00909148	-0,00976717	-0,01	-97,1723784	-143,737885	-278,876248	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609
19	-0,531892	0,00076	0,000608	1,62811E-06	2,1365E-05	0	0	2,1365E-05	0,712165909	-0,000485487	-0,00071832	-0,00139404	-0,0024465	-0,00377267	-0,00524274	-0,00671282	-0,00803899	-0,00909144	-0,00976716	-0,01	-97,097334	-143,664677	-278,808369	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609
20	-0,53186	0,0008	0,00064	1,67038E-06	2,3035E-05	0	0	2,3035E-05	0,767845108	-0,000485111	-0,00071796	-0,0013937	-0,0024462	-0,00377242	-0,00524256	-0,00671269	-0,00803891	-0,00909141	-0,00976715	-0,01	-97,0222836	-143,591463	-278,740486	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609
21	-0,531828	0,00084	0,000672	1,7116E-06	2,4747E-05	0	0	2,4747E-05	0,824898451	-0,000484736	-0,00071759	-0,00139336	-0,0024459	-0,00377218	-0,00524237	-0,00671256	-0,00803883	-0,00909137	-0,00976714	-0,01	-96,9472273	-143,518243	-278,672596	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609
22	-0,531796	0,00088	0,000704	1,75185E-06	2,6498E-05	0	0	2,6499E-05	0,883293532	-0,000484361	-0,00071723	-0,00139302	-0,0024456	-0,00377193	-0,00524218	-0,00671243	-0,00803876	-0,00909134	-0,00976714	-0,01	-96,872165	-143,445018	-278,604702	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609
23	-0,531764	0,00092	0,000736	1,7912E-06	2,829E-05	0	0	2,829E-05	0,943000128	-0,000483985	-0,00071686	-0,00139268	-0,00244531	-0,00377169	-0,00524199	-0,0067123	-0,00803868	-0,00909131	-0,00976713	-0,01	-96,7970969	-143,371787	-278,536802	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609
24	-0,531732	0,00096	0,000768	1,8297E-06	3,01197E-05	0	0	3,012E-05	1,00398967	-0,00048361	-0,00071649	-0,00139234	-0,00244501	-0,00377144	-0,00524181	-0,00671217	-0,0080386	-0,00909127	-0,00976712	-0,01	-96,7220228	-143,29855	-278,468897	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609
25	-0,5317	0,001	0,0008	1,8674E-06	3,19871E-05	0	0	3,1987E-05	1,066236525	-0,000483235	-0,00071613	-0,001392	-0,00244471	-0,0037712	-0,00524162	-0,00671204	-0,00803852	-0,00909123	-0,00976711	-0,01	-96,6469428	-143,225307	-278,400987	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609
26	-0,531668	0,00104	0,000832	1,90435E-06	3,38914E-05	0	0	3,3891E-05	1,129714853	-0,000482859	-0,00071576	-0,00139167	-0,00244441	-0,00377095	-0,00524143	-0,00671191	-0,00803845	-0,00909119	-0,0097671	-0,01	-96,5718569	-143,152059	-278,333071	434,78					



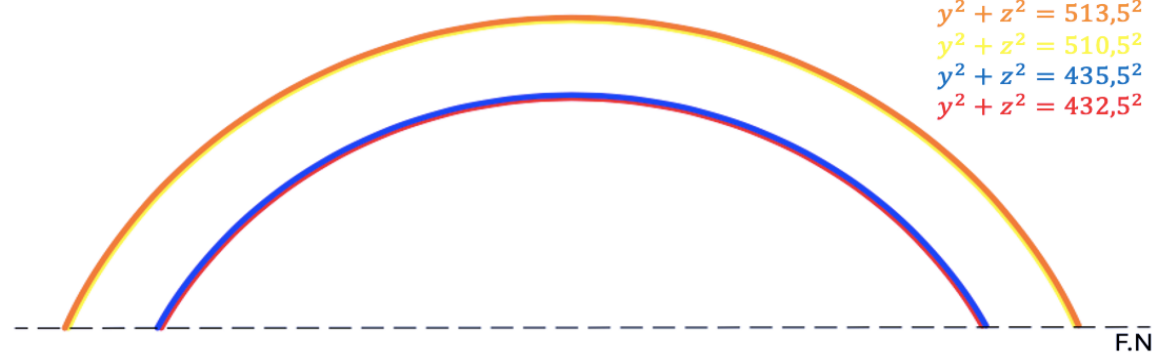


1031	-0,499508	0,04124	0,032992	1,18093E-05	0,008174448	0	0	0,00817445	272,4815837	-8,99606E-05	-0,00033248	-0,00103629	-0,00213249	-0,00351379	-0,00504498	-0,00657617	-0,00795747	-0,00905368	-0,00975748	-0,01	-17,992113	-66,4952984	-207,257025	-426,498554	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609
1032	-0,499476	0,04128	0,033024	1,18149E-05	0,008186262	0	0	0,00818626	272,8754133	-8,95535E-05	-0,00033248	-0,00103592	-0,00213217	-0,00351353	-0,00504478	-0,00657602	-0,00795738	-0,00905364	-0,00975747	-0,01	-17,910693	-66,4158709	-207,18338	-426,433915	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609
1033	-0,499444	0,04132	0,033056	1,18204E-05	0,008198083	0	0	0,00819808	273,2694276	-8,91463E-05	-0,00033168	-0,00103555	-0,00213185	-0,00351326	-0,00504457	-0,00657588	-0,0079573	-0,0090536	-0,00975746	-0,01	-17,8292663	-66,3364368	-207,109728	-426,369271	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609
1034	-0,499412	0,04136	0,033088	1,1826E-05	0,008209909	0	0	0,00820991	273,6636264	-8,87392E-05	-0,00033128	-0,00103518	-0,00213152	-0,003513	-0,00504437	-0,00657574	-0,00795722	-0,00905356	-0,00975745	-0,01	-17,7478329	-66,2566962	-207,036071	-426,304621	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609
1035	-0,49938	0,0414	0,03312	1,18315E-05	0,00822174	0	0	0,00822174	274,0580096	-8,8332E-05	-0,00033089	-0,00103481	-0,0021312	-0,00351273	-0,00504417	-0,0065756	-0,00795713	-0,00905352	-0,00975744	-0,01	-17,6663928	-66,1775491	-206,962408	-426,239967	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609
1036	-0,499348	0,04144	0,033152	1,1837E-05	0,008233577	0	0	0,00823358	274,4525773	-8,79247E-05	-0,00033049	-0,00103444	-0,00213088	-0,00351246	-0,00504396	-0,00657546	-0,00795705	-0,00905348	-0,00975743	-0,01	-17,584946	-66,0980954	-206,888739	-426,175307	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609
1037	-0,499316	0,04148	0,033184	1,18426E-05	0,00824542	0	0	0,00824542	274,8473291	-8,75175E-05	-0,00033009	-0,00103408	-0,00213055	-0,0035122	-0,00504376	-0,00657532	-0,00795696	-0,00905344	-0,00975742	-0,01	-17,5034925	-66,0186352	-206,815063	-426,110641	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609
1038	-0,499284	0,04152	0,033216	1,18481E-05	0,008257268	0	0	0,00825727	275,2422652	-8,71102E-05	-0,0003297	-0,00103371	-0,00213023	-0,00351193	-0,00504356	-0,00657518	-0,00795688	-0,0090534	-0,00975741	-0,01	-17,4220323	-65,9391685	-206,741382	-426,045971	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609
1039	-0,499252	0,04156	0,033248	1,18536E-05	0,008269122	0	0	0,00826912	275,6373853	-8,67028E-05	-0,0003293	-0,00103334	-0,00212991	-0,00351166	-0,00504335	-0,00657504	-0,0079568	-0,00905336	-0,0097574	-0,01	-17,3405654	-65,8596953	-206,667694	-425,981295	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609
1040	-0,49922	0,0416	0,03328	1,18591E-05	0,00828098	0	0	0,00828098	276,0326894	-8,62955E-05	-0,0003289	-0,00103297	-0,00212958	-0,0035114	-0,00504315	-0,0065749	-0,00795671	-0,0090533	-0,00975739	-0,01	-17,2590918	-65,7802155	-206,594001	-425,916613	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609
1041	-0,499188	0,04164	0,033312	1,18646E-05	0,008292845	0	0	0,00829285	276,4281774	-8,58881E-05	-0,0003285	-0,0010326	-0,00212926	-0,00351113	-0,00504294	-0,00657476	-0,00795663	-0,00905329	-0,00975738	-0,01	-17,1776116	-65,7007922	-206,520301	-425,851927	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609
1042	-0,499156	0,04168	0,033344	1,18702E-05	0,008304715	0	0	0,00830472	276,8238491	-8,54806E-05	-0,0003281	-0,00103223	-0,00212894	-0,00351086	-0,00504274	-0,00657462	-0,00795654	-0,00905325	-0,00975737	-0,01	-17,0961246	-65,6212364	-206,446596	-425,787235	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609
1043	-0,499124	0,04172	0,033376	1,18757E-05	0,008316591	0	0	0,00831659	277,2197045	-8,50732E-05	-0,00032771	-0,00103186	-0,00212861	-0,0035106	-0,00504254	-0,00657448	-0,00795646	-0,00905321	-0,00975736	-0,01	-17,0146309	-65,541737	-206,372884	-425,722538	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609
1044	-0,499092	0,04176	0,033408	1,18812E-05	0,008328472	0	0	0,00832847	277,6157435	-8,46657E-05	-0,00032731	-0,0010315	-0,00212829	-0,00351033	-0,00504233	-0,00657434	-0,00795638	-0,00905317	-0,00975735	-0,01	-16,9331306	-65,4622311	-206,299166	-425,657835	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609
1045	-0,49906	0,0418	0,03344	1,18867E-05	0,008340359	0	0	0,00834036	278,0119659	-8,42581E-05	-0,00032691	-0,00103113	-0,00212797	-0,00351006	-0,00504213	-0,0065742	-0,00795629	-0,00905313	-0,00975734	-0,01	-16,8516235	-65,3827186	-206,225442	-425,593127	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609
1046	-0,499028	0,04184	0,033472	1,18922E-05	0,008352251	0	0	0,00835225	278,4083178	-8,38505E-05	-0,00032652	-0,00103076	-0,00212764	-0,00350958	-0,00504193	-0,00657405	-0,00795621	-0,00905309	-0,00975733	-0,01	-16,7701097	-65,3031997	-206,151712	-425,528414	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609
1047	-0,498996	0,04188	0,033504	1,18977E-05	0,008364149	0	0	0,00836415	278,8049609	-8,34429E-05	-0,00032612	-0,00103039	-0,00212732	-0,0035093	-0,00504172	-0,00657391	-0,00795612	-0,00905305	-0,00975732	-0,01	-16,6885893	-65,2236741	-206,077976	-425,463696	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609
1048	-0,498964	0,04192	0,033536	1,19032E-05	0,008376052	0	0	0,00837605	279,2017333	-8,30353E-05	-0,00032572	-0,00103002	-0,00212699	-0,00350926	-0,00504152	-0,00657377	-0,00795604	-0,00905301	-0,00975731	-0,01	-16,6070621	-65,1441421	-206,004234	-425,398972	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609
1049	-0,498932	0,04196	0,033568	1,19087E-05	0,008387961	0	0	0,00838796	279,5986887	-8,26276E-05	-0,00032532	-0,00102965	-0,00212667	-0,003509	-0,00504131	-0,00657363	-0,00795596	-0,00905298	-0,0097573	-0,01	-16,5255282	-65,0646305	-205,930486	-425,334243	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609
1050	-0,4989	0,042	0,0336	1,19142E-05	0,008399875	0	0	0,00839987	279,9958272	-8,22199E-05	-0,00032493	-0,00102928	-0,00212635	-0,00350873	-0,00504111	-0,00657349	-0,00795587	-0,00905294	-0,00975729	-0,01	-16,4439877	-64,9850584	-205,856732	-425,269508	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609
1051	-0,498868	0,04204	0,033632	1,19196E-05	0,008411794	0	0	0,00841179	280,3931485	-8,18122E-05	-0,00032453	-0,00102891	-0,00212602	-0,00350846	-0,00504091	-0,00657335	-0,00795579	-0,0090529	-0,00975728	-0,01	-16,3624404	-64,9055067	-205,782972	-425,204768	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609
1052	-0,498836	0,04208	0,033664	1,19251E-05	0,00842372	0	0	0,00842372	280,7906526	-8,14044E-05	-0,00032413	-0,00102855	-0,0021257	-0,00350819	-0,0050407	-0,00657321	-0,0079557	-0,00905286	-0,00975727	-0,01	-16,2808864	-64,8250985	-205,709206	-425,140023	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609
1053	-0,498804	0,04212	0,033696	1,19306E-05	0,00843565	0	0	0,00843565	281,1883395	-8,09966E-05	-0,00032373	-0,00102818	-0,00212538	-0,00350793	-0,0050405	-0,00657307	-0,00795562	-0,00905282	-0,00975726	-0,01	-16,1993257	-64,7463837	-205,635433	-425,075713	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609
1054	-0,498772	0,04216	0,033728	1,19361E-05	0,008447586	0	0	0,00844759	281,5862209	-8,05888E-05	-0,00032333	-0,00102781	-0,00212505	-0,00350766	-0,00504029	-0,00657293	-0,00795552	-0,00905278	-0,00975725	-0,01	-16,1177583	-64,6668124	-205,561655	-425,010517	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609
1055	-0,49874	0,0422	0,03376	1,19416E-05	0,008459528	0	0	0,00845953	281,984261	-8,01809E-05	-0,00032294	-0,00102744	-0,00212473	-0,00350739	-0,00504009	-0,00657279	-0,00795545	-0,00905274	-0,00975724	-0,01	-16,0361842	-64,5872346	-205,487871	-424,945756	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609
1056	-0,498708	0,04224	0,033792	1,1947E-05	0,008471475	0	0	0,00847147	282,3824954	-7,9773E-05	-0,00032254	-0,00102707	-0,0021244	-0,00350713	-0,00503989	-0,00657265	-0,00795537	-0,00905271	-0,00975723	-0,01	-15,9546304	-64,5076502	-205,41408	-424,88099	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609
1057	-0,498676	0,04228	0,033824	1,19525E-05	0,008483427	0	0	0,00848343	282,7809322	-7,93649E-05	-0,00032214	-0,00102669	-0,00212408	-0,00350686	-0,00503968	-0,0065725	-0,00795528	-0,00905266	-0,00975722	-0,01	-15,8730159	-64,4280592	-205,340283	-424,816218	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609
1058	-0,498644	0,04232	0,033856	1,1958E-05	0,008495385	0	0	0,00849539	283,1795112	-7,89571E-05	-0,00032174	-0,00102633	-0,00212376	-0,00350659	-0,00503948	-0,00657236	-0,0079552	-0,00905262	-0,00975721	-0,01	-15,7914216	-64,3484618	-205,266481	-424,751441	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609
1059	-0,498612	0,04236	0,033888	1,19634E-05	0,008507349	0	0	0,00850735	283,5782923	-7,85491E-05	-0,00032134	-0,00102596	-0,00212343	-0,00350633	-0,00503927	-0,00657222	-0,00795512	-0,00905259	-0,0097572	-0,01	-15,7098207	-64,2688577	-205,192672	-424,686659	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609
1060	-0,49858	0,0424	0,03392	1,19689E-05	0,008519318	0	0	0,00851932	283,9772555	-7,81411E-05	-0,00032095	-0,00102559	-0,00212311	-0,00350606	-0,00503907	-0,00657208	-0,00795503	-0,00905255	-0,00975719	-0,01	-15,628213	-64,1892471	-205,118857	-424,621871	434,782609	434,782609	434,782609	434,782609
1061	-0,498548	0,04244	0,033952	1,19744E-05	0,008531292	0	0	0,00853129	284,3764006	-7,7733E-05	-0,00032055	-0,00102523	-0,00212279	-0,00350579	-0,00503887</													



	Mpa	Kpa
fck	50	50000
fcd	33,33333333	33333,33333
fyk	355	355000
fyd	322,727273	322727,2727
Es	200000	200000000
Coef. Horm	0,85	

Gamma,c	1,5
Gamma,s	1,1



	m
Radio naranja	0,5135
Radio amarillo	0,5105
Radio azul	0,4355
Radio rojo	0,4325

Área tot. Ext	0,009650973	m2	Área tot. Int	0,008180707	m2
---------------	-------------	----	---------------	-------------	----

Incremento Y	0,00002	m
--------------	---------	---

Valores de Y	Círculo exterior_ext		Círculo interior_ext		Círculo exterior_int		Círculo interior_int		m2		m2		m3		m2		m2		KN		KN		KN		KN	
	m	Incremento Área	Área acumulada	Incremento Área	Área acumulada	Incremento Área	Área acumulada	Incremento Área	Área acumulada	Área acero ext. Compresión	Área acero ext. Tracción	Área hormigón comprimido	Área acero int. Compresión	Área acero int. Tracción	Fuerza acero ext compresión	Fuerza acero ext tracción	Fuerza hormigón compresión	Fuerza acero int compresión	Fuerza acero int tracción							
0	-0,5135	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,009650973	0	0	0,008180707	0	3114,632077	0	0	2640,137346	-5754,769423	0					
1	-0,51348	1,81283E-07	1,81283E-07	0	0	0	0	0	0	1,81283E-07	0,009650791	0	0	0,008180707	0,05850482	3114,573572	0	0	2640,137346	-5754,652413	0,05850482					
2	-0,51346	2,5637E-07	4,37652E-07	0	0	0	0	0	0	4,37652E-07	0,009650535	0	0	0,008180707	0,141242325	3114,490834	0	0	2640,137346	-5754,486938	0,082737505					
3	-0,51344	3,13984E-07	7,51637E-07	0	0	0	0	0	0	7,51637E-07	0,009650221	0	0	0,008180707	0,242573673	3114,389503	0	0	2640,137346	-5754,284275	0,101331348					
4	-0,51342	3,62554E-07	1,11419E-06	0	0	0	0	0	0	1,11419E-06	0,009649858	0	0	0,008180707	0,359579896	3114,272497	0	0	2640,137346	-5754,050263	0,117006223					
5	-0,5134	4,05344E-07	1,51954E-06	0	0	0	0	0	0	1,51954E-06	0,009649453	0	0	0,008180707	0,490395555	3114,141681	0	0	2640,137346	-5753,788632	0,13081566					
6	-0,51338	4,44028E-07	1,96356E-06	0	0	0	0	0	0	1,96356E-06	0,009649009	0	0	0,008180707	0,633695535	3113,998381	0	0	2640,137346	-5753,502032	0,14329998					
7	-0,51336	4,79601E-07	2,44316E-06	0	0	0	0	0	0	2,44316E-06	0,009648529	0	0	0,008180707	0,788475697	3113,843601	0	0	2640,137346	-5753,192471	0,154780161					
8	-0,51334	5,1271E-07	2,95587E-06	0	0	0	0	0	0	2,95587E-06	0,009648017	0	0	0,008180707	0,953941038	3113,678136	0	0	2640,137346	-5752,861541	0,165465341					
9	-0,51332	5,43805E-07	3,49968E-06	0	0	0	0	0	0	3,49968E-06	0,009647473	0	0	0,008180707	1,129441826	3113,502635	0	0	2640,137346	-5752,510539	0,175500788					
10	-0,5133	5,73215E-07	4,07289E-06	0	0	0	0	0	0	4,07289E-06	0,009646969	0	0	0,008180707	1,314434099	3113,317643	0	0	2640,137346	-5752,140555	0,184992272					
11	-0,51328	6,01188E-07	4,67408E-06	0	0	0	0	0	0	4,67408E-06	0,009646299	0	0	0,008180707	1,508453741	3113,123623	0	0	2640,137346	-5751,752515	0,194019642					
12	-0,51326	6,27914E-07	5,302E-06	0	0	0	0	0	0	5,302E-06	0,009645671	0	0	0,008180707	1,711098675	3112,920978	0	0	2640,137346	-5751,347225	0,202644934					
13	-0,51324	6,53547E-07	5,95554E-06	0	0	0	0	0	0	5,95554E-06	0,009645017	0	0	0,008180707	1,922016155	3112,71006	0	0	2640,137346	-5750,925391	0,21091748					
14	-0,51322	6,78211E-07	6,63375E-06	0	0	0	0	0	0	6,63375E-06	0,009644339	0	0	0,008180707	2,140893437	3112,491183	0	0	2640,137346	-5750,487636	0,218877281					
15	-0,5132	7,02009E-07	7,33576E-06	0	0	0	0	0	0	7,33576E-06	0,009643637	0	0	0,008180707	2,36745074	3112,264626	0	0	2640,137346	-5750,034521	0,226557304					
16	-0,51318	7,25024E-07	8,06079E-06	0	0	0	0	0	0	8,06079E-06	0,009642912	0	0	0,008180707	2,601435839	3112,030641	0	0	2640,137346	-5749,566551	0,233985098					
17	-0,51316	7,47331E-07	8,80812E-06	0	0	0	0	0	0	8,80812E-06	0,009642165	0	0	0,008180707	2,842619808	3111,789457	0	0	2640,137346	-5749,084183	0,241183969					
18	-0,51314	7,68989E-07	9,57711E-06	0	0	0	0	0	0	9,57711E-06	0,009641396	0	0	0,008180707	3,090793648	3111,541283	0	0	2640,137346	-5748,587836	0,24817384					
19	-0,51312	7,90054E-07	1,03672E-05	0	0	0	0	0	0	1,03672E-05	0,009640605	0	0	0,008180707	3,345765546	3111,286311	0	0	2640,137346	-5748,077892	0,254971899					
20	-0,5131	8,1057E-07	1,11777E-05	0	0	0	0	0	0	1,11777E-05	0,009639795	0	0	0,008180707	3,607358647	3111,024718	0	0	2640,137346	-5747,554706	0,2615931					
21	-0,51308	8,30579E-07	1,20083E-05	0	0	0	0	0	0	1,20083E-05	0,009638964	0	0	0,008180707	3,875409197	3110,756667	0	0	2640,137346	-5747,018604	0,268050551					
22	-0,51306	8,50117E-07	1,28584E-05	0	0	0	0	0	0	1,28584E-05	0,009638114	0	0	0,008180707	4,149765011	3110,482312	0	0	2640,137346	-5746,469893	0,274355813					
23	-0,51304	8,69214E-07	1,37276E-05	0	0	0	0	0	0	1,37276E-05	0,009637245	0	0	0,008180707	4,43028416	3110,201792	0	0	2640,137346	-5745,908855	0,280519149					
24	-0,51302	8,87901E-07	1,46155E-05	0	0	0	0	0	0	1,46155E-05	0,009636357	0	0	0,008180707	4,716833878	3109,915243	0	0	2640,137346	-5745,335755	0,286549718					
25	-0,513	9,06201E-07	1,55217E-05	0	0	0	0	0	0	1,55217E-05	0,009635451	0	0	0,008180707	5,009289611	3109,622787	0	0	2640,137346	-5744,750844	0,292455732					
26	-0,51298	9,24138E-07	1,64459E-05	0	0	0	0	0	0	1,64459E-05	0,009634527	0	0	0,008180707	5,307534202	3109,324542	0	0	2640,137346	-5744,154354	0,298244592					
27	-0,51296	9,41733E-07	1,73876E-05	0	0	0	0	0	0	1,73876E-05	0,009633585	0	0	0,008180707	5,611457193	3109,020619	0	0	2640,137346	-5743,546508	0,303922991					
28	-0,51294	9,59005E-07	1,83466E-05	0	0	0	0	0	0	1,83466E-05	0,009632626	0	0	0,008180707	5,920954202	3108,711122	0	0	2640,137346	-5742,927514	0,309497009					
29	-0,51292	9,7597E-07	1,93226E-05	0	0	0	0	0	0	1,93226E-05	0,00963165	0	0	0,008180707	6,235926391	3108,39615	0	0	2640,137346	-5742,29757	0,314972189					
30	-0,5129	9,92645E-07	2,03152E-05	0	0	0	0	0	0	2,03152E-05	0,009630657	0	0	0,008180707	6,556279989	3108,075797	0	0	2640,137346	-5741,656863	0,320353598					
31	-0,51288	1,00904E-06	2,13243E-05	0	0	0	0	0	0	2,13243E-05	0,009629648	0	0	0,008180707	6,881925874	3107,750151	0	0	2640,137346	-5741,005571	0,325645885					
32	-0,51286	1,02518E-06	2,23495E-05	0	0	0	0	0	0	2,23495E-05	0,009628623	0	0	0,008180707	7,2127792	3107,419297	0	0	2640,137346	-5740,343864	0,330853326					
33	-0,51284	1,04106E-06	2,33905E-05	0	0	0	0	0	0	2,33905E-05	0,009627582	0	0	0,008180707	7,548759068	3107,083318	0	0	2640,137346	-5739,671905	0,335979968					
34	-0,51282	1,05671E-06	2,44472E-05	0	0	0	0	0	0	2,44472E-05	0,009626525	0	0	0,008180707	7,889788225	3106,742288	0	0	2640,137346	-5738,989846	0,341029157					
35	-0,5128	1,07213E-06	2,55194E-05	0	0	0	0	0	0	2,55194E-05	0,009625453	0	0	0,008180707	8,235792802	3106,396284	0	0	2640,137346	-5738,297837	0,346004577					
36	-0,51278	1,08732E-06	2,66067E-05	0	0	0	0	0	0	2,66067E-05	0,009624366	0	0	0,008180707	8,586702071	3106,045375	0	0	2640,137346	-5737,596019	0,350909269					
37	-0,51276	1,10231E-06	2,7709E-05	0	0	0	0	0	0	2,7709E-05	0,009623264	0	0	0,008180707	8,942448231	3105,689628	0	0	2640,137346	-5736,884526	0,355746159					
38	-0,51274	1,1171E-06	2,88261E-05	0	0	0	0	0	0	2,88261E-05	0,009622147	0	0	0,008180707	9,302966207	3105,32911	0	0	2640,137346	-5736,16349	0,360517976					
39	-0,51272	1,13169E-06	2,99578E-05	0	0	0	0	0	0	2,99578E-05	0,009621015	0	0	0,008180707	9,668193477	3104,963883	0	0	2640,137346	-5735,433036	0,365227271					
40	-0,5127	1,1461E-06	3,11039E-05	0	0	0	0	0	0	3,11039E-05	0,009619869	0	0	0,008180707	10,038069991	3104,594007	0	0	2640,137346	-5734,693283	0,369876431					
41	-0,51268	1,16032E-06	3,22642E-05	0	0	0	0	0	0	3,22642E-05	0,009618708	0	0	0,008180707	10,4125376	3104,219539	0	0	2640,137346	-5733,944348	0,374467696					
42	-0,51266	1,17438E-06	3,34386E-05	0	0	0	0	0	0	3,34386E-05	0,009617534	0	0	0,008180707	10,79154077	3103,840536	0	0	2640,137346	-5733,186341	0,379003171					
43	-0,51264	1,18826E-06	3,46268E-05	0	0	0	0	0	0	3,46268E-05	0,009616346	0	0	0,008180707	11,175025											

KN	KN	m	KN*m	KN*m	KN*m
Inc. fuerza hormigón	Inc. fuerza acero int	Dist. A la F.N. plástica	Momento en la FN	Momento en la FN	Momento en la FN
0	0	0,2639	0	0	0
0	0	0,26389	0,01543884	0	0
0	0	0,26387	0,02183195	0	0
0	0	0,26385	0,02673628	0	0
0	0	0,26383	0,03086975	0	0
0	0	0,26381	0,03451048	0	0
0	0	0,26379	0,0378011	0	0
0	0	0,26377	0,04082636	0	0
0	0	0,26375	0,04364148	0	0
0	0	0,26373	0,04628482	0	0
0	0	0,26371	0,04878431	0	0
0	0	0,26369	0,05116104	0	0
0	0	0,26367	0,05343139	0	0
0	0	0,26365	0,05560839	0	0
0	0	0,26363	0,05770262	0	0
0	0	0,26361	0,05972277	0	0
0	0	0,26359	0,06167613	0	0
0	0	0,26357	0,06356886	0	0
0	0	0,26355	0,06540622	0	0
0	0	0,26353	0,06719274	0	0
0	0	0,26351	0,0689324	0	0
0	0	0,26349	0,07062864	0	0
0	0	0,26347	0,07228453	0	0
0	0	0,26345	0,07390277	0	0
0	0	0,26343	0,07548579	0	0
0	0	0,26341	0,07703576	0	0
0	0	0,26339	0,07855464	0	0
0	0	0,26337	0,0800442	0	0
0	0	0,26335	0,08150604	0	0
0	0	0,26333	0,08294163	0	0
0	0	0,26331	0,08435231	0	0
0	0	0,26329	0,08573931	0	0
0	0	0,26327	0,08710376	0	0
0	0	0,26325	0,0884467	0	0
0	0	0,26323	0,08976911	0	0
0	0	0,26321	0,09107186	0	0
0	0	0,26319	0,09235581	0	0
0	0	0,26317	0,09362172	0	0
0	0	0,26315	0,09487031	0	0
0	0	0,26313	0,09610225	0	0
0	0	0,26311	0,09731819	0	0
0	0	0,26309	0,09851871	0	0
0	0	0,26307	0,09970436	0	0
0	0	0,26305	0,10087569	0	0
0	0	0,26303	0,10203316	0	0
0	0	0,26301	0,10317727	0	0
0	0	0,26299	0,10430843	0	0
0	0	0,26297	0,10542708	0	0
0	0	0,26295	0,1065336	0	0
0	0	0,26293	0,10762837	0	0
0	0	0,26291	0,10871174	0	0
0	0	0,26289	0,10978405	0	0
0	0	0,26287	0,11084563	0	0
0	0	0,26285	0,11189677	0	0
0	0	0,26283	0,11293777	0	0
0	0	0,26281	0,11396891	0	0
0	0	0,26279	0,11499045	0	0
0	0	0,26277	0,11600265	0	0
0	0	0,26275	0,11700575	0	0
0	0	0,26273	0,11799997	0	0
0	0	0,26271	0,11898555	0	0
0	0	0,26269	0,1199627	0	0
0	0	0,26267	0,12093162	0	0
0	0	0,26265	0,1218925	0	0
0	0	0,26263	0,12284554	0	0
0	0	0,26261	0,12379091	0	0
0	0	0,26259	0,1247288	0	0
0	0	0,26257	0,12565937	0	0
0	0	0,26255	0,12658277	0	0
0	0	0,26253	0,12749918	0	0
0	0	0,26251	0,12840873	0	0
0	0	0,26249	0,12931156	0	0
0	0	0,26247	0,13020783	0	0
0	0	0,26245	0,13109767	0	0
0	0	0,26243	0,1319812	0	0
0	0	0,26241	0,13285855	0	0
0	0	0,26239	0,13372984	0	0
0	0	0,26237	0,1345952	0	0
0	0	0,26235	0,13545472	0	0
0	0	0,26233	0,13630854	0	0
0	0	0,26231	0,13715674	0	0
0	0	0,26229	0,13799944	0	0
0	0	0,26227	0,13883673	0	0
0	0	0,26225	0,13966872	0	0
0	0	0,26223	0,14049549	0	0
0	0	0,26221	0,14131714	0	0

Momento TOT acero exterior	Momento TOT hormigón	Momento TOT acero interior
1138,42102	300,481644	853,794571

Momento último	2292,69723
----------------	------------





507	-0.491276	0.02028	0.016224	8.14691E-06	0.00276658	0	0	0.00276658	235.1592743	-0.000179896	-0.00042018	-0.00111803	-0.00220346	-0.00357206	-0.00508995	-0.00660684	-0.00797643	-0.00906187	-0.00975972	-0.01	-35.9791897	-84.0350181	-223.605859	434.782609	434.782609	434.782609	434.782609	434.782609
508	-0.491244	0.02032	0.016256	8.15481E-06	0.002774735	0	0	0.002774735	235.8524333	-0.000179486	-0.00041917	-0.00111766	-0.00220314	-0.00357206	-0.00508994	-0.00660667	-0.00797635	-0.00906187	-0.00975971	-0.01	-35.8917144	-83.954951	-223.531624	434.782609	434.782609	434.782609	434.782609	434.782609
509	-0.491212	0.02036	0.016288	8.1627E-06	0.002782897	0	0	0.002782897	236.546263	-0.000179075	-0.00041937	-0.00111729	-0.00220281	-0.00357252	-0.00508984	-0.00660656	-0.00797626	-0.00906179	-0.0097597	-0.01	-35.8150323	-83.8748772	-223.457383	434.782609	434.782609	434.782609	434.782609	434.782609
510	-0.49118	0.0204	0.01632	8.17059E-06	0.002791068	0	0	0.002791068	237.2407629	-0.000178665	-0.00041897	-0.00111692	-0.00220249	-0.00357225	-0.00508933	-0.00660642	-0.00797618	-0.00906175	-0.00975969	-0.01	-35.7329433	-83.7947968	-223.383137	434.782609	434.782609	434.782609	434.782609	434.782609
511	-0.491148	0.02044	0.016352	8.17846E-06	0.002799245	0	0	0.002799245	237.9359321	-0.000178254	-0.00041857	-0.00111654	-0.00220216	-0.00357198	-0.00508913	-0.00660627	-0.00797618	-0.00906171	-0.00975968	-0.01	-35.6508474	-83.7147096	-223.308883	434.782609	434.782609	434.782609	434.782609	434.782609
512	-0.491116	0.02048	0.016384	8.18633E-06	0.002807433	0	0	0.002807433	238.6317701	-0.000177844	-0.00041817	-0.00111617	-0.00220183	-0.00357171	-0.00508892	-0.00660613	-0.00797601	-0.00906167	-0.00975967	-0.01	-35.5687446	-83.6346158	-223.234624	434.782609	434.782609	434.782609	434.782609	434.782609
513	-0.491084	0.02052	0.016416	8.19419E-06	0.002815623	0	0	0.002815623	239.3282761	-0.000177433	-0.00041777	-0.00111558	-0.00220151	-0.00357144	-0.00508872	-0.00660599	-0.00797592	-0.00906163	-0.00975966	-0.01	-35.4866635	-83.5545152	-223.160359	434.782609	434.782609	434.782609	434.782609	434.782609
514	-0.491052	0.02056	0.016448	8.20204E-06	0.002823829	0	0	0.002823829	240.0254495	-0.000177023	-0.00041737	-0.00111543	-0.00220118	-0.00357117	-0.00508851	-0.00660585	-0.00797584	-0.00906159	-0.00975965	-0.01	-35.4045186	-83.474408	-223.086087	434.782609	434.782609	434.782609	434.782609	434.782609
515	-0.49102	0.0206	0.01648	8.20988E-06	0.002832039	0	0	0.002832039	240.7232896	-0.000176612	-0.00041697	-0.00111506	-0.00220086	-0.00357091	-0.00508831	-0.00660571	-0.00797576	-0.00906155	-0.00975964	-0.01	-35.3223952	-83.3942941	-223.011809	434.782609	434.782609	434.782609	434.782609	434.782609
516	-0.490988	0.02064	0.016512	8.21772E-06	0.002840256	0	0	0.002840256	241.4217956	-0.000176201	-0.00041657	-0.00111469	-0.00220053	-0.00357064	-0.00508811	-0.00660556	-0.00797568	-0.00906151	-0.00975963	-0.01	-35.2402665	-83.3141734	-222.937525	434.782609	434.782609	434.782609	434.782609	434.782609
517	-0.490956	0.02068	0.016544	8.22555E-06	0.002848482	0	0	0.002848482	242.1209669	-0.000175791	-0.00041617	-0.00111432	-0.0022002	-0.00357037	-0.00508791	-0.00660542	-0.00797559	-0.00906147	-0.00975962	-0.01	-35.158128	-83.2340461	-222.863234	434.782609	434.782609	434.782609	434.782609	434.782609
518	-0.490924	0.02072	0.016576	8.23336E-06	0.002856715	0	0	0.002856715	242.8208029	-0.00017538	-0.00041577	-0.00111394	-0.00220098	-0.0035701	-0.00508769	-0.00660528	-0.00797551	-0.00906144	-0.00975961	-0.01	-35.075984	-83.1539121	-222.788938	434.782609	434.782609	434.782609	434.782609	434.782609
519	-0.490892	0.02076	0.016608	8.24118E-06	0.002864957	0	0	0.002864957	243.5213029	-0.000174969	-0.00041537	-0.00111357	-0.00219955	-0.00356983	-0.00508748	-0.00660514	-0.00797542	-0.0090614	-0.0097596	-0.01	-34.9938332	-83.0737713	-222.714635	434.782609	434.782609	434.782609	434.782609	434.782609
520	-0.49086	0.0208	0.01664	8.24989E-06	0.002873205	0	0	0.002873205	244.2242461	-0.000174558	-0.00041497	-0.0011132	-0.00219923	-0.00356956	-0.00508728	-0.006605	-0.00797533	-0.00906136	-0.00975959	-0.01	-34.9116756	-82.993239	-222.640326	434.782609	434.782609	434.782609	434.782609	434.782609
521	-0.490828	0.02084	0.016672	8.25678E-06	0.002881462	0	0	0.002881462	244.9242929	-0.000174148	-0.00041457	-0.00111283	-0.00219898	-0.00356929	-0.00508707	-0.00660485	-0.00797525	-0.00906132	-0.00975958	-0.01	-34.829511	-82.9134698	-222.566011	434.782609	434.782609	434.782609	434.782609	434.782609
522	-0.490796	0.02088	0.016704	8.26456E-06	0.002889727	0	0	0.002889727	245.6267799	-0.000173737	-0.00041417	-0.00111246	-0.00219857	-0.00356902	-0.00508687	-0.00660471	-0.00797518	-0.00906128	-0.00975957	-0.01	-34.7473396	-82.8333089	-222.491689	434.782609	434.782609	434.782609	434.782609	434.782609
523	-0.490764	0.02092	0.016736	8.27234E-06	0.002897999	0	0	0.002897999	246.3292999	-0.000173326	-0.00041377	-0.00111209	-0.00219825	-0.00356876	-0.00508666	-0.00660457	-0.00797516	-0.00906124	-0.00975956	-0.01	-34.6651613	-82.7531414	-222.417362	434.782609	434.782609	434.782609	434.782609	434.782609
524	-0.490732	0.02096	0.016768	8.28011E-06	0.002906279	0	0	0.002906279	247.0337387	-0.000172915	-0.00041336	-0.00111172	-0.00219792	-0.00356849	-0.00508646	-0.00660443	-0.00797499	-0.0090612	-0.00975955	-0.01	-34.5829761	-82.6729672	-222.343028	434.782609	434.782609	434.782609	434.782609	434.782609
525	-0.4907	0.021	0.0168	8.28788E-06	0.002914567	0	0	0.002914567	247.7382084	-0.000172504	-0.00041296	-0.00111134	-0.0021976	-0.00356822	-0.00508625	-0.00660429	-0.00797491	-0.00906116	-0.00975954	-0.01	-34.5007841	-82.5927862	-222.268688	434.782609	434.782609	434.782609	434.782609	434.782609
526	-0.490668	0.02104	0.016832	8.29564E-06	0.002922863	0	0	0.002922863	248.4433278	-0.000172093	-0.00041256	-0.00111097	-0.00219727	-0.00356795	-0.00508605	-0.00660414	-0.00797482	-0.00906112	-0.00975953	-0.01	-34.4185852	-82.5125985	-222.194342	434.782609	434.782609	434.782609	434.782609	434.782609
527	-0.490636	0.02108	0.016864	8.30338E-06	0.002931166	0	0	0.002931166	249.1491251	-0.000171682	-0.00041216	-0.00111016	-0.00219694	-0.00356768	-0.00508584	-0.006604	-0.00797474	-0.00906108	-0.00975952	-0.01	-34.3363794	-82.432042	-222.119989	434.782609	434.782609	434.782609	434.782609	434.782609
528	-0.490604	0.02112	0.016896	8.31113E-06	0.002939477	0	0	0.002939477	249.8555707	-0.000171271	-0.00041176	-0.00111023	-0.00219662	-0.00356741	-0.00508564	-0.00660386	-0.00797465	-0.00906104	-0.00975951	-0.01	-34.2541668	-82.3522031	-222.045663	434.782609	434.782609	434.782609	434.782609	434.782609
529	-0.490572	0.02116	0.016928	8.31886E-06	0.002947796	0	0	0.002947796	250.5626737	-0.00017086	-0.00041136	-0.00110986	-0.00219629	-0.00356714	-0.00508543	-0.00660372	-0.00797457	-0.009061	-0.0097595	-0.01	-34.1719472	-82.2719953	-221.971265	434.782609	434.782609	434.782609	434.782609	434.782609
530	-0.49054	0.0212	0.01696	8.32658E-06	0.00295612	0	0	0.00295612	251.2704333	-0.000170449	-0.00041096	-0.00110948	-0.00219596	-0.00356687	-0.00508522	-0.00660358	-0.00797448	-0.00906096	-0.00975949	-0.01	-34.0897208	-82.1917808	-221.896894	434.782609	434.782609	434.782609	434.782609	434.782609
531	-0.490508	0.02124	0.016992	8.3343E-06	0.002964457	0	0	0.002964457	251.978849	-0.000170037	-0.00041056	-0.00110911	-0.00219564	-0.0035666	-0.00508502	-0.00660343	-0.0079744	-0.00906092	-0.00975948	-0.01	-34.0074875	-82.1115596	-221.822517	434.782609	434.782609	434.782609	434.782609	434.782609
532	-0.490476	0.02128	0.017024	8.34201E-06	0.002972799	0	0	0.002972799	252.6879201	-0.000169626	-0.00041016	-0.00110874	-0.00219531	-0.00356633	-0.00508481	-0.00660329	-0.00797432	-0.00906089	-0.00975947	-0.01	-33.9252473	-82.0313317	-221.748133	434.782609	434.782609	434.782609	434.782609	434.782609
533	-0.490444	0.02132	0.017056	8.34972E-06	0.002981149	0	0	0.002981149	253.3976458	-0.000169215	-0.00040974	-0.00110837	-0.00219498	-0.00356606	-0.00508461	-0.00660315	-0.00797423	-0.00906085	-0.00975946	-0.01	-33.8430063	-81.9510971	-221.673743	434.782609	434.782609	434.782609	434.782609	434.782609
534	-0.490412	0.02136	0.017088	8.35741E-06	0.002989506	0	0	0.002989506	254.1080257	-0.000168804	-0.00040935	-0.001108	-0.00219466	-0.00356578	-0.0050844	-0.00660301	-0.00797415	-0.00906081	-0.00975945	-0.01	-33.7607463	-81.8708557	-221.599347	434.782609	434.782609	434.782609	434.782609	434.782609
535	-0.49038	0.0214	0.01712	8.3651E-06	0.002997871	0	0	0.002997871	254.8190595	-0.000168392	-0.00040895	-0.00110762	-0.00219433	-0.00356553	-0.0050842	-0.00660287	-0.00797406	-0.00906077	-0.00975944	-0.01	-33.6784855	-81.7906077	-221.524945	434.782609	434.782609	434.782609	434.782609	434.782609
536	-0.490348	0.02144	0.017152	8.37278E-06	0.003006244	0	0	0.003006244	255.5307451	-0.000167981	-0.00040855	-0.00110725	-0.002194	-0.00356526	-0.00508399	-0.00660272	-0.00797398	-0.00906073	-0.00975943	-0.01	-33.5962178	-81.7103529	-221.450537	434.782609	434.782609	434.782609	434.782609	434.782609
537	-0.490316	0.02148	0.017184	8.38045E-06	0.003014625	0	0	0.003014625	256.2434083	-0.00016757	-0.00040815	-0.00110688	-0.00219368	-0.00356499														







## ANEXO 5

### COSTES DE LAS DISTINTAS SOLUCIONES

En este proyecto se va a estimar una valoración económica de las actuaciones necesarias para proyectar este estudio en las alternativas propuestas.

#### A. COSTE DEL MATERIAL

Los costes de los materiales se van a determinar siguiendo la guía del Edupack Granta de Ansys. Para ello, se deberá calcular inicialmente la cantidad de cada material que se va a necesitar para cada sección de las alternativas.

- Hormigón HA-50

En este caso se debe considerar tanto el peso de la estructura de hormigón como la armadura de acero.

El peso del hormigón, considerando la densidad mencionada de  $2500 \text{ kg/m}^3$ , será de 1818,98 kg.

El peso de la armadura de acero será el peso de cada barra multiplicado por veinte.

$$A_{\text{barra}} = \frac{\pi}{4} * (d_{\text{barra}}^2) = 7,853 * 10^{-5} \text{ m}^2$$
$$P_{\text{barras}} = 20 * \rho_{\text{acero}} * A_{\text{barra}} * L = 29,59 \text{ kg}$$

El peso total de la estructura es de 1848,57 kg.

- Hormigón con doble camisa de chapa

El peso será:

*Beatriz de Silva Espinar Hernández*



$$P_{total} = P_{chapa,ext} + P_{hormigón} + P_{barras} + P_{chapa,int}$$

Peso de la chapa exterior:

- Área:  $9,651 * 10^{-3} m^2$
- Longitud:  $2,4 m$
- Densidad:  $7850 kg/m^3$
- Peso:  $181,82 kg$

Peso hormigón:

- Área:  $0,223 m^2$
- Longitud:  $2,4 m$
- Densidad:  $2500 kg/m^3$
- Peso:  $1337,38 kg$

Peso barras:  $29,59 kg$ , no difiere del apartado anterior al ser el mismo armado.

Peso de la chapa interior:

- Área:  $8,181 * 10^{-3} m^2$
- Longitud:  $2,4 m$
- Densidad:  $7850 kg/m^3$
- Peso:  $154,12 kg$
  
- Hormigón de ultra alta resistencia

De igual manera que en el apartado de hormigón HA-50, con la misma densidad, se obtiene un peso de las armaduras de  $29,59 kg$ , y un peso del hormigón de  $1328,89 kg$ .

- Acero S355

Sabiendo que el área de la sección es de  $0,0415 m^2$ , con una longitud de  $2,4 m$ , el volumen tendrá un valor de  $0,0995 m^3$ , lo que resulta en un peso de  $781,28 kg$ .

Librería Granta Edupack indica que el acero tiene un precio de  $0,6 €/kg$  y el hormigón ronda los  $0,04 €/kg$ . El hormigón de ultra alta resistencia no se encuentra dentro de este pack, pero se ha determinado un precio aproximado de  $0,4 €/kg$ .



Tabla 17 - Precios de las distintas alternativas según Granta Edupack por kg - Fuente: Elaboración propia

<i>Variante</i>	<i>Precio por segmentos</i>
<i>Acero</i>	468,77 €
<i>Hormigón HA-50</i>	90,51 €
<i>Hormigón con doble camisa de chapa</i>	272,81 €
<i>Hormigón de ultra alta resistencia</i>	549,31 €

Tabla 17 - Precios de las distintas alternativas según Granta Edupack por metro - Fuente: Elaboración propia

<i>Variante</i>	<i>Precio por metro lineal</i>
<i>Acero</i>	195,32 €
<i>Hormigón HA-50</i>	37,71 €
<i>Hormigón con doble camisa de chapa</i>	131,67 €
<i>Hormigón de ultra alta resistencia</i>	228,88 €



## ANEXO 6

### RESULTADO DE LAS SIMULACIONES

Las simulaciones han sido realizadas para las cuatro alternativas a través del software Ansys.

Se ha comenzado desde Ansys Workbench generando un modelo estático. En el panel de control, se han determinado los materiales que se iban a implementar en los diseños.

Seguidamente, se procede a diseñar la estructura dentro del Design Modeler con las dimensiones calculadas.

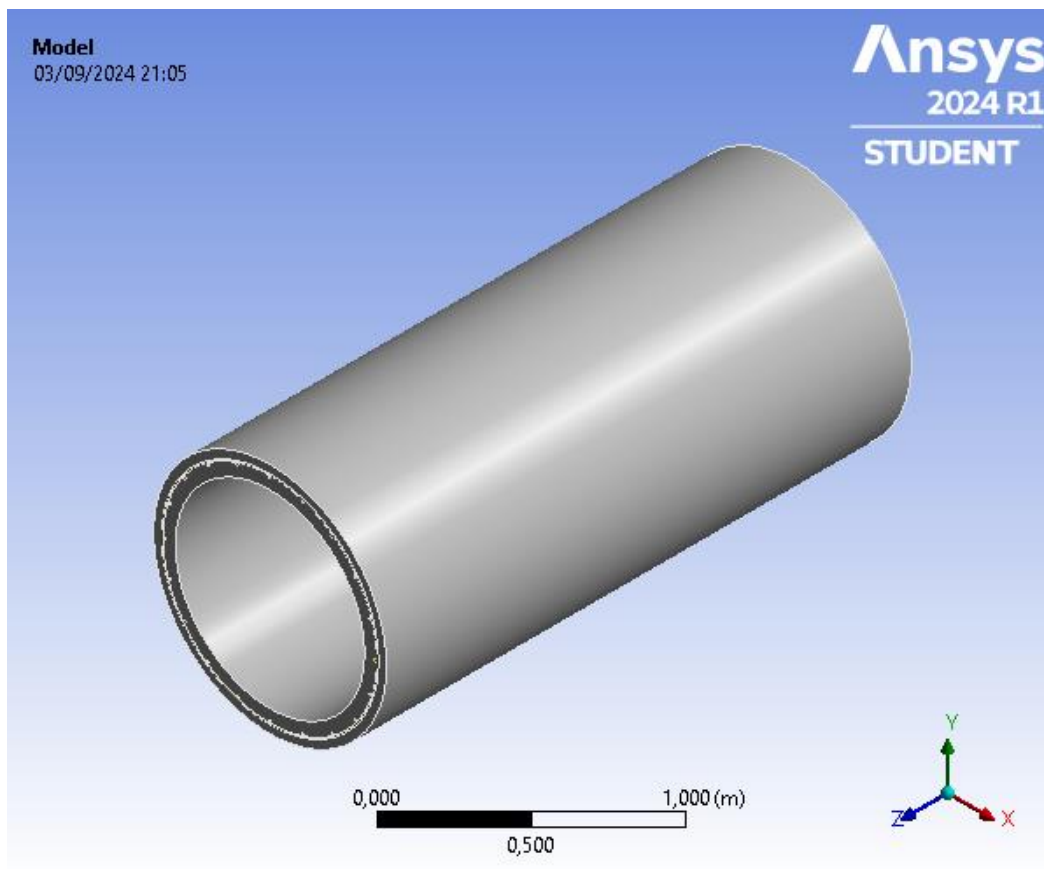


Ilustración 35 - Render en Ansys de HA-50 - Fuente: Elaboración propia

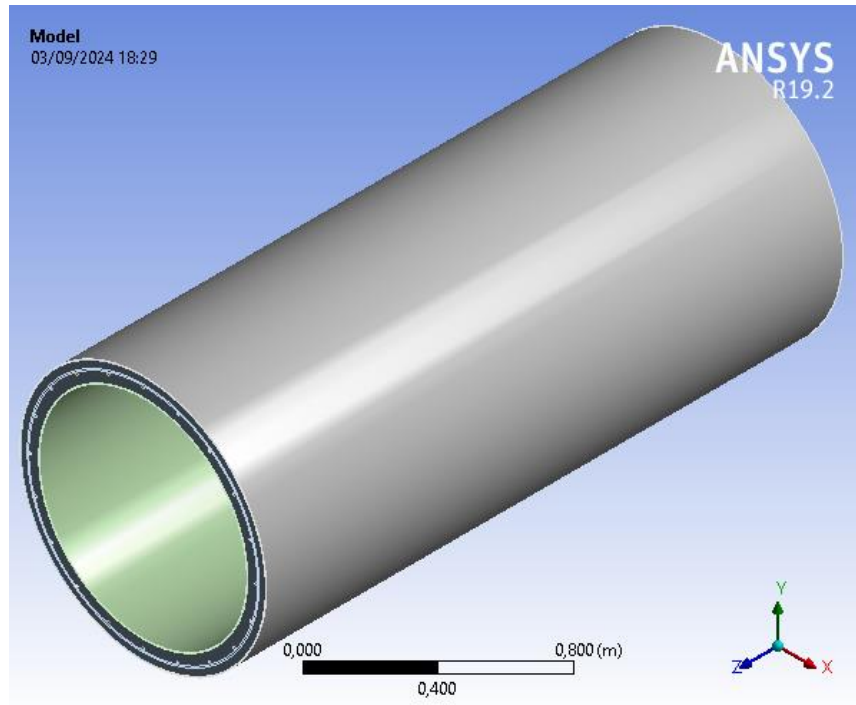


Ilustración 36 - Render en Ansys de Hormigón con camisa de chapa - Fuente: Elaboración propia

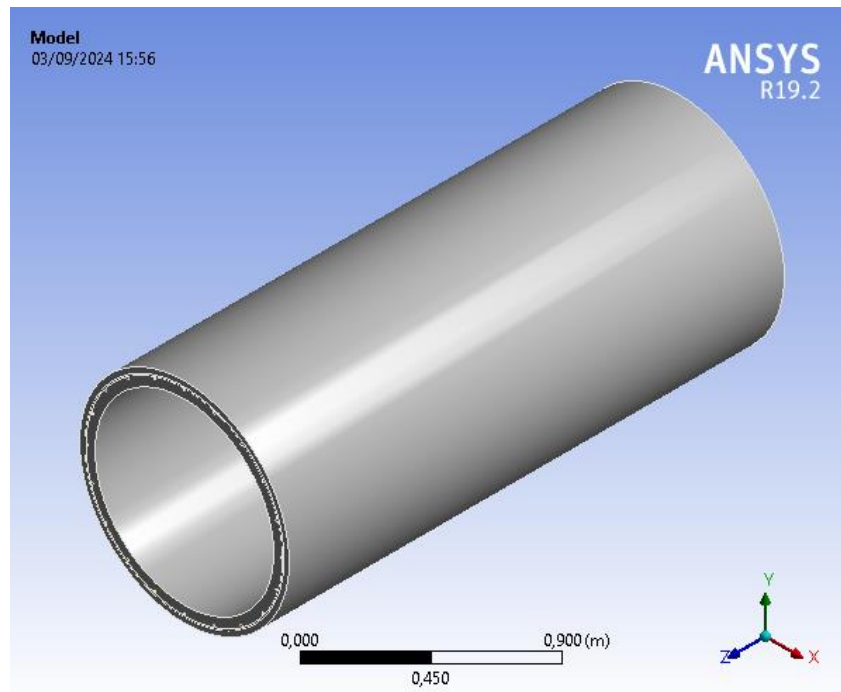


Ilustración 37 - Render en Ansys de Hormigón de ultra alta resistencia - Fuente: Elaboración propia

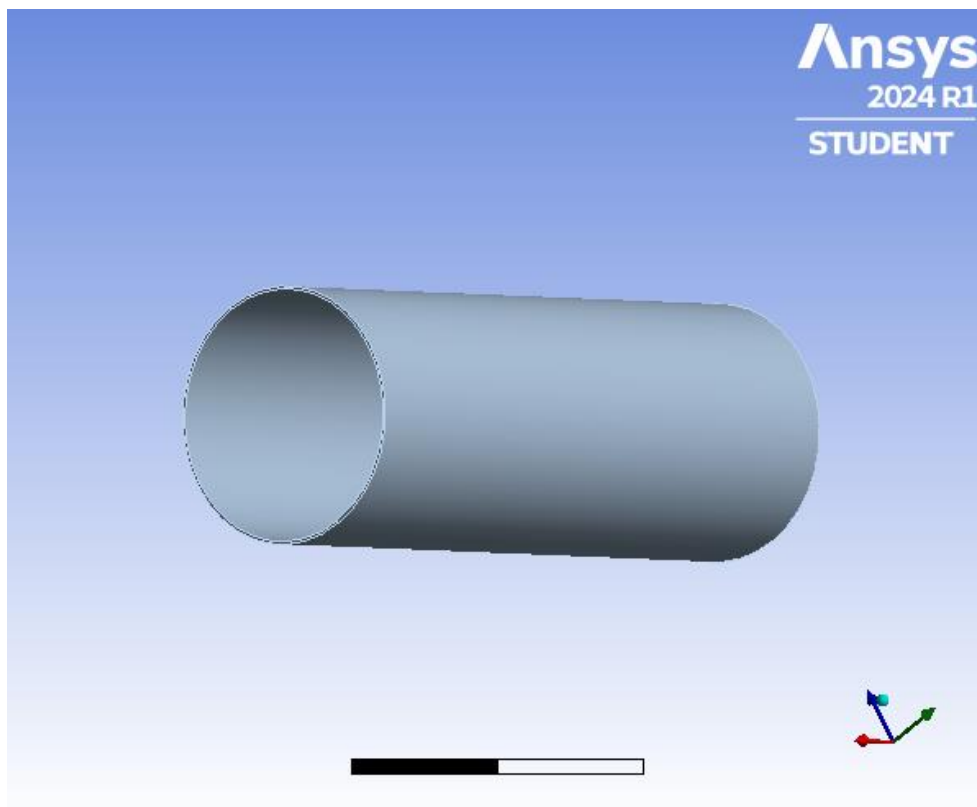


Ilustración 38 - Render en Ansys de Acero - Fuente: Elaboración propia

Una vez terminadas las secciones, se pasa al Ansys Mechanical, interfaz donde se empieza a añadir lo necesario para las simulaciones. En este momento, se añaden los materiales a los distintos sólidos insertados.

La parte más importante de una simulación es el mallado. Se ha generado una malla de buena calidad para poder hacer una simulación lo más realista posible. Para cada alternativa, se han determinado las siguientes mallas:



- HA-50

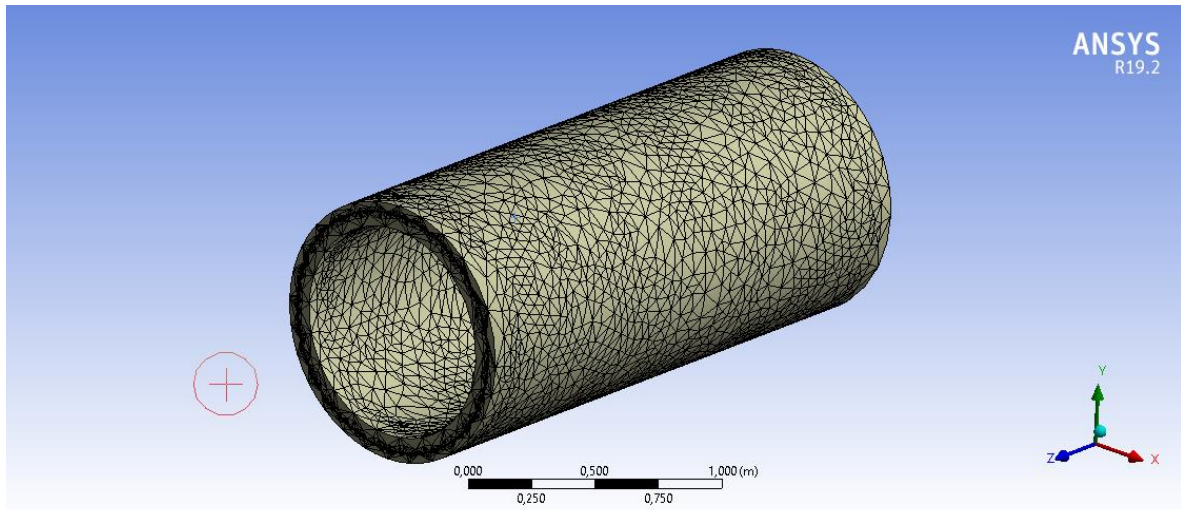


Ilustración 39 - Mallado Ansys HA-50 - Fuente: Elaboración propia

Tabla 18 - Mallado HA-50 – Fuente: Ansys Workbench

Object Name	Mesh
State	Solved
<b>Display</b>	
Display Style	Use Geometry Setting
<b>Defaults</b>	
Physics Preference	Mechanical
Element Order	Program Controlled
Element Size	0,25 m
<b>Sizing</b>	
Use Adaptive Sizing	Yes
Resolution	1
Mesh Defeaturing	Yes
Defeature Size	Default
Transition	Fast
Span Angle Center	Coarse
Initial Size Seed	Part
Bounding Box Diagonal	2,8385 m
Average Surface Area	0,17915 m <sup>2</sup>
Minimum Edge Length	3,1416e-002 m
<b>Quality</b>	
Check Mesh Quality	Yes, Errors
Error Limits	Standard Mechanical
Target Quality	Default (0.050000)
Smoothing	Medium
Mesh Metric	None
<b>Inflation</b>	



Use Automatic Inflation	None
Inflation Option	Smooth Transition
Transition Ratio	0,272
Maximum Layers	5
Growth Rate	1,2
Inflation Algorithm	Pre
View Advanced Options	No
<b>Advanced</b>	
Number of CPUs for Parallel Part Meshing	Program Controlled
Straight Sided Elements	No
Number of Retries	Default (4)
Rigid Body Behavior	Dimensionally Reduced
Triangle Surface Mesher	Program Controlled
Use Asymmetric Mapped Mesh (Beta)	No
Topology Checking	Yes
Pinch Tolerance	Please Define
Generate Pinch on Refresh	No
<b>Statistics</b>	
Nodes	696834
Elements	390627

Tabla 19 - Control de mallado HA-50 – fuente: Ansys Workbench

Object Name	Body Sizing 2	Body Sizing 3
State	Fully Defined	
<b>Scope</b>		
Scoping Method	Geometry Selection	
Geometry	20 Bodies	11 Bodies
<b>Definition</b>		
Suppressed	No	
Type	Element Size	
Element Size	0,12 m	5,e-002 m
<b>Advanced</b>		
Defeature Size	Default	
Behavior	Hard	



- Hormigón con doble camisa de chapa

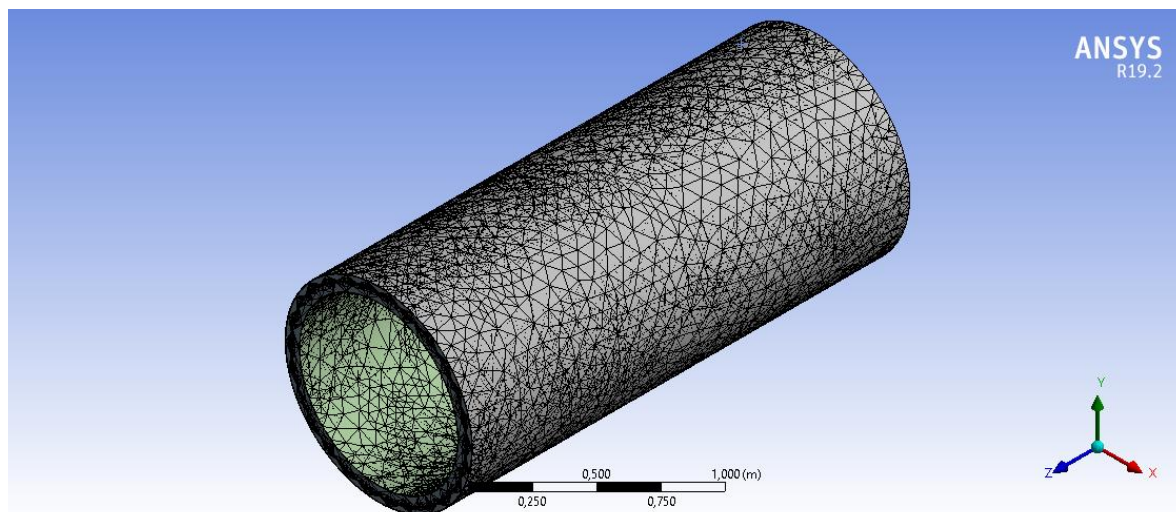


Ilustración 40 - Mallado Ansys Camisa de chapa - Fuente: Elaboración propia

Tabla 20 - Mallado Camisa de chapa – Fuente: Ansys Workbench

Object Name	Mesh
State	Solved
<b>Display</b>	
Display Style	Use Geometry Setting
<b>Defaults</b>	
Physics Preference	Mechanical
Element Order	Program Controlled
Element Size	0,25 m
<b>Sizing</b>	
Use Adaptive Sizing	Yes
Resolution	0
Mesh Defeaturing	Yes
Defeature Size	Default
Transition	Fast
Span Angle Center	Coarse
Initial Size Seed	Part
Bounding Box Diagonal	2,8104 m
Average Surface Area	0,4019 m <sup>2</sup>
Minimum Edge Length	3,1416e-002 m
<b>Quality</b>	
Check Mesh Quality	Yes, Errors
Error Limits	Standard Mechanical
Target Quality	Default (0.050000)



Smoothing	Medium
Mesh Metric	None
<b>Inflation</b>	
Use Automatic Inflation	None
Inflation Option	Smooth Transition
Transition Ratio	0,272
Maximum Layers	5
Growth Rate	1,2
Inflation Algorithm	Pre
View Advanced Options	No
<b>Advanced</b>	
Number of CPUs for Parallel Part Meshing	Program Controlled
Straight Sided Elements	No
Number of Retries	Default (4)
Rigid Body Behavior	Dimensionally Reduced
Triangle Surface Mesher	Program Controlled
Use Asymmetric Mapped Mesh (Beta)	No
Topology Checking	Yes
Pinch Tolerance	Please Define
Generate Pinch on Refresh	No
<b>Statistics</b>	
Nodes	551242
Elements	284048

Tabla 21 - Control de mallado Camisa de chapa – Fuente: Ansys Workbench

Object Name	Body Sizing 2	Body Sizing 3
State	Fully Defined	
<b>Scope</b>		
Scoping Method	Geometry Selection	
Geometry	20 Bodies	9 Bodies
<b>Definition</b>		
Suppressed	No	
Type	Element Size	
Element Size	0,18 m	0,1 m
<b>Advanced</b>		
Defeature Size	0,1 m	6,e-002 m
Behavior	Hard	

- UHPC

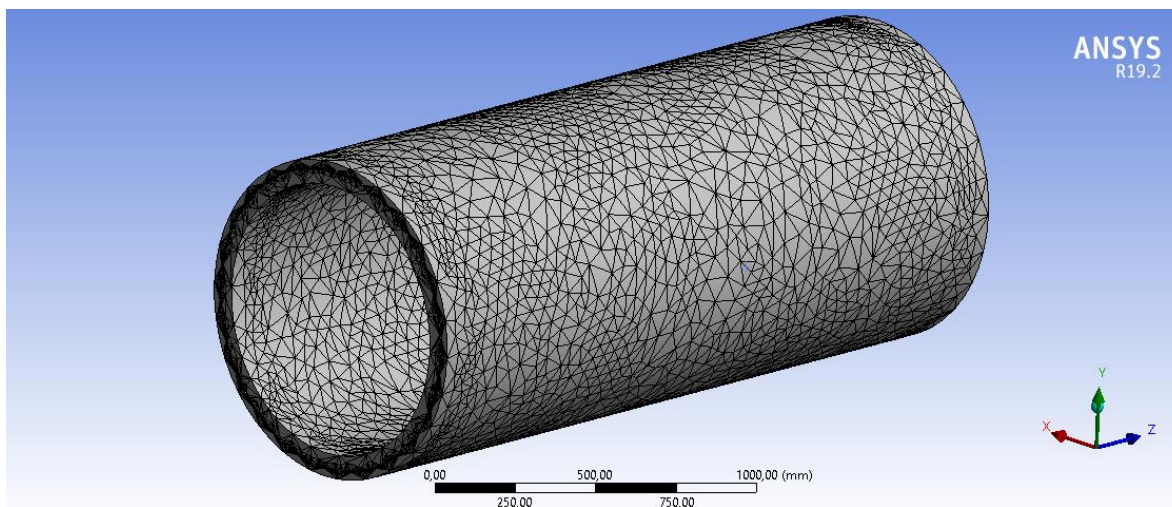


Ilustración 41 - Mallado Ansys Hormigón de ultra alta resistencia - Fuente: Elaboración propia

Tabla 22 - Mallado UHPC – Ansys Workbench

Object Name	Mesh
State	Solved
<b>Display</b>	
Display Style	Use Geometry Setting
<b>Defaults</b>	
Physics Preference	Mechanical
Element Order	Program Controlled
Element Size	0,25 m
<b>Sizing</b>	
Use Adaptive Sizing	Yes
Resolution	1
Mesh Defeaturing	Yes
Defeature Size	Default
Transition	Fast
Span Angle Center	Coarse
Initial Size Seed	Part
Bounding Box Diagonal	2,8017 m
Average Surface Area	0,17387 m <sup>2</sup>
Minimum Edge Length	3,1416e-002 m
<b>Quality</b>	
Check Mesh Quality	Yes, Errors
Error Limits	Standard Mechanical
Target Quality	Default (0.050000)
Smoothing	Medium
Mesh Metric	None
<b>Inflation</b>	
Use Automatic Inflation	None
Inflation Option	Smooth Transition
Transition Ratio	0,272



Maximum Layers	5
Growth Rate	1,2
Inflation Algorithm	Pre
View Advanced Options	No
<b>Advanced</b>	
Number of CPUs for Parallel Part Meshing	Program Controlled
Straight Sided Elements	No
Number of Retries	Default (4)
Rigid Body Behavior	Dimensionally Reduced
Triangle Surface Mesher	Program Controlled
Use Asymmetric Mapped Mesh (Beta)	No
Topology Checking	Yes
Pinch Tolerance	Please Define
Generate Pinch on Refresh	No
<b>Statistics</b>	
Nodes	671617
Elements	371422

Tabla 23 - Control de mallado UHPC – Fuente: Ansys Workbench

Object Name	<i>Body Sizing 2</i>	<i>Body Sizing 3</i>
State	Fully Defined	
<b>Scope</b>		
Scoping Method	Geometry Selection	
Geometry	20 Bodies	11 Bodies
<b>Definition</b>		
Suppressed	No	
Type	Element Size	
Element Size	0,12 m	5,e-002 m
<b>Advanced</b>		
Defeature Size	Default	
Behavior	Hard	



- Acero

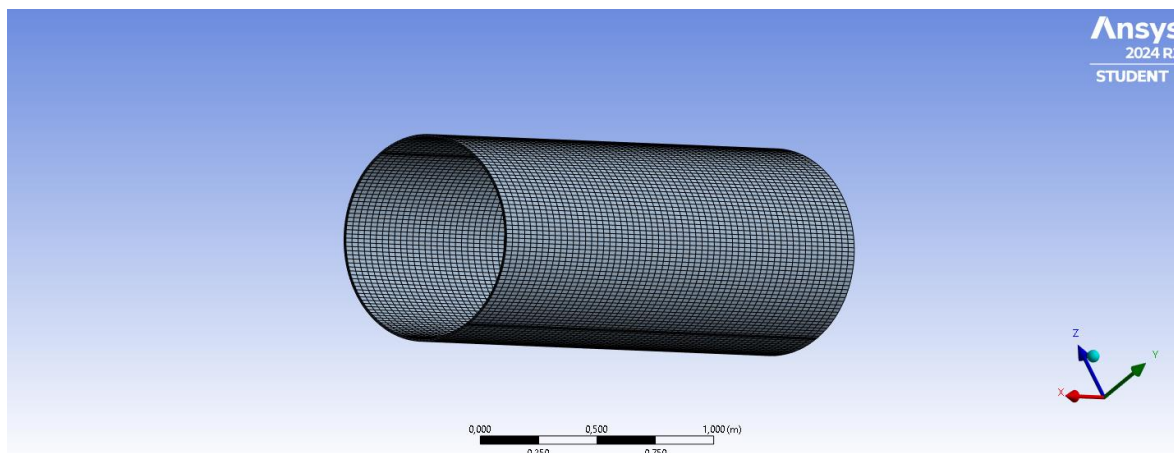


Ilustración 42- Malla de Ansys Acero en Fuente: Elaboración propia

Object Name	Mesh
State	Solved
<b>Display</b>	
Display Style	Use Geometry Setting
<b>Defaults</b>	
Physics Preference	Mechanical
Element Order	Program Controlled
Element Size	4,2e-002 m
<b>Sizing</b>	
Use Adaptive Sizing	No
Growth Rate	Default (1,85)
Max Size	Default (8,4e-002 m)
Mesh Defeaturing	Yes
Defeature Size	Default (2,1e-004 m)
Capture Curvature	Yes
Curvature Min Size	Default (4,2e-004 m)
Curvature Normal Angle	Default (70,395°)
Capture Proximity	No
Bounding Box Diagonal	2,7067 m
Average Surface Area	2,2054 m <sup>2</sup>
Minimum Edge Length	1,e-002 m
<b>Quality</b>	
Check Mesh Quality	Yes, Errors
Error Limits	Aggressive Mechanical
Target Element Quality	Default (5,e-002)
Smoothing	Medium
Mesh Metric	Orthogonal Quality
Min	0,99979
Max	0,99998
Average	0,99981
Standard Deviation	3,4949e-005



Inflation	
Use Automatic Inflation	None
Inflation Option	Smooth Transition
Transition Ratio	0,272
Maximum Layers	5
Growth Rate	1,2
Inflation Algorithm	Pre
Inflation Element Type	Wedges
View Advanced Options	No
Advanced	
Number of CPUs for Parallel Part Meshing	Program Controlled
Straight Sided Elements	No
Rigid Body Behavior	Dimensionally Reduced
Triangle Surface Mesher	Program Controlled
Topology Checking	Yes
Pinch Tolerance	Default (3,78e-004 m)
Generate Pinch on Refresh	No
Statistics	
Nodes	99060
Elements	17784
Show Detailed Statistics	No

Tabla 25 - Control de mallado Acero – Fuente: Ansys Workbench

Object Name	Automatic Method	Edge Sizing	Edge Sizing 2	Face Meshing	Face Meshing 2
State	Fully Defined				
Scope					
Scoping Method	Geometry Selection				
Geometry	1 Body	8 Edges	4 Edges	4 Faces	2 Faces
Definition					
Suppressed	No				
Method	Automatic				
Element Order	Use Global Setting				
Type		Number of Divisions			
Number of Divisions		75	2		
Mapped Mesh				Yes	
Constrain Boundary				No	
Internal Number of Divisions					Default
Advanced					
Growth Rate			Default (1,85)		
Capture Curvature			Yes		
Curvature Normal Angle			Default (70,395°)		
Local Min Size			Default (4,2e-004 m)		
Capture Proximity			No		
Bias Type			No Bias		



Specified Sides		No Selection	
Specified Corners		No Selection	
Specified Ends		No Selection	

Con la malla diseñada, se pueden distribuir las cargas para cada solución, establecer las condiciones de contorno y ejecutar el comando SOLVE.

- HA-50

Tabla 26 - Resultados simulación HA-50 – Fuente: Ansys Workbench

Object Name	Total Deformation	Maximum Principal Elastic Strain	Equivalent Stress
State	Solved		
<b>Scope</b>			
Scoping Method	Geometry Selection		
Geometry	All Bodies		
<b>Definition</b>			
Type	Total Deformation	Maximum Principal Elastic Strain	Equivalent (von-Mises) Stress
By	Time		
Display Time	Last		
Calculate Time History	Yes		
Identifier			
Suppressed	No		
<b>Results</b>			
Minimum	0, m	-4,1262e-009 m/m	0, Pa
Maximum	8,8016e-007 m	8,0108e-006 m/m	3,2665e+005 Pa
Average	6,7413e-007 m	3,9194e-007 m/m	63409 Pa
Minimum Occurs On	Component1\Sólido1		Component32\Sólido32
Maximum Occurs On	Component1\Sólido1		Component30\Sólido30
<b>Information</b>			
Time	1, s		
Load Step	1		
Substep	1		
Iteration Number	1		
<b>Integration Point Results</b>			
Display Option	Averaged		
Average Across Bodies	No		

Tabla 27 - Deformación total HA-50 – Fuente: Ansys Workbench

Time [s]	Minimum [m]	Maximum [m]	Average [m]
1,	0,	8,8016e-007	6,7413e-007

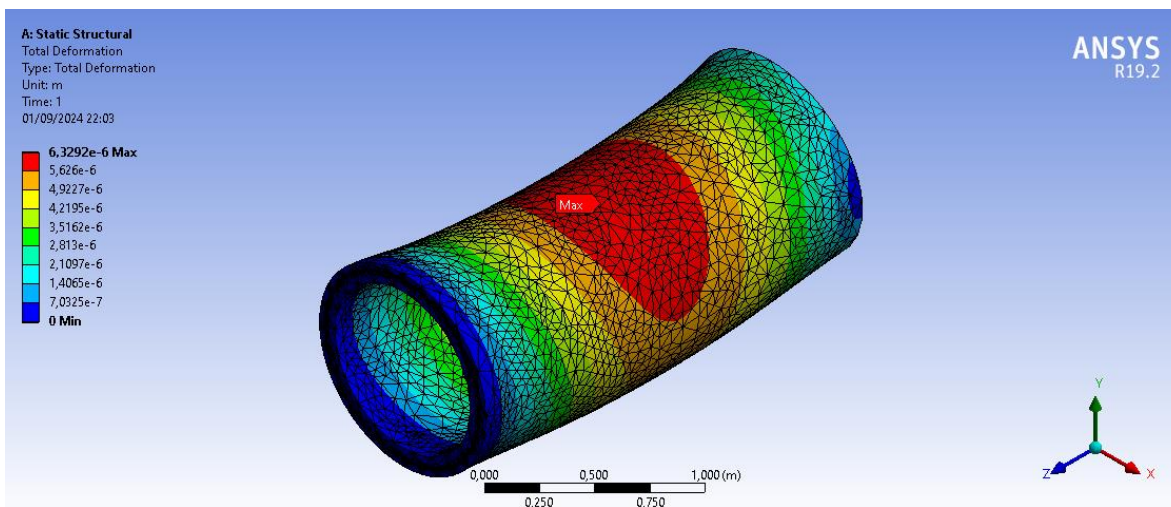


Ilustración 43 - Deformación total HA-50 - Fuente: Elaboración propia

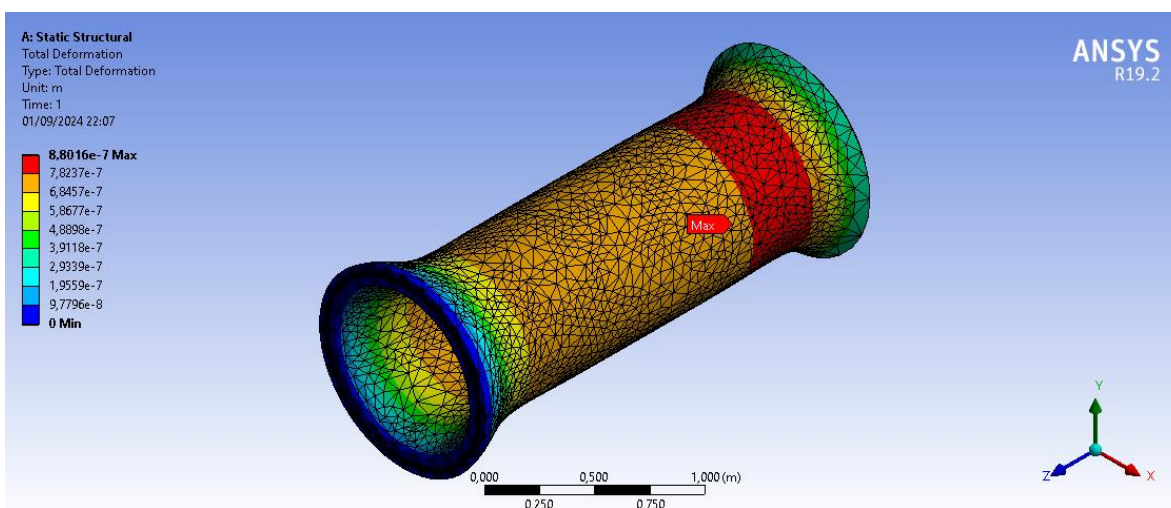


Ilustración 44 - Deformación total por vacío HA-50 - Fuente: Elaboración propia

Tabla 28 - Factor de seguridad para vacío HA-50 - Fuente: Ansys Workbench

Time [s]	Minimum	Maximum	Average
1,	15,	15,	15,

Tabla 29 - Deformación elástica principal máxima HA-50 - Fuente: Ansys Workbench

Time [s]	Minimum [m/m]	Maximum [m/m]	Average [m/m]
1,	-4,1262e-009	8,0108e-006	3,9194e-007





Tabla 30 - Tensión equivalente HA-50 - Fuente: Ansys Workbench

Time [s]	Minimum [Pa]	Maximum [Pa]	Average [Pa]
1,	0,	3,2665e+005	63409

- Camisa de chapa

Tabla 31 - Resultados simulación Camisa de chapa - Fuente: Ansys Workbench

Object Name	Total Deformation	Maximum Principal Elastic Strain	Equivalent Stress
State	Solved		
<b>Scope</b>			
Scoping Method	Geometry Selection		
Geometry	All Bodies		
<b>Definition</b>			
Type	Total Deformation	Maximum Principal Elastic Strain	Equivalent (von-Mises) Stress
By	Time		
Display Time	Last		
Calculate Time History	Yes		
Identifier			
Suppressed	No		
<b>Results</b>			
Minimum	0, m	-9,895e-008 m/m	4269,9 Pa
Maximum	8,1578e-007 m	3,6367e-006 m/m	3,3838e+005 Pa
Average	6,0237e-007 m	3,6974e-007 m/m	78545 Pa
Minimum Occurs On	Component2\Sólido2		Component1\Sólido1
Maximum Occurs On	Component2\Sólido2		Component14\Sólido14
<b>Information</b>			
Time	1, s		
Load Step	1		
Substep	1		
Iteration Number	1		
<b>Integration Point Results</b>			
Display Option	Averaged		
Average Across Bodies	No		

Tabla 32 - Deformación total Camisa de chapa - Fuente: Ansys Workbench

Time [s]	Minimum [m]	Maximum [m]	Average [m]
1,	0,	8,1578e-007	6,0237e-007

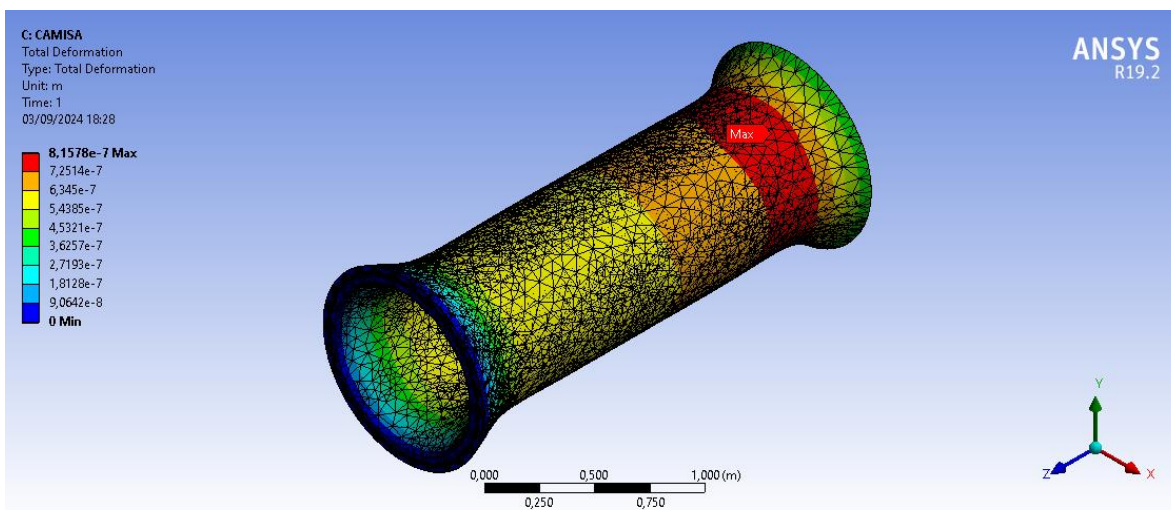


Ilustración 45 - Deformación total por vacío Camisa de chapa - Fuente: Elaboración propia

Tabla 33 - Factor de seguridad para vacío Camisa de chapa - Fuente: Ansys Workbench

Time [s]	Minimum	Maximum	Average
1,	15,	15,	15,

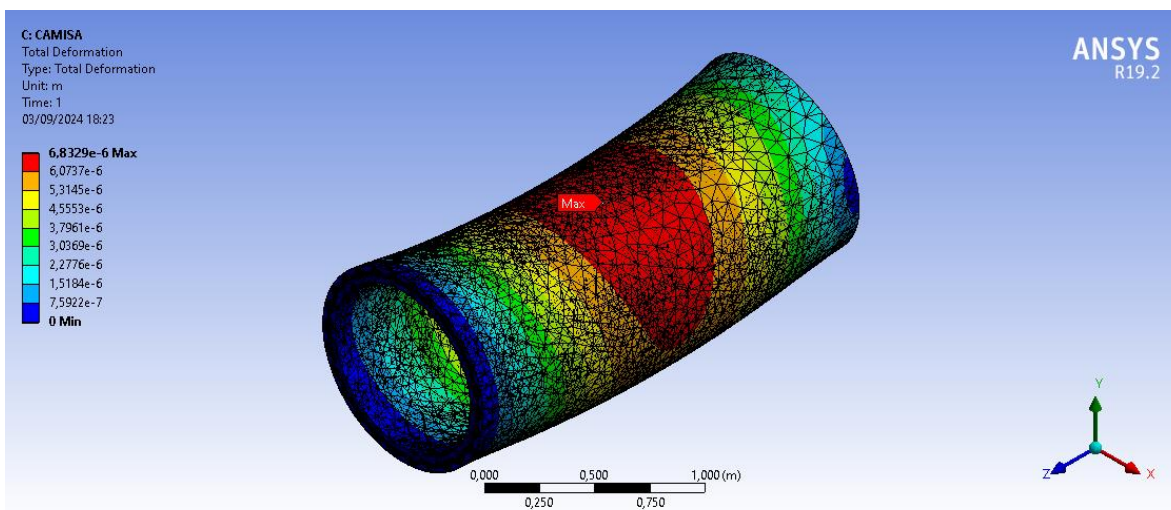


Ilustración 46 - Deformación total Camisa de chapa - Fuente: Elaboración propia

Tabla 34 - Deformación elástica principal máxima Camisa de chapa - Fuente: Ansys Workbench

Time [s]	Minimum [m/m]	Maximum [m/m]	Average [m/m]
1,	-9,895e-008	3,6367e-006	3,6974e-007

Tabla 35- Tensión equivalente Camisa de chapa - Fuente: Ansys Workbench

Time [s]	Minimum [Pa]	Maximum [Pa]	Average [Pa]
1,	4269,9	3,3838e+005	78545



- UHPC

Tabla 36 - Resultados simulación UHPC - Fuente: Ansys Workbench

Object Name	Total Deformation	Maximum Principal Elastic Strain	Equivalent Stress
State	Solved		
<b>Scope</b>			
Scoping Method	Geometry Selection		
Geometry	All Bodies		
<b>Definition</b>			
Type	Total Deformation	Maximum Principal Elastic Strain	Equivalent (von-Mises) Stress
By	Time		
Display Time	Last		
Calculate Time History	Yes		
Identifier			
Suppressed	No		
<b>Results</b>			
Minimum	0, m	0, m/m	0, Pa
Maximum	6,9909e-007 m	1,7019e-006 m/m	3,3287e+005 Pa
Average	5,3619e-007 m	2,8455e-007 m/m	69923 Pa
Minimum Occurs On	Component1\Sólido1	Component32\Sólido32	
Maximum Occurs On	Component1\Sólido1		Component3\Sólido3
<b>Information</b>			
Time	1, s		
Load Step	1		
Substep	1		
Iteration Number	1		
<b>Integration Point Results</b>			
Display Option	Averaged		
Average Across Bodies	No		

Tabla 37 - Deformación Total UHPC - Ansys Workbench

Time [s]	Minimum [m]	Maximum [m]	Average [m]
1,	0,	6,9909e-007	5,3619e-007

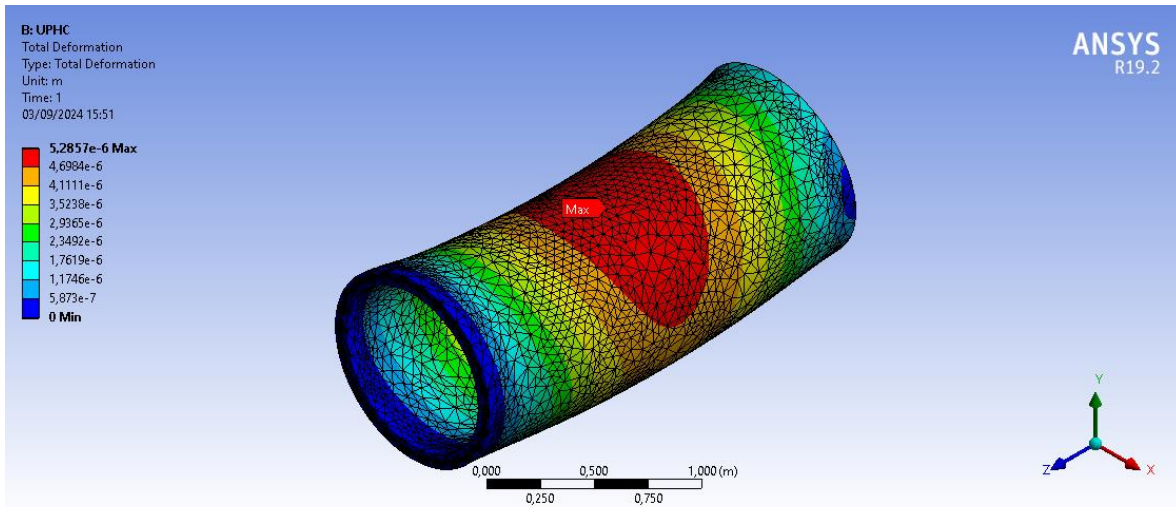


Ilustración 47 - Deformación total UHPC - Fuente: Elaboración propia

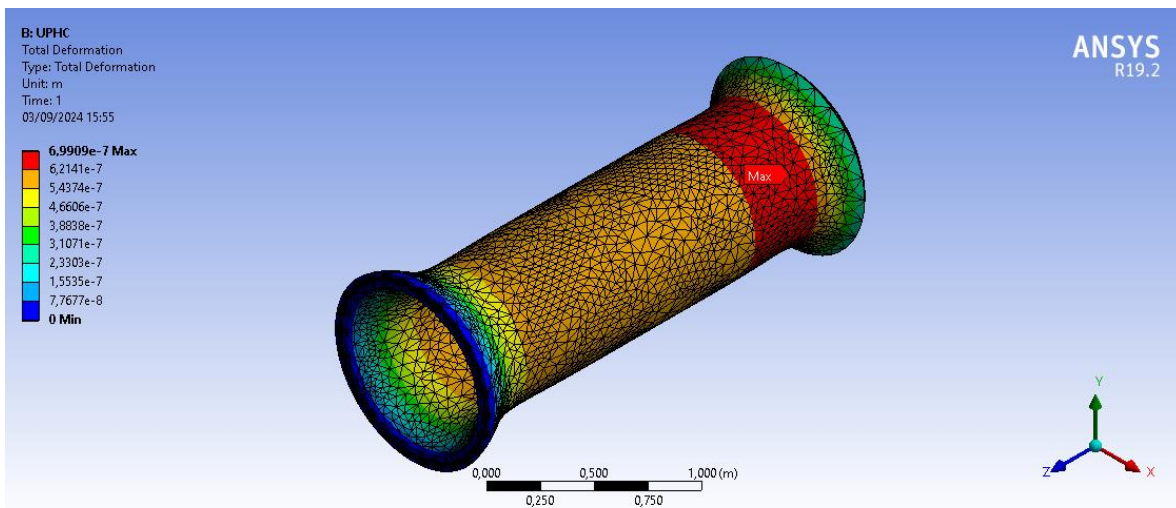


Ilustración 48 - Deformación total por vacío UHPC - Fuente: Elaboración propia

Tabla 38 - Factor de seguridad para vacío UHPC - Fuente: Ansys Workbench

Time [s]	Minimum	Maximum	Average
1,	15,	15,	15,

Tabla 39 - Deformación elástica principal máxima UHPC - Fuente: Ansys Mechanical

Time [s]	Minimum [m/m]	Maximum [m/m]	Average [m/m]
1,	0,	1,7019e-006	2,8455e-007



Tabla 40- Tensión equivalente UHPC - Fuente: Ansys Workbench

Time [s]	Minimum [Pa]	Maximum [Pa]	Average [Pa]
1,	0,	3,3287e+005	69923

- Acero

Tabla 41 - Deformación total por vacío en Acero - Fuente: Ansys Workbench

Time [s]	Minimum [m]	Maximum [m]	Average [m]
1,	0,	1,7638e-007	1,2248e-007

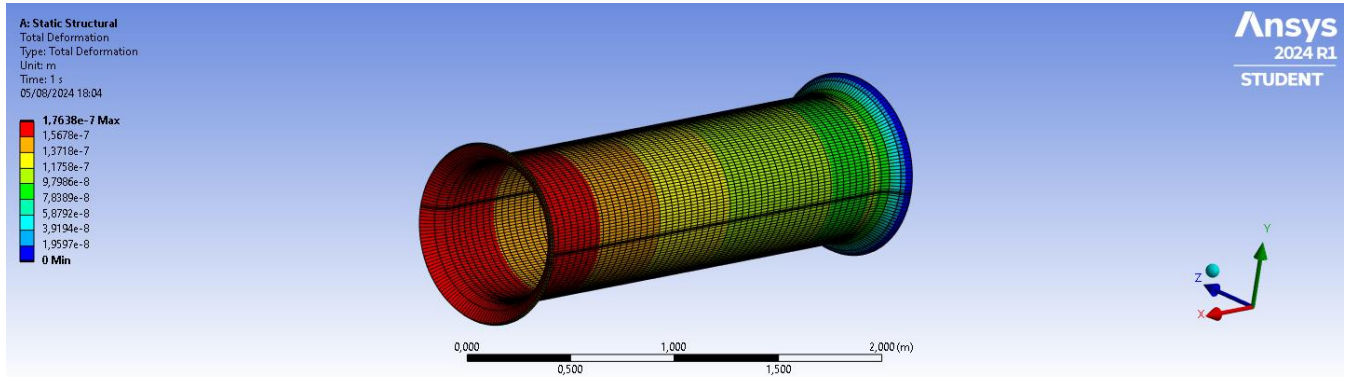


Ilustración 49 - Deformación total por vacío en Acero - Fuente: Elaboración propia

Tabla 42 - Factor de seguridad para vacío en Acero - Fuente: Ansys Workbench

Time [s]	Minimum	Maximum	Average
1,	15,	15,	15,

Tabla 43 - Resultados simulación Acero - Fuente: Ansys Workbench

Object Name	Total Deformation	Equivalent Stress	Maximum Principal Elastic Strain
State			Solved
<b>Scope</b>			
Scoping Method			Geometry Selection
Geometry			All Bodies
<b>Definition</b>			
Type	Total Deformation	Equivalent (von-Mises) Stress	Maximum Principal Elastic Strain
By			Time
Display Time	First		Last
Separate Data by Entity			No
Calculate Time History			Yes
Identifier			
Suppressed			No
<b>Results</b>			



Minimum	0, m	4197,5 Pa	9,1195e-009 m/m
Maximum	4,7358e-006 m	7,6261e+005 Pa	3,9618e-006 m/m
Average	3,121e-006 m	2,9685e+005 Pa	1,0826e-006 m/m
Minimum Occurs On	Solid		
Maximum Occurs On	Solid		
<b>Information</b>			
Time	1, s		
Load Step	1		
Substep	1		
Iteration Number	1		
<b>Integration Point Results</b>			
Display Option	Averaged		
Average Across Bodies	No		
Object Name	<i>Total Deformation</i>	<i>Equivalent Stress</i>	<i>Equivalent Elastic Strain</i>
State	Solved		
<b>Scope</b>			
Scoping Method	Geometry Selection		
Geometry	All Bodies		
<b>Definition</b>			
Type	Total Deformation	Equivalent (von-Mises) Stress	Equivalent Elastic Strain
By	Time		
Display Time	First	Last	
Separate Data by Entity	No		
Calculate Time History	Yes		
Identifier			
Suppressed	No		
<b>Results</b>			
Minimum	0, m	4197,5 Pa	2,0994e-008 m/m
Maximum	4,7358e-006 m	7,6261e+005 Pa	3,813e-006 m/m
Average	3,121e-006 m	2,9685e+005 Pa	1,4854e-006 m/m
Minimum Occurs On	Solid		
Maximum Occurs On	Solid		
<b>Information</b>			
Time	1, s		
Load Step	1		
Substep	1		
Iteration Number	1		
<b>Integration Point Results</b>			
Display Option	Averaged		
Average Across Bodies	No		

Tabla 44 - Deformación total Acero - Fuente: Ansys Workbench

Time [s]	Minimum [m]	Maximum [m]	Average [m]
----------	-------------	-------------	-------------



1,	0,	4,7358e-006	3,121e-006
----	----	-------------	------------

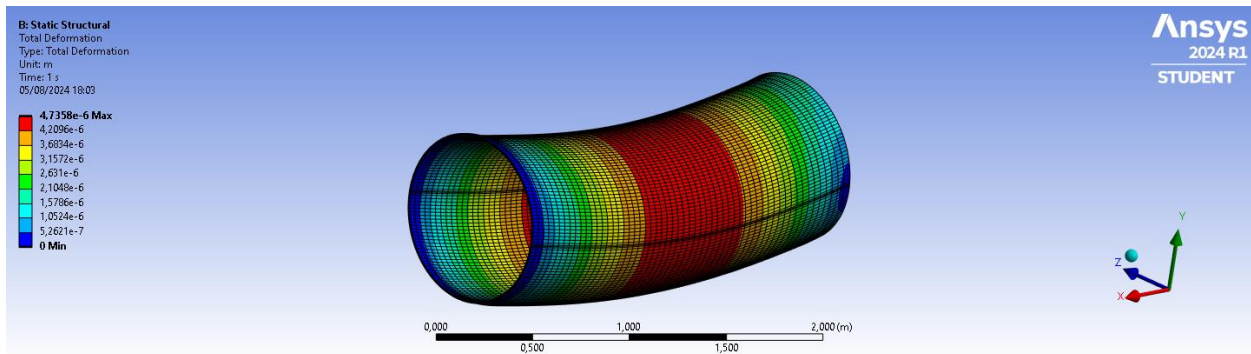


Ilustración 50 - Deformación total Acero - Fuente: Elaboración propia

Tabla 45 - Deformación elástica principal máxima Acero - Fuente: Ansys Workbench

Time [s]	Minimum [m/m]	Maximum [m/m]	Average [m/m]
1,	9,1195e-009	3,9618e-006	1,0826e-006

Tabla 46- Tensión equivalente Acero - Fuente: Ansys Workbench

Time [s]	Minimum [Pa]	Maximum [Pa]	Average [Pa]
1,	4197,5	7,6261e+005	2,9685e+005

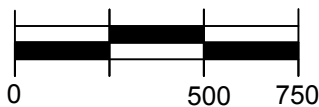
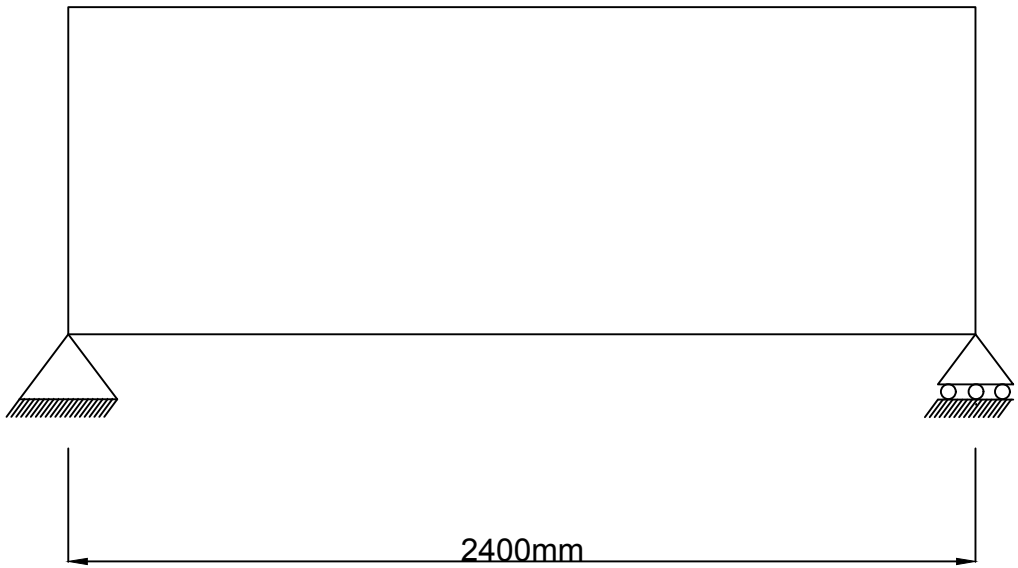


## ANEXO 7

### PLANOS



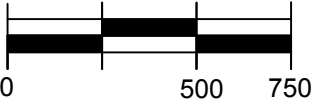
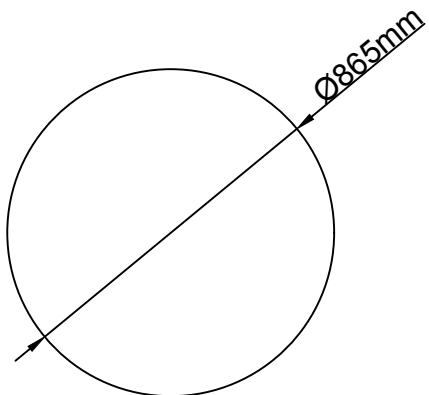
SECCIÓN DE  
TUBERÍA TIPO



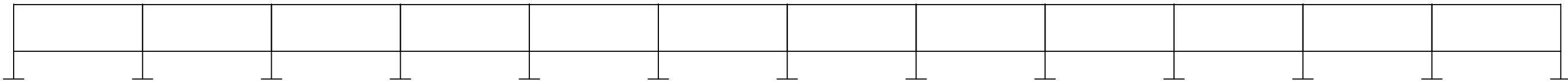
CASOS DE ESTUDIO

- ALTERNATIVA 1: HA-50
- ALTERNATIVA 2: Hormigón con doble camisa de chapa
- ALTERNATIVA 3: Hormigón de ultra alta resistencia
- ALTERNATIVA 4: Acero estructural

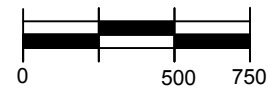
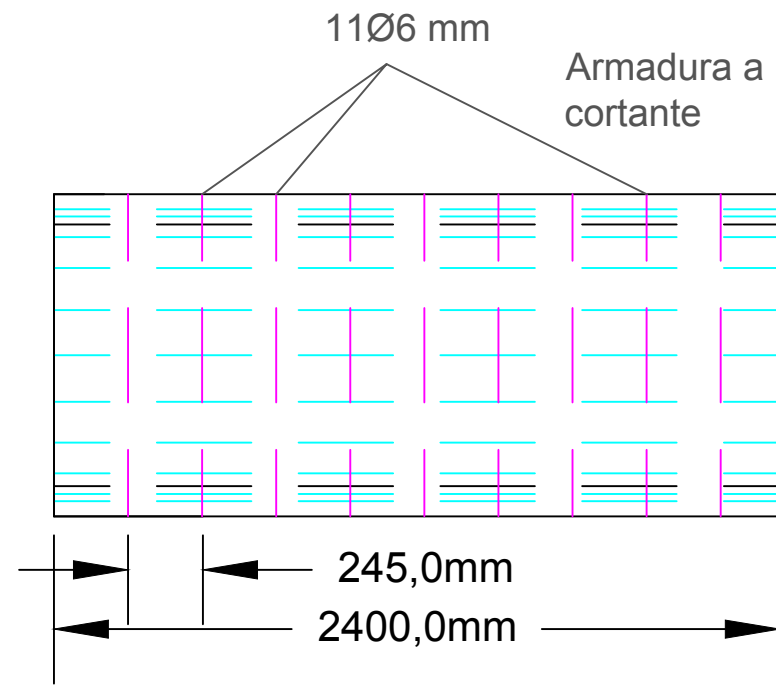
DIÁMETRO  
NOMINAL



VISTA LONGITUDINAL



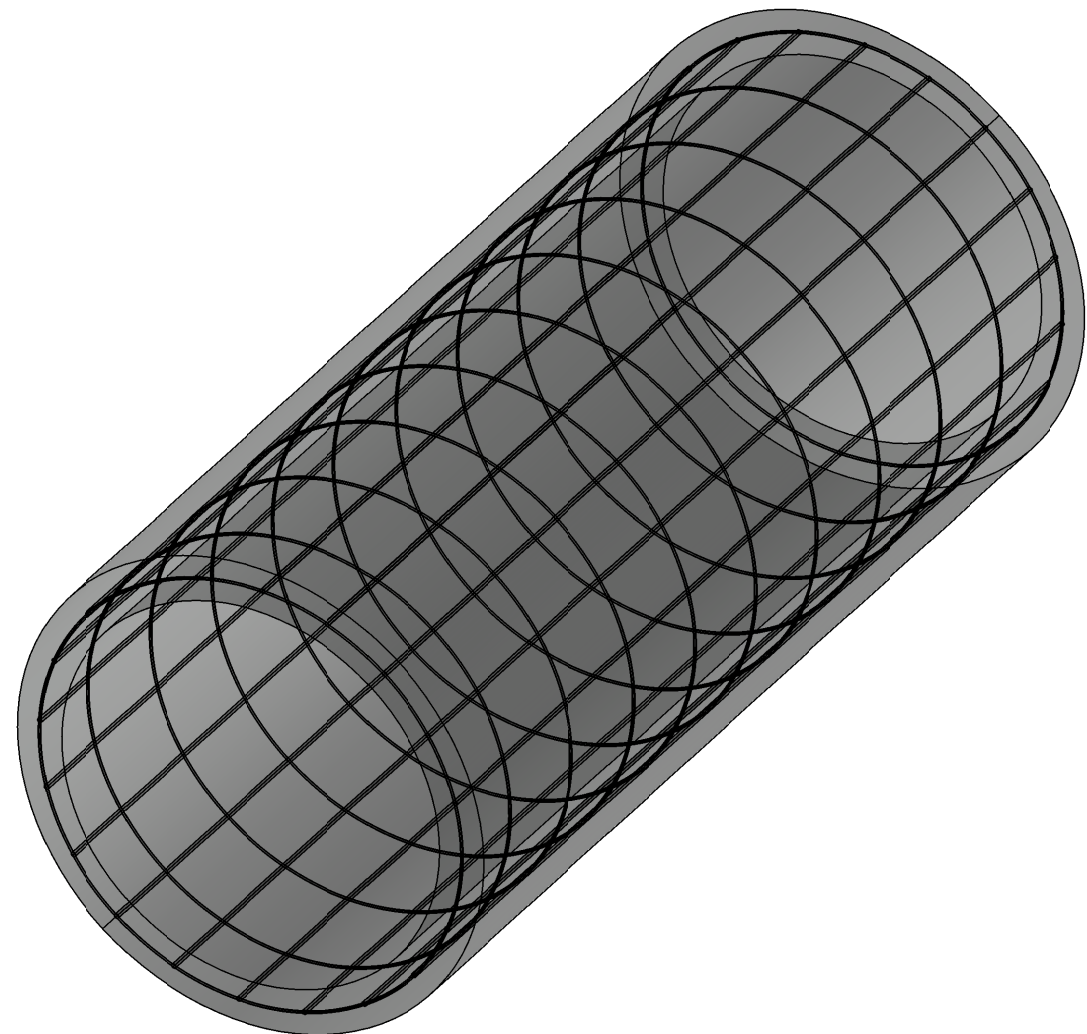
# ALZADO



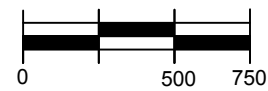
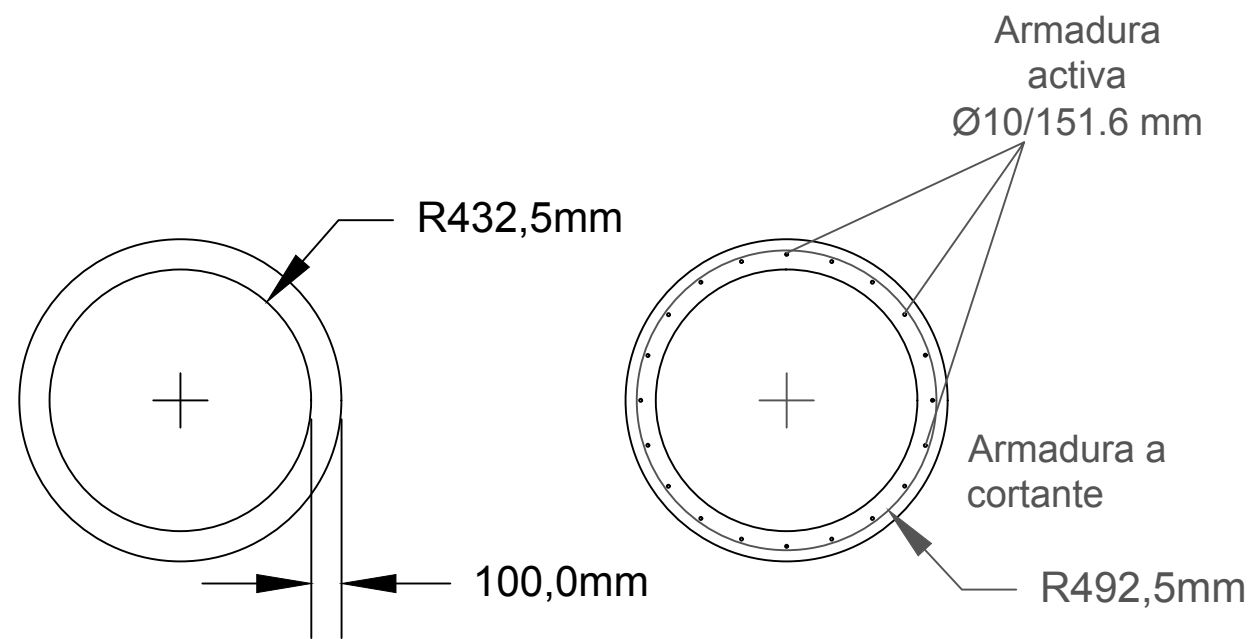
# CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

Elemento estructural	Tipo de material	Designación	Resistencia característica	Niveles de control	Coefficientes de seguridad
Tubería	Hormigón estructural	C50/60	$f_{ck} = 50 \text{ N/mm}^2$	Normal	$\gamma_c = 1.5$
	Acero pasivo	B500S	$f_{yk} = 500 \text{ N/mm}^2$	Normal	$\gamma_s = 1.15$
Control de calidad de la ejecución intenso			$\gamma_Q = 1.5$		
Recubrimiento en hormigón				$r_{mec} = 50 \text{ mm}$	$r_{nom} = 40 \text{ mm}$

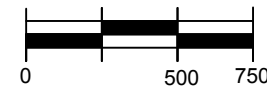
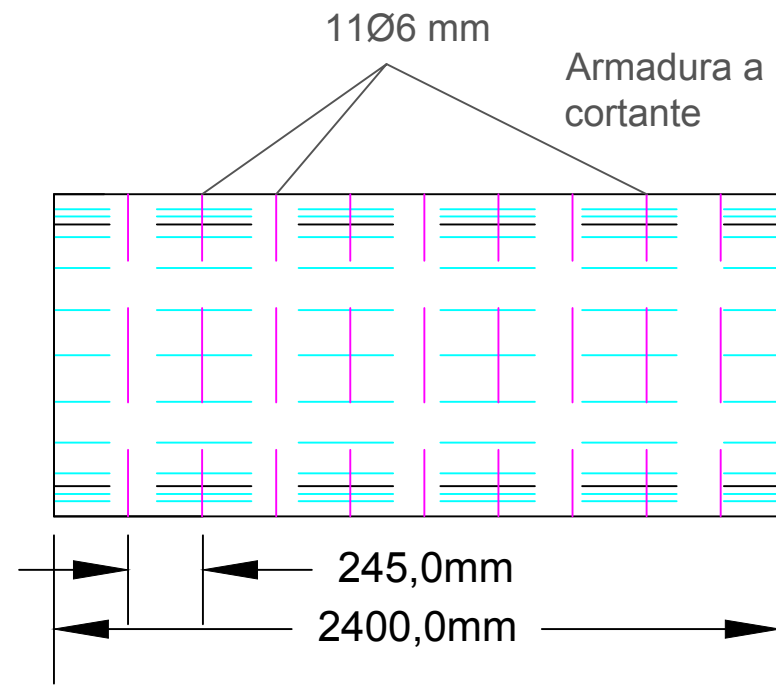
# VISTA 3D



# PERFIL



# ALZADO



## CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

Elemento estructural	Tipo de material	Designación	Resistencia característica	Niveles de control	Coefficientes de seguridad
Tubería	Hormigón estructural	C50/60	$f_{ck} = 50 \text{ N/mm}^2$	Normal	$\gamma_c = 1.5$
	Acero pasivo	B500S	$f_{yk} = 500 \text{ N/mm}^2$	Normal	$\gamma_s = 1.15$
	Acero estructural	S355	$f_{yk} = 355 \text{ N/mm}^2$	Normal	$\gamma_s = 1.15$

Control de calidad de la ejecución intenso  $\gamma_c = 1.35$   $\gamma_Q = 1.5$

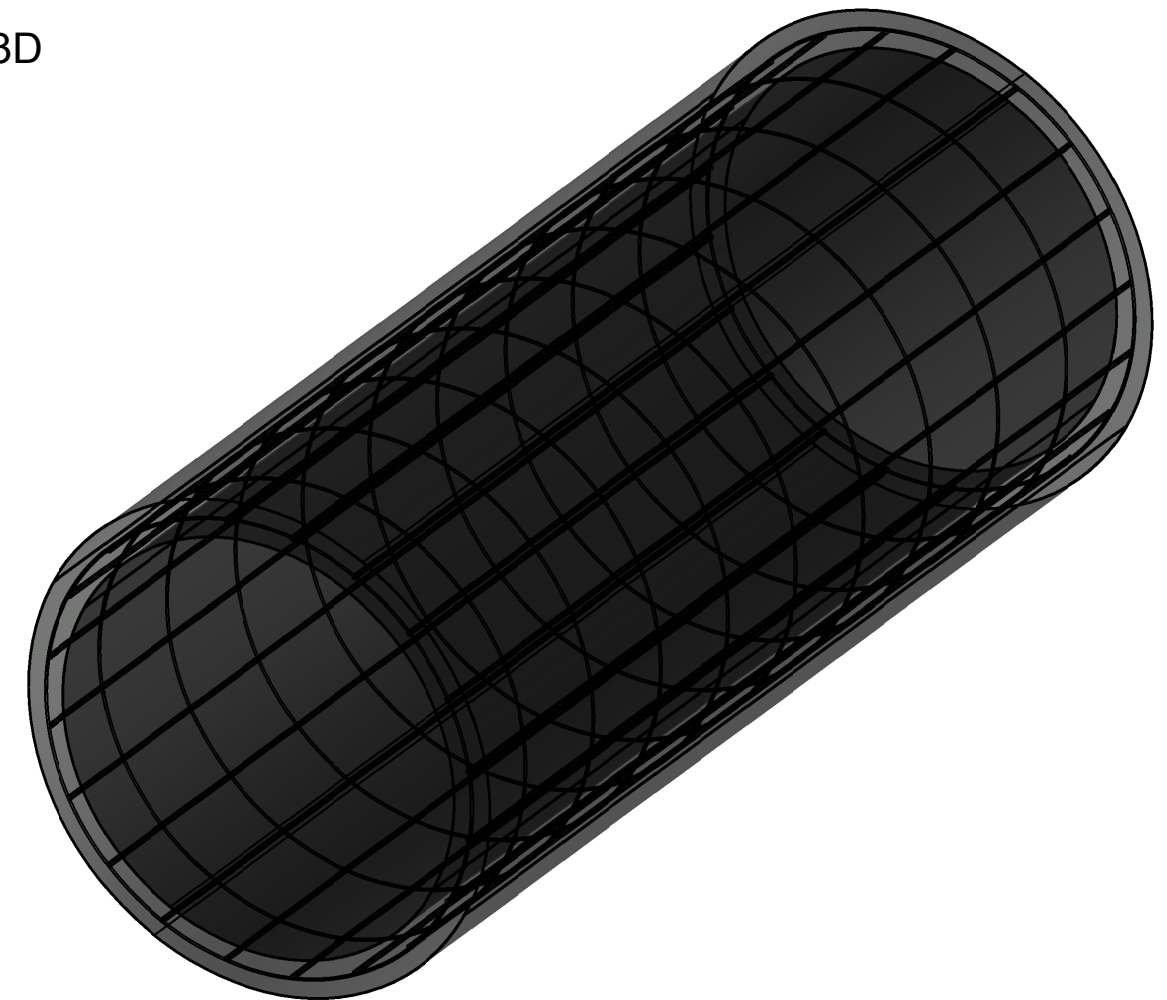
Recubrimiento en hormigón

$r_{mec} = 37.5 \text{ mm}$   $r_{nom} = 30 \text{ mm}$

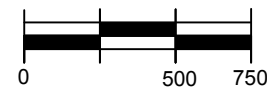
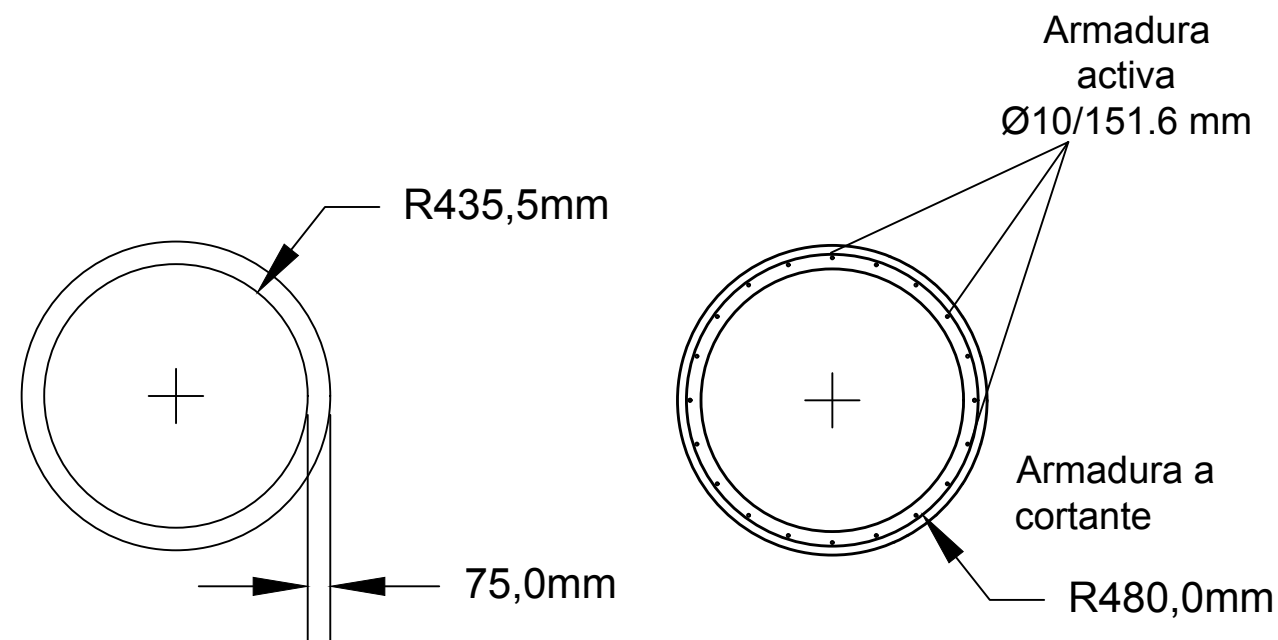
Espesor de chapa

$e = 3 \text{ mm}$

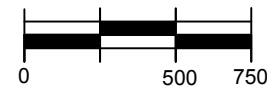
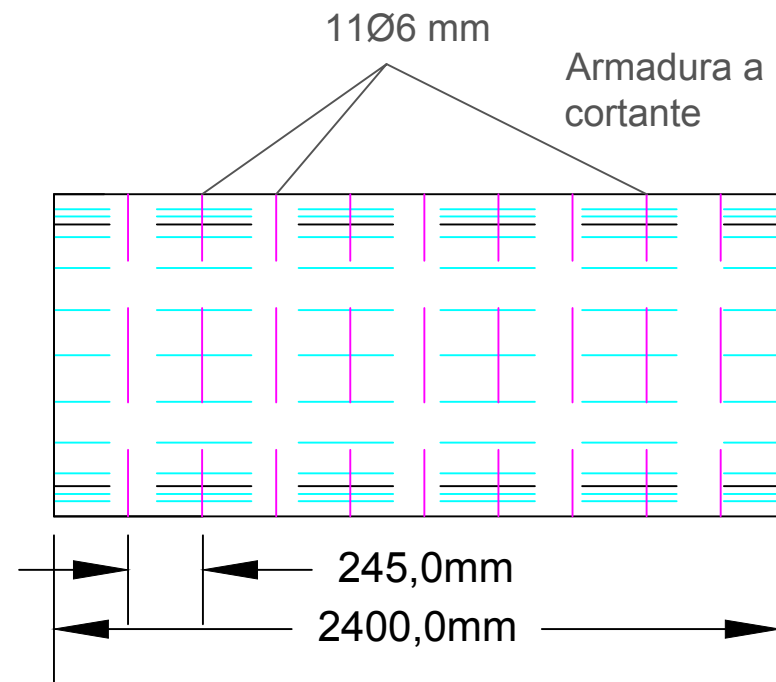
## VISTA 3D



# PERFIL



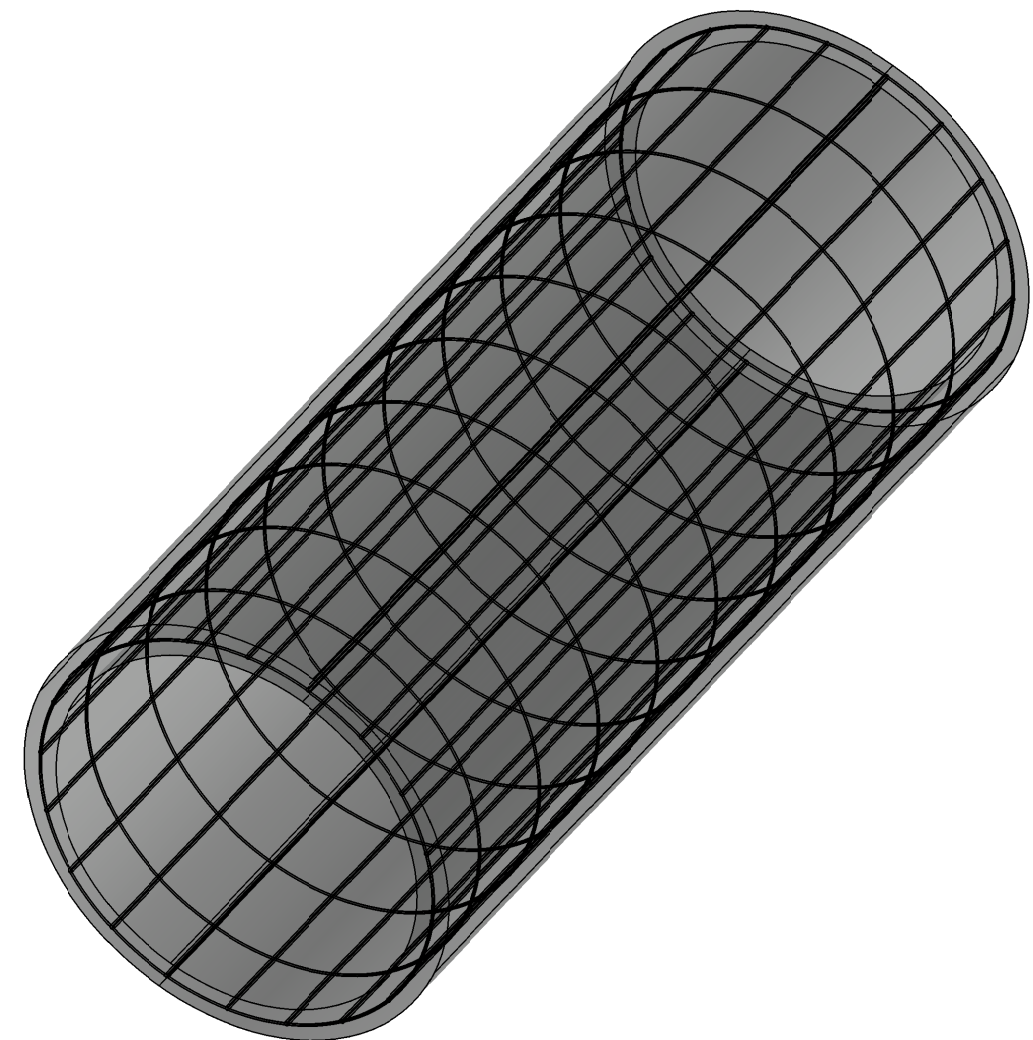
# ALZADO



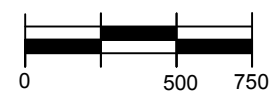
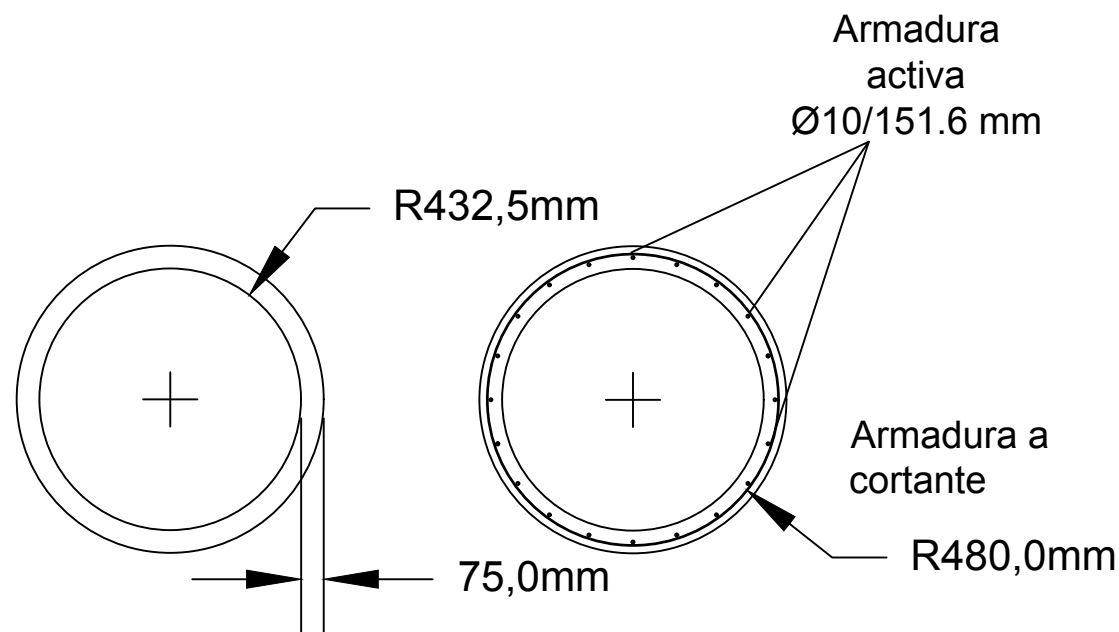
## CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

Elemento estructural	Tipo de material	Designación	Resistencia característica	Niveles de control	Coefficientes de seguridad
Tubería	Hormigón estructural	UPHC	$f_{ck} = 150 \text{ N/mm}^2$	Normal	$\gamma_c = 1.5$
	Acero pasivo	B500S	$f_{yk} = 500 \text{ N/mm}^2$	Normal	$\gamma_s = 1.15$
Control de calidad de la ejecución intenso			$\gamma_c = 1.35$	$\gamma_Q = 1.5$	
Recubrimiento en hormigón				$r_{mec} = 37.5 \text{ mm}$	$r_{nom} = 30 \text{ mm}$

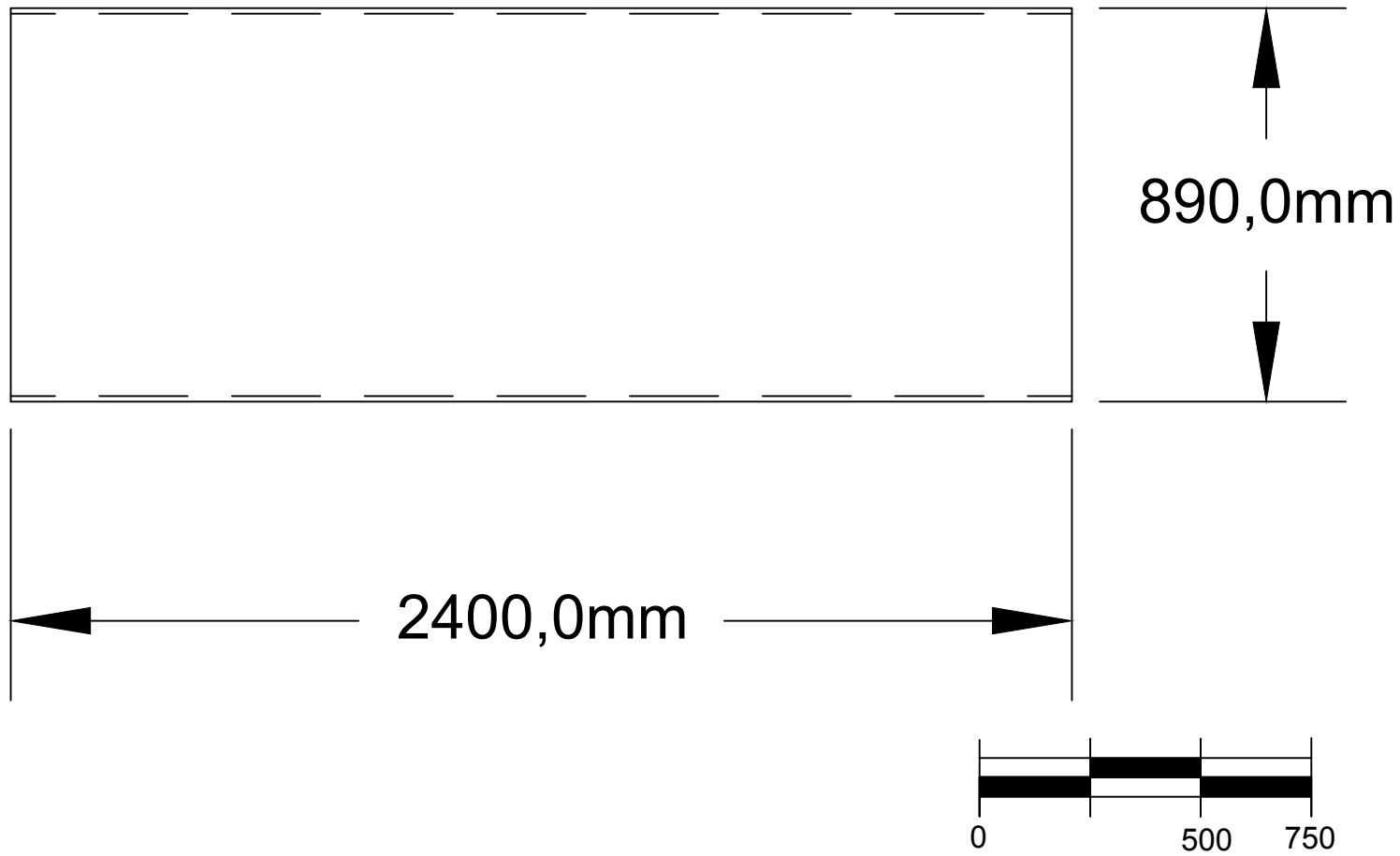
# VISTA 3D



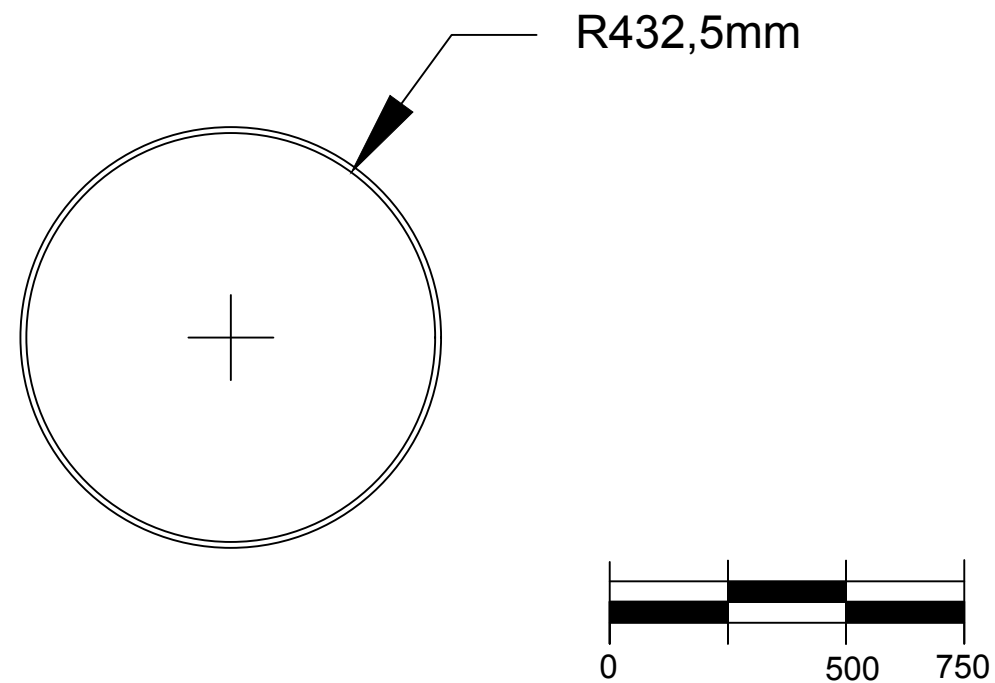
# PERFIL



# ALZADO



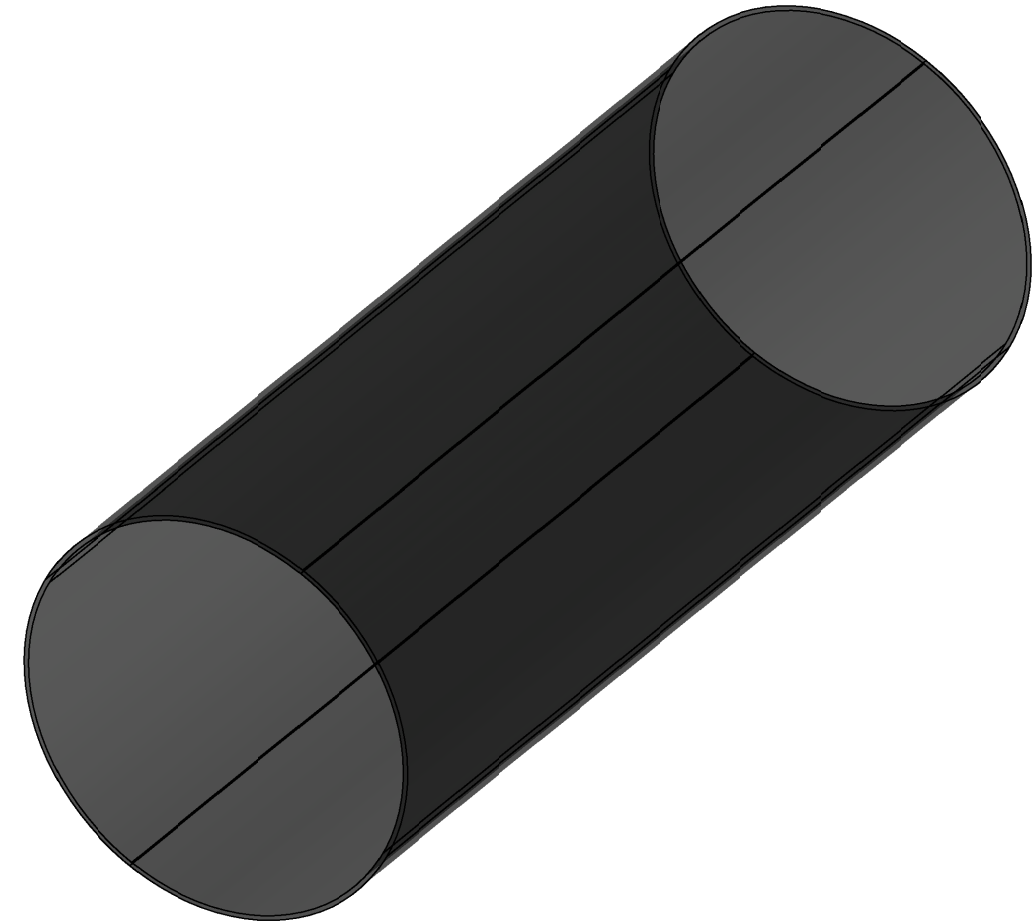
# PERFIL



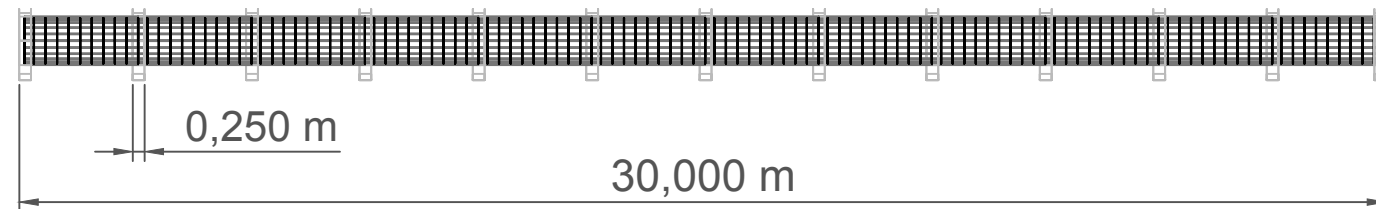
## CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

Elemento estructural	Tipo de material	Designación	Resistencia característica	Niveles de control	Coefficientes de seguridad
Tubería	Acero estructural	S355	$f_{yk} = 355 \text{ N/mm}^2$	Normal	$\gamma_s = 1.15$
Control de calidad de la ejecución intenso		$\gamma_c = 1.35$	$\gamma_Q = 1.5$		
Espesor de chapa				$e = 15 \text{ mm}$	

# VISTA 3D

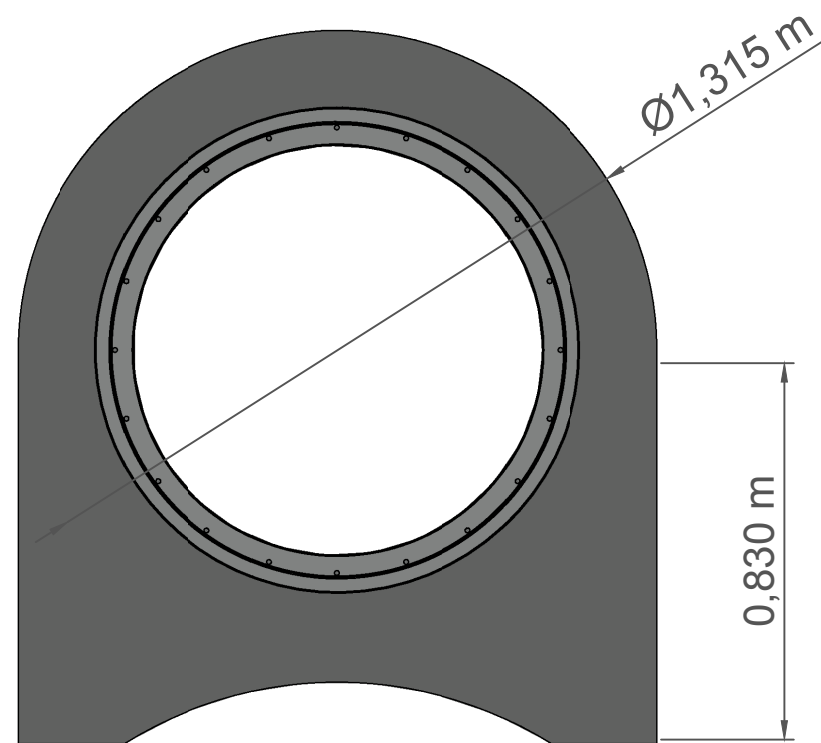


VISTA LONGITUDINAL



ESCALA 1:160

DETALLE DE LA UNIÓN



ESCALA 1:16

CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

Elemento estructural	Tipo de material	Designación	Resistencia característica	Niveles de control	Coefficientes de seguridad
Tubería	Hormigón estructural	C50/60	$f_{ck} = 50 \text{ N/mm}^2$	Normal	$\gamma_c = 1.5$
	Acero pasivo	B500S	$f_{yk} = 500 \text{ N/mm}^2$	Normal	$\gamma_s = 1.15$
	Acero estructural	S355	$f_{yk} = 355 \text{ N/mm}^2$	Normal	$\gamma_s = 1.15$

Control de calidad de la ejecución intenso  $\gamma_c = 1.35$   $\gamma_Q = 1.5$

Recubrimiento en hormigón

$r_{mec} = 37.5 \text{ mm}$   $r_{nom} = 30 \text{ mm}$

Espesor de chapa

$e = 3 \text{ mm}$

VISTA 3D





## BIBLIOGRAFÍA

- (AENOR), A. E. (2020). *Eurocódigo 2: Proyecto de estructuras de hormigón. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para la edificación (UNE-EN 1992-1-1)*. Madrid.
- Carreteras, D. G. (2003). *Recomendaciones para el proyecto de puentes mixtos para carreteras RPX-95*. Madrid: Ministerio de Fomento. Centro de Publicaciones.
- Cavabolo. (16 de Junio de 2009). *El metro secreto de Nueva York*. Obtenido de cavabolo.com: <http://www.cavabolo.com/2009/06/el-metro-secreto-de-nueva-york.html>
- Civil, A. F. (2013). *Bétons fibres á ultra-hautes performances*. Francia.
- Dini, A. (14 de Marzo de 2022). *Acero y hormigón, hormigón y acero. La paradoja del estructurista*. Obtenido de International Business School: <https://eiposgrados.com/blog-ingenieros/hormigon-y-acero/>
- Fomento, M. d. (2011). *Instrucción de Acero Estructural - EAE*. Madrid, España.
- KLM. (2024). *Tipos de aviones*. Obtenido de klm.es: <https://www.klm.es/information/travel-class-extra-options/aircraft-types/boeing-787-9#specifications>
- Leybold. (s.f.). *Leybold Hispánica Online Shop*. Obtenido de Sogevac SV 300 B: <https://www.leyboldproducts.es/productos/bombas-de-vacio-selladas-con-aceite/sogevac-neo-d/sogevac-b/bombas/583/sogevac-sv-300-b?countryswitch=ES>
- López, J. (Enero de 2021). Impulso de los estándares a Hyperloop. *La revista de la normalización española*(32).
- López, R. (28 de Octubre de 2021). *Dónde se encuentran las instalaciones siderúrgicas en España*. Obtenido de reciclajeslopez.com: <https://reciclajeslopez.com/donde-se-encuentran-las-instalaciones-siderurgicas-en-espana/>
- Ministerio de Transportes, M. y. (2021 de Septiembre de 2021). Obtenido de Dirección General de Carreteras: <https://www.mitma.gob.es/carreteras>
- Museros, P., Lázaro, C., Pinazo, B., & S., M. (2021). Key aspects in the analysis and design of hyperloop infrastructure under static, dynamic and thermal loads. *Engineering structures*, 29, pág. 112177.
- Musk, E. (2013). *Hyperloop Alpha*. Hawthorne, California.
- Palau, E. J. (4 de Mayo de 2015). *Blog del Máster oficial de Ciudad y Urbanismo*. Obtenido de Universitat Oberta de Catalunya: <https://blogs.uoc.edu/ciudad/alta-velocidad-ferroviaria-en-espana-y-japon/>
- Pérez, R. (20 de Febrero de 2024). El sector del acero en Europa como palanca de la descarbonización global. *VIAempresa*.
- Ràfols, S. C. (31 de Enero de 2024). *¿Cuántos kg de CO2 generas en tu día a día? Transporte, alimentación y energía*. Obtenido de ZeroConsulting: <https://blog.zeroconsulting.com/huella-de-carbono-ejemplos-cuotidianos>



- Renfe. (2024). *Alta velocidad, un caso de éxito*. Obtenido de renfe.com:  
<https://www.renfe.com/es/es/grupo-renfe/sociedades/renfe-viajeros/viajeros-conocenos/alta-velocidad>
- Sostenible, M. d. (14 de Noviembre de 2023). *España se posiciona como uno de los países con la alta velocidad ferroviaria más eficiente del mundo*. Obtenido de es.movilidad: <https://esmovilidad.transportes.gob.es/node/1357>
- Sostenible, M. d. (14 de Noviembre de 2023). *España se posiciona como uno de los países con la alta velocidad ferroviaria más eficientes del mundo*. Obtenido de es.movilidad: <https://esmovilidad.transportes.gob.es/node/1357>
- Sostenible, M. d. (2024). *Portal del Observatorio del Transporte y la Logística en Españaa*. Obtenido de otle.transportes.gov.es:  
<https://otle.transportes.gob.es/#:~:text=Transporte%20por%20carretera%3A%2097.916%20accidentes,mar%C3%ADtimo%3A%207.392%20emergencias%20en%202022>
- Torroja, I. d. (2007). *Instrucción del instituto Eduardo Torroja para tubos de hormigón armado o pretensado*. Madrid, España: Gráficas/85.



