



Universidad
Zaragoza

TRABAJO FIN DE GRADO

Urban MonoCab: Diseño e Ingeniería estructural básica de un vehículo autónomo monocabina, para circuitos cerrados en núcleos urbanos.

Urban MonoCab: Design and basic structural engineering of an autonomous single-cab vehicle in urban centers.

Autor:

Esther Ciriano Fernández

Directores:

María Solá Laguens

David Ranz Angulo

Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura

2025

Abstract

El presente proyecto recoge la concepción y desarrollo de un vehículo autónomo, monocabina y eléctrico.

El diseño de este vehículo se centra en el factor estructural y estético, con el objetivo final de conseguir una óptima relación entre el peso, la seguridad y la eficiencia del conjunto. También abarca el estudio y elección de los materiales, con la decisión final de emplear materiales compuestos como la fibra de vidrio (GFRP) y de carbono (CFRP), junto con espuma PET como núcleo del material.

Como referencias reales se toman vehículos en funcionamiento que presentan similitudes sólidas como el minibús de 2getthere o el tranvía zaragozano Urbos de CAF. Para concluir la validez del diseño se realizan los cálculos pertinentes, a través de un proceso iterativo de diseño-cálculo-mejora, hasta la obtención de parámetros lo suficientemente buenos.

A partir de la estructura obtenida se desarrolla el diseño estético con aires de modernidad y cercanía. Para ello, se analiza la historia tanto del entorno de aplicación para conseguir un diseño completamente integrado sin olvidar la necesidad de que sea apto para tener un gran potencial de escalabilidad.

Los resultados muestran una significativa reducción del peso respecto a las estructura empleadas en la actualidad, hecho que ayuda enormemente a la agenda 2030 con la eficiencia energética y el avance en transporte dentro de entornos urbanos.

ÍNDICE

0. Introducción	6
0.1 Contexto	7
0.1.1 Proyecto	7
0.1.2 SEGULA.....	7
0.2 Antecedentes.....	7
0.3 Objetivos Proyecto	8
0.4 Alcance y contexto técnico	9
0.5 Incertidumbres y Dificultades técnicas	9
0.6 Factor innovador	11
0.7 Factor medioambiental	11
0.8 Planificación.....	12
1. Estudios iniciales	14
1.1 Entorno.....	15
1.2 Estudio del arte de vehículos actuales.....	15
1.2.1 Locomotoras	16
1.2.2 Tranvías.....	16
1.2.3 Vehículos autónomos	17
1.2.4 Vehículos ferroviarios de bajo peso.....	18
1.3 Sistemas eléctricos	19
1.3.1 Normativa aplicable	21
1.4 Conclusiones fase 1.	23
2. Alternativas estructurales	25
2.1 Introducción.....	26
2.2 Dimensionamiento y distribución de cargas.	26
2.3 Distribución de las cargas.	28
2.4 Apoyos.....	29

2.5	Definición de alternativas	30
2.5.1	Materiales	31
2.5.2	Estructura metálica.	31
2.5.3	Estructura híbrida.....	34
2.5.4	Estructura en composites	37
2.6	Análisis de resultados	53
2.6.1	Fabricación y ensamblado.	55
3.	<i>Apariencia visual</i>	56
3.1	Introducción.....	57
3.2	Desarrollo final.....	59
3.3	Conclusiones fase III	62
4.	<i>Imagen corporativa</i>	63
4.1	Imagen corporativa	64
4.1.1	Nombre	64
4.1.2	Manual de marca	64
4.1.3	Versión a una tinta	67
4.1.4	Versión en negativo.....	67
4.1.5	Usos indebidos	68
4.2	Renders	69
5.	<i>Conclusiones finales</i>	73
5.1	Conclusiones del proyecto.....	74
5.1	Posibles vías de estudio y proyección de futuro.....	74
5.2	Lecciones aprendidas	75
6.	<i>Bibliografía</i>	76

Anexos

- 1. Estudios preliminares***
- 2. Dimensionamiento de cargas***
- 3. Materiales***
- 4. Alternativas estructurales***
- 5. Fabricación y ensamblado***
- 6. Aspecto visual***
- 7. Imagen corporativa***

0. INTRODUCCIÓN

0.1 Contexto

0.1.1 Proyecto

Este proyecto se engloba dentro de los proyectos de I+D de la empresa Segula Tecnologías Zaragoza. Dicho proyecto es consecuencia de la realización de prácticas laborales en la empresa orientadas al proyecto dentro del departamento de I+D dentro del área de interiorismo.

El proyecto tendrá una duración aproximada de 4 meses, invirtiendo por lo tanto un total de 640 horas de trabajo.

El proyecto busca la consecución de un vehículo monocabina eléctrico autónomo que permita la descongestión de los núcleos urbanos saturados en grandes ciudades. Objetivo que se debe conseguir sin agravar el nivel de polución actual de dichos núcleos.

0.1.2 SEGULA

Segula Tecnologías es una consultoría de ingeniería con presencia mundial, presta servicios a diversos sectores de actividad como la aeronáutica, automoción, naval, ferrocarril, energía e industria. Segula Tecnologías se fundó en Francia en 1985 y actualmente está presente en 28 países, con más de 140 sedes y más de 12.000 empleados.

En España, Segula Tecnologías está presente desde 2002 y actualmente cuenta con 12 oficinas en diferentes ciudades españolas que dan trabajo a más de 600 profesionales en diferentes campos.

Segula Technologies Zaragoza es una de las oficinas de Segula Tecnologías en España. Está especializada en el sector del ferrocarril trabajando con las empresas constructoras de dicho sector: CAF, Alstom, Stadler y Talgo entre otras, realizando tanto trabajos de asistencia técnica como proyectos “llave en mano”. Segula Tecnologías Zaragoza trabaja en proyectos ferroviarios que abarcan las áreas de: estructuras, interiorismo, instalaciones eléctricas, instalaciones mecánicas, bujes y utillajes.

La innovación es uno de los valores principales de Segula Tecnologías, realiza más de 200 proyectos de investigación e innovación al año de cualquier sector en los que opera, en colaboración con polos competitivos, instituciones académicas o centros de investigación.

0.2 Antecedentes

El presente proyecto nace a raíz de no existir una solución que consiga una mayor fluidez en las zonas de mayor afluencia de núcleos urbanos. Esto es debido a que las líneas establecidas de transporte público no generan una vía directa de cohesión entre los puntos de interés en ciudades de gran congestión. Esta situación es provocada por las limitaciones del transporte público actual, algunas de estas son.

- Imposibilidad física de los tranvías actuales de circular por calles muy estrechas debido a sus dimensiones.

- Irregularidad de frecuencia de autobuses por la congestión del tráfico
- Inexistencia de ruta única de metro que conecte los puntos de interés de la urbe.

A parte de esto, se desarrolló un proyecto anterior cuyo alcance era el dimensionamiento energético de un vehículo monocabina autónomo 100% eléctrico. Lo que condicionará el dimensionamiento físico del coche final.

Es por esto, que sus conclusiones y resolución de cálculos serán tomados como referencia y base para el desarrollo del concepto físico de dicho vehículo.

Capacidad		
Ocupantes (personas)	Ud.	22,00
Dimensionamiento		
Longitud	mm	6044,00
Anchura		2104,00
Altura		2784,00
Distancia al suelo		410,00
Altura en el interior del vehículo		2000,00
Distancia entre ejes		3700,00
Distancia entre ruedas del mismo eje		1580,00
Diámetro de rueda		590,00
Área frontal	m ²	5,85
Pesos		
Tara (Peso en vacío)	Kg	6317,00
Masa Máxima Autorizada (con carga)		8077,00

Tabla 1. Resumen dimensiones y parámetros condicionantes del diseño (Sancho, 2024).

0.3 Objetivos Proyecto

El objetivo final del proyecto es impulsar la red de transporte urbano a través de la incorporación de una flota de pequeños vehículos que conecten puntos de interés de las ciudades ya que son las que se encuentran en mayor grado de saturación. Como consecuencia directa se pretende conseguir la descongestión de dichas zonas ayudando a la fluidez de circulación y tránsito.

Este objetivo final se desglosa en hitos u objetivos técnicos, cuyo desarrollo completo se resolverá en la obtención del diseño estructural y estético del vehículo. Estos hitos son:

- Dimensionamiento aproximado y listado de los sistemas a introducir
- Comprobación de gálibos y normativas aplicables
- Cálculo estructural
- Elección de materiales
- Diseño de la estética exterior
- Obtención de una propuesta final con potencial de implementación

Un objetivo derivado del diseño de este concepto es la aceptación de algo tan novedoso por el público general.

0.4 Alcance y contexto técnico

El alcance de este proyecto abarca, como se ha mencionado anteriormente, el dimensionamiento físico y diseño estético exterior del vehículo. Esto conlleva el listado y ubicación de los sistemas empleados para el funcionamiento básico del coche.

También es objeto del proyecto el cálculo estructural del cuerpo principal del vehículo; con la consiguiente selección de materiales según la opción de mayor viabilidad atendiendo a factores de funcionalidad, protección y economía.

No es objeto del proyecto la concreción en detalle de las características técnicas de los sistemas eléctricos y/o electrónicos ni el diseño del interior del vehículo ni estética ni funcionalmente.

0.5 Incertidumbres y Dificultades técnicas

La problemática principal reside en la inexistencia de un vehículo en circulación de condiciones similares, por lo que las referencias son escasas; más aún en España debido a que es más débil tecnológicamente que países como Japón o China cuyo avance en transporte y tecnología es mayor.

Esto trae una serie de incertidumbres, ya que no hay normativas concretas respecto a vehículos autónomos de nivel 5 puesto que en España a día de hoy solo se ha desarrollado hasta nivel 3. Esto no hace otra cosa que dificultar su diseño y entorpecer sus posibilidades. Siguiendo con las normativas, en lo referente a resistencia y esfuerzos, a nivel nacional no existe normativa concreta ya que solo la hay de aplicación a materiales metálicos; por lo que podemos tomar estimaciones, pero no valores de total veracidad al tener que ser aplicados en fibras y materiales plásticos.

Además, la limitación en los materiales debido a los pesos y normativas que rigen el diseño de material rodante también supone una limitación en su potencial estético.

Por ello, este proyecto plantea el diseño de un vehículo cuya implementación será a largo plazo ya que se prevé que en Europa se tarde mínimo 5 años en regular la conducción autónoma y se empiecen a probar vehículos de estas características (DGT, 2024).

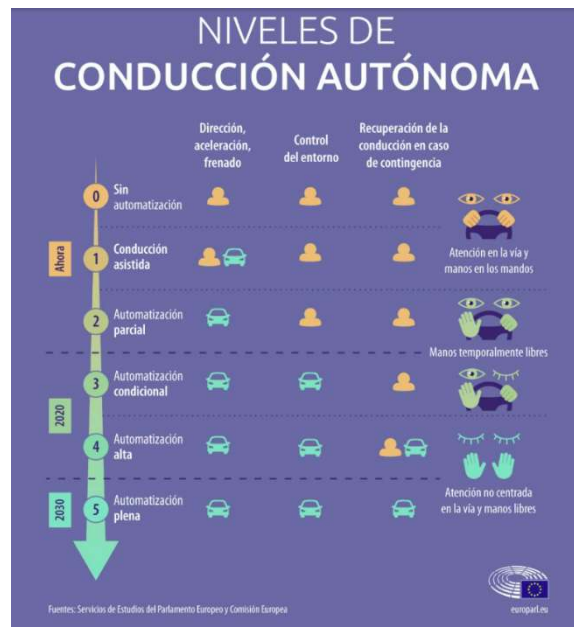


Figura 1. Evolución de la conducción autónoma en territorio europeo.

Por otro lado, cabe mencionar que tampoco existe en Europa un vehículo en circulación fabricado mayoritariamente en composites, por lo que supone un obstáculo más en la concepción de esta nueva propuesta.

El marco de normativas de trenes ligeros y tranvías es estricto y está formado por normativa europea (EN) e internacional (ISO).

Una de las exigencias mayores está constituida por la UNE-EN 45545 estableciendo la normativa para fuego, humos y gases tóxicos; por lo que afecta al uso de determinados materiales y limita las posibilidades a aquellos que no resulten deficientes bajo su criterio o puedan ser tratados para no serlo.

Así como los materiales metálicos siguen una normativa consolidada, los materiales compuestos, por su carácter novedoso, no tienen normas completamente asentadas sino guías por lo que se deben reiterar los ensayos específicos para evidenciar su seguridad y eficiencia.

0.6 Factor innovador

Es una realidad que innovaciones de amplia envergadura como es la propuesta que se desarrolla en este proyecto evoca, en general, sentimientos escépticos en los usuarios.

Hoy en día existe miedo y rechazo hacia los vehículos de conducción autónoma debido, en una gran parte, a no tener bajo control el movimiento de un vehículo que se mueve a una velocidad a la que un accidente podría resultar mortal, tanto para sus integrantes como para los viandantes de su entorno.

Este miedo por parte de los usuarios es desembocado por la falta de información y la incertidumbre que esto supone, sobre productos nuevos que carecen de antecedentes conocidos y/o con renombre.

Sin embargo, este escepticismo podría verse atenuado si consideramos que un vehículo del ámbito ferroviario sigue una trayectoria fija, sea autónomo o no, por lo que el nivel de peligrosidad percibido por el usuario sería menor que en el caso de un vehículo de libre circulación.



Figura 2. Vehículo con autonomía nivel 3 apto para la circulación en España (Santiago Casero, 2024).

0.7 Factor medioambiental

La necesidad real del impulso de proyectos sostenibles en núcleos urbanos queda evidenciada por la excesiva contaminación de dichos entornos. Para nuestro caso particular, basta con observar la nube de polución que envuelve Barcelona, apreciable a simple vista desde fuera de la ciudad.

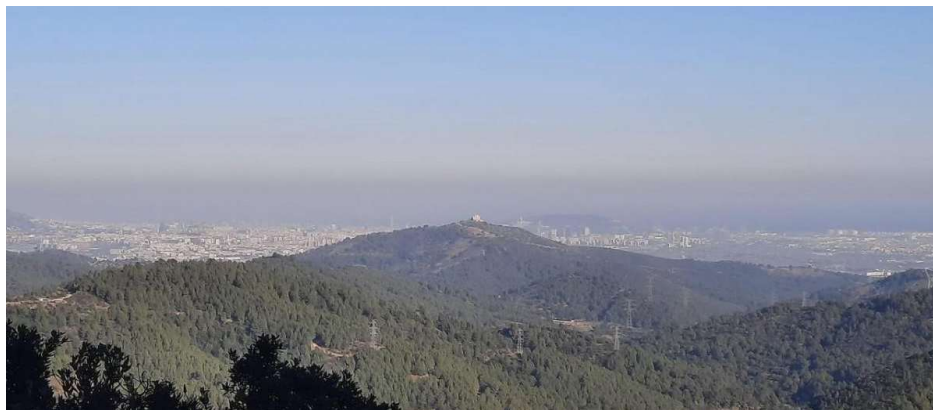


Figura 3. Vista de la nube de contaminación sobre Barcelona.

La mayor contribución a la acción por el clima de este proyecto reside principalmente en dos factores:

- **Reducción de peso del vehículo:** lo que se traduce en minimizar las emisiones de CO₂, resultado de su circulación.
- **Impulso de vehículos eléctricos:** frenando el uso de combustibles fósiles y, una vez más, reduciendo la emisión de gases contaminantes, entre ellos, el CO₂.

Más allá de la mejora de la fluidez de circulación y tránsito, en este proyecto también se considera como objetivo de gran importancia contribuir a las políticas de medioambiente y la agenda de 2030 a favor de una sociedad más eficiente energéticamente y ciudades más limpias.



Figura 4. Objetivos de Desarrollo Sostenible correspondientes a la agenda de 2030.

La actividad de este proyecto impulsa, principalmente, los objetivos (Welcome to the United Nations, 2022)

- 9. Industria, innovación e infraestructura.
- 11. Ciudades y comunidades sostenibles.
- 12. Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles.
- 13. Acción por el clima.

0.8 Planificación

- **FASE I: Estudios preliminares**

Investigación de la problemática, entorno de aplicación, normativa vigente, entre otros factores bajo los que se rige el diseño del coche.

- **FASE II: Diseño estructural**

Definición, dimensionamiento y cálculo de la estructura que validen su viabilidad de implementación, bajo las condiciones particulares de funcionamiento de este proyecto.

• FASE III: Diseño estético

Desarrollo del valor estético, con la consiguiente elección de acabados necesarios para el correcto funcionamiento y durabilidad del vehículo sujeto a normativa.

• FASE IV: Conclusiones finales

Análisis y reflexión sobre el trabajo realizado e identificación de posibles vías futuras susceptibles a estudio.

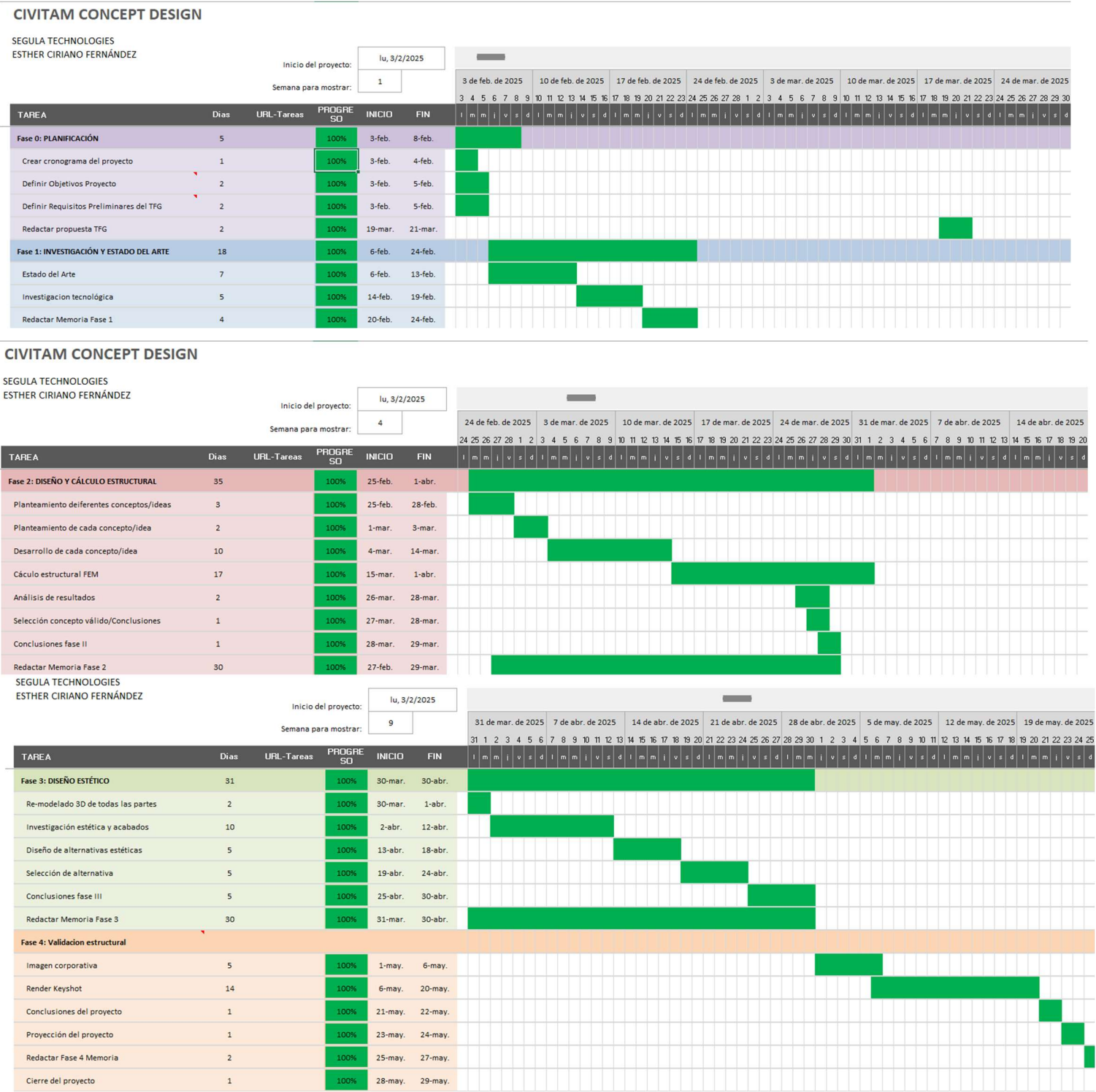


Figura 5. Cronograma general del proyecto.

1. ESTUDIOS INICIALES

1.1 Entorno

El vehículo a desarrollar está pensado para dar solución al problema del congestionamiento del tráfico, así como reducir el impacto medioambiental del mismo en núcleos urbanos europeos.

Como hemos mencionado anteriormente en el apartado de antecedentes el proyecto antecesor al tratado en este documento ubica las mediciones en la ciudad de Barcelona, por lo que con el objetivo de conseguir un vehículo lo más realista posible acorde con sus conclusiones nuestro emplazamiento y entorno de aplicación también será dicha ciudad.



Figura 6. Diseño del recorrido del vehículo monocabina (Indicador en azul el inicio y fin de línea) (Sancho, 2024).

Para más información de los apartados anteriormente citados consultar el anexo 1.

1.2 Estudio del arte de vehículos actuales

En la actualidad existen multitud de tipologías de vehículos destinadas a la circulación tanto de mercancías como de pasajeros. Es por esto, que se realiza un análisis de los mismos con el objetivo de concluir cual encaja mejor con los requisitos de este proyecto en vistas de coger referencias lo más aproximadas y realistas posibles para el desarrollo de este proyecto.

1.2.1 Locomotoras

La locomotora europea se caracteriza por su carrocería de sección constante en toda su longitud, además de disponer del pasillo de tránsito para mantenimiento en la zona central de la misa, por lo que la accesibilidad a los sistemas se da desde el interior del vehículo. Aunque, con el objetivo de facilitar la accesibilidad, suelen ubicar pequeñas puertas en puntos críticos que necesitan mayor control o comodidad de manipulación.

Además, esta la tipología más estéticamente cercana al objetivo que buscamos.



Figura 7. Locomotora Clase 99 de Stadler para GB Railfreight (Stadler, 2023).

1.2.2 Tranvías

Los tranvías son los vehículos que mayores similitudes presentan frente a nuestra propuesta de vehículo, es por esto que muchas de las referencias tendrán su origen en este modelo de transporte.



Figura 8. Tranvía de Barcelona de Tram.

Además, en vistas de justificar el potencial de la propuesta se ha realizado una comparativa del tranvía frente a los dos transportes públicos de mayor uso hoy en día, el autobús y el metro.

En esta comparativa, resultada ganador el tranvía con características tan determinantes como las citadas a continuación:

- Mejor accesibilidad y menor consumo energético que el metro.
- Menor ruido y mayor fiabilidad en sus tiempos de llegada.

1.2.3 Vehículos autónomos

Lo más semejante a nuestra idea de proyecto que existe en la actualidad es el ART en China, como un autobús – tranvía autónomo, aunque de momento existe la obligatoriedad de que el chófer vaya en el vehículo durante su actividad (La Vanguardia, 2023).

El principio de funcionamiento se basa en un sistema de sensores que detectan y siguen las líneas blancas trazadas en la carretera en contraposición al color oscuro propio del asfalto y capaces de evitar posibles obstáculos gracias a su capacidad de recalcular la ruta.



Figura 9. Tranvía autónomo ART (Autonomous Rail Rapid Transit), en China (CRRC, 2024).

En el proyecto que compone parte de los antecedentes de este se toma como referencia para los cálculos el vehículo autónomo de 2getthere (2getthere, n.d.). Un minibús para el transporte de pequeños grupos de pasajeros, teniendo en cuenta su confort y experiencia, al servirse de su capacidad bidireccional para mejorar la fluidez de subida y bajada de usuarios mediante su óptima colocación en las estaciones de parada.



Figura 10. GRT minibús eléctrico autónomo de carretera GRT de 2getthere.

En países con vías ferroviarias inutilizadas se han empezado a implementar y desarrollar alternativas al transporte privado, como el caso del Taxi Monocab Owl en Alemania (Monocab, n.d.), pensado para

dar alternativas de transporte a zonas rurales con comunicación deficiente. Este nuevo vehículo es autónomo y utiliza un sistema de estabilización giroscópico al emplear un solo carril de una vía estándar ferroviaria; de modo que permita la circulación de dos coches, en dirección opuesta por la misma vía.



Figura 11. Taxi Monocab Owl en Alemania.

Para mayor información de los apartados anteriormente citados consultar el anexo 1.

1.2.4 Vehículos ferroviarios de bajo peso

A parte de este proyecto, se están desarrollando estudios para la introducción de composites en la estructura principal de vehículos ferroviarios de alta velocidad conducida por la empresa ferroviaria española Talgo(García, 2024a), (García, 2024b).



Figura 12. Prototipo en composites para ensayos a escala.

Por otro lado, la empresa China CRRC, ha implementado este 2025 el primer metro para el desplazamiento de pasajeros íntegramente de fibra de carbono reforzada con polímeros o CFRP. Con esta innovación se garantiza la fiabilidad de la fibra de carbono como material estructural principal en material ferroviario.

Con el uso de fibra se ha reducido el peso total del tren, tanto de los coches como de los bogies, en un 11% y el consumo en un 7%, es decir, cada CETROVO 1.0 reduce las emisiones en 130 toneladas de CO₂ al año (CRRC, 2025).

Además, este innovador material permite la reducción de vibraciones y aumento el aislamiento y resistencia; aumentando la comodidad y seguridad del pasajero.



Figura 13. Tren de larga distancia Cetrovo 1.0.

1.3 Sistemas eléctricos

En vistas de realizar el dimensionamiento lo más fiel a la realidad posible, se han seleccionado los sistemas más voluminosos que interfieren en el funcionamiento y seguridad del coche. Además, para tener cierto margen, se ha cogido el volumen cúbico mínimo que podría albergar cada conjunto. Las dimensiones de los sistemas tenidos en cuenta son los siguientes:

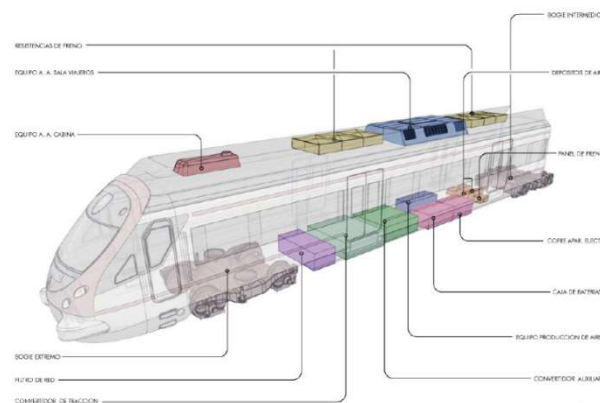


Figura 14. Volúmenes y disposición aproximados de los sistemas fundamentales de un tranvía.

Bogie		
Largo	mm	800
Ancho		800
Alto		2350
Peso	kg	3200
Sistema de climatización		
Largo	mm	193
Ancho		2940
Alto		1890
Peso	kg	214
Arenero		
Largo	mm	300
Ancho		580
Alto		230
Peso unitario	kg	35
Peso total		140
Sistema de carga eléctrico		
Largo	mm	484
Ancho		1200
Alto		490
Peso	kg	338
Bobina de inducción		
Largo	mm	760
Ancho		760

Alto		140
Peso	kg	100
Cajón eléctrico		
Largo	mm	2000
Ancho		350
Alto		1600
Peso	kg	140

Tabla 2. Tabla resumen de dimensiones y peso de los sistemas considerados.

Dentro del cálculo FEM estos parámetros serán los que generen los esfuerzo que la estructura del coche debe soportar, con el correspondiente factor de seguridad, como mínimo para ser considerara apta.

Para mayor información consultar el anexo 2, dimensionamiento de cargas.

1.3.1 Normativa aplicable

1.3.1.1 Gálibo

Para facilitar la comprensión del siguiente apartado a continuación definimos el término **gálibo** como el contorno que no debe ser invadido de dentro hacia afuera por un vehículo.

En aras de evitar la colisión del coche con la infraestructura construida tanto en el entorno como para su circulación, las dimensiones del mismo deben entrar dentro de los límites definidos por el galibo según el tamaño y el ancho de vía por el que el material rodante circule.

La normativa que rige las dimensiones de este caso es la EN 15273-3 2013 + A1:2017 correspondiente a tranvías y trenes ligeros. Si bien no recoge dimensiones concretas, si impone la metodología de diseño así como las tolerancias de estructura. (CEN (Comité Europeo de Normalización), 2017)

Sin embargo y debido a la compartición de tramos de línea con el tranvía de Barcelona, se toman dichas medidas como referencia para el diseño dimensional de a caja del vehículo. El vehículo que opera en la actualidad en la ciudad española es el Alstom Citadis serie 302 (Listadotrenes.es, 2025).

Las dimensiones de la caja del tranvía de Barcelona son las siguientes:

- 2650 mm de anchura (Alstom, 2012).
- 3300mm de altura (All Pyrenees, 2019).

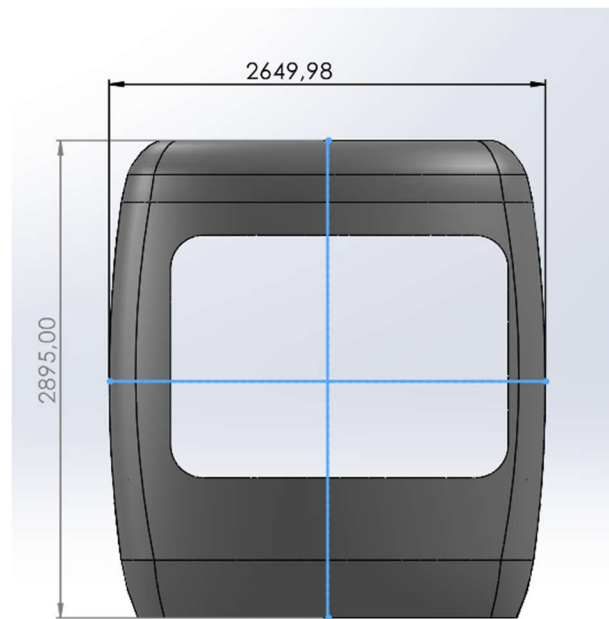


Figura 15. Dimensiones generales en alzado del vehículo.

Estas medidas están ampliamente aceptadas tanto en España como Europa ya que otros tranvías comparten anchos y altos de caja similares; ejemplo de ello es el caso del tranvía de Barcelona.

Al cumplir con los requisitos dimensionales del vehículo con el que comparte vía, quedan validadas las dimensiones estructurales del coche.

1.3.1.2 Pasaje

El pasaje va a ser un parámetro crucial ya que va a ser la masa variable y no uniformemente repartida durante la actividad del vehículo. Por otro lado, aunque el vehículo esté pensado para un rango de 20-30 personas, el uso indebido del coche y por motivos de seguridad la estructura debe diseñarse para una mayor ocupación en aras de garantizar la seguridad y el correcto servicio del vehículo incluso en condiciones de uso indebido por parte del usuario.

Es por esto que las dimensiones estructurales se definen con un valor de 8 usuarios por metro cuadrado del suelo del vehículo.

Para el cálculo de la ocupación del coche, se toma como referencia la guía de cálculo de capacidad de viajeros de CAF para Renfe, disponible en los archivos internos de SEGULA Technologies.

Condiciones de carga	Cercanías / Metro / Tranvías	Alta velocidad / Largo recorrido / Trenes regionales
CCN (Condiciones de Carga Normal)	4 v/m ²	0 v/m ²
CCM (Condiciones de Carga Máxima)	6 v/m ²	2 v/m ²
CCE (Condiciones de Carga Excepcional)	8 v/m ²	4 v/m ²

Tabla 3. Número de personas por metro cuadrado para cada tipo de carga en cada tipo de vehículo (CAF, n.d.).

1.3.1.3 Materiales

La selección de materiales queda determinada bajo la máxima de cumplir con la normativa ferroviaria de fuego y humos, EN 45545-2, velando por la seguridad del pasaje y del medio ambiente.

Por otro lado, respecto a los cálculos FEM se deberá seguir el criterio de la flecha máxima aceptable en referencia a la deformación del material. Para elementos estructurales de carácter crítico como es la estructura principal atiende a la relación $L/500$, siendo L la distancia ente los apoyos. (EUROCOMP Design Code and Handbook: Structural Design of Polymer Composites for Civil Engineering Structures, 1996)(Researchgate.Net, n.d.), (researchgate.net, s.f.),(Eurocódigo 3. Proyectos de Estructuras de Acero, 1993).

1.4 Conclusiones fase 1.

A raíz de esta primera fase de investigación se evidencia que, un elemento tan crítico como es la estructura del material rodante, tiene gran potencial de mejora.

Esta mejora no se centra en su valor estético, sino en sus propiedades físicas. Al ser un elemento determinante para el correcto funcionamiento y protección de los vehículos ferroviarios se justifica su elevado peso debido a su fabricación en materiales altamente resistentes, en aras de garantizar la seguridad del pasajero. Sin embargo, con el avance de las tecnologías, y su aplicación en materiales, en la actualidad se ha demostrado la gran eficacia y seguridad de los composites como materiales estructurales. Esta tipología de material, comúnmente utilizada para estructuras secundarias y carrocería, se está haciendo paso en elementos de mayor responsabilidad en los vehículos; su desarrollo se ha debido, en gran parte, a su gran ligereza y resistencia. Teniendo en cuenta esto, en las siguientes fases se tratará de determinar la viabilidad de la introducción de estos materiales en la estructura principal en el material rodante; de modo que se garantice la seguridad del pasajero y se reduzca, de manera contundente, el peso íntegro del vehículo.

Además, la reducción de la masa circulante supondría el aumento de la autonomía de sus baterías o la posibilidad de transportar mayor cantidad de pasajeros, además de garantizar su correcto funcionamiento bajo usos incorrectos del vehículo como podría ser su una ocupación excesiva.

Con todo esto, surgen una serie de EDP's que deberá cumplir, como mínimo, el vehículo resultante:

- Alto componente estético
- Bajo impacto urbanístico
- Bidireccional
- Capacidad para compartir tramos con el tranvía de Barcelona
- Accesibilidad a sistema para mantenimiento diario
- Accesibilidad al habitáculo
- Bajo peso
- Capacidad de giro para radios reducidos

2. ALTERNATIVAS ESTRUCTURALES

2.1 Introducción

Como resultado de la fase de investigación se concluye que el mayor potencial de innovación para el material rodante reside en la reducción de peso, más en concreto, de sus elementos críticos y, por tanto, de mayor peso como, por ejemplo, la estructura principal y la carrocería.

Es por esto que se plantean diferentes alternativas de diseño las cuales, siendo estéticamente semejantes, difieren en la combinación de materiales y procesos de fabricación destinados a su producción; de modo que las alternativas resultantes tienen asociados diferentes factores estéticos, formales, físicos y económicos. En base a estos criterios se realiza su comparación y elección de la propuesta final.

2.2 Dimensionamiento y distribución de cargas.

Se han seleccionado, dentro de todos los sistemas para el funcionamiento básico de un tren ligero, los de mayor volumen y peso ya que serán los conjuntos decisivos para concluir satisfactoria, o no, la robustez de la estructura.

Además, también se realiza un cálculo aproximado del diseño interior y el pasaje que deber resistir la estructura durante su servicio.

Largo (mm)	3620,00
Alto (mm)	800,00
Ancho (mm)	2351,00

Tabla 4. Dimensiones del conjunto bogie.

Alto (mm)	120,00
Largo (mm)	2270,00
Ancho (mm)	1840,00
Peso(kg)	260,00

Tabla 5. Dimensiones aire acondicionado de referencia.

Alto (mm)	300,00
Largo (mm)	580,00
Ancho (mm)	230,00
Peso unitario (kg)	35,00
Peso conjunto (kg)	140,00

Tabla 6. Medidas del arenero cogido como referencia.

Alto (mm)	484,00
Largo (mm)	1200,00
Ancho (mm)	490,00
Peso (kg)	338,00

Tabla 7. Resumen medidas módulo Batería LTO de Max 8C de ABB.

Largo (mm)	760,00
Alto (mm)	760,00
Ancho (mm)	140,00
Pes (kg)	100,00

Tabla 8. Dimensiones aproximadas de la bobina de inducción utilizada.

Largo (mm)	2000,00
Alto (mm)	350,00
Ancho (mm)	1600,00
Peso (kg)	140,00

Tabla 9. Dimensionamiento del cajón eléctrico.

Para más información sobre el dimensionamiento de los conjuntos consultar el anexo 2 “dimensionamiento de cargas”.

Pasaje (ud)	Peso unitario (kg)	Peso total pasaje (kg)
117	80	9331

Tabla 10. Cálculo de la carga generada por el pasaje.

Para más información sobre el pasaje consultar anexo 7 “diseño de alternativas estructurales”.

2.3 Distribución de las cargas.

La distribución no se realiza de manera arbitraria, sino atendiendo criterios de eficiencia y estabilidad con el objetivo de conseguir una distribución equilibrada y lo más homogénea posible en cuanto a peso y volumen se refiere.

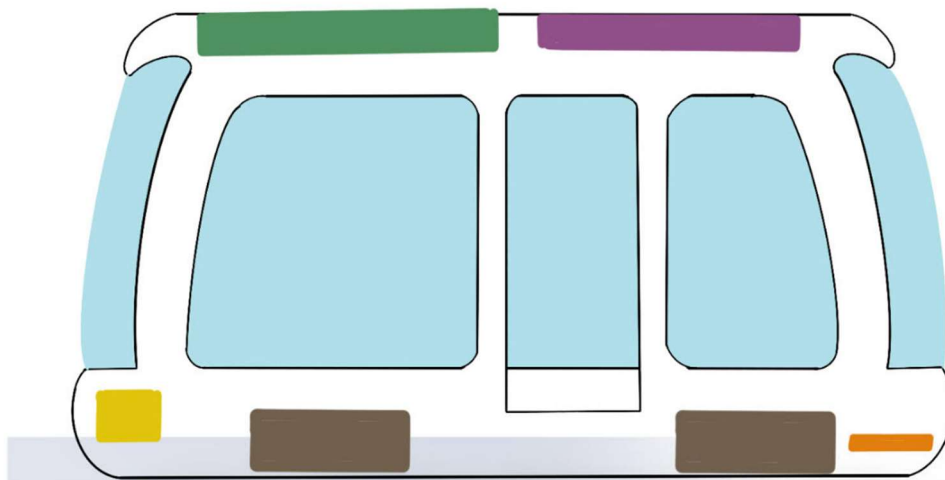


Figura 16. Vista en perfil del área transversal del coche con los volúmenes de los sistemas básicos dimensionados. En gris el coche, en marrón los conjuntos de los bogies, en naranja la bobina de inducción, en amarillo el conjunto de la batería, en verde el cajón eléctrico y en morado el sistema de climatización.

Esto es así ya que, por las limitaciones que supone tener la línea de suelo a 35 cm de altura, los sistemas calculados, en su mayoría, no pueden ubicarse bajo bastidor. Por lo que la batería se ubica sobre la estructura del suelo y la bobina bajo bastidor, debido a su bajo espesor, pero en el cabecero opuesto, ya que de ubicarla en el centro se estaría debilitando la zona más susceptible a fallo al ser la más alejada de los puntos de apoyo.

Por otro lado, los conjuntos de mayores dimensiones se ubicarán sobre el techo del coche de modo que se “escondan” a la percepción del usuario y no interfieran en el área habitable del vehículo ni a la estética general.

Esta distribución se cumplirá independientemente de la alternativa diseñada, para conseguir una comparación bajo las mismas condiciones de esfuerzo.

Distribución de pesos común a las 3 alternativas		
Elemento	Peso (kg)	Fuerza (N/m ²)
Techo		
Sistema de climatización interior	168,00	1648,08
Cajón eléctrico	140,00	1373,40
Cableado e iluminación	200,00	1962,00
Bajo-bastidor		
Módulo batería	338,00	3315,78
Bobina	100,00	981,00
Areneros	140,00	1373,40
Sobresuelo		
Diseño interior	200,00	1962,00
Usuarios	9360,00	91821,60
Marcos laterales		
Ventanas grandes	1035,22	10155,51
Ventanas pequeñas	581,80	5707,46
Puertas	798,34	7831,72
Cabeceros		
Parabrisas	1794,68	17605,81

Tabla 11. Resumen pesos y fuerzas comunes a las tres alternativas para el cálculo estructural.

2.4 Apoyos

En el modelado empleando elementos finitos resulta crucial la identificación de las condiciones de contorno y, más concretamente, en la tipología de los apoyos ya que resulta determinante en los esfuerzos internos y en las deformaciones producidas en la estructura tratada.

En la realidad, el coche no tiene un movimiento completamente solidario a los bogies, sino que hay que considerar cierto movimiento relativo de rotación, traslación y torsión (Segula Technologies, 2024).

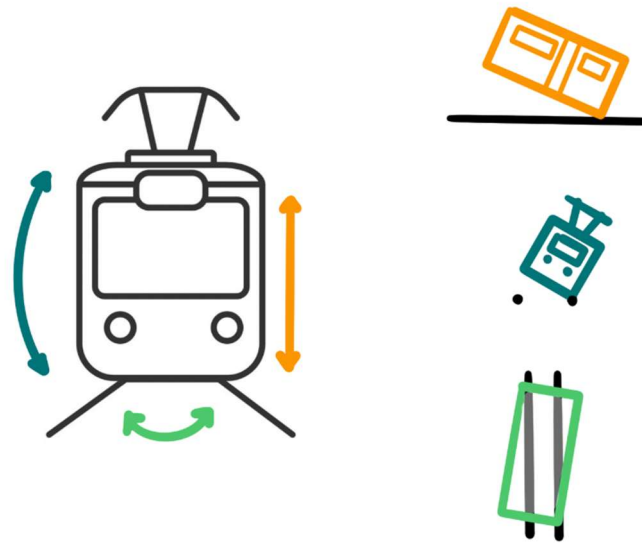


Figura 17. Movimientos relativos de un vagón de tranvía.

En este caso se consideran dos tipos de apoyos, los cuales se explican a continuación:

- Dos apoyos fijos que restringen todos los grados de libertad de movimiento y evitan la traslación y rotación del modelo en exceso.
- Dos apoyos que se encuentran restringidos únicamente en desplazamiento vertical, de modo que permiten el movimiento relativo del vagón respecto a estos puntos de apoyo.

2.5 Definición de alternativas

Con el objetivo de realizar una selección con el mayor grado de objetividad posible, la estructura interna de las diferentes alternativas es diferente, sin embargo, la geometría final exterior, realizada en los tres casos en material compuesto de pieles GFRP y espuma PET, será común a todas las propuestas.

Además, las secciones destinadas a ventanas y parabrisas, así como el material de las mismas es común a los tres diseños planteados.

La variabilidad del material para el diseño depende de los requisitos específicos de cada vehículo, dependiendo si prima el aligeramiento de peso, mayor resistencia, facilidad de mantenimiento y reparación, comodidad del pasajero, entre otros.

Las diferentes alternativas que se plantean en este proyecto quedan definidas por el material empleado en cada una de ellas.

2.5.1 Materiales

Los materiales empleados en las diferentes alternativas son los siguientes:

- **Aluminio 6061-T4.** Para las dos primeras alternativas.
- **GFRP (Glass Fiber Reinforced Plastic).** Para los refuerzos de la última alternativa.
- **Espuma PET.** Como núcleo del material compuesto de la última alternativa.
- **CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic).** Como pieles para el material compuesto de la última alternativa.
- **Vidrio laminado y vidrio templado.** Para las ventanas.

Para la consulta de información más detallada leer el anexo 3.

2.5.2 Estructura metálica.

Para la alternativa en metal se incluyen las superficies que encierran al volumen total del conjunto y los parachoques. Al disponer de un conjunto de superficies cerrado se aprovecha la rigidez general del conjunto.

Sobre estos elementos se apoyará el material compuesto que dará a forma final al vehículo.

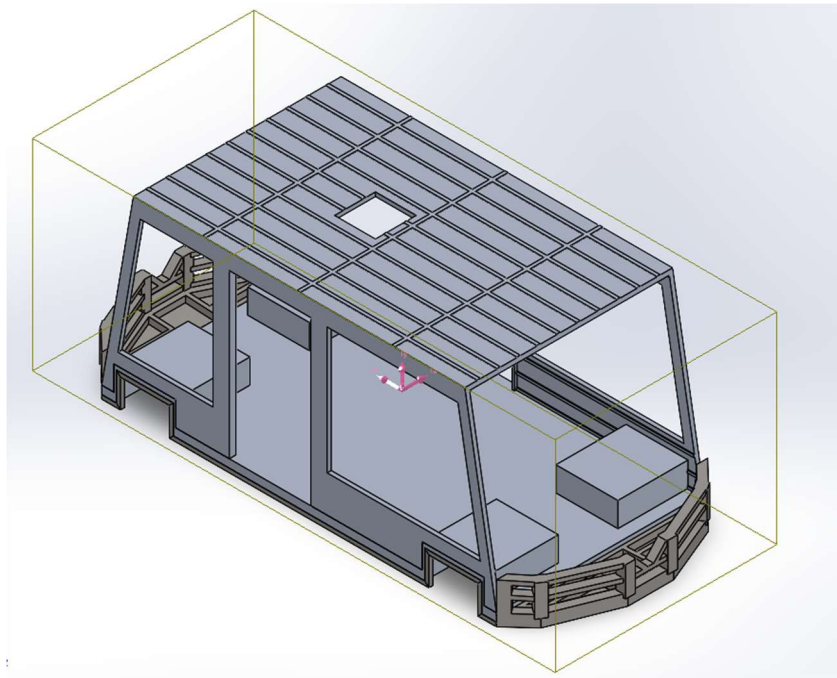


Figura 18. Diseño estructural final de la alternativa metálica.

Se debe tener en cuenta para la interpretación de resultados el Factor de Seguridad a respetar en relación al material empleado en la estructura, en este caso aluminio 6061-T4.

$$\sigma_{VM} \leq \frac{\sigma_{\text{límite}}}{FS} = \frac{275 \text{ MPa}}{2,5} = 110 \text{ MPa}$$

Ecuación 1. Tensión de Von Mises máxima permitida teniendo en cuenta el Factor de Seguridad.

Con esta relación se obtiene que el valor máximo de las tensiones de Von Mises para el conjunto metálico debe ser de 110 MPa.

Los resultados obtenidos del cálculo final para la estructura metálica se exponen a continuación.

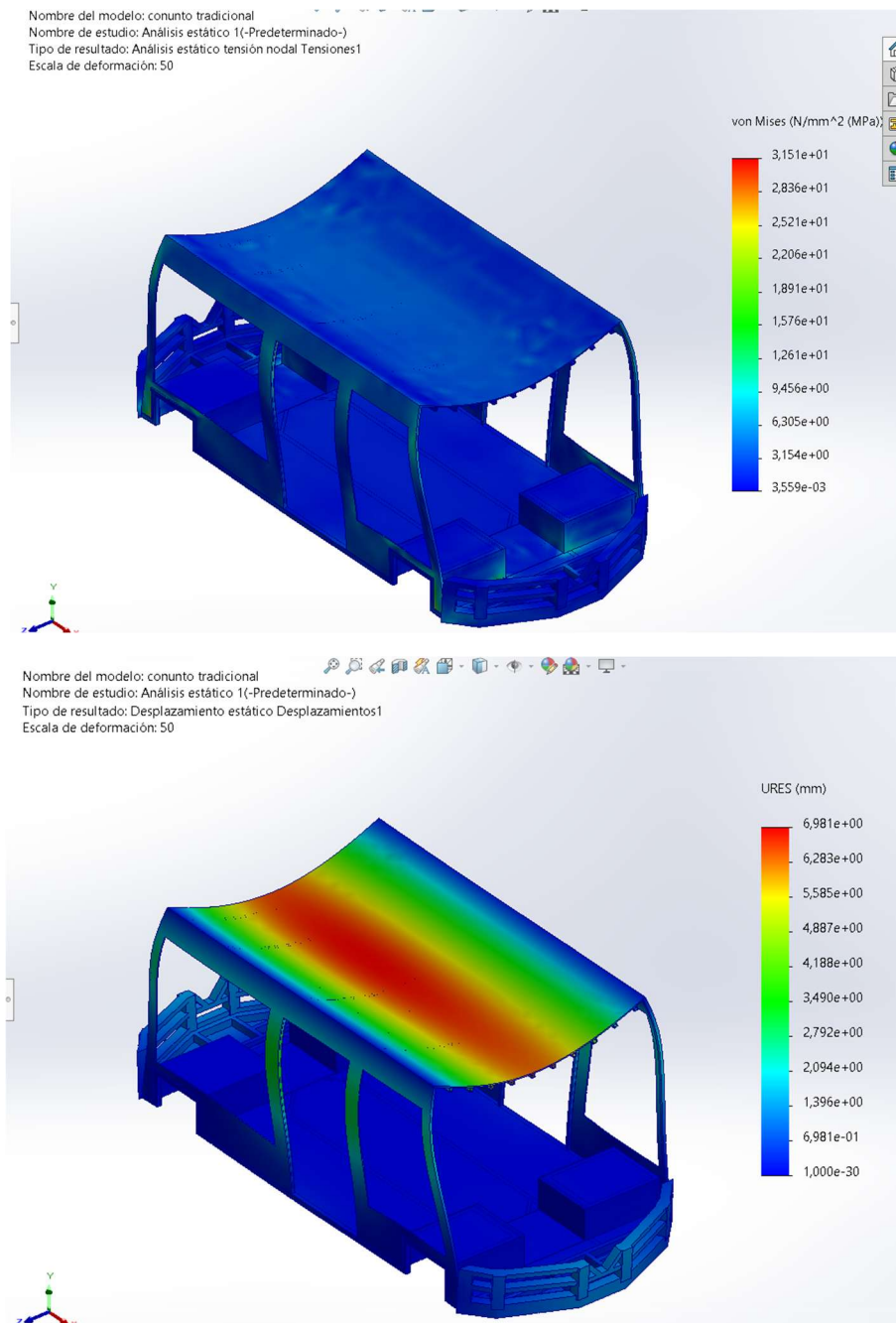


Figura 19 y 20. Resultados de resultados del último análisis estático tensional nodal y de la flecha máxima, con una deformación 50.

Como se puede apreciar el valor de la tensión de Von Mises máxima es mayor a causa de los cambios realizados. Sin embargo, se ha reducido el peso de la estructura considerablemente desde las más de 3 toneladas a 2,5.

Desde un primer acercamiento se observa que la tensión máxima soportada es de 31,51 MPa lo que supone el 28,6% del límite admisible como se ha calculado anteriormente.

Al tratar la **zona superior** se encuentra un valor de tensión menor pese a haber reducido el espesor de las placas, lo que se debe a la reducción del peso en todas las partes del conjunto. En concreto, en la zona más elevada del coche se encuentra, de nuevo, el máximo valor de la tensión soportada, en este caso de 31,51 MPa, mientras que en el resto de la superficie las tensiones se encuentran en el rango de 15 - 31,51 MPa, con los mismos puntos de concentración de tensiones que en el cálculo anterior.

En este cálculo, se tiene en consideración, también, la flecha máxima de deformación de cada zona del conjunto. Para el techo se tiene una distancia entre apoyos de 3987 mm aproximadamente por lo que la flecha máxima admisible es de 12,99 mm según la ecuación 5. Como la deformación de la placa superior es, en el punto más crítico de 6,98 mm se considera, tanto seguro a nivel de valores obtenidos, como cómodo para el usuario.

Para nuestro caso particular $L = 4650$ mm, por lo que aplicando esta ecuación se obtiene una flecha máxima admisible de 15,5 mm.

Cuando se analiza la **zona media** el valor de las tensiones se reduce a un rango entre 8 – 20 MPa, de modo que sigue habiendo buena transmisión de cargas a la base dentro de una deformación máxima de 4 mm, lo que entra dentro del máximo aceptado ya que en este caso la distancia entre puntos de apoyo es de 1900 mm, por lo que puede llegar hasta los 6,33 mm de deformación.

Por último, al observar la **zona inferior** las tensiones permanecen por debajo de los 5 MPa, por lo que es altamente resistente ante los esfuerzos de las cargas aplicadas. Por otro lado, el suelo debe tener una deformación máxima de 9,63 mm ya que los apoyos sobre los bogies se encuentran distanciados 2890 mm. Por esta razón, como los desplazamientos son de 1 mm aproximadamente se considera de muy elevada rigidez estructural.

Masa total (Kg)	2252,4
Materiales	Aluminio 6061

Tabla 12. Tabla resumen características técnicas estructura metálica final

2.5.3 Estructura híbrida

La sección transversal de los perfiles que conforman la estructura son de 100 x 60 mm con un espesor en la zona inferior de 6 mm y la zona superior de 4 mm.

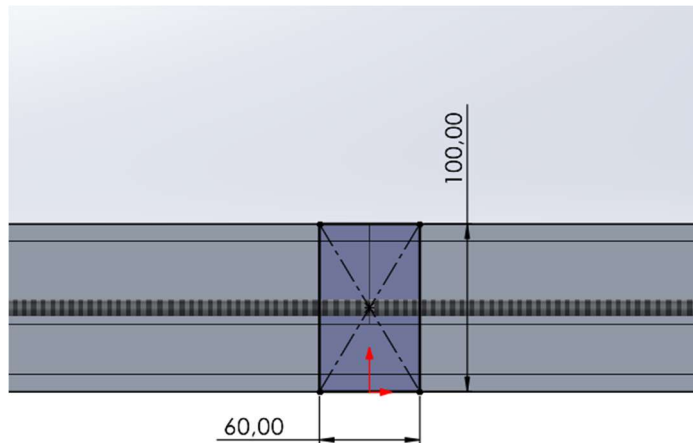


Figura 21. Dimensiones generales de los perfiles de la zona inferior del conjunto.

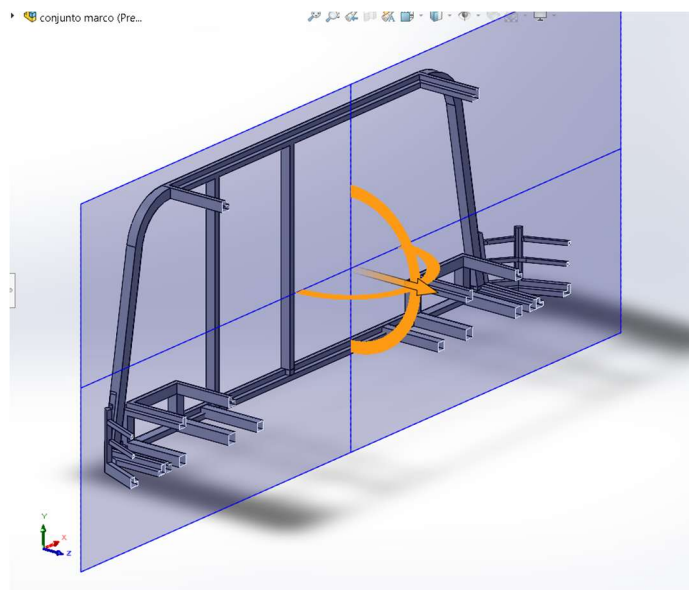


Figura 22. Vista seccionada del conjunto.

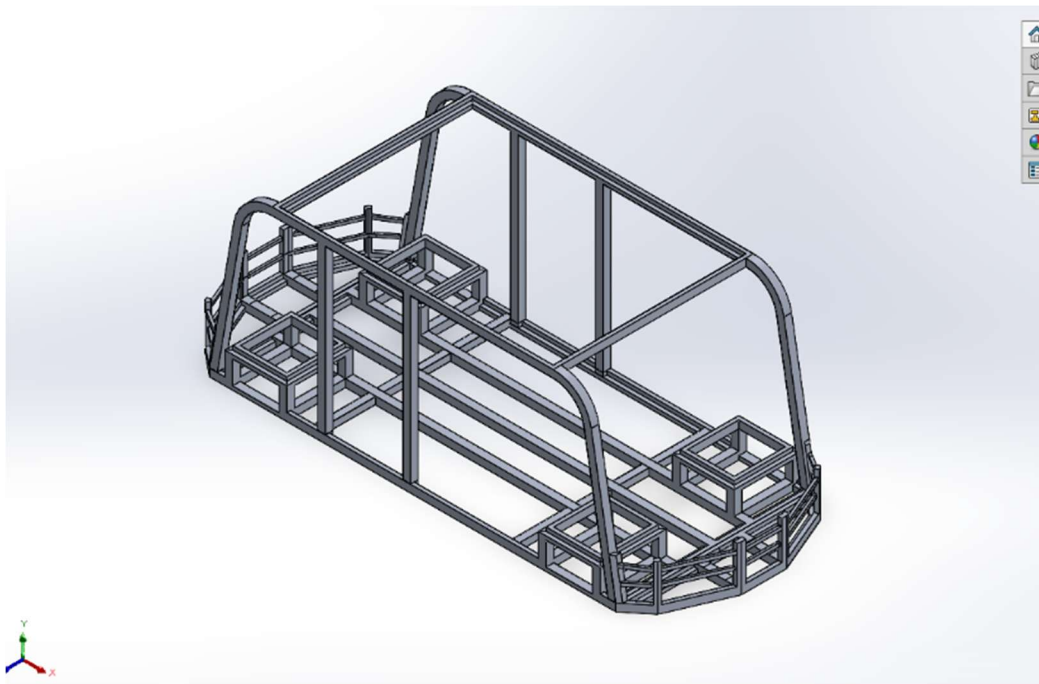
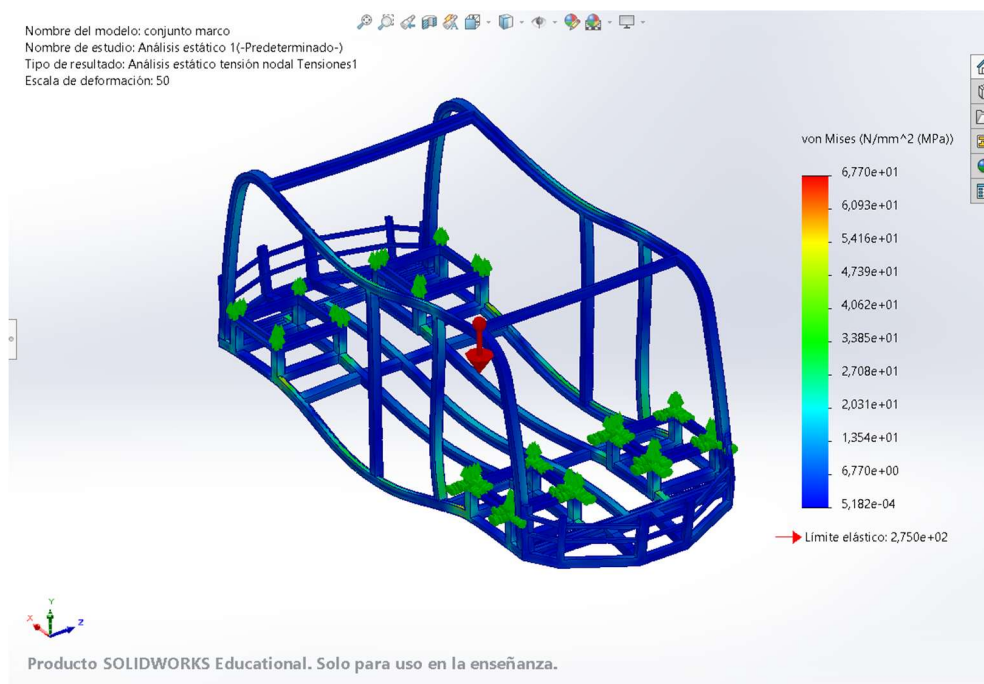


Figura 23. Rediseño de la distribución de los perfiles de la estructura "space frame".

Para esta situación particular, se lleva a cabo el cálculo estructural únicamente del "marco" de aluminio 6061, ya que será el componente que resista los esfuerzos provocados por los pesos tanto del sistema como de la carrocería fabricada en material compuesto con pieles de GFRP y núcleo de espuma PET.

A continuación, se exponen los resultados del cálculo estructural, de nuevo, según el criterio de Von Mises.



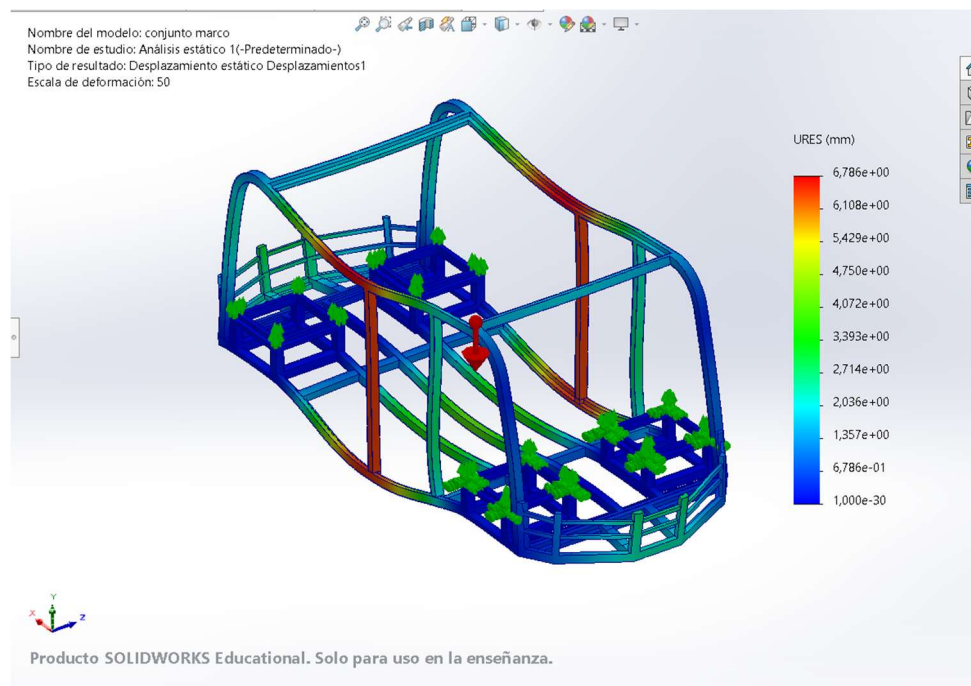


Figura 24 y 25. Resultados tensión de Von Mises y desplazamientos respectivamente con una escala de deformación 50.

, se observa que el valor máximo de la tensión en el conjunto es de 67,7 MPa, es decir, por debajo del límite admisible de 110 MPa. Al ser viable en términos de tensión se realiza la interpretación de los resultados de manera específica también para la deformación por lo que se calculan los valores máximos admisibles para cada zona.

$$f_{admSup} = \frac{4106}{300} = 16,69 \text{ mm}$$

$$f_{admMed} = \frac{2105}{300} = 7,02 \text{ mm}$$

$$f_{admInf} = \frac{2890}{300} = 9,63 \text{ mm}$$

Ecuación 2, 3 y 4. Deformación máxima admisible de la zona superior, media e inferior respectivamente.

En la **zona superior** se dan concentraciones de tensión máximas de 47 MPa, aproximadamente, con un margen amplio respecto al límite admisible ya que supone el 42,73% de este. En cuanto a la deformación máxima de 6,79 mm correspondiente a la zona media del marco superior, siendo inferior a los 13,69 mm admisibles según la ecuación 6.

Respecto a la **zona media** se registran valores de tensión hasta de 40 MPa aproximadamente, es decir, el 36,37% del límite admisible, por lo que no se registran comportamientos plásticos tampoco en esta zona siendo la más susceptible debido a sus escasos refuerzos y sus largas longitudes entre puntos de apoyo. Sin embargo, por esas mismas razones es la zona que más cerca está del límite de deformación admisible ya que, siendo de 7,02 mm como se muestra la ecuación 7, la deformación resultante es de 6,79 mm.

Por último, en la **zona inferior** se observa que se encuentra el máximo valor de la tensión en el conjunto 67,7 MPa, aunque no supone más que el 61,81% dentro del límite admisible por lo que el conjunto presenta comportamiento elástico bajo las cargas definidas. Por otro lado, presenta deformación máximas de 6,786 mm en la zona central de los perfiles longitudinales extremos ya que son los que, estando más alejados de los puntos de apoyo, realizan la transferencia de carga desde la parte superior. Sin embargo, para los perfiles inferiores esta deformación no resulta de carácter crítico como sí lo hacía en la zona media ya que se considera buen comportamiento del material hasta una deformación de 9,63 mm como muestra la ecuación 8 al estar sus puntos de apoyo más alejados.

En cuanto a la torsión y el cortante, se observa por la deformada que, pese a existir pandeo, este es moderado por lo que se puede concluir que tiene suficiente rigidez como para soportar los esfuerzos que se le exigen.

Masa total (kg)	683,04
Materiales	Aluminio 6061-T4

Tabla 13. Tabla resumen de las características principales de la estructura "space frame" final.

2.5.4 Estructura en composites

Esta alternativa es la que más modificaciones sufre, con el objetivo de conseguir la estructura con la relación aspecto visual- resistencia óptima.

En cuanto a la estética se realizan curvaturas en los cabeceros y en los marcos de los mismos para obtener un diseño que rompa con la horizontalidad propia de los medios de transporte convencionales. También se busca que, tanto desde su perspectiva lateral como frontal y trasera, se perciba más redondeado y cercano, restando apariencia pesada al vehículo. Además, se busca una geometría más sencilla en cuanto al ensamblado posterior del conjunto.

Cabe destacar el cumplimiento del diseño de las normativas del diseño interior de tranvías y trenes ligeros ya que, en cierta medida, ha estado influenciado por esto al ser diseñada la estructura de manera simultánea con el interior. El proyecto de interiorismo ha sido llevado a cabo en un TFG independiente.

Ejemplo de ello es la distancia entre la puerta y el bogie más lejano a ella, teniendo que ser una distancia mínima de 1500 mm para la ubicación de una zona para personas con movilidad reducida (European Union Agency for Railways, 2022).

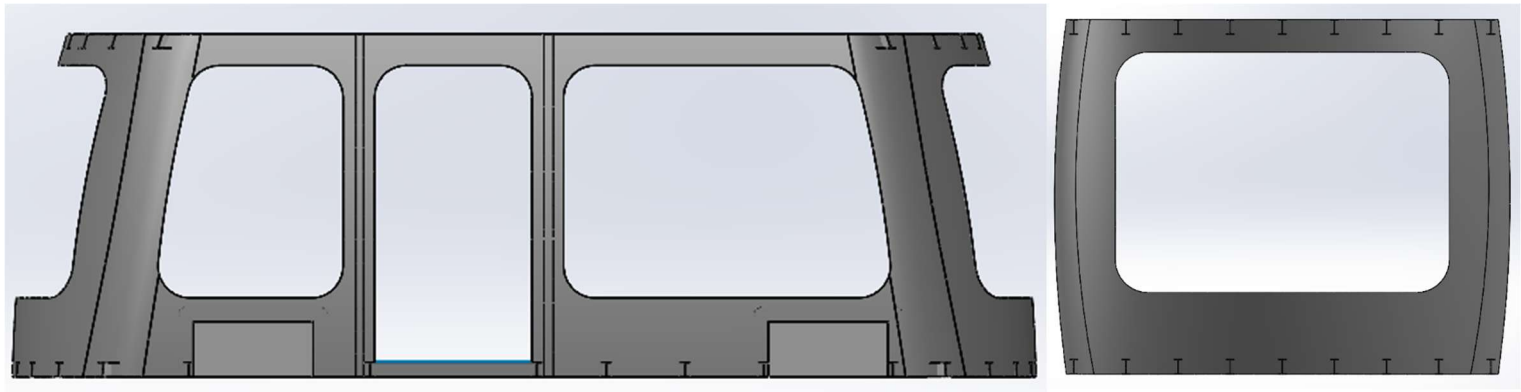


Figura 26. Diseño final de los marcos de los cabeceros desde la vista lateral y frontal / trasera respectivamente.

Se incluyen como refuerzos perfiles con sección transversal “I” tienen ventajas mecánicas respecto a los tradicionales rectangulares. Debido a que al soportar la mayor parte del material que refuerzan con las alas consiguen un momento de inercia máximo (Esther Ciriano, 2021) con menor cantidad de material empleado. Por otro lado, las superficies planas de las alas de los refuerzos permiten una eficaz unión mediante adhesivos o uniones mecánicas con materiales compuestos sin generar tensiones no deseadas (Davies, 2001).

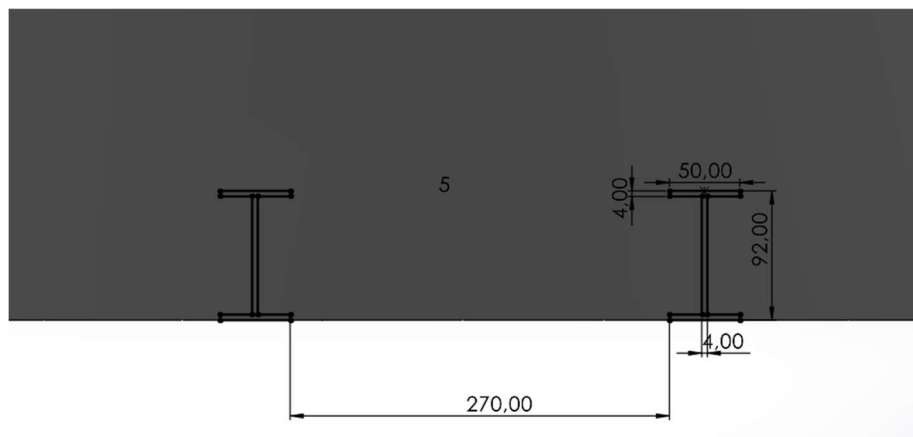


Figura 27. Sección transversal perfiles I longitudinales del suelo.

Al contar con puntos críticos como los cajones bogie, por ser puntos de unión con los sistemas de tracción; y la puerta, ya que uno de sus marcos es el punto más alejado de los elementos de apoyo y sufrirá la mayor afluencia de pasaje al ser la zona de entrada y salida del vehículo. Estos perfiles no se disponen a una distancia regular unos de otros sino que estos perfiles se ubicarán bajo los marcos de las puertas y de dicho cajones para mejorar su resistencia.

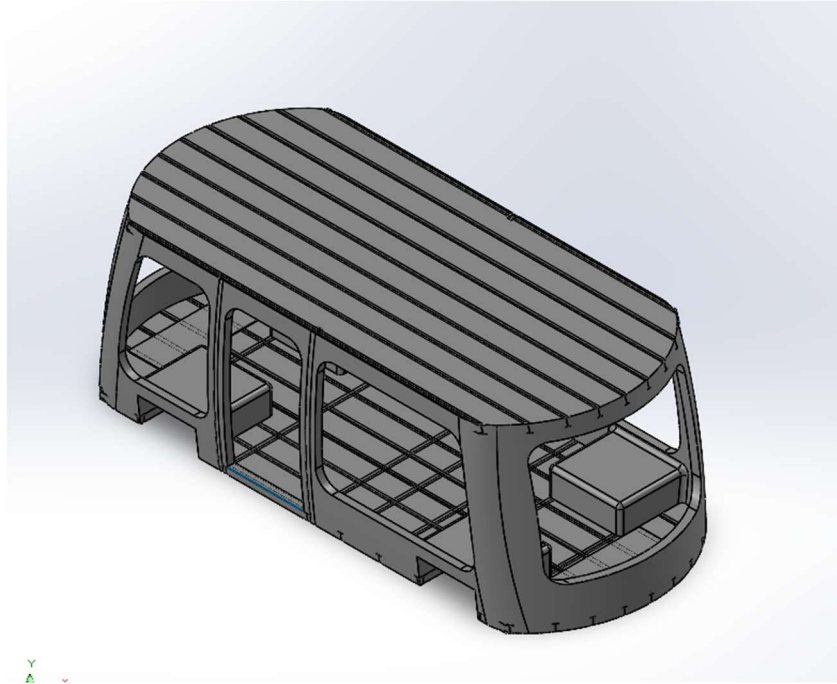
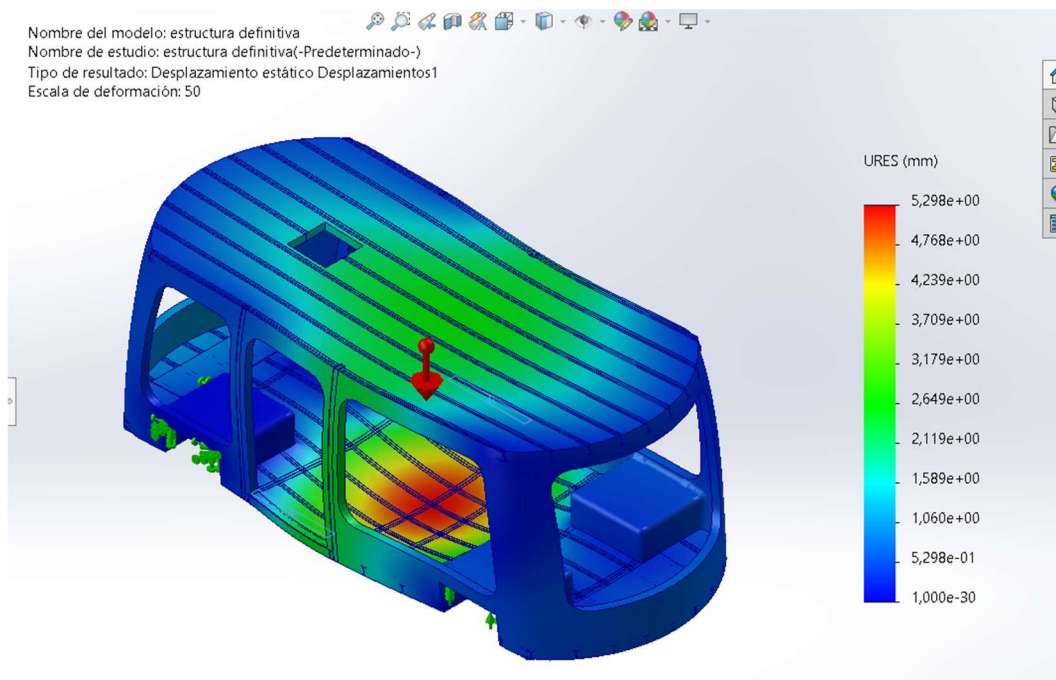
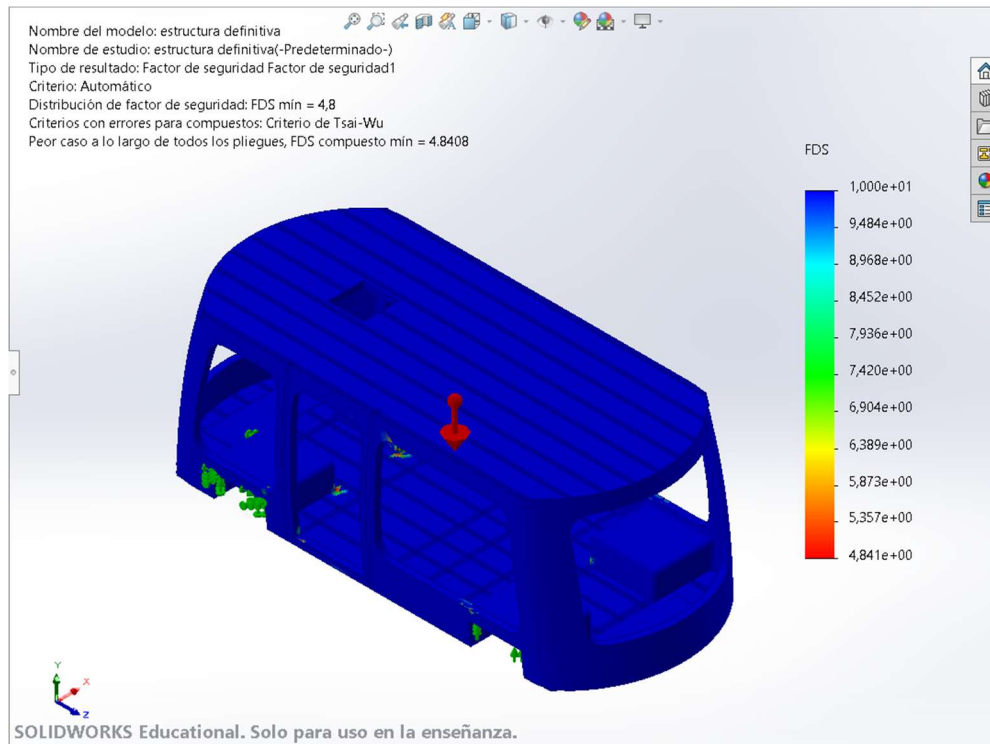


Figura 28. Rediseño de la distribución de perfiles de refuerzo.

Una vez se ha rediseñado el vehículo se realiza el cálculo para comprobar la viabilidad del nuevo diseño.



Figuras 29 y 30. Resultado final del Factor de Seguridad y del desplazamiento respectivamente, con una escala de deformación 50.

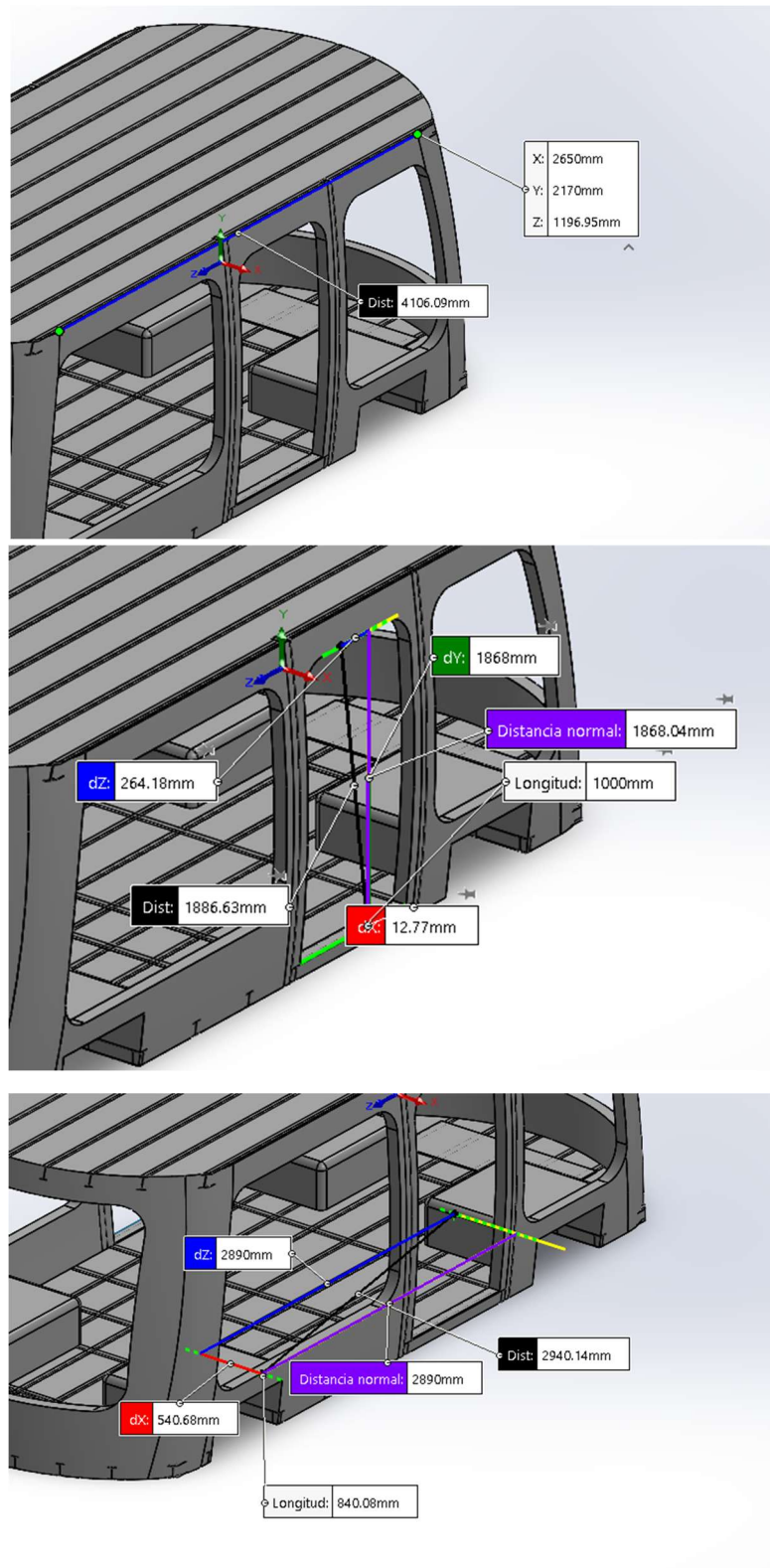


Figura 31, 32 y 33. Distancias entre puntos de apoyo del techo, marcos de puerta y suelo respectivamente.

Al verificar de nuevo el Factor de Seguridad mínimo del conjunto se consigue un valor de 4,84, el cual tiene un buen margen respecto del valor mínimo admisible considerado. Al suplir el requisito mínimo indispensable se pasa el análisis de resultados general.

Al observar la **zona superior** del vehículo se observa un Factor de Seguridad máximo, apoyado en una deformación máxima aproximada de 3,71 mm; valor muy inferior al máximo admisible para la superficie del techo como evidencia la siguiente ecuación:

$$f_{adm.superior} = \frac{4106}{300} = 13,69 \text{ mm}$$

Ecuación 5. Desplazamiento máximo admisible de la zona superior.

Queda un amplio margen respecto del límite del desplazamiento, sin embargo, en aras de velar por el confort del usuario lo más idóneo es evitar el desplazamiento de las diferentes superficies en la medida de lo posible.

En la **zona media** el mayor desplazamiento lo sufre el marco de la puerta que se encuentra más próximo al centro del conjunto ya que se ve arrastrado por el esfuerzo que sufre este. Sin embargo la flecha máxima en esta “columna”, siendo el valor mayor de esta zona, es del orden de 3,79 mm lo que supone el 60,8% del límite.

$$f_{adm.medio} = \frac{1868}{300} = 6,23 \text{ mm}$$

Ecuación 6. Flecha máxima admisible para la zona media del conjunto.

Por lo que se puede concluir que esta zona no es susceptible a rotura bajo los esfuerzos estáticos a los que está sometido el conjunto.

Por último, se analiza la **zona inferior** siendo la que más deformación sufre al soportar esfuerzos tanto por las cargas como por el peso del propio vehículo.

Tras la modificación de distancia entre los bogies, la distancia de apoyo final y, por tanto, la deformación máxima admisible es la calculada a continuación:

$$f_{adm.inferior} = \frac{2890}{300} = 9,63 \text{ mm}$$

Ecuación 7. Flecha máxima admisible en la parte inferior del vehículo.

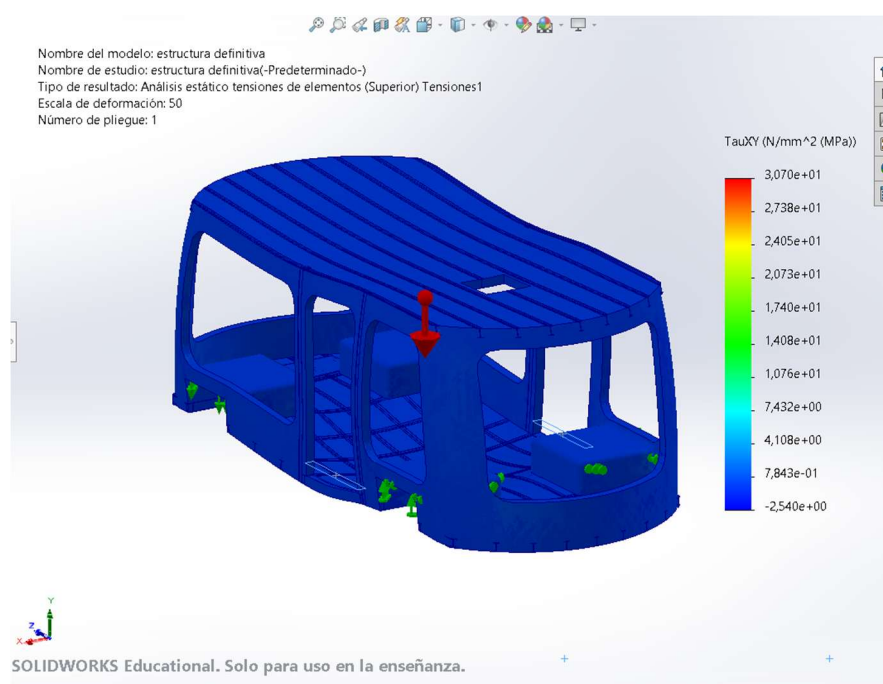
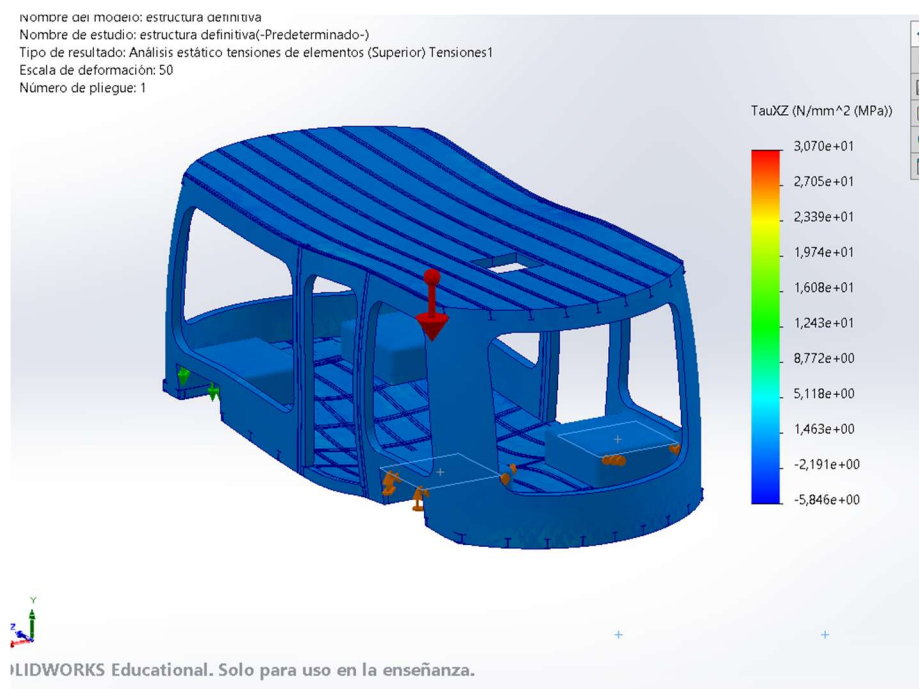
La zona central del suelo es el que mayor deformación sufre al ser el más alejado de los puntos de apoyo. Sin embargo, esta deformación en su cota máxima es de 5,3 mm por lo que es inferior al mínimo considerado, es decir que el conjunto, ni en su zona más solicitada, se comporta de manera plástica y se mantiene dentro de los límites de seguridad tomados como mínimos admisibles.

Si bien es cierto que podría optimizarse más la distribución de los perfiles y de los espesores, al estar en un proyecto con futuras etapas de desarrollo se deja cierto margen para que pueda resistir mayor cantidad de carga sin precisar de rediseño.

Una vez se concluye que cumple los dos requisitos básicos se analizan los esfuerzos de **torsión y cortadura** de modo que se verifique la eficacia total de la estructura.

Para analizar los esfuerzos cortantes se debe tener en cuenta que las cargas tanto como la gravedad siguen la dirección Y y las distancias longitudinales de las diferentes superficies en dirección Z. Por lo que es necesario conocer la tensión en planos YZ, XY y XZ.

Cabe mencionar que el pliegue analizado es el 2, es decir, el núcleo de espuma PET, debido a que en materiales de configuración “sándwich” las pieles son las que soportan los esfuerzos provocados por tensiones normales, mientras que es el núcleo el trasmisor de cortadura entre dichas pieles. Además, de que el PET tiene un módulo cortante (40MPa) muy inferior a los de GFRP y CFRP en cualquiera de sus direcciones. Esto hace que si el fallo en la estructura es por cortadura sea en el núcleo donde se produzca.



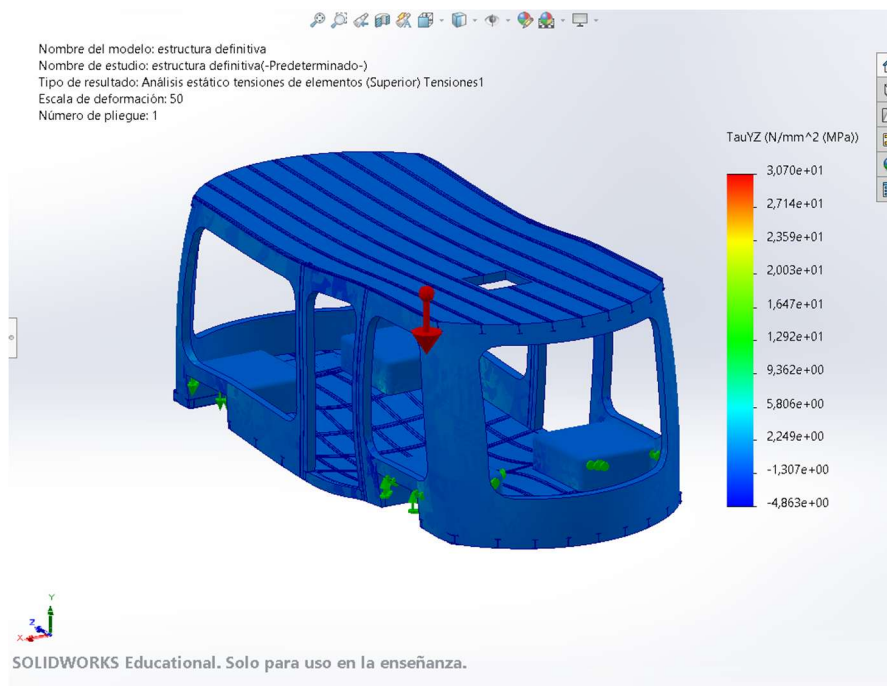


Figura 34, 35 y 36. Esfuerzos de cortadura en los planos XZ, XY y YZ respectivamente.

De manera directa no se puede saber los valores del núcleo, por lo que se genera un corte en la estructura para poder obtener el mayor esfuerzo cortante del punto más solicitado.

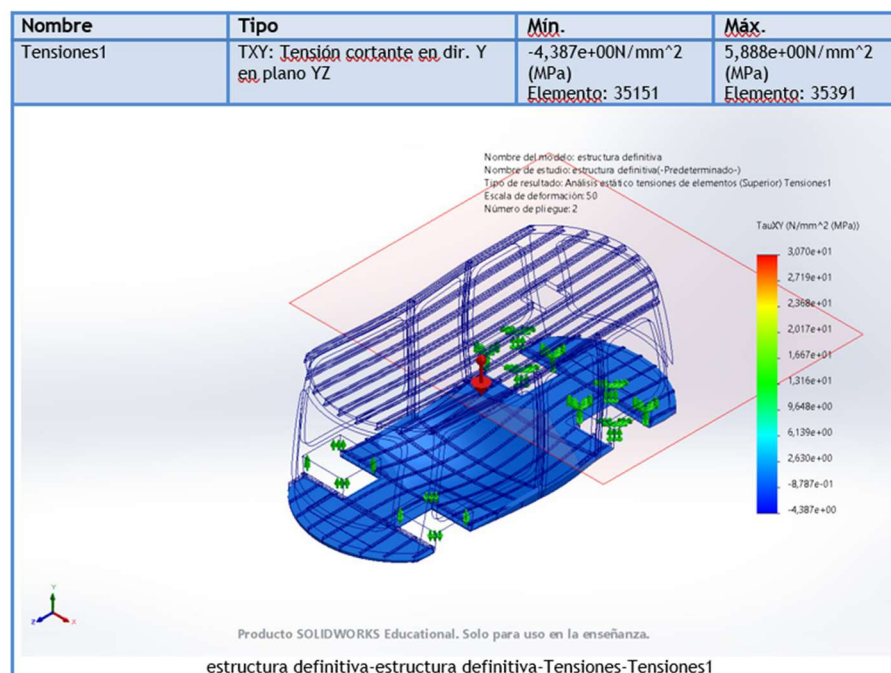


Figura 37. Corte de plano perpendicular a la planta para conocer el máximo valor de cortadura del núcleo.

Con este informe obtenemos una tensión de cortadura máxima de 5,88 MPa. Si calculamos el máximo admisible teniendo en cuenta el Factor de Seguridad considerado obtenemos el siguiente resultado, teniendo en cuenta que el límite de cortadura para el PET es de 40 MPa:

$$\tau_{adm} = \frac{40}{3} = 13,33 \text{ MPa}$$

Ecuación 8. Límite de tensión de cortadura admitido por el núcleo.

El valor máximo obtenido en la zona de mayor solicitud, siendo la zona de los apoyos inferiores, es decir de los bogies, en contacto con el suelo. Se puede concluir que la estructura cumple con los requerimientos. De hecho, el núcleo trabaja al 44% de su capacidad por lo que aún tendría margen de optimización respecto a los grosores de las diferentes capas o con la disminución de la cantidad de perfiles de refuerzo.

Por otro lado, en referencia a los resultados en el caso de las pieles, el límite a cortadura del GFRP en el plano XY (el de menos valor) es de 2500 MPa, siendo que el máximo valor a lo largo de todos los pliegues es del orden de 30 MPa y según el valor mínimo admisible calculado a continuación:

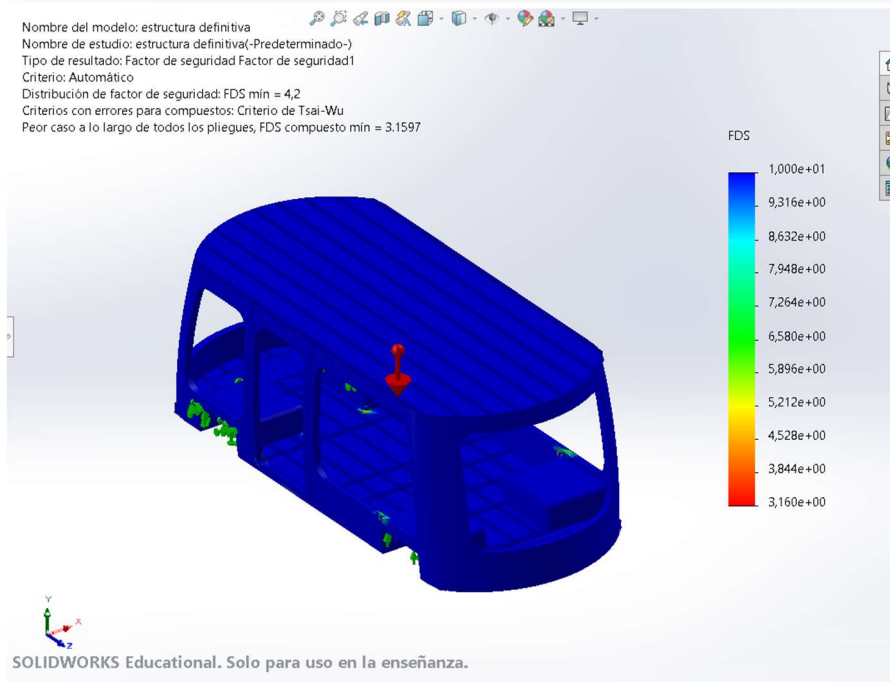
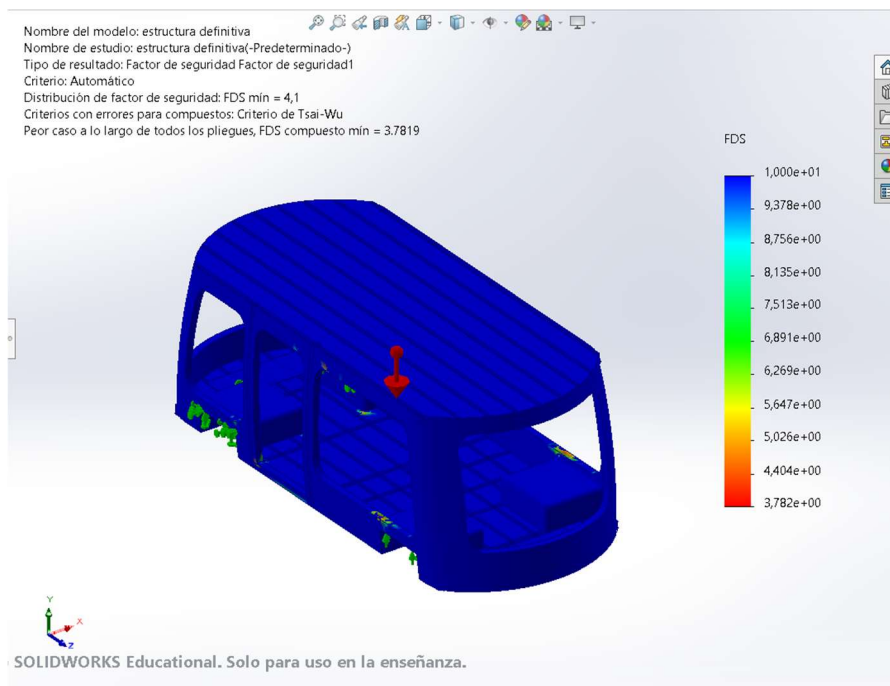
$$\tau_{adm} = \frac{2500}{3} = 833,33 \text{ MPa}$$

Ecuación 9. Límite de tensión de cortadura admitido por las pieles en el plano XY.

Al analizar los valores de las tensiones que generan torsión (plano XZ) se observa que ninguno de los valores sobrepasa los límites admisibles por lo que se puede concluir que la estructura es eficaz ante el momento de torsión generado por las cargas aplicadas.

Se concluye que el conjunto responde de manera positiva, también, a los esfuerzos de cortadura y torsión.

Ante la variedad de posibilidades respecto de la dirección de las fibras del material compuesto se opta por hacer una serie de pruebas que corrobore, o no, su comportamiento óptimo en disposición longitudinal.



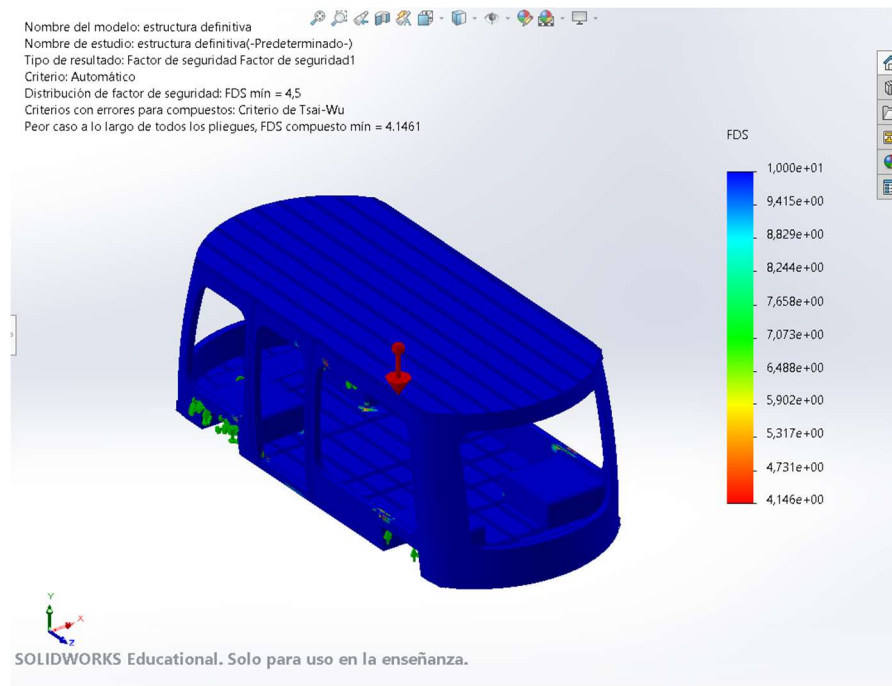


Figura 38, 39 y 40. Cálculo de alternativas con las fibras del GFRP dispuestas a 45º y -45º, 45º y 0º; y 90º y 0º respectivamente.

Como se observa en el valor del FS de las figuras 39, 40 y 41, este valor es de 3,16, 3,48 y 4,15 respectivamente. Teniendo en cuenta el FS = 4,78 conseguido en el caso de las fibras longitudinales queda evidenciado que resulta la alternativa más idónea en cuanto a dirección de las fibras del tejido se refiere.

Con la consecución de la estructura final, se adaptan los diferentes carenados a la última geometría.

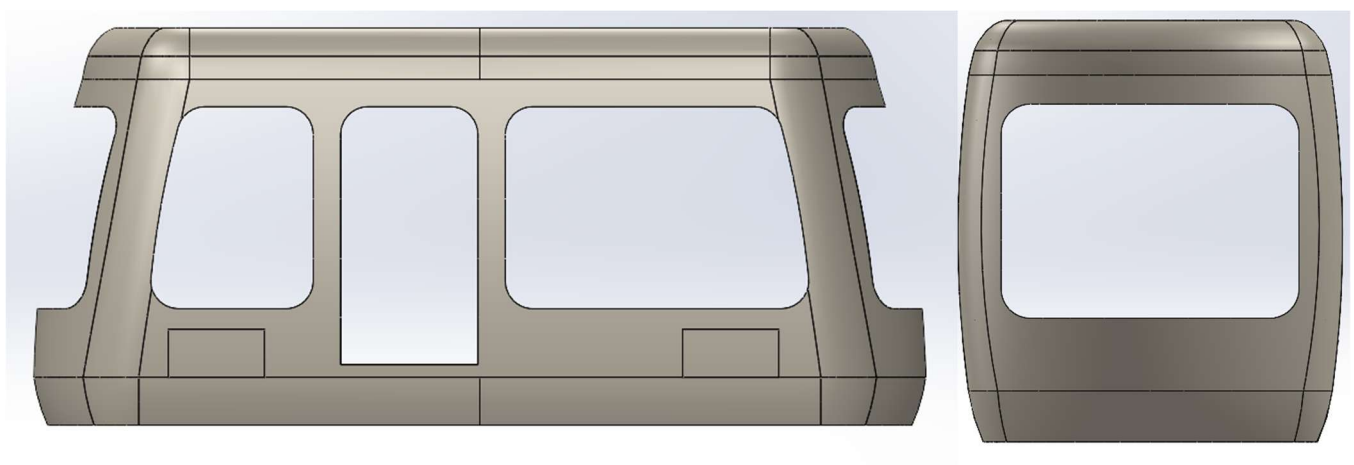


Figura 41. Alzado y vista lateral del diseño final de la estructura con los faldones y acabados.

Masa total (Kg)	2502,37
Materiales	GFRP Espuma PET CFRP

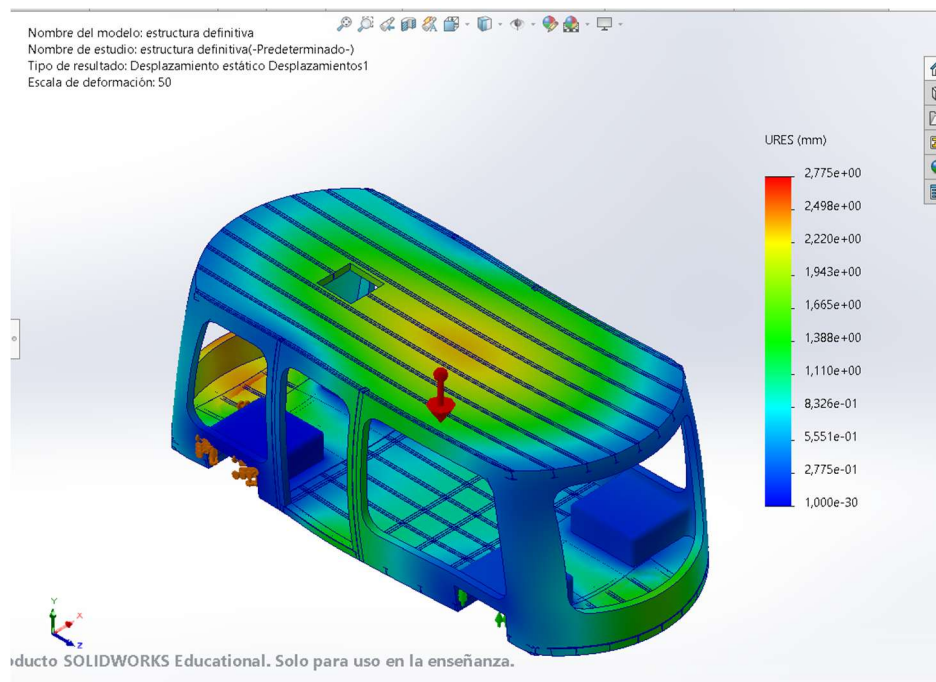
Tabla 14. Tabla resumen de las propiedades principales de la estructura en composites.

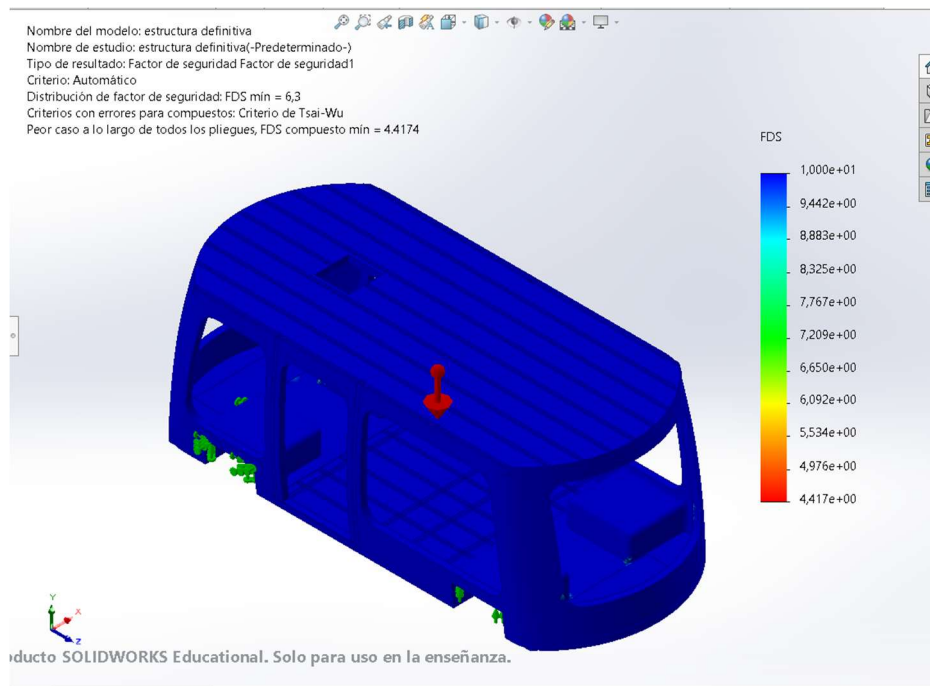
2.5.4.4 Casos de carga para la estructura elegida.

Los cálculos anteriores se han realizado siempre con la carga del pasaje repartida de manera homogénea a lo largo de la superficie del suelo del coche. Sin embargo, es necesario verificar la eficacia de la estructura en situaciones en las que los usuarios estén repartidos de manera irregular ya que debe mantener la rigidez bajo cualquier distribución del pasaje durante su actividad.

Cargas máximas en ambos extremos

Como primera alternativa se desplaza toda la carga del pasaje a ambos extremos del coche dejando el centro del vehículo vacío.





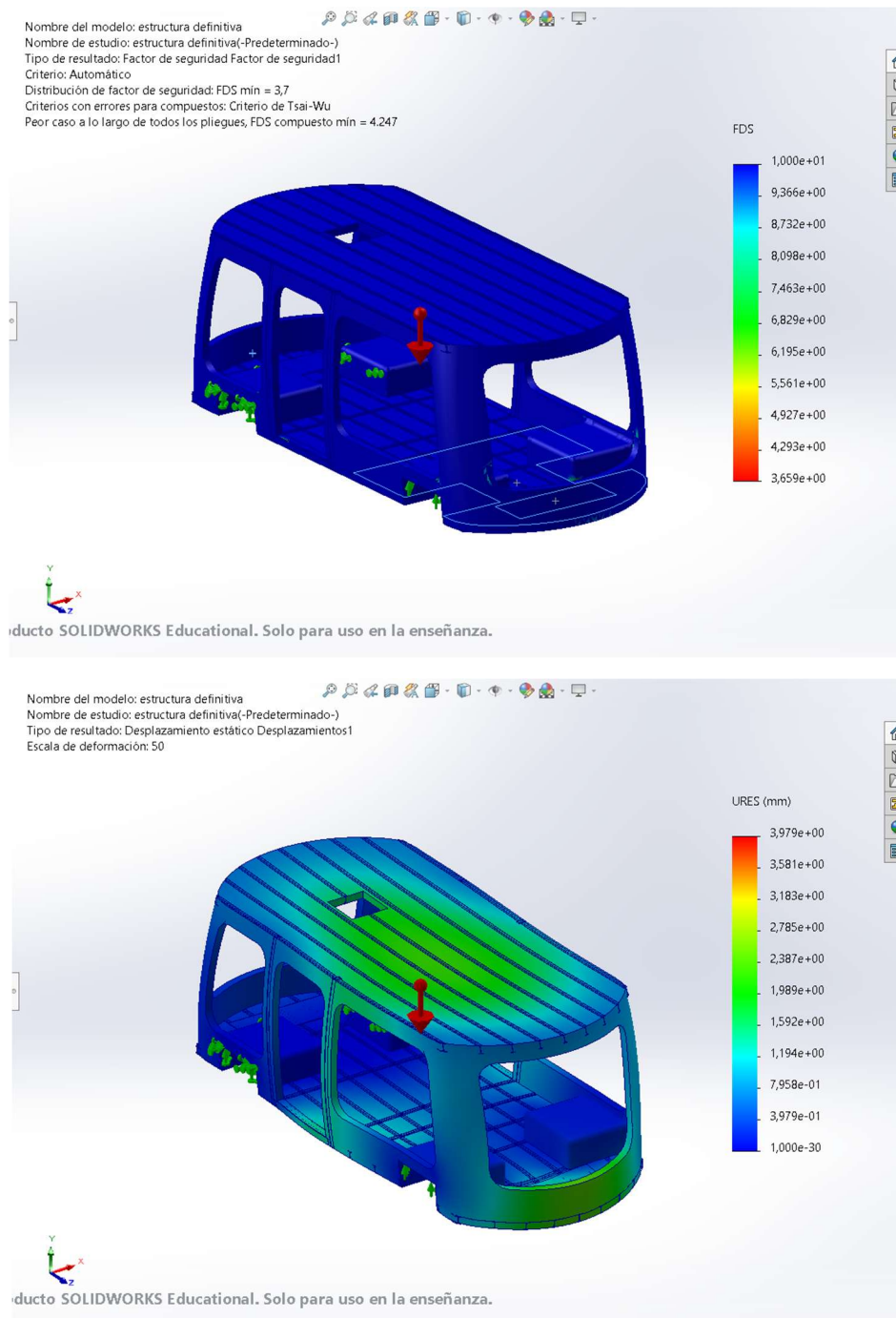
Figuras 42 y 43. Resultado del Factor de Seguridad y los desplazamientos respectivamente, para el caso de carga excepcional en ambos extremos del vehículo.

Como se puede apreciar, el extremo que más sufre es en el que se ubica la batería debido a que es el sistema más pesado que soporta, directamente, el suelo del conjunto. Sin embargo, la flecha máxima del conjunto, localizada precisamente en este extremo, es de 2,78 mm por lo que entra dentro del límite admisible ya que es de 9,63 mm como se ha calculado anteriormente.

Por otro lado, el Factor de Seguridad se reduce mínimamente, de 4,78 del caso de carga homogénea a 4,42 en este caso particular. No se ve demasiado afectado debido a que la zona de menor rigidez es el centro del vehículo al ser el punto más alejado de los puntos de apoyo y es, concretamente, de donde se ha retirado el esfuerzo provocado por el pasaje.

Carga máxima en un extremo

En este segundo caso se comprueba la rigidez de la estructura en el caso excepcional de que todo el pasaje se ubique en uno de los extremos.



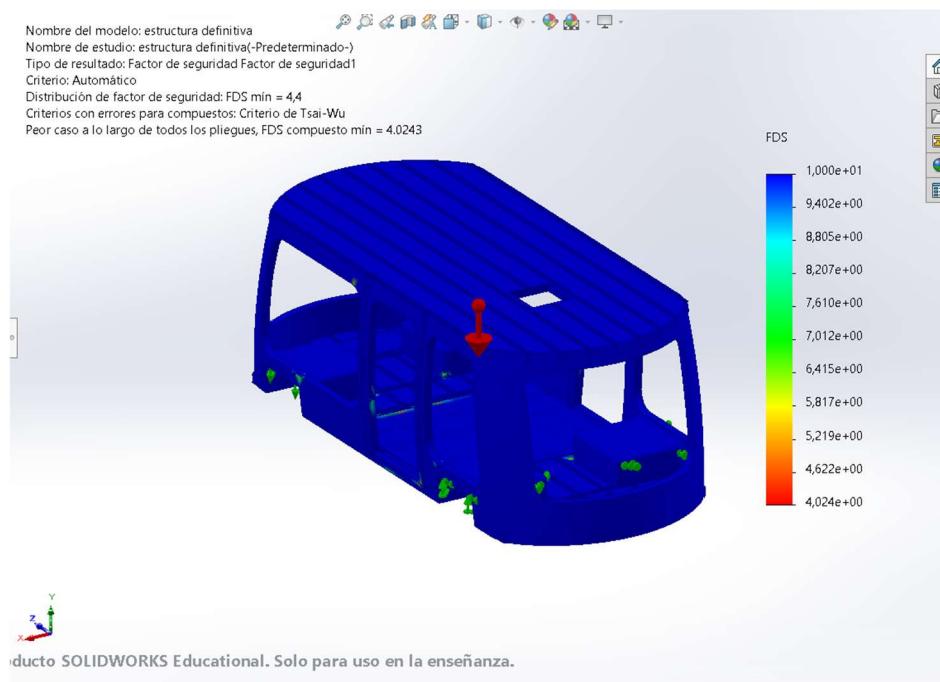
Figuras 44 y 45. Resultado del Factor de Seguridad y los desplazamientos respectivamente, para el caso de carga excepcional en un extremo del vehículo.

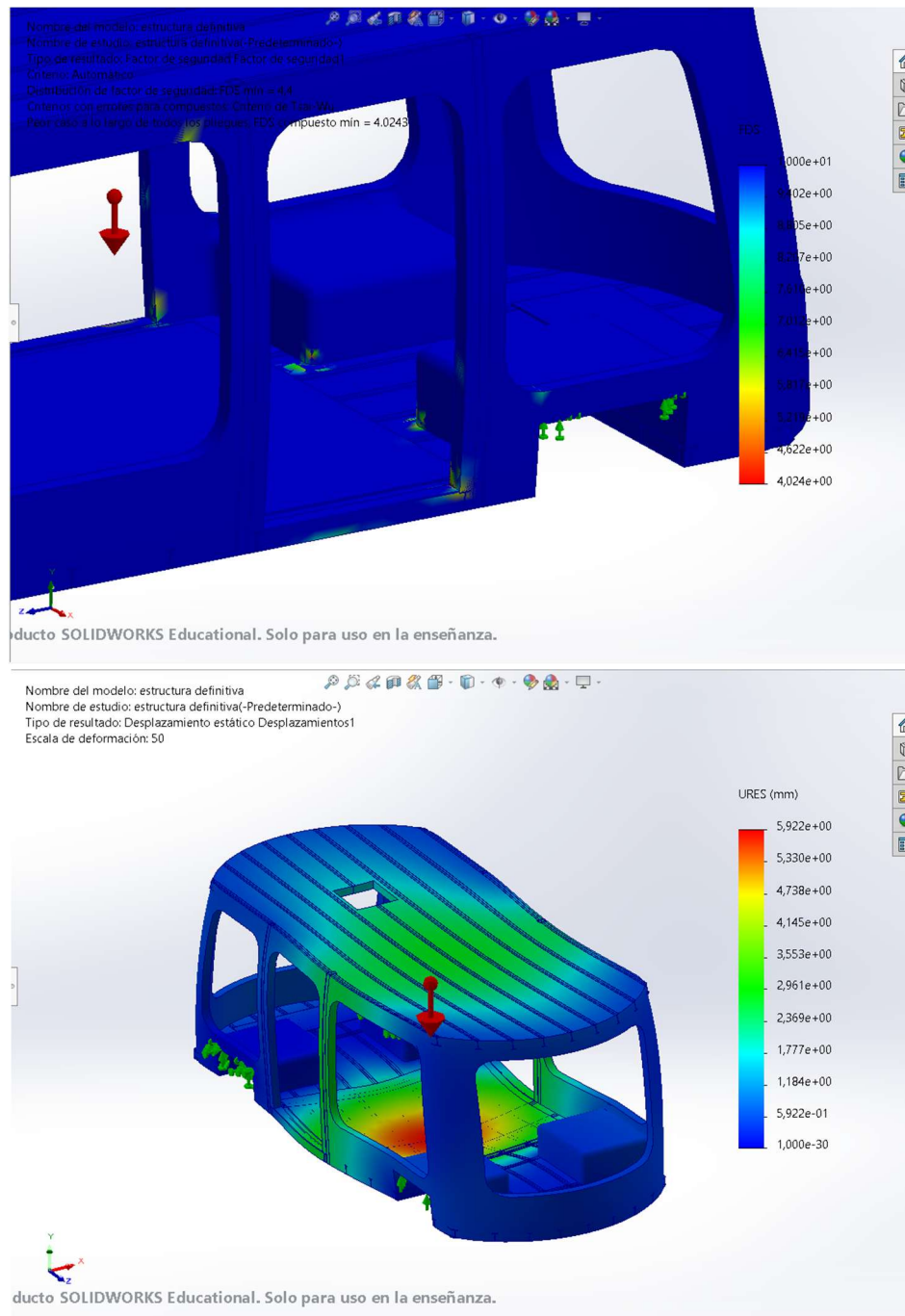
La leyenda muestra una deformación máxima de 3,979 mm localizada en el extremo que sustenta el esfuerzo del pasaje, sin embargo, frente a la flecha máxima para la zona inferior supone el 41,3% de esta por lo que la deformación es admisible. Además, en cuanto al Factor de seguridad se observa que

es peor respecto del caso de carga en ambos extremos debido, posiblemente, a la alteración en mayor grado de la posición de equilibrio. Sin embargo, el mínimo FS es de 3,66 por lo que al ser mayor que 3, se concluye que la estructura resiste.

Carga máxima en el centro

Como último caso se toma toda la carga del pasaje en el centro del vehículo ya que es la situación más susceptible a rotura debido a que sufre la mayor deformación en el caso de distribución homogénea.





Figuras 46, 47 y 48. Resultado del Factor de Seguridad y los desplazamientos respectivamente, para el caso de carga excepcional en el centro del vehículo.

Se observa la deformación máxima de los tres casos estudiados siendo de 5,92 mm, es decir, el 61,41% de la flecha máxima admitida. Sin embargo, sigue teniendo margen de deformación antes de entrar en comportamiento plástico aunque no se debería incrementar ya que afectaría al confort del usuario. Como era previsible el Factor de Seguridad se ve afectado ahora siendo de valor 4, correspondiente al contacto de los cajones-bogie con la superficie horizontal del suelo debido al gran esfuerzo que sufre esta superficie sin más puntos de apoyo que estos. No obstante, el Factor de Seguridad sigue siendo mayor que el mínimo ($FS=3$) y guarda margen, por lo que no es necesario el refuerzo de la estructura y es lo suficientemente rígida como para aguantar las cargas exigidas.

2.6 Análisis de resultados

Las estructuras metálicas, solo están aportando el peso estructural por lo que para acercarse al peso que tendrían en la realidad se le suma la del peso del armazón en materiales GFRP y PET.

Se toma la mitad del peso de la tercera alternativa sin los perfiles de refuerzo de CFRP, ya que los grosores empleados están orientados al soporte de cargas y no es necesario su refuerzo ya que la propia estructura lo soporta, por lo que carece de sentido aplicar tal cantidad de material en aplicaciones cuyo objetivo no es soportar esfuerzos si no dotar a la estructura de la volumetría final.

La masa correspondiente del GFRP son 21,18kg, por lo que el conjunto GFRP - espuma PET supone los 696,54 kg restantes. Se suman 348,27 kg a las dos primeras alternativas.

Además, se debe prestar especial atención al peso final de los diferentes conjuntos, para conseguir un mejor entendimiento de la elección de la alternativa se comparan otros parámetros comunes a los tres cálculos, como la deformación máxima o el factor de seguridad.

Estructura	Metálica	"Space frame"	"Composites"
Materiales	Acero S355 J0 Aluminio 6061	Aluminio 6061	GFRP CFRP Espuma PET
Masa total (kg)	2592,36	1031,31	717,72
Deformación máxima	6,98	6,79	5,29
FS	3,97	3,22	4,84

Tabla 15. Tabla comparativa de los resultados de las diferentes estructuras.

Con esta comparativa se observa el menor peso final de la propuesta de materiales compuestos. Siendo la reducción de peso en un 56% aproximadamente respecto de la estructura "metálica" y de un 31% aproximadamente respecto de la "space frame".

Por otro lado, la estructura en materiales compuestos sufre la menos deformación, siendo 9,98 mm la deformación en el caso del primer diseño y 6,79 mm en el caso del segundo, en comparación a los 5,29 mm del tercero.

Lo mismo sucede con el caso del factor de seguridad. Para los tres casos entra dentro del mínimo admisible, sin embargo, los casos de materiales metálicos se acercan más a su límite 2,5; siendo el 63% del valor obtenido en el caso de la primera propuesta; y el 77,6% para la segunda. Siendo, en el caso de la tercera propuesta, el 62% del Factor de Seguridad obtenido.

Es por esto que la tercera alternativa no solo resulta un avance en el aligeramiento de peso, sino que tiene mayor potencial de seguir desarrollándose al presentar mayores márgenes y mejores condiciones de confort para el usuario, determinadas por la deformación de las superficies bajo esfuerzos.

En vista de que las tres alternativas son válidas y susceptibles a continuar con su desarrollo, se procede a realizar su comparación en relación a criterios que resultan determinantes para la viabilidad y continuación del proyecto, de modo que sirva de guía para la resolución de la estructura con mayor potencial.

		Estructura		
Criterio	Ponderación	Metal	"space frame"	Composites
Seguridad	20%	5	5	4
Durabilidad	15%	5	4	4
Peso	15%	3	4	5
Sostenibilidad	14%	4	4	5
Escalabilidad	13%	3	4	4
Innovación	10%	2	3	5
Procesos de fabricación	8%	5	4	4
Mantenimiento	5%	3	3	5
Total:		3,9	4,1	4,4

Tabla 16. Comparación de las diferentes alternativas.

En base a los criterios y la ponderación de la tabla anterior, podemos concluir que la estructura con mayor potencial de desarrollo es la **estructura de "composites"** ya que ha obtenido la puntuación más alta siendo de 4,4 / 5.

De cara a futuros proyectos es la alternativa con mayor potencial de innovación y desarrollo. No obstante, si se quiere velar por los intereses económicos se optaría por desarrollar la alternativa "space frame" ya que mantiene la iniciativa del aligeramiento de peso, pero tanto los procesos a utilizar como los materiales conllevan un menor coste.

Sin embargo, las diferentes alternativas han sido diseñadas para tener el mismo acabado estético final, por lo que el desarrollo del aspecto visual, en parte, independiente a la selección final de esta fase II.

Para más información sobre las alternativas estructurales, consultar anexo 4.

2.6.1 Fabricación y ensamblado.

La estructura en materiales compuestos será fabricada mediante un proceso de infusión de resina por vacío o VARTM y ensamblado mediante uniones únicamente mediante adhesivos epoxi para las uniones que precisen gran rigidez y uniones adhesivo-mecánicas para aquellos elementos que precisen de apertura.

Además, para facilitar el ensamblado, los puntos de unión se han diseñado para conseguir una unión a solapoe o “lap joint”.

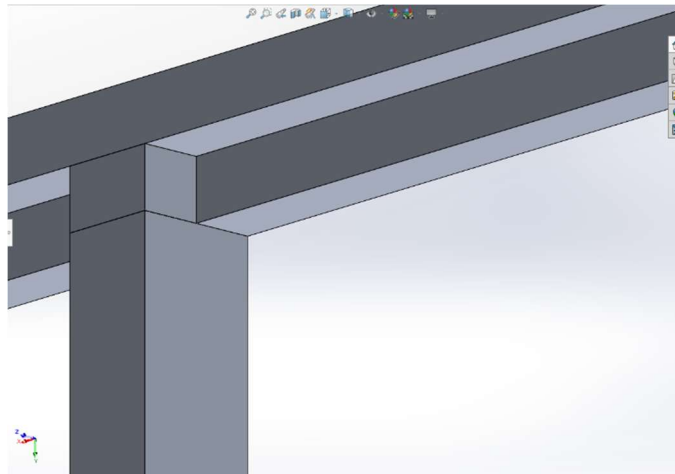


Figura 49. Ejemplo de la unión de solape en la estructura.

3. APARIENCIA VISUAL

3.1 Introducción

Como se menciona en el entorno del proyecto el proyecto tiene cabida en emplazamientos de gran afluencia turística, por lo que se debe prestar especial atención al aspecto visual.

En este caso se basa en formas sinuosas que aporten dinamismo y juego con las formas del conjunto, de modo que se consiga la ruptura buscada con la robustez y horizontalidad del mismo.

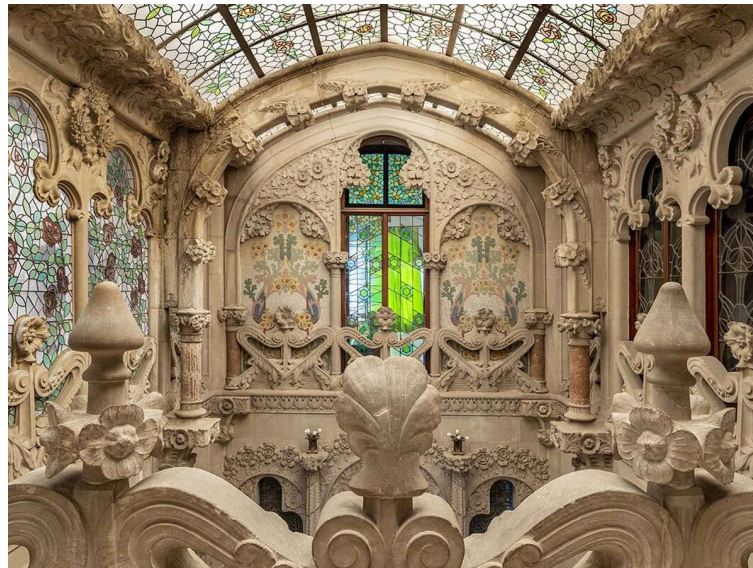


Figura 50. Casa Navás en Reus, Tarragona. De Lluís Domènech i Montaner.

De la Casa Novás se aprecia la adición de formas redondeadas a una composición robusta.



Figura 51. Casa Tassel en Bruselas, Bélgica. De Victor Horta.

Respecto a la Casa Tessel se aprecian grandes superficies como son escaleras, paredes y suelos amplios, en contraposición a detalles de carácter más estrecho y sinuoso como las columnas o la barandilla de la escalera.



Figura 52. Parque Güell en Barcelona, España. De Antoni Gaudí.

Gaudí, en el Parque Güell, vuelve nuevamente a combinar líneas horizontales y sinuosas para conseguir una obra que tanto se acerca a los principios que marcan toda su carrera artística.

Por otro lado, para romper con la robustez y la simetría de la estructura del coche se opta por un diseño asimétrico de modo que se innove con la sensación provocada en el usuario y se reduzca el peso visual al llenar el diseño con líneas sinuosas que aportan dinamismo.

En este caso se toman tres colores, los cuales son empleados según la siguiente distribución.

- Un color neutro para dar cohesión a las diferentes partes del conjunto.
- Un segundo color neutro diferente al anterior para destacar detalles.
- Un color vivo que haga destacar el diseño principal del conjunto y sirva de elemento diferenciador.

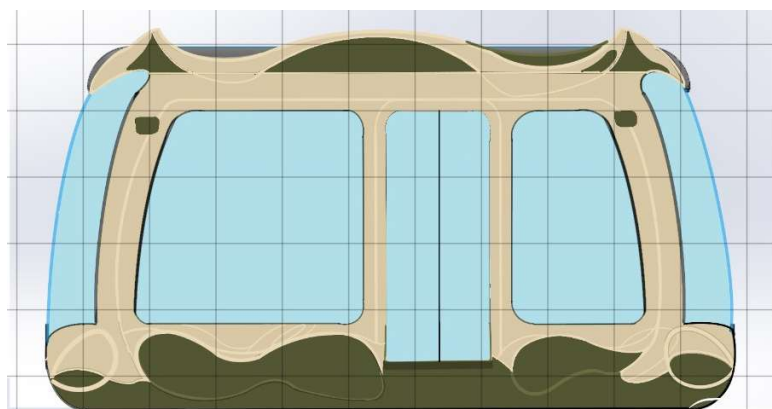


Figura 53. Segunda alternativa de diseño exterior del Civitam.

Con la combinación de colores más neutros con uno más llamativo se consigue desarrollar un diseño que alto valor estético sin la necesidad de recargar visualmente la estética final del vehículo.

Para más información consultar anexo 6 alternativas estéticas.

3.2 Desarrollo final

Se lleva a cabo la modificación del diseño de modo que se adapte por completo a la geometría final del vehículo. Así como el desarrollo de formas más atractivas para el usuario objetivo de modo que se consiga un diseño novedoso a la par que minimalista y de un gran atractivo, todo ello dentro del marco artístico del arte moderno.

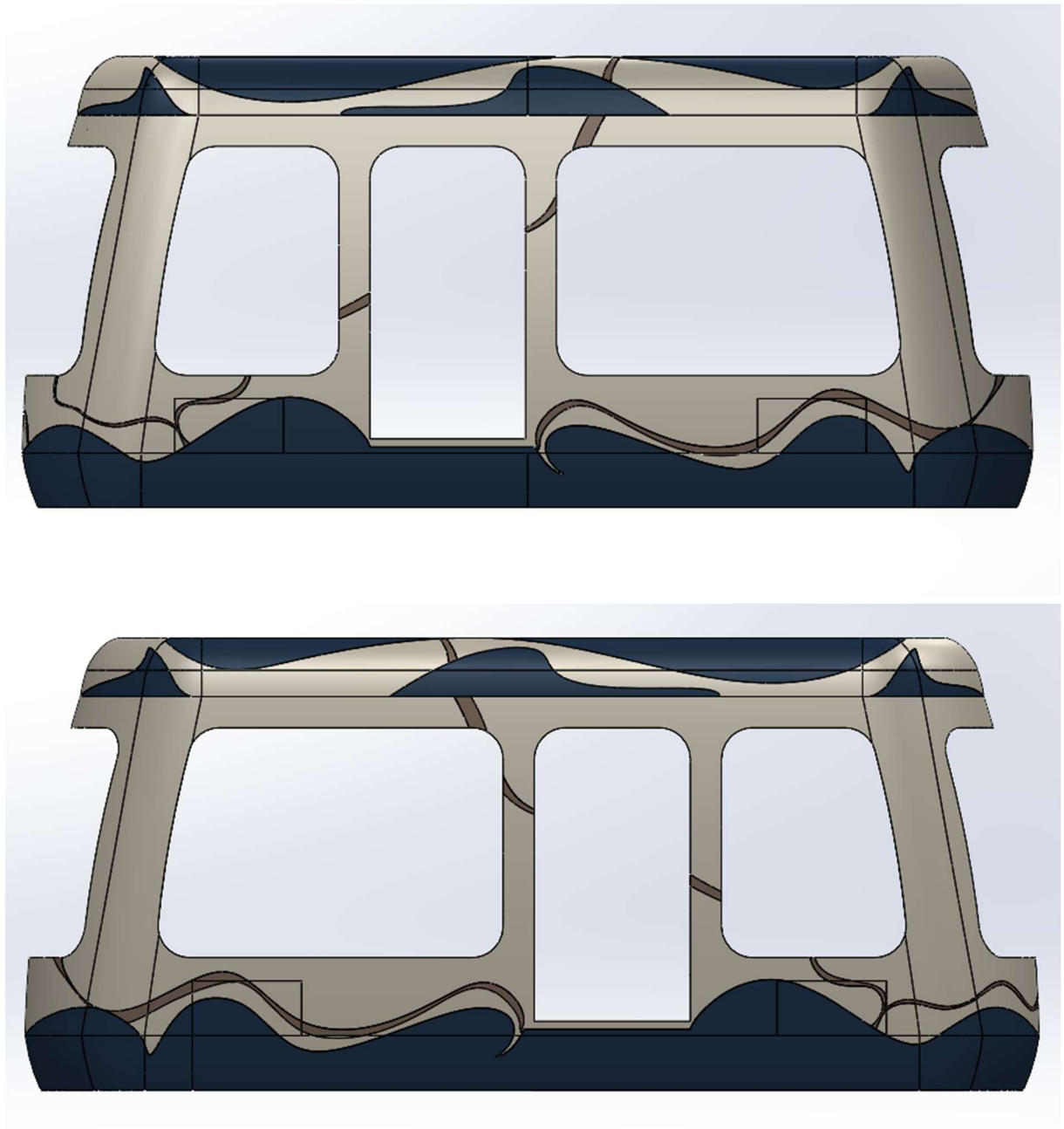


Figura 54 y 55. Diseño estético final en las paredes laterales.

El diseño base seleccionado, evoluciona de una fase conceptual a una más realista.

Por otro lado, se eliminan líneas innecesarias que, al ser de bajo contraste con el vagón y con espesor reducido no se apreciarían durante el servicio prestado por el vehículo y se sustituye por una línea sinuosa de sección irregular que recorre el coche con tendencia diagonal desde su parte inferior hasta la superior dando cohesión a las diferentes zonas del conjunto.

Se juega con las formas sinuosas de modo que se consiga impulsar un diseño dinámico y con apariencia de ligereza, apoyando el objetivo primero del proyecto de conseguir un vehículo ligero y resistente.

Además, como los puntos de color de mayor peso se encuentran en la parte superior e inferior del diseño, para no perder la cohesión entre ambos se añade una línea sinuosa que sirve como nexo entre ambas partes, consiguiendo un diseño cohesionado y compacto.

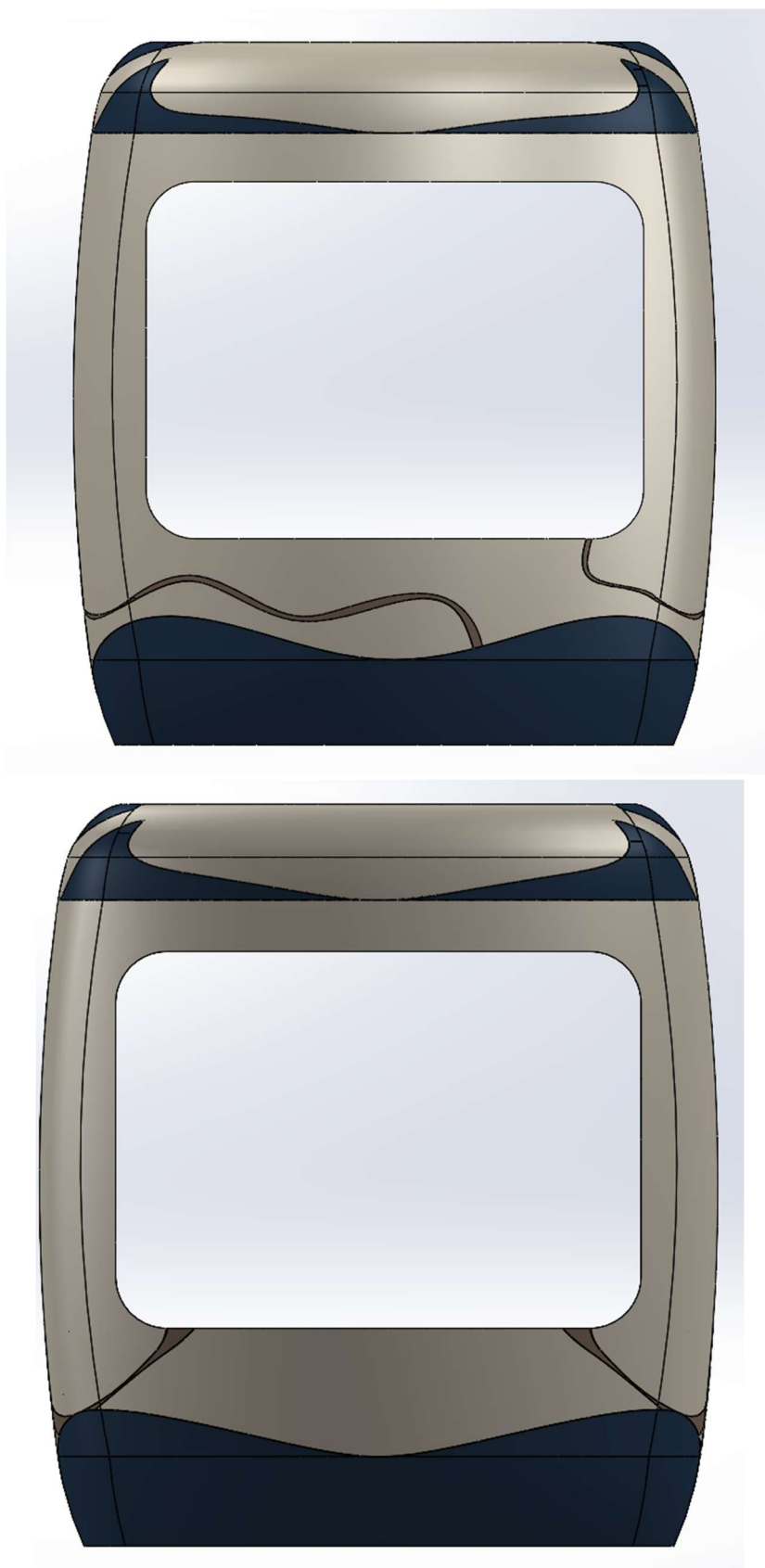


Figura 56 y 57. Diseño estético final en los cabeceros.

En la comparativa de los dos cabeceros se hace más evidente la no-simetría del diseño para romper, en cierta medida, con los estándares del diseño ferroviario.

3.3 Conclusiones fase III

Como cierre de esta penúltima fase se consigue un diseño contemporáneo e innovador pero con la suficiente escalabilidad para no solo tener capacidad de implementación en Barcelona, si no poder llevarse al resto de ciudades europeas.

Un diseño rompedor, que no se basa únicamente en colorimetría o líneas rectas que den sensación de velocidad, si no que con un marco histórico que respalde el diseño se consigue una propuesta que se integra en su totalidad en el marco histórico actual de Barcelona y conmemora la historia de una de sus infraestructuras con más recorrido histórico de la mano de uno de sus artistas de mayor renombre.

Además, resulta un diseño vivo, cuyas curvas pueden adaptarse en caso de que en futuros proyectos se precise de cambios en la estructura en función de nuevos parámetros a tener en cuenta, por lo que la esencia y el recorrido del diseño no se pierden.

4. IMAGEN CORPORATIVA

4.1 Imagen corporativa

4.1.1 Nombre

Para la consecución de un nombre adecuado para el vehículo se tomaron referencias de proyectos internos dentro de Segula Technologies de modo que se obtuviera una línea de tendencia sobre la metodología para la creación y selección de nombres para sus proyectos.

De esta investigación se concluye que se basan, por lo general, es la creación de acrónimos para sus proyectos. Estos se basan en el título del proyecto correspondiente y con una posible variación basada en el idioma en el que se coja estos títulos de proyecto.

Para este caso en particular se cogen algunos de los requisitos que evidencian la singularidad del proyecto, la cuales se explican a continuación.

- Es un vehículo pensado para la descongestión de núcleos urbanos, por lo que tiene un recorrido cerrado en grandes ciudades. Lo que también facilita la completa electrificación del mismo.
- Es monocabina por lo que se compone de un único coche con capacidad para circular de manera bidireccional y de manera autónoma.

De estos dos requisitos (circuito en ciudad + moncabina) se extraen los conceptos de “ciudad” y “cabina” cuya traducción al latín es “civitas” y “cameram” respectivamente. Al combinarlos y obtener un único acrónimo de ambos términos se obtiene **Civitam** como nombre final y oficial del vehículo resultado del presente proyecto.

4.1.2 Manual de marca

4.1.2.1 Logotipo

Finalmente se escogió, esta idea para su desarrollo y consecución del logotipo definitivo.

Lo que se pretendía en este caso era aunar el “factor innovador” del proyecto en un único logotipo compacto, de modo que fuese reconocible manteniendo la línea minimalista seguida en todo el proyecto.

Para ello se busca representar los aspectos de mayor originalidad del vehículo. Se quiere evidenciar la existencia de una única cabina, la autonomía, el carácter compacto y la completa innovación que supone su concepción.

Para ello se busca un diseño completamente sobrio con un máximo de dos colores distintos para la obtención de un logotipo completamente digitalizable. Además, un diseño singular y robusto, que denote seguridad y confianza, con lo que el usuario capte que, a pesar de ser un proyecto innovador, cuenta con la máxima seguridad y eficiencia.

Por otro lado, a pesar de el deseo de conseguir un resultado robusto no se quiere caer en un diseño que resulte pesado visualmente, ya que se quiere representar el gran avance hacia nuevas formas de transporte.

Bajo estas premisas, se obtiene un logotipo en la que hay dos elementos diferenciables a simple vista; el interior y el exterior, ya que se han hecho de manera simultánea pero como proyectos independientes, dando lugar a la colaboración entre dos personas.

Por otro lado, se resalta la sencillez de la geometría de la estructura y la innovación de un tranvía monocabina. Dentro de esta curva sencilla, aparecen representadas las grandes ventanas de este vehículo ya que se destina a actividades turísticas por lo que resulta necesario un amplio rango de visió desde dentro. Además, las ventansa también tienen este carácter innoavdor al contar con tecnología para poder adaptarse a las necesidades de confort del usuario al poder controlar su opacidad.



Figura 58. Logotipo original Civitam.

Hay una flota de seis vehículos recorriendo en circuito con de manera simultánea como se menciona en el anexo 1., cada uno tiene un color característico, por lo que el logotipo sufre variación de color en su contorno principal dependiendo del coche en el que se ubique.



Figura 59. Logotipo con los colores de los vehículos de la flota.

Por último, se crea el símbolo como el resultado de suprimir las letras correspondientes al modelo de vehículo y quedar solo con la estructura, consiguiendo el contorno característico del coche y una mayor simplicidad para un mayor carácter reconocible.

4.1.2.2 Símbolo



Figura 60. Símbolo a partir del logotipo con la gama cromática válida.

Así como el símbolo se emplea en el propio vehículo, el logotipo se destina al resto de aplicaciones que tengan relación con la imagen corporativa del proyecto.

El resultado final resulta en un diseño adaptable al color del coche sobre el que se aplique, debido a que cada uno de los vehículos de la flota de 6 será de uno de los colores especificados en la fase de diseño estético.

4.1.3 Versión a una tinta

Para que sea claramente diferenciable en versiones impresas en blanco y negro.



Figura 61. Versión del logotipo a una tinta.

4.1.4 Versión en negativo

En caso de que el fondo del soporte sea oscuro se usa la versión en negativo.



Figura 62. Versión logotipo en negativo.

4.1.5 Usos indebidos

Los únicos usos aceptados son los recogidos anteriormente, cualquier alteración de las dimensiones, o de los colores, bien sea del logotipo o del símbolo, no son aceptados.

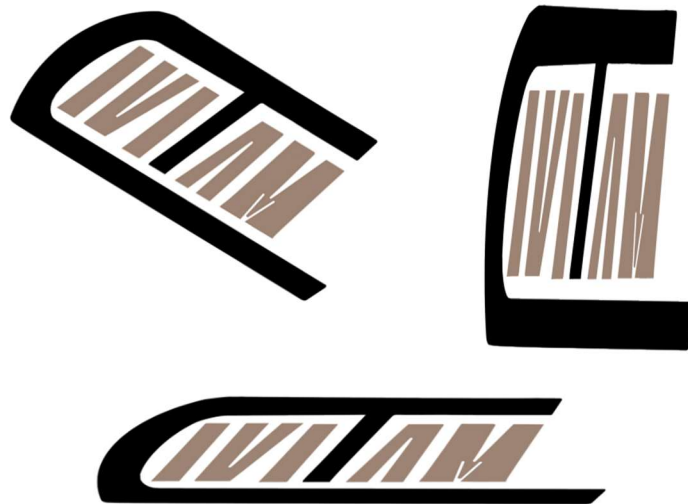


Figura 63. Cambio de dimensiones del logotipo.



Figura 64. Uso de colore son corporativos.

Además, tampoco es admisible el uso del logotipo en su versión original sobre fondos de color que no permitan la correcta diferenciación del mismo. Ante estos casos, siempre se empleará la versión en negativo.



Figura 65. No respeto sobre fondos de color.

4.2 Renders

Como cierre del proyecto se realizan una serie de renders mediante keyshot y Photoshop que recojan la estética final y los rasgos innovadores que caracterizan al Civitam.

En primer lugar, se consigue un render con toda la flota de coches que entrarán en circulación para agilizar el servicio.



Figura 66. Render 1/4.

Como segundo render se aprecia el Civitam con el color original en un stand de presentación del vehículo.



Figura 67. Render 2/4.

El tercer render quiere hacer ver la diferencia de tamaño entre el Civitam y el tranvía actual de Barcelona.



Figura 68. Render 3/4.

Y, por último, se presenta el tranvía durante su actividad por una calle emblemática de Barcelona con lo que se muestra uno de los objetivos del vehículo, la descongestión de núcleos urbanos grandes.



Figura 69. Render 4/4.

5. CONCLUSIONES FINALES

5.1 Conclusiones del proyecto

Bajo condiciones idénticas de carga y esfuerzo, los resultados de las tres alternativas han evidenciado que el mayor potencial de desarrollo recaer en la diseñada con materiales compuestos.

Al observar los resultados se advierte un factor de seguridad con más margen y menores deformaciones a lo largo de las superficies, lo que está directamente relacionado con el nivel de confort y seguridad del pasajero. Esto además favorece el desarrollo específico de la estructura pudiendo realizar el resto de cálculos pertinentes sin tener que haber un rediseño en caso de necesitar aplicar cargas o esfuerzos mayores. Por otro lado, en caso de no requerir cargas mayores, puede realizarse una optimización mayor de los espesores delj pieles o núcleo.

La introducción de una estructura en materiales compuestos obtiene una relación rigidez-peso completamente equilibrada. Además, siendo un vehículo eléctrico permite mayor autonomía y menos desgaste de las baterías.

Si bien es cierto que el modelado por infusión de resina y la inversión inicial sobre los materiales es menos al tratarse de materiales compuestos, sin embargo, el bajo mantenimiento que requieren y la eficiencia energética al reducir las emisiones de CO₂ a la atmósfera. Ambos factores velan por la sostenibilidad y rentabilidad de dicha inversión, pese a ser mayor que en el caso de una estructura metálica convencional.

Finalmente, cabe destacar la tendencia de fabricantes de los diferentes modelos de transporte hacia soluciones de menos peso, mayor eficiencia energética y que aboguen por la defensa de iniciativas medioambientales como la agenda 20030.

Por estas razones, la apuesta por nuevas configuraciones estructurales como las resultantes de la introducción de materiales compuestos son una apuesta con previsiones muy favorables a un plazo medio-largo, al ser la tendencia natural hacia donde se posicionan las grandes empresas de innovación.

5.1 Posibles vías de estudio y proyección de futuro.

La reducción del peso de vehículos ferroviarios, en este caso, se ha centrado en la estructura principal. Sin embargo, un componente muy susceptible a innovación en el ámbito de materiales es el bogie de tracción, debido a su gran peso y a la necesidad del uso de materiales altamente resistentes y de larga duración. Por lo que el CFRP puede ser una alternativa con gran potencial de implementación para este elemento.

Otra vía de estudio puede ser la continuación de cálculos más concretos y avanzados como simulaciones dinámicas y esfuerzos de fatiga, así como i, la exploración con los niveles de autonomía 4-5 en función de la permitividad a la normativa europea.

Desarrollo de sistemas concretos que no son alcance de este proyecto como el cableado; el sistema de apertura y cierre de la puerta; la rampa para personas con movilidad reducida, la cual presenta ciertas dificultades debido al espacio reducido del vehículo; o la posible implementación de ventanas fotosensibles que regulen la cantidad de luz que entra en el habitáculo.

Por otro lado, el desarrollo del servicio entorno al vehículo ya que presenta la particularidad de ser autónomo y requiere de un estudio preciso del funcionamiento durante su actividad.

5.2 Lecciones aprendidas

El cierre de la etapa académica que supone la finalización de este proyecto, ha supuesto una serie de aprendizajes complementarios a los adquiridos durante los estudios previos.

- **Interdisciplinariedad.** El ámbito ferroviario es multidisciplinar dentro de la ingeniería ya que requiere de conocimientos de ergonomía, normativa, materiales, mecánica, estética, sostenibilidad y otros muchos campos que son necesarios investigar y controlar.
- **Peso de la toma de decisiones.** Cada elección que ha sucedido durante el desarrollo de este proyecto a determinado el camino a seguir a lo largo de las diferentes fases, por lo que ha quedado evidenciada la necesidad de tomar dichas decisiones con la suficiente profundidad en la investigación y apoyándose en el rigor científico, evitando la intuición.
- **Gestión de tiempo y planificación.** El cumplimiento del cronograma como máxima que rige el proyecto ha sido crucial a la hora de dedicar el tiempo y recursos necesarios en cada fase e hito del proyecto, de modo que se logre un equilibrio entre las obligaciones y el descanso personal.
- **Visión crítica.** La combinación de la investigación sobre hechos y datos objetivos, en contraste con y valorar y absorber un ámbito tan subjetivo como es el arte y la historia, hacen que se desarrolle un pensamiento crítico para que se genere una cohesión fluida entre dos campos tan opuestos.
- **Crecimiento personal.** Este proyecto ha supuesto un reto académico al no entrar íntegramente en el campo de estudio del grado, sin embargo, se ha demostrado constancia, disciplina y entrega con le objetivo de conseguir un proyecto con rigor y robustez.

6. BIBLIOGRAFÍA

- 2getthere. (n.d.). *Vehículo GRT autónomo*. 2getthere. Retrieved September 5, 2025, from <https://www.2getthere.eu/>
- All Pyrenees. (2019). *Alstom Citadis 302*. <https://all-andorra.com/alstom-citadis-402/>
- Alstom. (2012). *Alstom's Citadis Trams, France*. https://www.railway-technology.com/projects/alstom-citadis-trams/?utm_source=chatgpt.com&cf-view
- CAF. (n.d.). *Guía para el cálculo de capacidad de pasajeros de CAF*.
- CEN (Comité Europeo de Normalización). (2017). *EN 15273-3:2013 + A1:2017. Railway applications — Gauges — Part 3: Structure gauges*.
- CRRC. (2024). *ART China*. https://www.crrcgc.cc/en/2024-09/27/article_2024092715480084389.html
- CRRC. (2025). *CETROVO 1.0: Tren ligero con CFRP*. CRRC — https://www.crrcgc.cc/Es/2025-02/18/Article_2025021816580417232.Html. https://www.crrcgc.cc/es/2025-02/18/article_2025021816580417232.html
- Davies, J. M. (2001). *Lightweight Sandwich Construction*.
- DGT. (2024). *Conducción autónoma en Europa*. <https://www.dgt.es/muevete-con-seguridad/tecnologia-e-innovacion-en-carretera/vehiculos-de-conduccion-automatizada/>
- Esther Ciriano. (2021). *Apuntes Física*.
- Eurocódigo 3. Proyectos de estructuras de acero*. (1993).
- EUROCOMP Design Code and Handbook: Structural Design of Polymer Composites for Civil Engineering Structures*. (1996).
- European Union Agency for Railways. (2022). *TSI PRM: People with Reduced Mobility*.
- García, P. (2024a). *Caja ligera de Talgo*. *Scipedia*. https://www.scipedia.com/public/Garcia*_et_al_2024a
- García, P. (2024b). Reducción de peso en trenes Talgo con CFRP. *Ingeniería Civil (CEDEX)*.

La Vanguardia. (2023). El tranvía eléctrico sin cables, raíles ni conductor que revolucionará la movilidad urbana. *La Vanguardia*.

Listadotrenes.es. (2025). *Dimensiones de tranvías en Zaragoza*. Listadotrenes.Es. <https://www.listadotren.es/carac/fichadatos.php?id=198>

Monocab. (n.d.). *Monocab Owl: Movilidad rural sostenible*. Monocab. Retrieved September 5, 2025, from <https://www.monocab-owl.de/english-language/>

researchgate.net. (n.d.). Retrieved September 5, 2025, from https://www.researchgate.net/figure/Deflection-criteria-of-different-FRP-Bridge-design-specifications_tbl1_262881027

Sancho, R. (2024). *Monocab energy sizing*.

Santiago Casero. (2024). *20minutos*. <https://www.20minutos.es/motor/movilidad/marcas-coches-ya-podrian-ofrecer-vehiculos-autonomos-en-espana-pero-no-tenemos-regulacion-correcta-para-ello-5665643/>

Segula Technologies. (2024). *Segula Technologies*.

Stadler. (2023). *Locomotora KiwiRail y Clase 99*.

Welcome to the United Nations. (2022). *Welcome to the United Nations*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/infrastructure/>

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Evolución de la conducción autónoma en territorio europeo.</i>	<i>10</i>
<i>Figura 2. Vehículo con autonomía nivel 3 apto para la circulación en España (Santiago Casero, 2024).</i>	<i>11</i>
<i>Figura 3. Vista de la nube de contaminación sobre Barcelona.</i>	<i>11</i>
<i>Figura 4. Objetivos de Desarrollo Sostenible correspondientes a la agenda de 2030.</i>	<i>12</i>
<i>Figura 5. Cronograma general del proyecto.</i>	<i>13</i>
<i>Figura 6. Diseño del recorrido del vehículo monocabina (Indicador en azul el inicio y fin de línea) (Sancho, 2024).</i>	<i>15</i>
<i>Figura 7. Locomotora Clase 99 de Stadler para GB Railfreight (Stadler, 2023).</i>	<i>16</i>
<i>Figura 8. Tranvía de Barcelona de Tram.</i>	<i>16</i>
<i>Figura 9. Tranvía autónomo ART (Autonomous Rail Rapid Transit), en China (CRRC, 2024).</i>	<i>17</i>
<i>Figura 10. GRT minibús eléctrico autónomo de carretera GRT de 2getthere.</i>	<i>17</i>
<i>Figura 11. Taxi Monocab Owl en Alemania.</i>	<i>18</i>
<i>Figura 12. Prototipo en composites para ensayos a escala.</i>	<i>18</i>
<i>Figura 13. Tren de larga distancia Cetrovo 1.0.</i>	<i>19</i>
<i>Figura 14. Volúmenes y disposición aproximados de los sistemas fundamentales de un tranvía.</i>	<i>19</i>
<i>Figura 15. Dimensiones generales en alzado del vehículo.</i>	<i>22</i>
<i>Figura 16. Vista en perfil del área transversal del coche con los volúmenes de los sistemas básicos dimensionados. En gris el coche, en marrón los conjuntos de los bogies, en naranja la bobina de inducción, en amarillo el conjunto de la batería, en verde el cajón eléctrico y en morado el sistema de climatización.</i>	<i>28</i>
<i>Figura 17. Movimientos relativos de un vagón de tranvía.</i>	<i>30</i>
<i>Figura 18. Diseño estructural final de la alternativa metálica.</i>	<i>31</i>
<i>Figura 19 y 20. Resultados de resultados del último análisis estático tensional nodal y de la flecha máxima, con una deformación 50.</i>	<i>32</i>
<i>Figura 21. Dimensiones generales de los perfiles de la zona inferior del conjunto.</i>	<i>34</i>
<i>Figura 22. Vista seccionada del conjunto.</i>	<i>34</i>
<i>Figura 23. Rediseño de la distribución de los perfiles de la estructura “space frame”.</i>	<i>35</i>
<i>Figura 24 y 25. Resultados tensión de Von Mises y desplazamientos respectivamente con una escala de deformación 50.</i>	<i>36</i>
<i>Figura 26. Diseño final de los marcos de los cabeceros desde la vista lateral y frontal / trasera respectivamente.</i>	<i>38</i>
<i>Figura 27. Sección transversal perfiles l longitudinales del suelo.</i>	<i>38</i>
<i>Figura 28. Rediseño de la distribución de perfiles de refuerzo.</i>	<i>39</i>
<i>Figuras 29 y 30. Resultado final del Factor de Seguridad y del desplazamiento respectivamente, con una escala de deformación 50.</i>	<i>40</i>
<i>Figura 31, 32 y 33. Distancias entre puntos de apoyo del techo, marcos de puerta y suelo respectivamente.</i>	<i>41</i>
<i>Figura 34, 35 y 36. Esfuerzos de cortadura en los planos XZ, XY y YZ respectivamente.</i>	<i>44</i>

Figura 37. Corte de plano perpendicular a la planta para conocer el máximo valor de cortadura del núcleo.	44
Figura 38, 39 y 40. Cálculo de alternativas con las fibras del GFRP dispuestas a 45º y -45º, 45º y 0º; y 90º y 0º respectivamente.....	47
Figura 41. Alzado y vista lateral del diseño final de la estructura con los faldones y acabados.	47
Figuras 42 y 43. Resultado del Factor de Seguridad y los desplazamientos respectivamente, para el caso de carga excepcional en ambos extremos del vehículo.	49
Figuras 44 y 45. Resultado del Factor de Seguridad y los desplazamientos respectivamente, para el caso de carga excepcional en un extremo del vehículo.....	50
Figuras 46, 47 y 48. Resultado del Factor de Seguridad y los desplazamientos respectivamente, para el caso de carga excepcional en el centro del vehículo.	52
Figura 49. Ejemplo de la unión de solape en la estructura.	55
Figura 50. Casa Navás en Reus, Tarragona. De Lluís Domènech i Montaner.....	57
Figura 51. Casa Tassel en Bruselas, Bélgica. De Victor Horta.	57
Figura 52. Parque Güell en Barcelona, España. De Antoni Gaudí.	58
Figura 53. Segunda alternativa de diseño exterior del Civitam.	58
Figura 54 y 55. Diseño estético final en las paredes laterales.....	60
Figura 56 y 57. Diseño estético final en los cabeceros.	61
Figura 58. Logotipo original Civitam.	65
Figura 59. Logotipo con los colores de los vehículos de la flota.	66
Figura 60. Símbolo a partir del logotipo con la gama cromática válida.	67
Figura 61. Versión del logotipo a una tinta.....	67
Figura 62. Versión logotipo en negativo.	68
Figura 63. Cambio de dimensiones del logotipo.	68
Figura 64. Uso de colore son corporativos.	68
Figura 65. No respeto sobre fondos de color.	69
Figura 66. Render 1/4.	69
Figura 67. Render 2/4.	70
Figura 68. Render 3/4.	71
Figura 69. Render 4/4.	72

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resumen dimensiones y parámetros condicionantes del diseño (Sancho, 2024)..... 8

Tabla 2. Tabla resumen de dimensiones y peso de los sistemas considerados..... 21

Tabla 3. Número de personas por metro cuadrado para cada tipo de carga en cada tipo de vehículo (CAF, n.d.).
..... 23

Tabla 4. Dimensiones del conjunto bogie..... 26

Tabla 5. Dimensiones aire acondicionado de referencia..... 26

Tabla 6. Medidas del arenero cogido como referencia..... 27

Tabla 7. Resumen medidas módulo Batería LTO de Max 8C de ABB. 27

Tabla 8. Dimensiones aproximadas de la bobina de inducción utilizada..... 27

Tabla 9. Dimensionamiento del cajón eléctrico. 27

Tabla 10. Cálculo de la carga generada por el pasaje..... 28

Tabla 11. Resumen pesos y fuerzas comunes a las tres alternativas para el cálculo estructural. 29

Tabla 12. Tabla resumen características técnicas estructura metálica final 33

Tabla 13. Tabla resumen de las características principales de la estructura “space frame” final. 37

Tabla 14. Tabla resumen de las propiedades principales de la estructura en composites..... 48

Tabla 15. Tabla comparativa de los resultados de las diferentes estructuras. 53

Tabla 16. Comparación de las diferentes alternativas..... 54

ÍNDICE DE ECUACIONES

<i>Ecuación 1. Tensión de Von Mises máxima permitida teniendo en cuenta el Factor de Seguridad.....</i>	<i>32</i>
<i>Ecuación 2, 3 y 4. Deformación máxima admisible de la zona superior, media e inferior respectivamente.</i>	<i>36</i>
<i>Ecuación 5. Desplazamiento máximo admisible de la zona superior.....</i>	<i>42</i>
<i>Ecuación 6. Flecha máxima admisible para la zona media del conjunto.....</i>	<i>42</i>
<i>Ecuación 7. Flecha máxima admisible en la parte inferior del vehículo.....</i>	<i>42</i>
<i>Ecuación 8. Límite de tensión de cortadura admitido por el núcleo.....</i>	<i>45</i>
<i>Ecuación 9. Límite de tensión de cortadura admitido por las pieles en el plano XY.....</i>	<i>45</i>

FIN DEL DOCUMENTO