



Universidad
Zaragoza

ANEXOS

Autor:

Esther Ciriano Fernández

Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura

2025

ÍNDICE

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



Universidad
Zaragoza

1. ESTUDIOS PRELIMINARES

ANEXOS

Autor:

Esther Ciriano Fernández

Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura

2025

ÍNDICE

0. Abstract	3
1. Entorno de aplicación	4
1.1.1 España	4
1.1.2 Barcelona	5
2. Recorrido	7
3. Vehículos actuales	8
3.1 Material rodante	8
3.1.1 Locomotoras	8
3.1.2 Tranvías	9
3.1.3 Vehículos autónomos	12
3.1.4 Vehículos monocabina	14
4. Antecedentes directos	15
4.1 Talgo	15
4.2 CETROVO 1.0	16
5. Normativa aplicable	17
5.1 Gálibo	17
5.2 Pasaje	18
5.3 Materiales	18
6. Estética	20
6.1 Entorno y contexto	20
6.1.1 Barcelona	20
6.1.2 Movimiento moderno europeo	22
7. Bibliografía	25

0. ABSTRACT

A continuación, se recogen los estudios preliminares de los campos de los cuales resulta necesaria la recopilación de información para el correcto inicio y desarrollo del proyecto. Con la información recopilada y contrastada se sientan las bases del diseño y desarrollo del vehículo objetivo.

1. ENTORNO DE APLICACIÓN

En este apartado se recopila la información necesaria a cerca de la ubicación de implementación del nuevo vehículo para la posterior sustracción de requisitos de diseño y que ayudarán en la elección de alternativas en futuras fases en base a las necesidades suprir para este entorno determinado.

1.1.1 España

En la actualidad en España las vías ferroviarias no tienen la misma anchura (Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible, 2021) A lo largo de la extensión nacional se utilizan:

- Vía estrecha: 1000 mm
- Vía estándar: 1435 mm
- Vía ibérica: 1668 mm

En concreto el tranvía de Barcelona opera con el ancho internacional (Listadotrenes.es, 2020), correspondiente a 1435 mm.

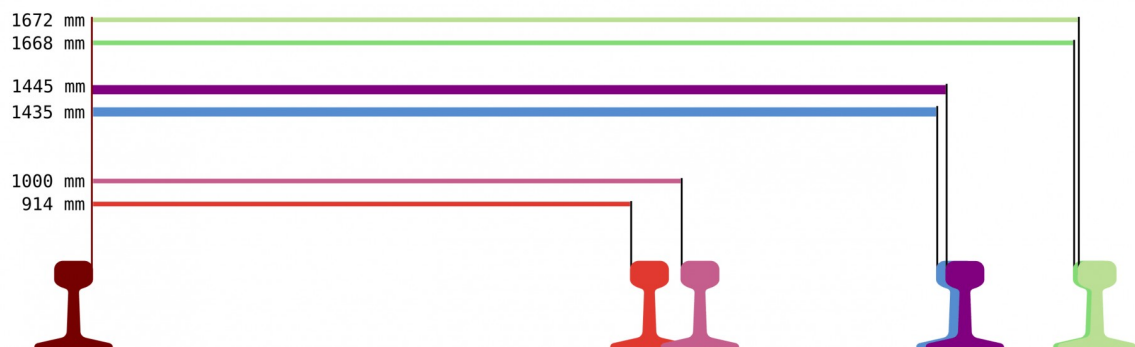


Figura 1. Comparativa de anchos de vía en vías españolas.

En España, los primeros tranvías se remontan los años 1970, fueron sustituidos por otros tipos de transporte (Ajuntament de Barcelona, 2017) como el autobús. Sin embargo, por su capacidad de circulación a bajo consumo y su gran actividad de descongestión de núcleos urbanos se volvió a invertir en ellos para su expansión por núcleos urbanos en toda España desde los años 2000.

El crecimiento demográfico conlleva un mayor número de personas dependiendo tanto de transporte público como privado. Sin embargo, las infraestructuras existentes no crecen al ritmo necesario para absorber el crecimiento de la demanda por lo que, como consecuencia, se sufre un tráfico congestionado y tiempos de desplazamiento más largos; lo que afecta de manera contundente y directa a la calidad de vida.

A esto, se le suma la apuesta de los países más desarrollados para la descarbonización del transporte por lo que el transporte tipo ferroviario es la solución con mayor viabilidad en la actualidad debido a sus bajas emisiones, su capacidad para el transporte de un gran número de personas/día y su potencial de crecimiento.

Además, las políticas de las administraciones locales se centran en situar al ciudadano en el centro de importancia del ámbito de la movilidad con medidas como la expansión de las zonas peatonales, los controles de velocidad o la prohibición de vehículos con alta tasa de contaminación en núcleos urbanos grandes.

Por esta razón, el transporte ferroviario y sus derivados son la solución realista al transporte de masas, en este caso particular, en núcleos urbanos europeos. Más concretamente, en España, 22 ciudades se están replanteando la implementación de infraestructuras tranviarias (El Diario, 2025).

Más aún, se prevé que se siga expandiendo el servicio que da este tipo de transporte (Pau Rodríguez, 2025), por lo que la proyección de esta propuesta es muy favorable, ya que además de seguir la línea de expansión, supone una ayuda suplementaria para la descongestión de zonas excesivamente concurridas por el turismo y afluencia masiva en zonas localizadas en urbes de grandes dimensiones.

1.1.2 Barcelona

Dentro de las ciudades europeas se pretende mejorar la fluidez del tránsito de personas, por lo que tendrá una mayor aplicabilidad en zonas turísticas ya que son las que mayor ralentización, respecto al transporte público, sufren.

Además, se debe tener en cuenta el mayor estrechamiento de las calles turísticas debido a su antigüedad y zonas protegidas, frente a aquellas de tránsito ordinario con mayor facilidad de tránsito.

Estamos ante una ciudad europea con un clima mediterráneo suave. Barcelona, al ser ciudad costera, cuenta con inviernos suaves y veranos muy calurosos, por lo que el vehículo tendrá que estar preparado para evitar sobrecalentamiento tanto de los pasajeros como de los sistemas, por esto, se debe prestar especial atención a la elección de los materiales seleccionados. Además, para su futura aplicabilidad en otras ciudades de interior, también se deberían tener en cuenta las temperaturas frías y sería interesante dar margen en ambos extremos del termómetro.

Además, como hemos comentado con anterioridad la propuesta se ha pensado para un entorno de alto componente turístico, es por esto, que el componente estético será esencial para su buena acogida. Por esta razón, se realiza un análisis exhaustivo de las diferentes referencias estéticas que influirán en el diseño exterior del concepto.

1.1.2.1 Tram Barcelona

Para un mayor entendimiento de la importancia de este medio de transporte en la historia de la ciudad se indaga en su historia a lo largo de los años, a través de los hitos más relevantes.

El primer tranvía instaurado en la ciudad data de 1872 (El Nacional, 2022) , siendo arrastrado por cuatro caballos, sistema conocido como “tracción de sangre”. Más tarde, en 1877, se implementó el primer tranvía a vapor con un recorrido más largo y evitando su circulación por Plaza Catalunya debido a su excesivo ruido y emisión de humo.

No fue hasta 1899 que la fuerza motora no pasó a ser eléctrica, lo que impulsó su desarrollo hacia una potente red de transporte que comunicase todos los barrios con el centro de la ciudad en 1907.

Empezó como un medio de transporte elitista movido por empresas privadas, pero no tardó demasiado en convertirse en el medio de movilidad para 2,5 millones de pasajeros al año.

Uno de los hitos históricos más relevantes del Tram de Barcelona corresponde a el atropello de Gaudí, causando su muerte en 1926.

Sin embargo, con el aumento de sus tarifas, tras varias revueltas y la llegada del automóvil el tranvía entro en declive y en 1971 se hizo el último recorrido para dejar paso a los autobuses como una vía de transporte más ágil. En contra de las previsiones de expansión de este nuevo método de transporte y con la subida del petróleo en 1973 se llegó a la conclusión de que no había sido una apuesta demasiado acertada.

Durante esta época el único coche en funcionamiento era el Blau de Barcelona, aunque realizaba más acción lúdica que funcional durante 30 años.

Sin embargo, por la subida del petróleo se reconsideró la vuelta del tranvía y en 1997 se hizo una primera prueba piloto del proyecto de un nuevo tranvía.

En 2004 entró, oficialmente, el TramBaix y el TramBesòs (Palmer, 2024), constituyendo las dos únicas líneas que circulan a día de hoy con el debate abierto de cohesionarlas en una única.



Figura 2. Tranvía Blau de Barcelona.

2. RECORRIDO

El recorrido diseñado es circular y **exclusivamente urbano** por zonas con alto componente turístico y, por tanto, de elevado tránsito. Este determinado recorrido conlleva una serie de características bajo las que el vehículo será capaz de circular (Sancho, 2024). Algunas de las más importantes son las listadas a continuación.

- Tránsito por calles estrechas y radios de giro reducido.
- Compartición de un tramo del recorrido con el tranvía de Barcelona.
- Recorrido de longitud 12,18 km y duración de 61 minutos.
- Pendientes de 7º ascendentes y 4º en bajada.
- Radio de giro mínimo 12 m.
- Calle más estrecha 25 m siendo una distancia de pared a pared de 4,5 m.
- Duración media de parada 15 s.
- Distancia compartida con el tranvía de Barcelona de 1,8 km.
- Servicio de 05:00am – 00:00am, al igual que el tranvía.
- Recorrido circulado por 6 coches a la vez, para suplir las necesidades de grandes masas.



Figura 3. Diseño del recorrido del vehículo monocabina (Indicador en azul el inicio y fin de línea) (Sancho, 2024).

3. VEHÍCULOS ACTUALES

En primera instancia, es necesario analizar el material rodante que actualmente se encuentra en circulación, con el objetivo de sustraer referencias para el posterior diseño de nuestra propuesta.

3.1 Material rodante

Existen dos tipologías principales de locomotoras en la actualidad, la de tipo europeo y la de tipo americano. Si bien es cierto que se implementaron para adaptarse al territorio y las vías de ambos continentes, a día de hoy se emplea una u otra en función del tipo de vía de la zona de circulación y la carga a desplazar; y no en función del emplazamiento.

3.1.1 Locomotoras

3.1.1.1 Locomotora europea

Esta locomotora 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 (Segula Technologies, 2024a).

Este tipo de locomotora está pensada para su circulación por vías estrechas y con curvas pronunciadas debido a la multitud de zonas con relieve del territorio europeo. Por esto, han sido pensadas con un diseño compacto y ligero y con sistemas de freno avanzados debido a su alta frecuencia de circulación y la variabilidad de las cargas que desplaza tanto de pasajeros como mercancías.

Además, por el contexto cultural y marco histórico han sido diseñadas con una estética de menor peso visual y en búsqueda de conseguir cierta ventaja aerodinámica.

Siendo esta la tipología estética más cercana al diseño objetivo que buscamos.



Figura 4. Locomotora Clase 99 de Stadler para GB Railfreight (Stadler, 2023).

3.1.1.2 Locomotora americana

Al contrario que en los modelos europeos, los pasillos para el tránsito de usuarios se encuentran en ambos laterales, mientras que los equipos en la zona central (Segula Technologies, 2024).

Debido a la planitud del territorio americano, las locomotoras son más robustas y con menor capacidad de giro, ya que sus vías son mayoritariamente rectas y de muy larga distancia. Además, su mayor potencia se justifica por el gran peso de los trenes de mercancías a desplazar.

Con frecuencia hacen uso de bogies más grandes para dotar la locomotora de mayor estabilidad lo que, junto a su mayor potencia en referencia a las europeas, las hace más eficaces frente al transporte de mercancías.



Figura 5. Locomotora KiwiRail de Stadler (Stadler, 2023).

3.1.2 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 6. Modelo Urbos 100/100x de CAF como el nuevo modelo de tranvía de Zaragoza (CAF, 2023).



Figura 7. Tranvía de Barcelona de Tram.

La estética de este tren ligero destaca por abundante acristalamiento para la reducción del peso visual y búsqueda de una estética homogénea con el entorno de aplicación. Se observa la predominancia de acabados suaves y redondeados buscando la menos resistencia al aire. Por otro lado, los interiores son sobrios y diáfanos, de modo que no se entorpezca la afluencia de los pasajeros. Una característica muy destacable de los tranvías es el piso en la línea de suelo, con una distancia aproximada de 35 cm respecto del suelo para garantizar su accesibilidad rápida y para todo tipo de usuario (Segula Technologies, 2024).

Además, el sistema tranviario tiene una tendencia expansiva debido a sus ventajas frente al resto de medios de transporte público. A continuación, se lista una serie de ventajas y desventajas comparando el tranvía con sus competidores directos.

3.1.2.1 Tranvía vs autobús

En la siguiente tabla se listan las ventajas e inconvenientes que presenta el uso del tranvía frente al uso de autobús como medio de transporte urbano recurrente.

Ventajas	Inconvenientes
• Menor ruido. • Menor contaminación. • Menor consumo energético por viajero. • Ahorro económico de las ciudades al reducir la necesidad de importación de combustibles fósiles. • Menor espacio necesario para su circulación. • Menor tiempo de parada. • Mayor capacidad. • Mejora el atractivo de centros urbanos en términos económicos. • Mayor fiabilidad en tiempos de llegada. • Circulación más suave. • Mejor accesibilidad.	• Mayor coste de construcción de infraestructura. • Recorrido limitado.

Tabla 1. Ventajas e inconvenientes del uso del tranvía frente al uso de autobús.

3.1.2.2 Tranvía vs metro

En la siguiente tabla se listan las ventajas e inconvenientes que presenta el uso del tranvía frente al uso de metro como medio de transporte urbano recurrente.

Ventajas	Inconvenientes
• Menor consumo energético. • Construcción de infraestructura más económica. • Mejor accesibilidad.	• Capacidad de transporte menor. • Mayor impacto urbanístico.

Tabla 2. Ventajas e inconvenientes del uso del tranvía frente al uso de metro.

3.1.3 Vehículos autónomos

Teniendo en cuenta que gran parte del factor innovador de este proyecto es la autonomía del vehículo, se debe considerar el estado actual de esta tipología particular de vehículo, ya que el desarrollo de niveles de conducción autónoma limitan la implementación del objeto de este proyecto.

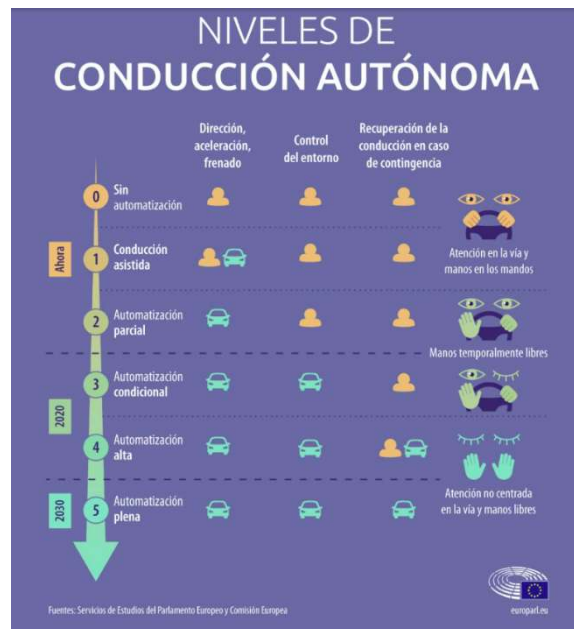


Figura 8. Evolución de la conducción autónoma en territorio europeo

En la actualidad, en Europa se está trabajando con un nivel 3 de automatización, es decir, un sistema capaz de realizar todas las tareas de conducción, pero con determinadas limitaciones; esto hace que el conductor deba estar alerta para responder ante cualquier necesidad de intervención (DGT, 2024)



Figura 9. Vehículo con autonomía nivel 3 apto para la circulación en España.

Lo más semejante a esta idea de proyecto que existe en la actualidad es el ART en China (CRRC, 2024), como un autobús – tranvía totalmente autónomo, aunque de momento existe la obligatoriedad de que el chófer vaya en el vehículo durante su actividad.

La evasión de accidentes y correcta circulación se consigue a través de sensores y cámaras que detectan las líneas reflectantes pintadas en el suelo consiguiendo contraste con el color oscuro de la carretera, ya que no va sobre raíles sino sobre llantas convencionales. Mediante este sistema mantiene su ruta y puede desviarla relativamente en caso de encontrar un obstáculo como podría ser un coche en doble fila.

Además, este autobús – tranvía es ampliable ya que permite la adición de más coches al cuerpo principal del mismo.



Figura 10. Tranvía autónomo ART (Autonomous Rail Rapid Transit), en China.

El proyecto que compone parte de los antecedentes y que se toma como referencia para los cálculos es el vehículo autónomo de 2getthere (2getthere, n.d.). Este vehículo ha sido adaptado para adquirir la capacidad de circular sobre raíles, de modo que la toma de datos y dimensionamiento eléctrico sea lo más realista posible.

Este vehículo se concibe como un minibús para el transporte de pequeños grupos de pasajeros en ciudades de gran afluencia de personas, siendo el primero en su categoría con capacidad de movimiento bidireccional, lo que le facilita en gran medida la subida y bajada de pasajeros al poder adaptarse a la estación de llegada en función de la geometría de la misma.

Además, su estética y acabados han sido pensados para mejorar el confort y la experiencia de los usuarios que hagan uso de este vehículo.



Figura 11. GRT minibús eléctrico autónomo de carretera GRT de 2getthere.

3.1.4 Vehículos monocabina

En zonas rurales de Alemania se han comenzado a implementar los conocidos como “*Monocab Owl*” (Monocab, n.d.), cuyo principal objetivo es dotar a zonas rurales, con ausencia de transporte público, de opciones de movilidad sostenible en sustitución al transporte privado.



Figura 12. Taxi Monocab en Alemania.

Este vehículo circula por un solo carril, de modo que puedan circular dos cabinas por la misma vía. Se estabiliza gracias a un sistema giroscópico de funcionamiento ininterrumpido que mantiene la posición del coche gracias al momento angular.

Esta cabina está destinada al desplazamiento de 4-6 pasajeros y habilitado para albergar bicicletas, carritos de bebé o silla de ruedas. Además, está disponible todos los días del año en horario las 24 horas del día y los usuarios, mediante aplicación, son los que solicitan la parada del vagón en determinadas ubicaciones de parada.

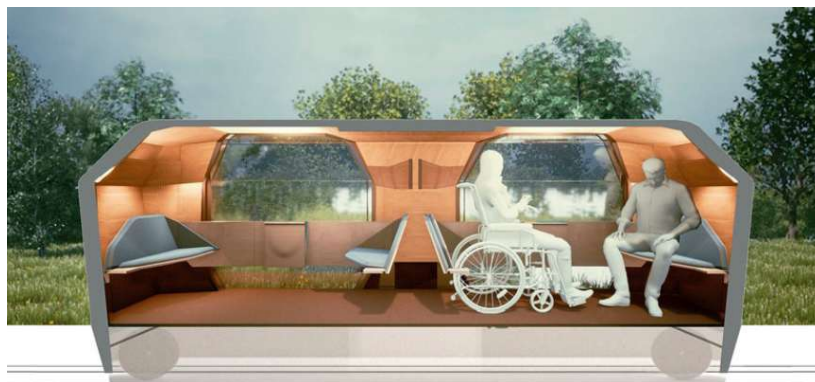


Figura 13. Interior del Monocab Owl.

4. ANTECEDENTES DIRECTOS

Se toman diversos proyectos de aligeramiento de material rodante como referencia, concretamente, los procesos de desarrollo para la obtención de la estructura principal, ya que supone el grueso del proyecto.

4.1 Talgo

Dentro del programa europeo conocido como Shift2Rail, la compañía de material rodante Talgo con un modelo de tren de alta velocidad como es el 102/112 de Renfe persigue reducir el peso de este vehículo en un 20% mediante la introducción de un material de alta resistencia y baja densidad como es el CFRP o más comúnmente conocido como fibra de carbono (García, 2024).

Gracias a esta reducción de peso se consiguen tres puntos clave que a su vez son las motivaciones que impulsaron el inicio de este estudio:

- Menor consumo energético al reducir la resistencia opuesta por el propio vehículo.
- Mayor posibilidad de ocupación, ya que el peso reducido se puede transformar en pasaje a desplazar.
- Bajada del precio de los peajes por la reducción de carga del vehículo.

Se tuvieron en cuenta varias posibilidades de materiales, todos ellos con el requisito del cumplimiento de la normativa de fuego y humos EN 45545. Finalmente se optó por un conjunto híbrido de CFRP y aluminio.

Para el diseño se cogió como referencia un tren de la compañía como es el Talgo 350 de modo que únicamente se rediseñase la parte central compuesta por los laterales el techo y el bastidor. Estas partes rediseñadas fueron unidas con uniones mecánicas y adhesivas para garantizar la seguridad de dichas uniones.

Se realizaron diversos ensayos acústicos, de fuego, de impacto de balasto o de análisis de elementos finitos adaptado a materiales compuestos. Así como, otras pruebas en banco de ensayos siguiendo la normativa EN 12663.

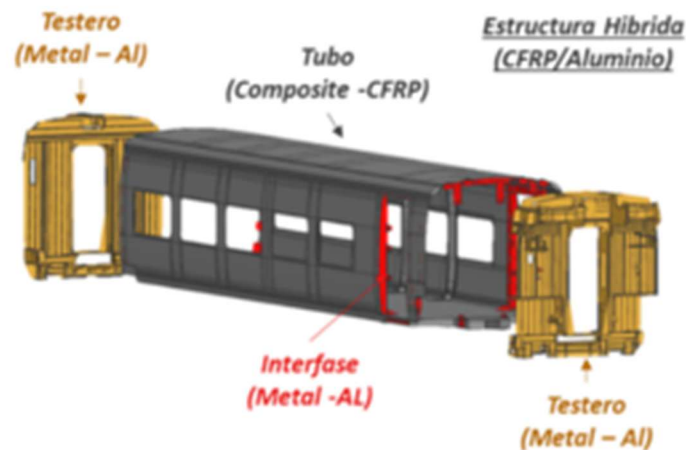


Figura 14. Caja ligera de Talgo.

El estudio resultó favorable ya que se consiguió una reducción de peso de, aproximadamente 800 kg, estando a la altura de la previsión de conseguir una reducción entorno al 20% del peso original.

4.2 CETROVO 1.0.

El 10 de enero de este año 2025, se puso en circulación el CETROVO 1.0 como resultado de la colaboración entre la empresa CRRC (CRRC, 2025) y el grupo metro Qingdao.

En comparación con los trenes que, tradicionalmente, se han fabricado a base de metales, se ha conseguido una estructura un 25% más ligera y un bogie con la mitad de peso. Con estas reducciones de peso, se consigue un 7% menos de consumo energético del vehículo, es decir, alrededor de 130 toneladas de CO₂ menos con carácter anual.

Además, el CFRP tiene mayor resistencia, reduce el ruido y la vibración resultantes de la actividad del tren; lo que supone, un incremento de la seguridad y confort del usuario pasajero.

Por último, consta de una plataforma de gemelos digitales que permite el reconocimiento de fallos en los diferentes sistemas, lo que reduce el coste de mantenimiento en un 22%.

El único inconveniente de esta innovación es la inversión inicial, ya que el CFRP es un 35% más costoso que el acero o el aluminio. Sin embargo, se prevé que la mayor calidad y resistencia del material prolongue la durabilidad del vehículo, por lo que, junto al menor coste de mantenimiento y reducción de consumo energético, a largo plazo sea rentable.



Figura 15. Cetrove 1.0 (Arteaga, 2025).

5. NORMATIVA APLICABLE

Antes del diseño del coche, se debe tener en cuenta las diferentes normativas aplicables.

5.1 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 gálibo 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 la 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).

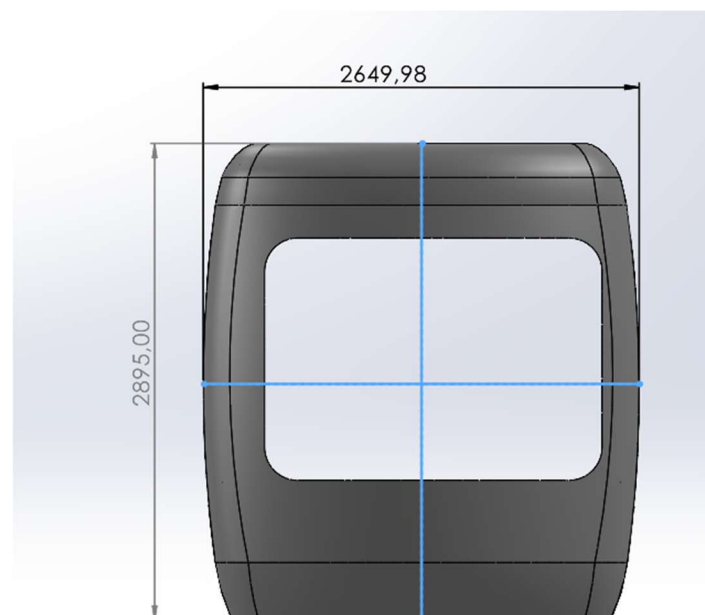


Figura 16. Dimensiones generales en alzado del Civitam.

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 Zaragoza. (Listadotrenes.es, 2020).

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

5.2 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.).

Además, este proyecto, se desarrolla de manera paralela y simultánea al diseño del interiorismo realizado por Julia Horno. Por esta razón, la disposición y distancias de los diferentes elementos dependen, en parte, de la normativa que rige el interiorismo, por lo que quedan aplicadas de manera indirecta.

5.3 Materiales

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.

Por otro lado, la resistencia a esfuerzos deberá ser favorable en cuanto a la norma EN 12663, ya que rige la resistencia de vehículos ferroviarios al establecer los límites de deformación o criterios de carga.

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.

6. ESTÉTICA

6.1 Entorno y contexto

6.1.1 Barcelona

Dentro de las ciudades europeas lo que se quiere es descongestionar el tránsito de personas por lo que tendrá una mayor aplicabilidad en zonas turísticas ya que son las que mayor afluencia de viandantes sufre. Es por esto, que tenemos que tener en cuenta el mayor estrechamiento de las calles frente a aquellas de tránsito ordinario.

Siendo una ciudad europea con un clima mediterráneo suave. Barcelona, al ser ciudad costera, cuenta con inviernos suaves y veranos muy calurosos, por lo que el vehículo tendrá que estar preparado para evitar sobrecalentamiento tanto de los pasajeros como de los sistemas (materiales). Además, para su futura aplicabilidad en otras ciudades de interior también se deberían tener en cuenta las temperaturas frías por lo que sería interesante dar margen en ambos extremos del termómetro.

Como se ha comentado con anterioridad en los antecedentes, la propuesta se ha pensado para un entorno de alto componente turístico, es por esto que el componente estético será esencial para su buena acogida. Por esta razón se realiza un análisis exhaustivo de los diferentes componentes estético que influirán en el diseño exterior del concepto.

6.1.1.1 Arte y cultura

Dentro de la cultura y el arte en Barcelona cabe mencionar sin duda la arquitectura de Gaudí, de carácter modernista y con gran cuidado por los detalles (Fundación Catalunya-La Pedrera, n.d.); (Hispagua, 2002). Su importancia en la cultura de esta ciudad queda más que evidenciada con obras como La Sagrada Familia, la casa Batlló o el Parque Güell.

Además de Gaudí, no pasa desapercibido el barrio gótico albergado por edificios medievales de gran componente histórico y cultural.

También hay una ferviente presencia de la corriente contemporánea.

A parte de la arquitectura hay también un fuerte componente musical y teatral defendido por obras como el Palau de la Música Catalana o el Teatro Liceu.

6.1.1.2 Estética

En este proyecto buscamos una propuesta que dé solución a la congestión excesiva en entornos turísticos, por lo que el componente estético tiene un peso mayor que en transportes cuya única prioridad es la movilidad de masas.

Tal y como hemos mencionado con anterioridad, Barcelona está marcada por la huella del arte de Gaudí, ubicada en el marco histórico del modernismo.

6.1.1.2.1 Formas

Como representante del modernismo, Gaudí siguió las características propias de dicha corriente, pero dándole el toque personal que tanto lo ha distinguido de sus compañeros de época. Se enfocó en fusionar formas inspiradas en la naturaleza y geométricas llenas de color y simbolismo; un concepto que hasta ese momento no había sido concebida.

Estas formas naturales le llevaron a una estética orgánica con la obtención de estructuras con apariencia de plantas, animales o elementos geológicos con el objetivo de sumergir los edificios en su entorno. Los principios más destacables en los que basó su carrera como artista son:

1. **Formas orgánicas:** evasión de líneas rectas y rígidas, utilizando curvas fluidas y sinuosas que imitan la naturaleza. Ejemplos de estas formas pueden ser las de las olas del mar o las hojas.
2. **Elementos diferenciales:** cerámica vidriada, vidrios de colores y trencadís (adorno empleado en los mosaicos) (Barcino, 2025);(Fundación Sagrada Familia, n.d.), para decorar tanto fachadas como interiores y la creación de efectos y el juego con la luminosidad.
3. **Ámbito estructural:** nuevas técnicas constructivas, como arcos catenarios, que permiten mayor ligereza y resistencia en las estructuras.
4. **Simbolismo:** religioso, cultural (centrado en Barcelona) y sobre la naturaleza.
5. **Inmersión en el entorno:** buscaba la integración de edificaciones con el paisaje específico, para la percepción de sus obras como un conjunto con el entorno en el que se ubican y no rompen la armonía de la estética general.



Figura 17. Park Güell en Barcelona de Gaudí.

6.1.1.2.2 Colores

Además de las formas, el color tiene un gran peso en la obra de Gaudí en su aplicación en Barcelona. Como se ha mencionado en el apartado de formas (0.3.1.1), uno de sus objetivos arquitectónicos era la integración de sus obras al entorno, lo que consiguió, en parte, gracias a la colorimetría empleada acorde con la estética de la ciudad.



Figura 18. Paleta de colores representativa de Barcelona (Sherwin-Williams, 2018).

6.1.2 Movimiento moderno europeo

El entorno específico de aplicación es la ciudad de Barcelona, sin embargo, en aras de garantizar el carácter escalable del proyecto se toma un nivel más de abstracción. Como se ha mencionado en apartados anteriores, la obra de Antoni Gaudí se ubica en la corriente modernista; movimiento artístico que tuvo cabida en gran parte del territorio europeo y que servirá de nexo estético del Urban Monocab entre las ciudades europeas a las que se amplíe el presente proyecto en futuras etapas de desarrollo.

6.1.2.1 Arte moderno

Esta corriente artística data de finales del siglo XIX y se extiende hasta principios del siglo XX y aboga por romper con los movimientos clásicos que inundaban la sociedad del momento como son el romanticismo, eclecticismo o el historicismo académico, entre otros (Esther Ciriano, 2021).

Este novedoso estilo artístico fue acogido por gran parte del territorio europeo de tal forma que se denominó diferente según el país de adopción.

- Modernismo en España.
- Art Nouveau en Bélgica y Francia.
- Modern Style en Gran Bretaña.
- Stile Liberty o Floreale en Italia.
- Sezessionstil en Viena.
- Jugendstil en Alemania.

Esta última variante del modernismo acuña el término *Gesamtkunstwerk*, haciendo referencia al objetivo del movimiento artístico de conseguir la “obra de arte total” con la integración de las seis

artes (música, danza, poesía, pintura, escultura y arquitectura). Esta obra de arte total se alineaba con el objetivo máximo del modernismo de llevar un arte joven a todas las facetas de la vida.

En rasgos generales, el modernismo a lo largo del territorio europeo se reconoce por las siguientes características:

- Libertad de expresión y ruptura con las estructuras establecidas, clara evidencia de ello es la variedad de nombres que se le atribuyeron a esta corriente.
- Uso de líneas sinuosas con alusión a formas vegetales.
- Introducción del hierro en la arquitectura como elemento decorativo y no meramente funcional.
- Estilización de formas con el alejamiento de la forma realista y profusa decoración.
- Amplia variedad de composiciones ornamentales y vuelta del azulejo como foco decorativo.
- Implementación de todos los materiales de la época en los acabados finales; desde el hierro y el acero, pasando por el hormigón y llegando a la cerámica y el vidrio.
- Concepción de las estructuras como “organismos vivos”.
- Concepto de “obra total”.

Además, se dieron dos corrientes diferenciadas. Estas son, *Einfühlung*, caracterizada por el uso de formas de carácter orgánico, cóncavas y convexas; y la abstracción de carácter geométrico.



Figuras 19 y 20. Edificios Lavirote, París, Francia y Old England, Bruselas, Bélgica.

Como vemos en estos dos exponentes del movimiento moderno, se evidencia la dicotomía causada por la libertad de expresión con la presencia de obras de carácter más fabril y sobrio, en el mismo marco temporal que obras de mayor componente artístico y orgánico.

6.1.2.2 Conclusiones investigación estética

Siendo el movimiento moderno un nexo de unión histórico entre grandes ciudades europeos, resulta idóneo explotar su base artística para el desarrollo del factor estético del presente proyecto. Más aún, siendo Antoni Gaudí, cuya obra está centrada en Barcelona, uno de los exponentes más reconocidos de esta corriente.

Partiendo de esta corriente, se busca encontrar un equilibrio entre lo abstracto de las formas orgánicas y la asimetría con perfiles de mayor robustez y seriedad constituidos por formas geométricas. Con esto se quiere conseguir la completa y fácil adaptabilidad del coche resultado de este proyecto, independientemente de cualquiera que sea su entorno de aplicación final.

Por esta misma razón, pese a que se define Barcelona como entorno de aplicación derivado de los antecedentes del proyecto, se evita el diseño de la propuesta final con un grado elevado de personalización del Urban Monocab para dicha ciudad, prefiriendo un grado más de abstracción consiguiendo una opción que se integre completamente en el entorno definido.

7. BIBLIOGRAFÍA

- 2getthere. (n.d.). *Vehículo GRT autónomo*. 2getthere. Retrieved September 5, 2025, from <https://www.2getthere.eu/>
- Ajuntament de Barcelona. (2017). *Historia del tranvía en Barcelona*. <https://ajuntament.barcelona.cat/mobilitat/tramviaconnectat/es/99-anos-al-servicio-de-los-barceloneses>
- 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
- Arteaga, R. (2025). *Inspenet*. <https://inspenet.com/noticias/tren-de-fibra-de-carbono-cetrovo-1-0/>
- Barcino. (2025). *Cerámica y color en Gaudí*. <https://barcinodesigns.com/es/blog/trencadis-origen-y-relacion-con-gaudi/>
- CAF. (n.d.). *Guía para el cálculo de capacidad de pasajeros de CAF*.
- CAF. (2023). *Modelo Urbos 100/100x de Zaragoza*.
- 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
- DGT. (2024). *Conducción autónoma en Europa*. <https://www.dgt.es/muevete-con-seguridad/tecnologia-e-innovacion-en-carretera/vehiculos-de-conduccion-automatizada/>
- El Diario. (2025). *Ciudades españolas estudian implementar tranvías*. https://www.eldiario.es/catalunya/espana-tranvias-22-ciudades-asumir-nuevo-ferrocarril-urbano_1_12186406.html
- El Nacional. (2022). *Historia del tranvía en Barcelona*. https://www.elnacional.cat/es/barcelona/tramvia-barcelona-relacion-amor-odio-150-anos_719814_102.html
- Esther Ciriano. (2021). *Apuntes de Historia y Estética del Diseño*.
- Fundación Catalunya-La Pedrera. (n.d.). *Antoni Gaudí y el modernismo catalán*. Retrieved September 5, 2025, from <https://www.lapedrera.com/es/arquitecto-antoni-gaudi/figura>
- Fundación Sagrada Familia. (n.d.). *Arquitectura y simbolismo*. Retrieved September 5, 2025, from <https://urldefense.com/v3/https://blog.sagradafamilia.org/es/trencadis-marca->

[gaudi/#!/Dy9BOQd7!Df3GkLJUonr3EYzZPFmNbp7hqJKHRyVxTjAjKqFARu3GTcOO4IU0W1ZQ-QCJloJ06nnW5Y-P4i23VZuRxKP18Yxngw\\$](https://www.gaudi.es/#!/Dy9BOQd7!Df3GkLJUonr3EYzZPFmNbp7hqJKHRyVxTjAjKqFARu3GTcOO4IU0W1ZQ-QCJloJ06nnW5Y-P4i23VZuRxKP18Yxngw$)

García, P. (2024). Caja ligera de Talgo. Scipedia.
https://www.scipedia.com/public/Garcia* et al 2024a

Hispagua. (2002). *Patrimonio arquitectónico en Barcelona*.
https://hispagua.cedex.es/sites/default/files/hispagua_articulo/ambienta/n12/articulo6.pdf

Listadotrenes.es. (2020). *Dimensiones de tranvías en Zaragoza*. Listadotrenes.Es —
<https://www.listadotren.es/carac/fichadatos.php?id=198>.
<https://www.listadotren.es/carac/fichadatos.php?id=271>

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

Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible. (2021). *Anchos de vía ferroviaria en España*.
<https://www.transportes.gob.es/el-ministerio/campanas-de-publicidad/2021-anio-europeo-del-ferrocarril/conociendo-el-ferrocarril/el-ferrocarril-espanol-en-cifras>

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

Palmer, J. (2024). *Elnacional.cat*. https://www.elnacional.cat/es/barcelona/tranvias-barcelona-noventa-nueve-anos-historia-treinta-tres-travesia-desierto_1200284_102.html

Pau Rodríguez. (2025). *El Diario*. https://www.eldiario.es/catalunya/espana-tranvias-22-ciudades-asumir-nuevo-ferrocarril-urbano_1_12186406.html

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

Segula Technologies. (2024a). *Locomotoras europeas y americanas*.

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

Sherwin-Williams. (2018). *Paleta de colores representativa de Barcelona*.
<https://conceptsBarcelona.wordpress.com/2018/10/30/paleta-de-colores-barcelona/>

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

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Comparativa de anchos de vía en vías españolas. 4

Figura 2. Tranvía Blau de Barcelona. 6

Figura 3. Diseño del recorrido del vehículo monocabina (Indicador en azul el inicio y fin de línea) (Sancho, 2024).
..... 7

Figura 4. Locomotora Clase 99 de Stadler para GB Railfreight (Stadler, 2023). 8

Figura 5. Locomotora KiwiRail de Stadler (Stadler, 2023). 9

Figura 6. Modelo Urbos 100/100x de CAF como el nuevo modelo de tranvía de Zaragoza (CAF, 2023). 9

Figura 7. Tranvía de Barcelona de Tram. 10

Figura 8. Evolución de la conducción autónoma en territorio europeo 12

Figura 9. Vehículo con autonomía nivel 3 apto para la circulación en España. 12

Figura 10. Tranvía autónomo ART (Autonomous Rail Rapid Transit), en China..... 13

Figura 11. GRT minibús eléctrico autónomo de carretera GRT de 2getthere. 13

Figura 12. Taxi Monocab en Alemania..... 14

Figura 13. Interior del Monocab Owl. 14

Figura 14. Caja ligera de Talgo. 16

Figura 15. Cetrovo 1.0 (Arteaga, 2025)..... 16

Figura 16. Dimensiones generales en alzado del Civitam. 17

Figura 17. Park Güell en Barcelona de Gaudí..... 21

Figura 18. Paleta de colores representativa de Barcelona (Sherwin-Williams, 2018). 22

Figuras 19 y 20. Edificios Lavirote, París, Francia y Old England, Bruselas, Bélgica..... 23

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Ventajas e inconvenientes del uso del tranvía frente al uso de autobús.....</i>	<i>11</i>
<i>Tabla 2. Ventajas e inconvenientes del uso del tranvía frente al uso de metro.....</i>	<i>11</i>
<i>Tabla 3. Número de personas por metro cuadrado para cada tipo de carga en cada tipo de vehículo (CAF, n.d.).</i>	<i>18</i>
<i>.....</i>	<i>18</i>

FIN DEL DOCUMENTO



Universidad
Zaragoza

2.DIMENSIONAMIENTO DE CARGAS

ANEXOS

Autor:

Esther Ciriano Fernández

Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura

2025

ÍNDICE

0. Abstract	3
1. Conjuntos.....	4
1.1 Sistema de tracción (Bogie)	4
1.1.1 Bogie convencional vs bogies simples.....	4
1.1.2 Bogie de tracción simple.....	6
1.2 Sistema de climatización	7
1.3 Arenero	8
1.4 Sistema de carga eléctrico	9
1.4.1 Batería.....	9
1.4.2 Conjunto de inducción electromagnética	11
1.4.3 Bobina receptora.....	11
1.5 Cajón eléctrico	13
2. Otras cargas.....	15
2.1 Pasaje	15
2.2 Diseño interior	16
2.3 Conclusiones	16
3. Bibliografía	17

0. ABSTRACT

En este anexo se recogen la información y cálculos necesarios para la obtención tanto de las dimensiones como la masa total con el objetivo final de emplear los datos obtenidos tanto para la distribución sobre la estructura, como para el cálculo estructural.

1. CONJUNTOS

Dado que los diferentes sistemas necesarios para el funcionamiento básico de un vehículo ferroviario van sujetos a la estructura, independientemente del método de unión, se tienen en cuenta los principales y más voluminosos sistemas, tanto para el dimensionamiento, como para los cálculos en vistas de garantizar y justificar la robustez y fiabilidad de la estructura final.

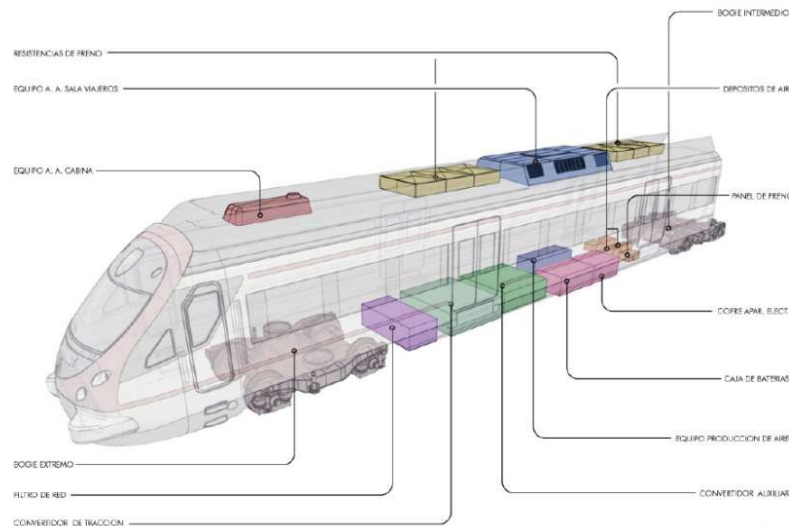


Figura 1. Ubicación de volúmenes de los sistemas fundamentales de un tranvía

1.1 Sistema de tracción (Bogie)

En un vehículo ferroviario de grandes o medianas dimensiones, como pueden ser trenes o tranvías, la fuerza de tracción y la dirección de circulación son proporcionadas por varios bogies.

Teniendo en cuenta los reducidos radios de giro (12 m (Sancho, 2024)) de las vías por las que tiene que poder circular, la tipología y dimensión de los bogies son cruciales ya que deberán cumplir ciertos criterios de estabilidad y maniobrabilidad.

1.1.1 Bogie convencional vs bogies simples.

A continuación, se realiza un análisis enfocado en las ventajas y desventajas de la implementación de un sistema de dos bogies simples de tracción frente a un único bogie convencional con el objetivo de resolver, si objetivamente es la opción óptima para nuestro caso.

Ventajas	Inconvenientes
Tracción y adherencia superior , al constar de dos ejes motrices, hay una mejor repartición de la fuerza de tracción. Lo que también ayuda frente a situaciones climáticas adversas de provoquen dificultades de adherencia (lluvias, obstáculos en la vía...) en tramos con inclinación o para la consecución de arranques suaves.	Mayor costo tanto de adquisición como de mantenimiento ya que todos los componentes y sistemas están duplicados. Además de la necesidad de repuestos dobles.
Distribución simétrica , lo que resulta en un menor soporte de la carga de tracción en cada bogie reduciendo el desgaste y aumentando la durabilidad de los componentes del conjunto como ruedas, ejes y motores.	Software asociado más complejo debido a la necesidad de coordinación de ambos sistemas en su actividad regular de modo que no se den frenados no uniformes o se den puntos de consumo o tensión en alguno de los sistemas.
Mayor funcionalidad ya que en caso de que uno de los bogies falle, el segundo, aunque con potencia limitada, puede llevar el vehículo a una zona segura para su reparación o retirada.	Mayor peso debido al duplicado de los sistemas.
Mejor comportamiento dinámico debido a que hay una mayor maniobrabilidad con dos ejes y una mejor distribución de los esfuerzos en el piso del vagón; la cual actúa como plataforma.	
Facilidad de diseño gracias al buen aprovechamiento del espacio debido a la menor dimensión de los bogies simples y la mayor separación entre ambos ejes.	

Tabla 1. Comparación entre la implementación de dos bogies simples de tracción y un bogie de tracción convencional.

Para este caso concreto, optar por **dos bogies de tracción simple** se considera la solución óptima ya, que a pesar del mayor peso del conjunto, el aligeramiento del peso total a consecuencia del diseño estructural compensa de manera contundente este peso extra. Por otro lado, siendo uno de los mayores retos del proyecto, las dimensiones reducidas del vehículo, la distribución de sistemas y el diseño interior resultan factores clave para el correcto funcionamiento tanto del coche como del servicio al que será destinado.

1.1.2 Bogie de tracción simple

Ante la escasa información de las dimensiones de ejes de tracción simple para su dimensionamiento (Segula Techonolgies, 2024), se cogen como referencia proyectos internos de Segula Techonologies, de modo que, a partir de los sistemas habituales dispuestos de un bogie tradicional se obtenga una dimensión aproximada de un bogie simple.

Largo (mm)	1000
Alto (mm)	800
Ancho (mm)	2350

Tabla 2. Dimensiones de un bogie simple.

Además, se toman datos de los antecedentes del proyecto para la aproximación de los pesos con los que desarrollarán los cálculos. (Sancho, 2024)

Ejes y ruedas (kg)	600,00
Motor y componentes de tracción (kg)	800,00
Sistemas de frenado (kg)	200,00
Conjunto bogie (kg)	1600,00
Peso total (kg)	3200,00

Tabla 3. Masa de las diferentes partes de los ejes tomados como referencia.



Figura 2. Eje montado de tranvía con eje para ruedas independientes.

Si bien, los bogies no afectan directamente al peso extra que debe soportar la estructura, son los puntos de apoyo sobre los que se sustenta el coche, por lo que se considera crucial realizar su dimensionamiento aproximado. Además, como se ha mencionado anteriormente son claves para la distribución y diseño de la estructura del vehículo resultante.

1.2 Sistema de climatización

Debido al factor innovador de nuestro vehículo, debemos tomar como referencia un sistema de aire acondicionado implementado en una aplicación similar a este caso. Para ello, se parte de la marca de aire acondicionado empleada en el tranvía de Barcelona, Thermo King, y se busca un modelo empleado en un vehículo de dimensiones similares.

Se selecciona un aire acondicionado de instalación sobre techo para un bus de tamaño mediano(Hispacold, 2025).



Figura 3. Aire acondicionado de Thermo King para un bus de tamaño mediano.

Alto (mm)	193,00
Largo (mm)	2940,00
Ancho (mm)	1890,00
Peso(kg)	214,00

Tabla 4.Dimensiones aire acondicionado de referencia.

Así como en el modelo de referencia entra el compresor, en los tranvías suele encontrarse centralizado dentro del conjunto del sistema de climatización, por lo que no se tendrán en cuenta las medidas, pero si el peso que aporta.

1.3 Arenero

Otro sistema a tener en cuenta, ya que precisa de una ubicación accesible para su manipulación y llenado, es el sistema de antideslizamiento de las ruedas con respecto a la vía. Este sistema dispensa cantidades controladas de arena sobre el riel para aumentar el rozamiento entre este y la vía. Además, en caso de activarse el freno de emergencia, también se activa para evitar en la medida de lo posible, la distancia de frenado del vehículo. Esta dispensación se realiza a través de aire, agua o vapor, dependiendo del tiepo de locomotora.

En un vehículo ferroviario se disponen de dos areneros por cada eje motor(Sancho, 2024).

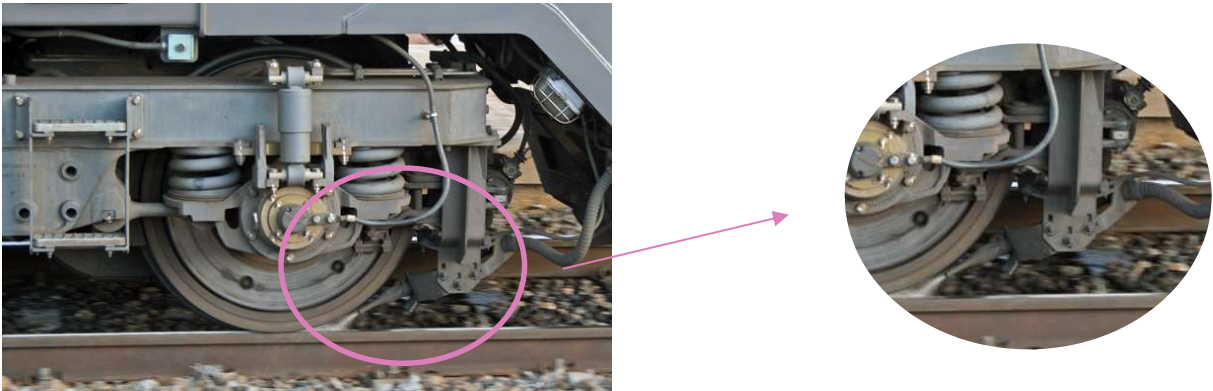


Figura 4. Sistema antideslizamiento de ruedas (arenero).

En el caso de este sistema, depende del fabricante y de las prestaciones particulares de cada coche. Es por esto, que se coge como referencia, el volumen de un arenero cuya actividad se centra en un coche de dimensiones semejantes al que se propone en este proyecto.

Además, hay que contar que para una efectividad óptima es preciso tener un arenero por cada rueda motriz, por lo que en nuestro caso se deberán implementar cuatro.

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

Tabla 5. Medidas del arenero cogido como referencia.

1.4 Sistema de carga eléctrico

1.4.1 Batería

Como hemos visto en los antecedentes (anexo 1), el sistema de carga se resuelve como una combinación del sistema de carga rápida al final de recorrido mediante CCS (sistema de carga combinado) y las cargas en paradas mediante inducción electromagnética(Sancho, 2024)

Finalmente, la batería seleccionada fue el modelo LTO de Max 8C de ABB y sus características técnicas se muestran a continuación:



Figura 5. Batería LTO de Max 8C de ABB.

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

Tabla 6. Resumen medidas módulo Batería LTO de Max 8C de ABB.

Technical data

Variants	Unit	8C-500	8C-700	8C-800	8C-850
Rating					
Nominal energy	kWh	20.3	27.9	30.5	33.0
Nominal voltage	V	442	607	662	718
Charge cut-off voltage	V	518	713	778	842
Discharge cut-off voltage	V	288	396	432	468
Peak power charge/discharge, up to	kW	200 / 175	275 / 240	300 / 260	325 / 285
Continuous power charge/ discharge, typical	kW	85	115	125	140
Cell chemistry		Lithium Titanate Oxide (LTO)			
Discharge efficiency		≥98 % at 25°C, 90%-10% SoC, 1C			
Mechanical data					
Dimensions (excl. mounting feet)	mm	L1200 x H484 x W490	L1588 x H484 x W490	L1727 x H506 x W488	L1857 x H506 x W488
Weight	kg	338	454	520	551
Mounting location		Exterior, e.g. roof or underfloor			
Degree of protection		IP 66/x9			
Shock & Vibration		ISO 6469-3, ECE R100, IEC 61373			
Cooling		Liquid cooling (water glycol)*			
		*Cooling power and flow rate to be selected based on operation profile			
Operation and diagnosis					
Communication interface		CANopen, CAN J1939 (in development)			
Service tool		Laptop-based service tool			
Lifetime					
Design life		15 years			
Cycle life		20'000 cycles at 35°C, 10-90 % SOC, 2C/2C			
Tested and certified					
Standards		ECE R100, IEC 62928, UN 38.3, IEC 62619, IEC 62620			

Figura 6. Características técnicas de la batería LTO de Max 8C de ABB (Max 8C High Power Battery Pack for Transportation, 2024).

Para este caso particular, de las especificaciones técnicas de la batería se extrae que tiene integrado el sistema BMS (Battery Management System), por lo que no es necesario su dimensionamiento. Este sistema es esencial para el correcto funcionamiento del sistema de carga ya que va a ser el que permita monitorizar y conocer el estado de los diferentes elementos que intervienen.

Del mismo modo, en función de las prestaciones finales requeridas, el sistema BTMS (Battery Thermal Management System) será seleccionado al efecto. En cualquier caso, va integrado dentro del volumen total considerado para la batería (Max 8C High Power Battery Pack for Transportation, 2024).

$$P = k \cdot f \cdot B \cdot A$$

Ecuación 1. Potencia transferida por una bobina de carga inductiva.

P (kW)	60
k (adimensional)	0,90
f (kHz)	85
B (T)	0,15

Tabla 7. Parámetros para el cálculo del área de la bobina.

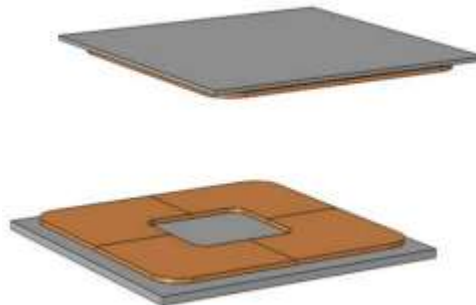


Figura 9. Render de una bobina de inducción electromagnética de sección cuadrada.

Por norma general, se toma una eficiencia del 90%; en este caso del 95%, para poder abarcar casos en los que la bobina receptora y la emisora no coincidan en su totalidad, o se dé algún tipo de interferencia de modo que se asegure la carga suficiente de las baterías.

Despejando la “A” de la ecuación 3, obtenemos un área de 0,52 m². Por motivos de ubicación y para una mayor facilidad a la hora de organizarla junto con el resto de sistemas dentro del coche, se resolverán sus dimensiones según un área cuadrada. Por lo que sería una **bobina cuadrada de lado 72 cm**.

Teniendo en cuenta que debe existir margen para el contenedor que la albergue tendremos una **longitud de lado en torno a 76 cm**.

Si bien es cierto, que el área depende mucho del tamaño del vehículo de aplicación, el grosor de bobinas comerciales que trabajan bajo una potencia de carga de 60 kW oscila entre 5 y 10 cm. Por lo que cogeremos el caso más desfavorable siendo de 10 cm, debido a que es la situación en la que la bobina ocuparía mayor volumen. A esta medida, se le debe añadir el espesor de su contenedor por lo que tendremos un **espesor final en torno a 14 cm**.

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

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

1.5 Cajón eléctrico

Este elemento, dentro de los sistemas del tranvía en aras de su funcionamiento correcto, es básico e imprescindible para la propulsión y el control del tren; es por esto, que se considera su dimensionamiento aproximado de modo que no existan interferencias en el ensamblado del volumen total del coche. Algunas de sus funciones principales se listan a continuación:

- **Suministro energético:** alberga transformadores, convertidores y sistemas para el control de voltaje cuyo objetivo es la recepción y distribución de energía eléctrica.
- **Propulsión del tranvía:** mediante los inversores que contiene transforma la energía eléctrica en mecánica para mover el coche, a los cuales está conectado el motor de tracción.
- **Control y regulación:** también contiene los sistemas para la gestión de diferentes funciones del tranvía entre las que se encuentran la velocidad o la dirección. Esta actividad la realiza mediante sistemas de monitoreo que aseguren el funcionamiento de los diferentes componentes.
- **Refrigeración:** a causa de ser un conjunto eléctrico, se genera calor por lo que en vistas de evitar el calentamiento y garantizar el rendimiento se implementan sistemas de refrigeración.
- **Protección:** se incluyen elementos de seguridad tales como fusibles o disyuntores que permitan la prevención de daños consecuencia de cortocircuitos, sobrecargas u otros fallos internos del sistema.

Una vez se conoce la importancia del cajón eléctrico, se procede a su dimensionamiento aproximado, para lo cual, se toma como referencia tranvías y trenes ya en funcionamiento (Segula Technologies, 2024) que se aproximen lo máximo posible a las características propias del vehículo que en este proyecto se desarrolla.

Largo (mm)	2000,00
------------	---------

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

Tabla 9. Dimensionamiento del cajón eléctrico.

2. OTRAS CARGAS

2.1 Pasaje

Para el cálculo de la ocupación del coche, se toma como referencia la guía de cálculo de capacidad de viajeros de CAF para Renfe, según se explica en el anexo 1.

Para el caso que concierne, solo es requisito una ocupación entre veinte y treinta usuarios. Sin embargo, para que el proyecto se ajuste al método real de diseño y sea apto para futuras ampliaciones, la estructura se ha diseñado para que aguante el margen general aceptado mencionado anteriormente. Se procede a calcular el área del piso por el que se dará la afluencia de usuarios, este cálculo se detalla a continuación gracias a la obtención del área de las diferentes superficies a través de SolidWorks.

Área cabecero (m ²)	Área cuerpo (m ²)	Área total (m ²)
1,74	12,84	14,58

Tabla 10. Área por partes y total del piso del coche.

Una vez se ha calculado el área habitable del interior del vehículo, se puede obtener el número máximo de pasajeros que debe aguantar la estructura teniendo en cuenta los datos de las tablas 3 y 4. De modo que al multiplicar el área del suelo por los usuarios por metro cuadrado nos sale el pasaje máximo a tener en cuenta durante el cálculo.

Pasaje (ud)
117

Tabla 11. Número total de pasajeros que debe aguantar el coche.

La estructura deberá resistir el esfuerzo ejercido por el peso de 117 personas. La presión resultante de la fuerza provocada por el peso se repartirá de forma equitativa por toda la superficie anteriormente calculada, de modo que no se den áreas con picos de tensión en el vehículo.

Teniendo en cuenta el requisito del vehículo autónomo, es decir, sin una figura de conductor que controle la entrada y salida de los usuarios, dimensionar el vehículo para soportar más pasaje del establecido, también como requisito, vela por la seguridad y garantía del servicio que prestará este vehículo.

Además, según la norma UNE-EN 15663 el peso considerado para un pasajero junto con sus pertenencias oscila entre los 65 y los 80 kg(UNE-EN 15663, 2019). Es por esto, que se toma el caso más desfavorable para la garantía de seguridad del pasaje y se toma un peso unitario medio por pasajero de 80 kilogramos.

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

Tabla 12. Cálculo de la fuerza ejercida por el pasaje máximo sobre el piso del coche.

2.2 Diseño interior

En este caso, se toman los datos del proyecto antecedente al presente. Es por esto, que como se puede ver en el apartado de antecedentes del anexo 1, se consideran 200 kg como peso total del diseño interior del vehículo.

2.3 Conclusiones

A partir de las dimensiones y el peso aproximado de cada uno de los conjuntos, conseguimos orientar el diseño de la disposición de los mismos, tanto en la cubierta como bajobastidor.

Una vez ubicados los diferentes conjuntos, conseguimos concretar tanto el diseño estructural como estético, en vistas de conseguir el vehículo más viable y atractivo posible.

Además, el elevado peso de los diferentes sistemas, evidencia la necesidad de reducir el peso del coche a través de otros elementos, ya que los sistemas son concretos y de dimensiones dadas, e intentar reducir su peso puede resultar perjudicial a largo plazo en su actividad y correcto funcionamiento.

Bogie	kg	1600,00
Aire acondicionado		260,00
Arenero		140,00
Batería		338,00
Bobina inductiva		100,00
Cajón eléctrico		140,00
Pasaje		9200,00
Diseño interior		200,00

Tabla 13. Resumen de los pesos de cada conjunto.

3. BIBLIOGRAFÍA

Esther Ciriano. (2021). *Apuntes Física* .

Hispacold. (2025).

Max 8C High power battery pack for transportation. (2024).

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

UNE-EN 15663. (2019).

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de volúmenes de los sistemas fundamentales de un tranvía 4

Figura 2. Eje montado de tranvía con eje para ruedas independientes..... 6

Figura 3. Aire acondicionado de Thermo King para un bus de tamaño mediano. 7

Figura 4. Sistema antideslizamiento de ruedas (arenero)..... 8

Figura 5. Batería LTO de Max 8C de ABB. 9

Figura 6.Características técnicas de la batería LTO de Max 8C de ABB (Max 8C High Power Battery Pack for Transportation, 2024). 10

Figura 7. Esquema sistema eléctrico del conjunto batería..... 11

Figura 8. Carga estática mediante inducción electromagnética..... 11

Figura 9.Render de una bobina de inducción electromagnética de sección cuadrada. 12

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Comparación entre la implementación de dos bogies simples de tracción y un bogie de tracción convencional.</i>	<i>5</i>
<i>Tabla 2. Dimensiones de un bogie simple.</i>	<i>6</i>
<i>Tabla 3. Masa de las diferentes partes de los ejes tomados como referencia.</i>	<i>6</i>
<i>Tabla 4. Dimensiones aire acondicionado de referencia.</i>	<i>7</i>
<i>Tabla 5. Medidas del arenero cogido como referencia.</i>	<i>8</i>
<i>Tabla 6. Resumen medidas módulo Batería LTO de Max 8C de ABB.</i>	<i>9</i>
<i>Tabla 7. Parámetros para el cálculo del área de la bobina.</i>	<i>12</i>
<i>Tabla 8. Dimensiones aproximadas de la bobina de inducción utilizada.</i>	<i>13</i>
<i>Tabla 9. Dimensionamiento del cajón eléctrico</i>	<i>14</i>
<i>Tabla 10. Área por partes y total del piso del coche.</i>	<i>15</i>
<i>Tabla 11. Número total de pasajeros que debe aguantar el coche.</i>	<i>15</i>
<i>Tabla 12. Cálculo de la fuerza ejercida por el pasaje máximo sobre el piso del coche.</i>	<i>16</i>
<i>Tabla 13. Resumen de los pesos de cada conjunto.</i>	<i>16</i>

ÍNDICE DE ECUACIONES

<i>Ecuación 1. Potencia transferida por una bobina de carga inductiva.....</i>	<i>12</i>
--	-----------

FIN DEL DOCUMENTO



Universidad
Zaragoza

3. MATERIALES

ANEXO

Autor:

Esther Ciriano Fernández

Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura

2025

ÍNDICE

0.	Preámbulo	<i>¡Error! Marcador no definido.</i>
1.	MATERIALES.....	4
1.1	Metálicos	4
1.1.1	Aceros de alta resistencia	5
1.1.2	Aluminio.....	8
1.2	Composites	9
1.2.1	Fibra de vidrio reforzada con polímeros (GFRP).....	12
1.2.2	Fibra de carbono reforzada con polímeros (CFRP)	10
1.2.3	Plástico reforzado con fibra de aramida (AFRP).....	13
1.2.4	Espumas estructurales de polímeros	14
1.2.5	Compuestos termoplásticos avanzados	16
1.2.6	Conclusiones	<i>¡Error! Marcador no definido.</i>
1.3	Ventanas y puertas.....	18
1.3.1	Vidrio laminado.....	18
1.3.2	Vidrio templado	19
1.3.3	PMMA (Polimetacrilato).....	21
1.3.4	Recubrimientos inteligentes.....	22
1.3.5	Conclusiones	23
1.4	Conclusiones finales	23

0. ABSTRACT

Se busca la consecución de un coche que garantice tanto la seguridad del usuario pasajero y la fiabilidad de un tránsito regular como un equilibrio entre la calidad técnica y funcionalidad y la viabilidad económica.

Es por esto, que la selección de materiales se orienta a lograr una óptima combinación de resistencia estructural y ante agentes externos, durabilidad, capacidad de absorber impactos y un coste de recursos realista.

Además, en este caso concreto, estamos ante un entorno costero y por tanto, con alta humedad, por lo que habrá que tener especial atención a perturbaciones generadas por corrosión.

Por lo que se procede a la investigación y selección de posibles materiales para la fabricación de dicho vehículo en base a las restricciones impuestas por las normativas mencionadas en el anexo 1.

Este anexo concluye con la elección concisa de los materiales que se utilizarán en el proyecto.

1. MATERIALES

Para conseguir la selección con mayor viabilidad se analizan los materiales utilizados actualmente en la fabricación de material rodante, de modo que podamos realizar los cálculos y comparativas necesarios para la selección final y sus marcos de aplicación debido a que no buscamos quedarnos con la combinación tradicional, sino, trabajar con cierto nivel de innovación en grado de responsabilidad de los materiales.

1.1 Metálicos

Comúnmente se utilizan para la fabricación de la estructura principal por sus buenas propiedades mecánicas.

Con el objetivo de conseguir un chasis que garantice de manera contundente su fiabilidad, la estructura debe suplir, como mínimo, los siguientes requisitos:

- **Resistencia mecánica, a la fatiga y a la corrosión:** para el soporte de las cargas correspondientes a los pasajeros, el resto de elementos del coche, impactos y vibraciones. Todas estas cargas generan esfuerzos reiterados que, junto a las condiciones climáticas y de contaminación alterarán la estructura del coche de no ser debidamente consideradas.
- **Ligereza:** con el objetivo de conseguir la mayor eficiencia energética posible.
- **Facilidad de manipulación y reparación:** permitiendo soldadura, corte y ensamblaje de manera sencilla y eficiente.
- **Viabilidad económica:** calidad y coste deben estar equilibrados para conseguir una producción viable.

Además, al ser materiales utilizados de manera tradicional en el ámbito ferroviario es tratado a través de procesos ampliamente estudiados y desarrollados; por lo que están mejor establecidos en las industrias consiguiendo que sean más económicos.

1.1.1 Aceros de alta resistencia

Los aceros se caracterizan, en general, por su alta resistencia estructural; por lo que es idóneo para aplicaciones que incluyen el soporte de cargas y esfuerzos mecánicos.

Ventajas	Inconvenientes
Muy alta resistencia mecánica y a impactos.	Mayor peso que el aluminio.
Elevada durabilidad (elevada resistencia al desgaste y a la corrosión) y resistencia a fatiga.	Los aceros al carbono precisan de tratamiento anticorrosivo.
Buena capacidad de soldadura y mecanizado.	
Su ligereza reduce el peso en las estructuras.	
Buena rentabilidad económica por su larga durabilidad.	
Versatilidad de aplicación.	
Totalmente reciclable.	

Figura 1. Ventaja e inconvenientes del acero de alta resistencia

En el ámbito ferroviario se aplican en elementos que soportan cargas pesadas, así como un uso constante.

- En el bastidor inferior
- En zonas que se ven afectadas por esfuerzos muy elevados.

1.1.1.1 Acero estructural HSLA

Este es un acero con alto límite elástico y baja aleación con grado fino y bajo contenido en carbono (tubos paris, s.f.). Además, contiene microaleantes como niobio, titanio, silicio y/o vanadio.

Si bien tiene bajo contenido en carbono, se ve aumentada la capacidad de soldabilidad. A esto último, se le suma el bajo contenido en azufre y una notable pureza interna que le confieren una gran tenacidad, ductilidad y resistencia a fatiga.

Además, con la implementación de aditivos se ven mejoradas sus capacidades como, por ejemplo, el aumento de la resistencia al aumentar el contenido en carbono o manganeso o un mayor límite elástico con la mayor presencia de titanio o niobio.

Por todo esto, los aceros de alto límite elástico y baja aleación son muy empleados como aceros para estructuras dentro del marco de aplicación de ingeniería, entre los que se incluyen los vehículos ferroviarios.

En concreto nos centramos en la serie S355 (CEN, 2004), como acero estructural no aleado, debido a sus buenas propiedades mecánicas idóneas para el caso que se desarrolla. Algunas de estas características son(ASM International, 1990):

- Resistencia a tracción de 355 MPa fundamental para las cargas dinámicas y estáticas que el vehículo debe soportar.
- Buena tenacidad para la absorción de impactos y vibraciones.
- Facilidad de soldadura esencial ya que es el método de unión de las diferentes partes del coche.
- Resistencia a la corrosión por agentes externos que resulta primordial para un clima costero como es el del entorno de aplicación del proyecto, Barcelona.
- Muy buena relación coste – rendimiento, lo que es idóneo para aplicaciones a gran escala.
- Cumplimiento de la norma europea EN10025 en referencia a la calidad estructural.
- Amplio uso en estructuras de transporte como son ferrocarriles o camiones, incluso puentes, por lo que se evidencia su eficacia.

Dentro de esta serie de aceros, encontramos alternativas como son S355 J2, S355 J0 o S355 JR, variando en la temperatura a la que conservan las propiedades de resistencia y tenacidad; conservando dichas propiedades hasta los -20°C, 0°C y temperatura ambiente respectivamente.

Sin embargo, teniendo en cuenta que el clima de Barcelona no se caracteriza por condiciones extremas, el acero S355 J0 es suficientemente resistente para conformar el bastidor del coche sin presentar irregularidades por la temperatura, además de ser la alternativa más barata entre las tres mencionadas anteriormente.



Figura 2. Láminas de acero S355, ejemplo de acero HSLA.

Además, el abanico de disposiciones que presenta como placas, láminas o barras incrementa el potencial de este material en aplicaciones estructurales.

1.1.1.2 Acero inoxidable

Esta tipología de acero destaca por la adición de cromo para aumentar notablemente la resistencia a la corrosión, aunque también se verá mejorado por la disposición de su estructura atómica y la aleación incluyendo más materiales.

En concreto, los aceros inoxidables austeníticos son aún más resistentes a la corrosión lográndose con la adición de estabilizadores como níquel, manganeso y/o nitrógeno para evitar su endurecimiento frente al calor y su no magnetismo(Callister, 2018).

Los más comunes de la serie 300 son el inox 304 e inox 316, materiales resultantes de la adición de níquel.

Ambos contienen un alto contenido en níquel y cromo en proporción a su peso para conseguir una excelente resistencia a la corrosión. Además, se les adicionan elementos de aleación, a parte del carbono, como el manganeso, fósforo, sulfuro y/o silicio a la composición mayoritaria de hierro, con el objetivo de mejorar sus propiedades mecánicas.

Si bien es cierto, que la diferencia percibida por un usuario común entre ambos tipos de acero puede ser imperceptible debido a su igual apariencia a simple vista; bajo el papel del fabricante y previamente del diseñador, es crucial conocer las diferencias para adecuar la elección final, tanto para conseguir las prestaciones demandadas, como para conseguir un vehículo viable en términos económicos.

inox 304	inox 316
Contenido en níquel 8-10,5%	Contenido en molibdeno 2-3%
Contenido en cromo 18-20%	

Figura 3. Diferencias en la composición química entre los aceros inox 304 e inox 316(ASM International, 1990).

Esta diferencia provoca que el acero inox 304 sea menos resistente a la corrosión, partiendo de la base de que es altamente resistente a esta perturbación que el inox 316; el cual es idóneo para aplicaciones cuya exposición al cloruro son continuadas, como pueden ser aplicaciones costeras.

Sin embargo, la composición del inox 304 le hace ser más conformable y económico, por lo que resulta idóneo para aplicaciones con formas más complejas y que no estén tan expuestas a factores altamente corrosivos. A todo esto, se le suma mayor facilidad de limpieza y consta de una excelente tenacidad y soldadura.

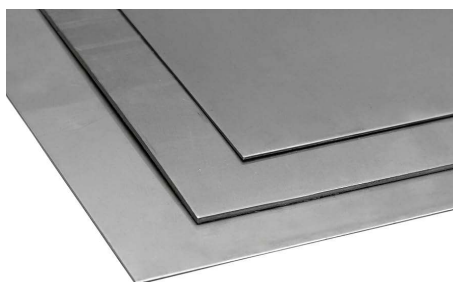


Figura 4. Láminas de acero AISI 304.

1.1.2 Aluminio

El aluminio reduce enormemente, en nuestro caso, el peso en vacío de los coches del material rodante, por lo que se ve incrementada la carga útil que el vehículo puede desplazar. El aluminio tiene propiedades que lo hacen muy atractivo en el ámbito ferroviario, algunas de estas se presentan a continuación enfrentándolas con los inconvenientes de dicho material:

Ventajas	Inconvenientes
Muy baja densidad, lo que permite pesos ligeros.	Mayor coste que el acero de alta resistencia.
Buena resistencia a corrosión.	Mayor dificultad de soldabilidad.
Totalmente reciclable.	Mal comportamiento a altas temperaturas, alterando sus propiedades mecánicas.
Gran durabilidad por su resistencia a corrosión y a rayos UV (Totten, 2003).	Baja resistencia a fatiga.
Fácilmente conformable, por lo que se aumentan las posibilidades de diseño.	

Figura 5. Ventajas e inconvenientes del uso del aluminio para usos estructurales.

Uno de los aluminios de mayor presencia en aplicaciones similares a la de este proyecto es el aluminio de aleación 6061 (Totten, 2003), conocido como aluminio estructural. La aleación de este tipo de aluminio está compuesta, entre otros, por magnesio, manganeso, zinc o titanio; lo que tiene como consecuencia la mejora de las prestaciones del material, dada su gran capacidad de extrusión y su mejor soldabilidad respecto del aluminio convencional u otras aleaciones del mismo.

En el ámbito de material rodante el aluminio se aplica a:

- Elementos expuestos a agentes corrosivos.
- Partes del vagón que no tengan que soportar esfuerzos excesivos o cíclicos.



Figura 6. Perfiles de aluminio 6061.

1.2 Composites

De fabricarse las cajas del material rodante empleando composites, se reduciría en un 20-30% el peso del vehículo gracias a su gran ligereza frente a los metales ligeros tradicionalmente usados. Sin embargo, en la actualidad, se destinan a estructuras secundarias y elementos de menor responsabilidad, como consecuencia del escaso desarrollo y proyección destinados a estos materiales.

Es frecuente ver vehículos ferroviarios con elementos fabricados de materiales compuestos de matriz polimérica, sin embargo, su implementación como material de la estructura principal no se ha estudiado en detenimiento.

Además, presentan notables ventajas frente a los metales, siendo estas ventajas incentivos para su utilización. Estas son, entre otras (Mallick, 2007):

- Materiales reciclados y reciclables.
- Disponibilidad de una amplia gama de fibras, espumas y núcleos para adaptar los diseños a las necesidades existentes.
- Cumplimiento de requerimientos frente al fuego y toxicidad de humos.
- Buena respuesta ante el impacto de balasto.
- Alta capacidad de amortiguamiento.
- Materiales elastómeros.

Los materiales de matriz polimérica se enfocan, muchas veces, en el aligeramiento para la eficiencia energética, conseguir albergar la máxima carga, mantenimiento, durabilidad y explotación.

Actualmente en las tipologías de materiales en que se está centrando I + D + i, son:

- Materiales multifuncionales.
- Materiales híbridos.
- Metamateriales.
- Recubrimientos funcionales.

En vistas de velar por el confort del usuario en referencia a las vibraciones y ruido; así como la corrosión, corrientes vagabundas, comportamiento a baja temperatura, y funciones antihielo.

Recubrimientos omnifóbicos que repelan sólidos y líquidos en plásticos o metales. Además de conseguir superficies más higiénicas con el rechazo de virus y bacterias.

- Los composites basados en matrices epoxi, benzocaína o química híbrida podrían llegar a sustituir a metales en partes estructurales e interiores.
- Los policarbonatos podrían sustituir a los vidrios en aplicaciones exteriores e interiores.
- Los termoplásticos podrán tener cabida en el entorno de aplicación de una gran variedad de componentes metálicos.

A pesar de las ventajas anteriormente listadas, los materiales compuestos también presentan ciertas desventajas como son:

- **Complejidad de reparación:** en caso de fracturas superficiales que no comprometan la estructura del material compuesto es relativamente fácil de reparar. Sin embargo, en caso de que se produzcan fracturas de mayor envergadura, la complejidad de reparación

y el costo de los procesos y recursos para realizarlo hacen que se descarte la opción de su reparación y se deseche el conjunto.

- **Mayor coste:**
 - Obtención: los metales son más fáciles de obtener, sobre todo en grandes cantidades, por lo que para grandes proyectos su aplicación es más económica.
 - Fabricación: coste más elevado que los procesos de fabricación con metales debido a su complejidad y el uso de materiales especializados. Los procesos como el curado por autoclave o la impregnación de resinas precisan de mayor tiempo y tecnología más avanzada.

1.2.1 Fibra de carbono reforzada con polímeros (CFRP)

Se trata de un plástico reforzado por una fibra muy fuerte y resistente consistente en fibras de carbono. Como base, consta de una matriz polimérica a la que se le incrustan fibras de carbono para la mejora de la relación resistencia-peso. Además, sus propiedades finales pueden verse alteradas por los aditivos en la espuma o en la matriz de unión.

Ventajas	Inconvenientes
Extremadamente resistente y ligero con una densidad de 1820 kg/m ³ .	Elevado coste de materiales y manufactura.
Gran resistencia a fatiga y factores externos (corrosión y desgaste).	Reparación compleja.
Muy efectivo en el deslizamiento para evitar abrasión.	Sin refuerzos, resulta frágil ante impactos directos.
Elevada durabilidad incluso en condiciones exigentes.	Conductor eléctrico.
Gran coeficiente de elasticidad (ideales para aplicaciones en las que se precisa rigidez).	
Muy bajo coeficiente de expansión térmica (no se deforma a altas temperaturas).	

Figura 7. Ventajas y desventajas del CFRP para aplicaciones estructurales.

Aunque tiene un elevado coste de implementación, gracias a la gran resistencia mecánica del producto resultante este nuevo material, se ha introducido de manera masiva, por ejemplo, en el sector de automoción, aeroespacial, civil o naval (Mallick, 2007).

En materia de aplicación al ámbito ferroviario se emplea principalmente en:

- Chasis y bastidores.
- Estructuras para carga.
- Bogies.

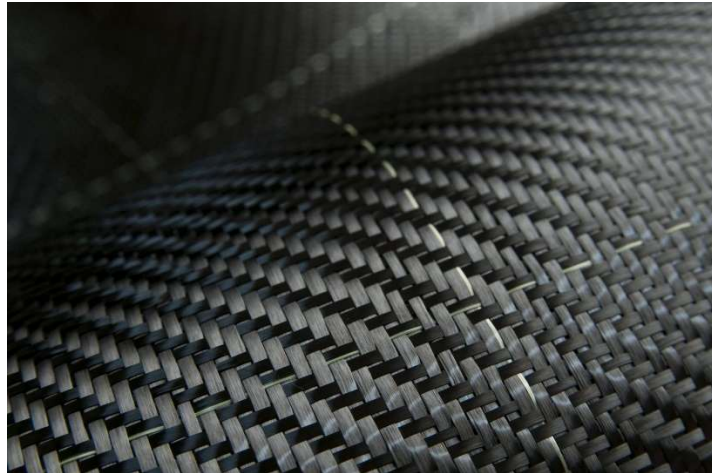


Figura 8. Tejido CFRP

Actualmente el CFRP se emplea para reforzar estructuras existentes, por ejemplo, cuando se requiere que dicha estructura soporte más peso que el inicialmente requerido en su diseño, el CFRP es empleado para mejorar la estructura.

El CFRP puede ser implementado en sus diferentes formas:

- Bandas: empleadas para reforzar estructuras de acero y hormigón.
- Planchas: cuyo objetivo es la reparación de hormigón y en general, en el ámbito de la construcción.
- Barras: utilizadas para mejorar la fuerza y resistencia de estructuras ya construidas.

Aunque el CFRP es un material ampliamente utilizado como refuerzo o en estructuras secundarias, su bajo desarrollo e investigación como componente de mayor responsabilidad hace que trabajar con él en estructuras principales tenga obstáculos que superar, como el escaso backup.

Sin embargo, este material es ampliamente conocido por su resistencia en multitud de situaciones como son:

- Gran resistencia a tracción: las fibras de carbono son más flexibles que las de acero u hormigón, lo que supone que el CFRP soporte mayor presión sin llegar a la fractura.
- Resistencia a fatiga: tiene alta resistencia a la degradación, lo que tiene como consecuencia directa menor necesidad de mantenimiento.
- Resistencia frente a factores externos: como condiciones medioambientales adversas procedentes de gran humedad, fuertes lluvias o exposición química.

1.2.2 Fibra de vidrio reforzada con polímeros (GFRP)

El GFRP es un material compuesto por fibra de vidrio y resina. Se basa en una matriz a base de fibras poliméricas con fibras de vidrio embebidas, comúnmente suele ser resina epoxi o poliéster. Este material puede presentarse en multitud de formas como pueden ser barras, mallas o tubos según su aplicación.

Ventajas	Inconvenientes
Gran ligereza (una cuarta parte del acero) 2000 kg/m ³ .	Menor resistencia mecánica que CFRP.
Bajo coste (menor coste que el CFRP).	Fragilidad ante impactos fuertes.
Resistencia a desgaste y corrosión.	
Buen aislamiento térmico y eléctrico.	
Gran fuerza y resistencia a tracción (de dos a tres veces más que el acero).	
Aislante térmico y eléctrico.	
No favorece la dispersión del fuego por su buena resistencia al quemado.	
Muy extensa durabilidad.	
Mayor facilidad de procesado que el CFRP.	

Figura 9. Ventajas y desventajas del GFRP para aplicaciones estructurales (Mallick, 2007).

En resumen, su alta resistencia y comportamiento elástico lo hacen idóneo para resistir altas cargas aplicadas a la estructura en la que se aplique. Además, su ligereza facilita la fabricación de equipos más pequeños y manejables, facilitando su manipulación a los operadores.

Gracias a su elevada durabilidad y bajo mantenimiento requerido lo hacen totalmente viable económica y medioambientalmente a largo plazo.

En el ámbito ferroviario se utilizan sobre todo en partes exteriores que no tengan componente estructural.



Figura 10. Planchas de GFRP.

En adición, cabe mencionar que tiene un coste menor que el CFRP sin comprometer en exceso las propiedades mecánicas. Por lo que, para este caso de aplicación, pese a ser ligeramente más pesado y tener peores propiedades mecánicas, su bajo coste y su capacidad suficiente para soportar esfuerzos cíclicos de compresión, tracción y torsión hacen que sea más factible su implementación en este proyecto frente a otras alternativas.

1.2.3 Plástico reforzado con fibra de aramida (AFRP)

Se trata de un polímero de origen sintético reforzado con fibras para la resistencia al impacto y a la tracción.

Las fibras de aramida suponen un refuerzo de la matriz de polímeros, esta última suele ser de resina epoxi, poliéster u otro tipo de resina. Este compuesto está dotado de ventajosas propiedades mecánicas por las fibras de aramida, siendo la matriz polimérica la que mantiene estas fibras juntas y transmite los esfuerzos entre ellas (DuPont, 2020).

Ventajas	Inconvenientes
Bajo peso con una densidad de 2800 kg/m ³ .	Menor rigidez que el CFRP.
Gran resistencia a impactos y perforaciones.	Mayor coste en comparación a la fibra de vidrio.
Gran resistencia a fatiga y tracción.	Se degrada bajo una exposición a UV prolongada si no se protege.
Buena absorción de ruidos y vibraciones.	
Buen comportamiento a altas temperaturas.	

Figura 11. Ventajas y desventajas del AFRP para aplicaciones estructurales.

Por su gran resistencia al impacto se aplica a estructuras sujetas a cargas dinámicas, además resulta idónea para reforzar la estructura frente a vibraciones propias de la actividad del vehículo, así como

reducir los daños ocasionados por choques. Aunque por su elevado coste es menos frecuente su aplicación.

Aplicado al material rodante se utiliza para:

- Refuerzos ante ubicaciones con riesgo de alto impacto.
- Asilamiento tanto térmico como acústico.

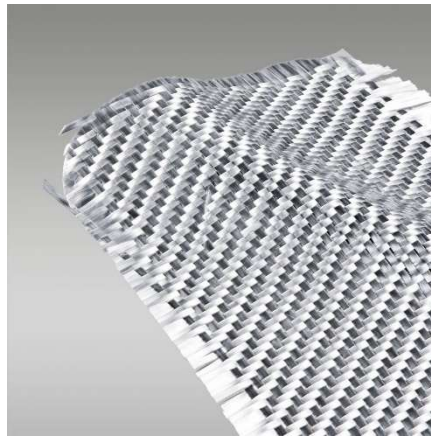


Figura 12. Tejido de kevlar®.

1.2.4 Espumas estructurales de polímeros

Estos materiales tienen un núcleo liviano que se ve reforzado con polímeros o espumas para estructuras.

De entre todas las opciones de polímeros que pueden conformar este material, se tratan los de uso más comunes y por tanto, más desarrollados.

Ventajas	Inconvenientes
Muy buen aislamiento térmico y acústico.	Baja resistencia mecánica.
Gran amortiguación y absorción de vibraciones.	Si no se combinan con aditivos pueden ser inflamables.
Elevada ligereza.	
Resistente al agua, humedad y productos químicos.	

Figura 13. Ventajas y desventajas de las espumas estructurales para aplicaciones estructurales.

Estas características son comunes a las espumas con independencia del polímero utilizado, si bien presentan ciertas particularidades que se evidencian a continuación.

Sus aplicaciones en materia ferroviaria se destinan a:

- Paneles para techos y paredes.
- Aislamiento en cabinas coches de pasajeros y con componentes eléctricos.



Figura 14. Espuma polimérica.

1.2.4.1 Polietileno

Más en concreto, polietileno reticulado de células cerradas; es reticulado ya que aumenta la resistencia del material.

Además, esta espuma se puede obtener casi en su totalidad de caña de azúcar obtenida de biomasa y presenta las mismas propiedades que la obtenida del petróleo, por lo que su producción es totalmente respetuosa con el medio ambiente.

1.2.5 Compuestos termoplásticos avanzados

Estos materiales tienen como base polímeros termoplásticos que se refuerzan con fibras tanto de vidrio como de carbono.

Ventajas	Inconvenientes
Buena resistencia al desgaste, la fatiga y al impacto.	Resistencia mecánica menos que el CFRP.
Gran resistencia química y a factores medioambientales.	En condiciones de temperaturas extremas se deforman.
Gran sostenibilidad al ser fácilmente reciclables.	
Costo mucho menor que el CFRP o el kevlar®.	
Mayor fiabilidad frente a materiales metálicos.	

Figura 15. Ventajas e inconvenientes de los compuestos termoplásticos para aplicaciones estructurales.

En cuanto a su uso en material rodante, estos compuestos se destinan a:

- Revestimientos en interiorismo.
- Componentes no estructurales.

1.2.5.1 PEEK (Polieteretercetona)

Es empleado para aplicaciones con necesidad de elevada resistencia térmica y mecánica.

Ventajas	Inconvenientes
Elevada resistencia mecánica y al desgaste y abrasión.	Mayor peso y fragilidad que los compuestos CFRP y otros composites.
Gran resistencia térmica y química.	Elevado coste.
Baja conductividad eléctrica.	Dificultad de procesamiento por elevado punto de fusión.
Prolongada durabilidad.	

Figura 16. Ventajas e inconvenientes del PEEK.

1.2.5.2 Espumas

Para entender la funcionalidad asociada a materiales compuestos se define lo que se conoce como “núcleo sandwich”:

Núcleo sándwich: disposición de las diferentes capas que dan como resultado paneles compuestos. Esta disposición se estructura en dos láminas de material altamente resistente en las caras exteriores y un núcleo grueso y débil como capa intermedia entre estas dos.

Estas espumas juegan un papel crítico en el buen rendimiento del material en los siguientes aspectos:

- **Peso:** gracias a su gran ligereza reduce el peso del conjunto sin comprometer la resistencia.
- **Estructura:** mejorando la resistencia a compresión y flexión en su combinación con el material resistente del composite.
- **Impactos:** por su capacidad de absorción de energía frente a un choque y distribución de la misma, aumenta la seguridad del compuesto y reduce los daños del material externo, de la estructura interna y de los usuarios en el interior del vehículo.
- **Aislamiento:** la capacidad absorbente dota a las espumas de capacidad de aislamiento acústico y térmico. Esto la hace idónea para la protección ante ruidos y altas temperaturas entre las distintas partes del vehículo.
- **Procesos de fabricación:** las espumas resultan fáciles de moldear y adaptar a la geometría de los componentes en el proceso de fabricación de composites.
- **Resistencia al fuego:** existen tipologías concretas con propiedades retardantes del fuego. Por lo que su implementación resulta crítica cuando prima la seguridad.
- **Durabilidad:** en su mayoría, son altamente resistentes a la humedad, productos químicos y a continuos cambios de temperatura. Por lo que para entornos en los que los componentes están expuestos a condiciones cambiantes son de elevada eficacia.

En este caso particular, las láminas exteriores resistentes, como se ha mencionado en el apartado de composites son de CFRP.

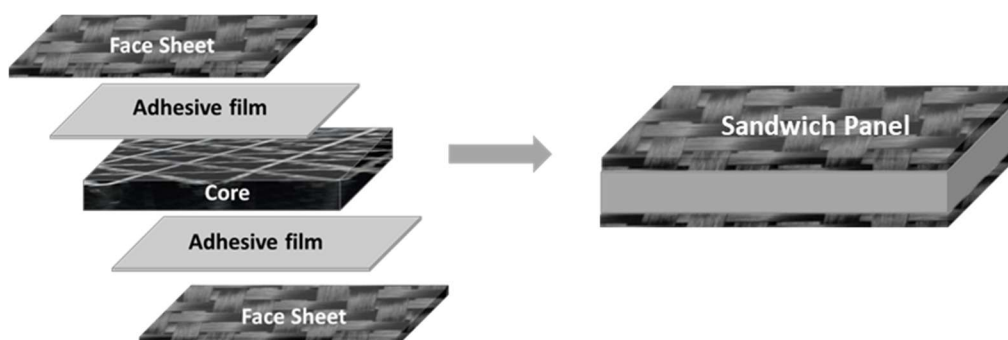


Figura 17. Disposición de capas de un panel sándwich.

Dentro de la gama de espumas disponibles se escoge la espuma PET (Diab Group, 2021).

En aplicaciones como la de este proyecto donde la seguridad es primordial al tratarse de transporte de pasajeros, la espuma PET, presenta una elevada resistencia al fuego y mala emisión de humo, a lo que se le suma su prolongada durabilidad en condiciones extremas.

Aunque presente alguna desventaja respecto al resto de espumas como un mayor coste o menor capacidad de moldeo, las ventajas que supone su implementación tienen mayor importancia. Además, la geometría del coche no presenta gran complejidad por lo que su utilización no resulta limitante en exceso.



Figura 18. Panel con núcleo de espuma PET.

La espuma finalmente empleada será la Divinycell P debido a sus buenas propiedades, haciendo que se cumplan los requisitos de la aplicación a la cual se destina su implementación.

Algunas de estos requisitos son los siguientes:

- Esta espuma es completamente reciclable.
- Cumplimiento de la normativa de fuego y humos UNE EN 45545-2 (European Committee for Standardization, 2016), debido a sus excelentes propiedades FST (fire, smoke & toxicity).
- Resistencia a altas temperaturas manteniendo sus propiedades mecánicas y químicas.
- Confiere un buen aislamiento térmico y absorbe agua en exceso.

1.3 Ventanas y puertas

Los materiales empleados para vidrios o ventanas no plantean interrogantes acerca de su marco de aplicación, sí que existen diferentes alternativas en la selección de materiales aplicados hoy en día para puertas y ventanas de vehículos destinados al transporte de pasajeros, por lo que se estudian las propiedades y limitaciones de las mejores alternativas en vistas de encontrar la elección de mayor eficacia y viabilidad.

1.3.1 Vidrio laminado

El vidrio laminado es lo que comúnmente se conoce como vidrio de seguridad. Está formado por dos o más láminas de vidrio monolítico unidos mediante láminas plásticas intermedias de PVB o EVA.

En caso de rotura, los trozos de cristal se quedan adheridos al PVB para evitar daños tanto a usuarios como a objetos cercanos; así como impedir el paso a su través (Pilkington Glass (NSG Group), 2017).

Lo que lo hace idóneo para material rodante que duerme a la intemperie y destinado al transporte de pasajeros.

Ventajas	Inconvenientes
Mayor nivel de resistencia.	Elevado coste.
Mayor seguridad ante impactos y robos.	Es muy pesado en relación al vidrio convencional con una densidad 2500 kg/m ³ .
Filtración de rayos UV.	Difícil de reparar.
Mejora los efectos de degradación del color.	
Buena durabilidad.	
Alto componente estético.	
Es completamente reciclable.	

Figura 19. Ventajas e inconvenientes del vidrio laminado.



Figura 20. Rotura de vidrio laminado.

1.3.2 Vidrio templado

Este tipo de vidrio, tras su procesamiento, se pasa por el horno para su temple en varias fases de calentamiento y enfriamiento; al final de este proceso se consigue un material de mayor dureza y resistencia.

Con respecto al vidrio laminado presenta peores prestaciones, sin embargo, velando por la seguridad del pasajero en caso de accidente, se fabricará una zona del acristalamiento general en vidrio laminado con el objetivo de facilitar la evacuación en una situación de emergencia (Pilkington Glass (NSG Group), 2017).

Ventajas	Inconvenientes
Mayor resistencia que el vidrio común.	Menor resistencia a impacto que el vidrio laminado.
Seguridad en situaciones de emergencia.	Menor aislamiento acústico.
Buena resistencia térmica.	Inexistente protección frente a rayos UV si no es tratado al efecto.
Transparencia similar a la del vidrio convencional.	Mayor peso que los vidrios convencionales con una densidad de 2500 kg/m ³ .
Menor peso y coste que el vidrio laminado.	
Resistencia al rayado y ante agentes químicos.	

Figura 21. Ventajas e inconvenientes del vidrio templado .



Figura 22. Fragmentos de vidrio templado tras su rotura.

1.3.3 PMMA (Polimetacrilato)

El PMMA es conocido como vidrio acrílico, siendo un termoplástico de gran rigidez cuyas propiedades aislantes pueden modificarse bajo pedido.

Ventajas	Inconvenientes
Transparencia del 93%, siendo el más transparente de los plásticos .	Relativa fragilidad.
Mayor ligereza que el vidrio (alrededor de dos veces más ligero).	Mayor resistencia al impacto que el vidrio convencional pero menor que el vidrio laminado.
Buena resistencia a la tracción.	Degradación a largo plazo con una exposición prolongada a rayos UV.
Aislante de calor y ruido.	Elevada dilatación térmica.
Mecanizado y moldeado a través de múltiples procesos.	Mala resistencia química.
Fácil mantenimiento y reciclaje.	

Figura 23. Ventajas e inconvenientes del PMMA.

Además, al optar por el PMMA de colada conseguimos mayor transparencia, ya que polimerizando el material entre dos placas de vidrio se consigue una placa homogénea; lo que lo hace idóneo para acristalamiento (Röhm GmbH, 2020).



Figura 24. Láminas de PMMA transparente.

1.3.4 Recubrimientos inteligentes

Teniendo en cuenta que el vidrio inteligente es más pesado y tiene peores prestaciones que los vidrios pensados para su aplicación en situaciones con riesgo de impacto, se opta por encontrar otra solución que aumente el confort del pasajero.

El recubrimiento inteligente puede ser aplicado mediante adhesivo o, en caso de tratarse de un vidrio laminado, puede integrarse entre las diferentes capas de vidrio.

En función del componente que haga reaccionar al recubrimiento, los hay electrocrómicos, fotocrómicos, termocrómicos o de suspensión de partículas. Aunque en el caso que concierne a este proyecto, la tipología más adecuada es el recubrimiento electrocrómico (PDLC) de modo que pueda, o bien manipularse y que un operador tenga su control, o bien automatizarse en función de franjas horarias o el clima.

El recubrimiento PDLC (película de cristal líquido disperso de polímero) funciona de tal manera, que cuando no existe corriente eléctrica las moléculas del cristal líquido se encuentran desordenadas de forma irregular y por tanto, la luz incidente se dispersa no consiguiendo penetrar al interior; sin embargo, al aplicarle corriente eléctrica, las moléculas del cristal líquido se ordenan y permite a la luz incidente pasar libremente a su través (Granqvist, 2014).

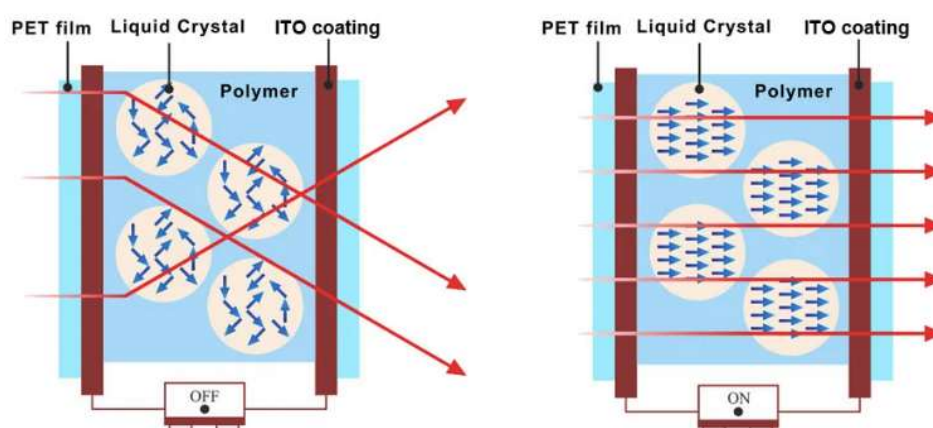


Figura 25. Funcionamiento del recubrimiento PDLC.



Figura 26. Apariencia del recubrimiento PDLC, encendido y apagado respectivamente.

Gracias a la aplicación de esta lámina se conseguirá reducir el calentamiento extra provocado por los rayos UV e IR en franjas horarias críticas del día, más aún, en estaciones con elevadas temperaturas que, generalmente, coinciden con la mayor afluencia de turistas en zonas de interés.

1.3.5 Conclusiones

Con el objetivo de velar por la seguridad del pasajero, el acristalamiento general se realizará con vidrio laminado. Sin embargo, teniendo en cuenta posibles situaciones de emergencia, se localizan salidas de emergencia y zonas con menor riesgo de impacto en vistas de implementar una zona de vidrio templado, el cual se rompe en trozos pequeños y no cortantes en caso de fuerte impacto o mediante un martillo de seguridad.

Las placas de virio templado se instalan en los laterales del coche ya que son zonas con menos riesgo de impacto que los parabrisas.

El PMMA queda descartado, ya que en este caso tiene más peso, si cabe, el factor protección del pasajero; por lo que para garantizar la eficacia del material frente a impactos o situaciones adversas se opta por el material de mayor calidad pese a tener un mayor coste. Además, el vidrio tiene una mayor durabilidad por lo que no se degradará con la misma rapidez que lo haría el PMMA.

Se ubicarán láminas de PDLC para mejorar la experiencia del usuario de modo que se reduzcan las consecuencias de la incidencia del sol en los cristales del vehículo, tanto sensación térmica y temperatura del interior como la incomodidad por exceso de luz y ausencia de sombra.

1.4 Conclusiones finales

Como resolución a la problemática de la selección de materiales se concluye lo a continuación expuesto:

En cuanto a la **estructura principal**, se realiza en Acero de Alta resistencia o HSLA, en concreto el **acero S355 J0**; esto es debido al requerimiento de una estructura fuerte capacitada para soportar esfuerzos como son las vibraciones propias de la circulación, la carga variable constituida por el tráfico de usuarios o las fuerzas de frenado, entre otros. A lo que se le suma su amplia aceptación en Europa, por lo que impulsa la escalabilidad del proyecto.

Además, resulta relativamente fácil de trabajar y presenta buen comportamiento frente al soldeo, proceso, que se utiliza para la unión entre diferentes partes del chasis y la estructura.

Para la **carrocería** se ha seleccionado **aluminio 6061** debido, principalmente, por su gran ligereza y resistencia a la corrosión. Si bien es cierto, que su coste es más elevado que el del acero, queda justificado con la reducción considerable del peso íntegro del coche, factor que adquiere mayor importancia al tratarse de un vehículo eléctrico para el transporte de cargas variables en aras de garantizar la suficiente autonomía para completar el recorrido previsto sin comprometer la seguridad.

Más aún, como hemos mencionado es muy resistente a la corrosión, siendo este un requisito indispensable para su implantación en un entorno húmedo como es Barcelona.

Siguiendo con la premisa de conseguir un coche ligero, la fabricación de elementos no estructurales de las alternativas metálica e híbrida y la mayor parte de la alternativa más ligera de las planteadas, se emplea **GFRP (Fibra de Vidrio Reforzada con Polímeros)**. El uso de GFRP resulta idóneo debido a su extrema ligereza en relación a su resistencia, además de su alta resistencia a la fatiga y desgaste y buenas propiedades ante la absorción de impactos. Aunque su uso se ve limitado por el alto coste del

material, además, en la estructura fabricada en material compuesto se dispondrán de nervaduras de refuerzo mediante perfiles fabricados en CFRP de modo que se garantice la fiabilidad del conjunto.

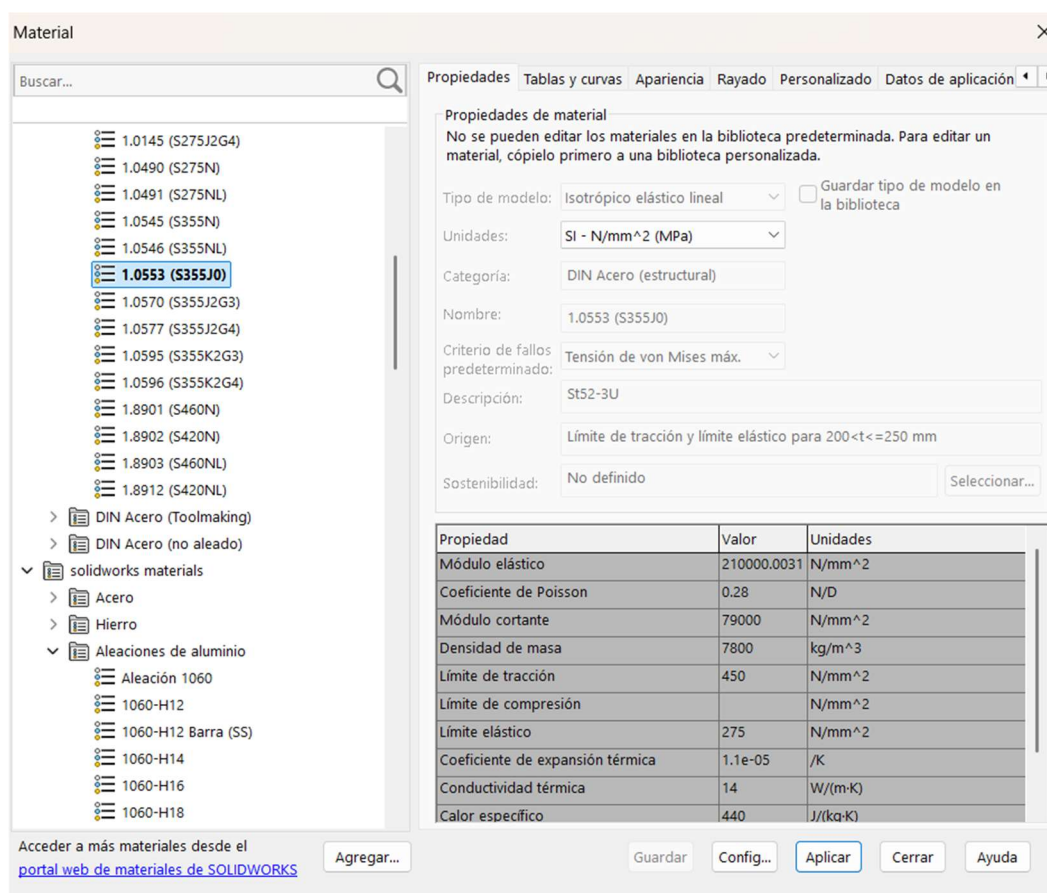
En referencia al acristalamiento general del vehículo se opta por una combinación entre los dos **vidrios de seguridad, laminado y templado**. De modo que, para las zonas de alto impacto como son la parte delantera y trasera del coche (alternan la dirección debido al carácter bidireccional del vehículo), los parabrisas, se fabricarán en vidrio laminado, mientras que en las ventanas laterales se dispondrá de vidrio templado para cumplimentar con la normativa para las salidas de emergencia. Además, al vidrio se le aplica un recubrimiento electrocrómico para mayor confort del usuario pasajero y un servicio de superior calidad.

Por último, se incluirá una **lámina electrocrómica inteligente** embebida en los vidrios, de modo que el usuario pueda controlar la entrada de los rayos de sol mediante los botones situados en el habitáculo al efecto. Con esto, se consigue tanto velar por su confort al conseguir la evasión de los rayos de sol, como controlar la temperatura del interior del coche al controlar la entrada de los rayos UV.

1.4.1 Ficha técnica de los materiales seleccionados

A continuación, se recogen las fichas técnicas de los materiales seleccionados.

1.4.1.1 Acero



Material

Buscar...

1.0145 (S275J2G4)
1.0490 (S275N)
1.0491 (S275NL)
1.0545 (S355N)
1.0546 (S355NL)
1.0553 (S355J0)
1.0570 (S355J2G3)
1.0577 (S355J2G4)
1.0595 (S355K2G3)
1.0596 (S355K2G4)
1.8901 (S460N)
1.8902 (S420N)
1.8903 (S460NL)
1.8912 (S420NL)
> DIN Acero (Toolmaking)
> DIN Acero (no aleado)
✓ solidworks materials
> Acero
> Hierro
✓ Aleaciones de aluminio
Aleación 1060
1060-H12
1060-H12 Barra (SS)
1060-H14
1060-H16
1060-H18

Acceder a más materiales desde el [portal web de materiales de SOLIDWORKS](#)

Agregar...

Propiedades Tablas y curvas Apariencia Rayado Personalizado Datos de aplicación

Propiedades de material
No se pueden editar los materiales en la biblioteca predeterminada. Para editar un material, cópielo primero a una biblioteca personalizada.

Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal ☐ Guardar tipo de modelo en la biblioteca

Unidades: SI - N/mm² (MPa)

Categoría: DIN Acero (estructural)

Nombre: 1.0553 (S355J0)

Criterio de fallos predeterminado: Tensión de von Mises máx.

Descripción: St52-3U

Origen: Límite de tracción y límite elástico para 200<t<=250 mm

Sostenibilidad: No definido

Propiedad	Valor	Unidades
Módulo elástico	210000.0031	N/mm ²
Coefficiente de Poisson	0.28	N/D
Módulo cortante	79000	N/mm ²
Densidad de masa	7800	kg/m ³
Límite de tracción	450	N/mm ²
Límite de compresión		N/mm ²
Límite elástico	275	N/mm ²
Coefficiente de expansión térmica	1.1e-05	/K
Conductividad térmica	14	W/(m·K)
Calor específico	440	J/(kg·K)

Guardar Config... **Aplicar** Cerrar Ayuda

Figura 27. Ficha técnica en SolidWorks acero S355 J0.

1.4.1.2 Aluminio

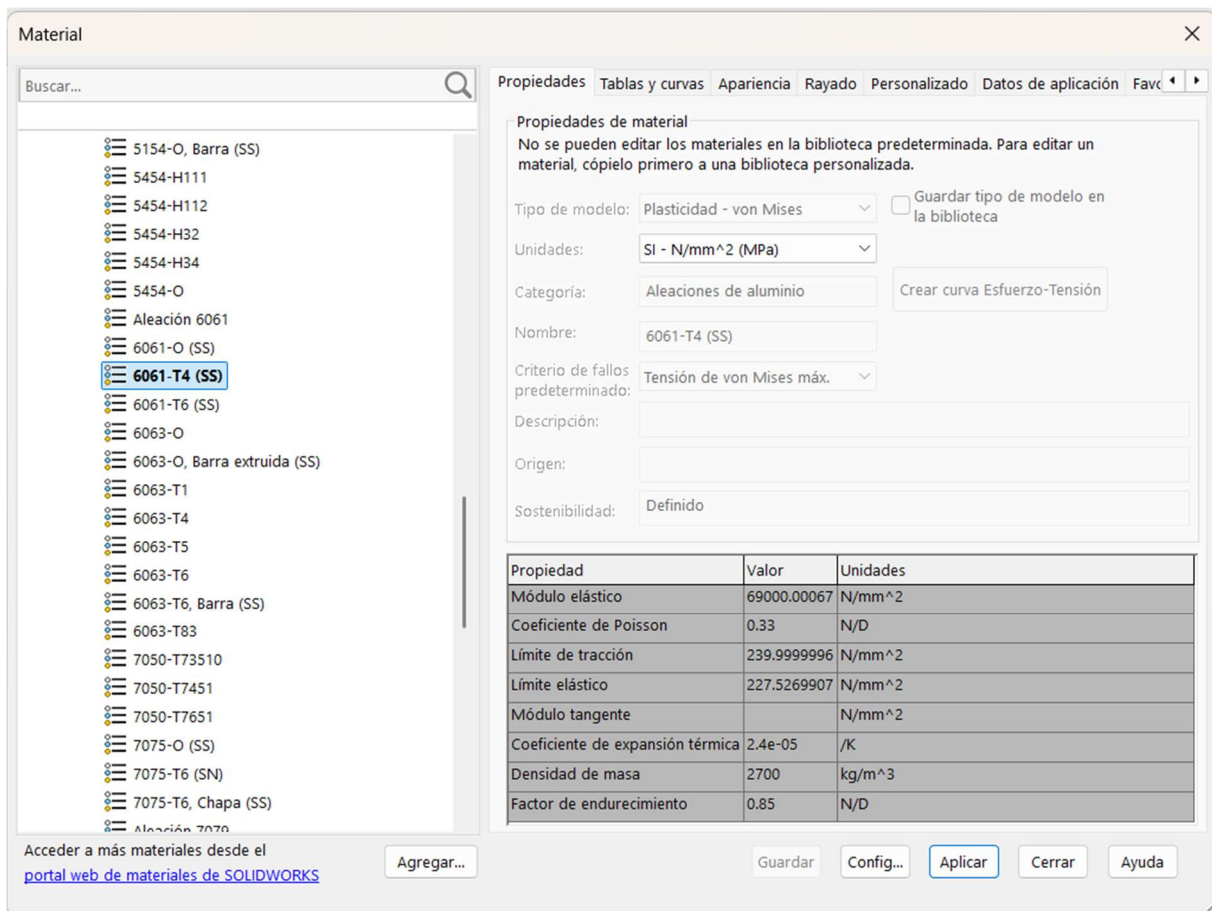


Figura 28. Ficha técnica en SolidWorks aluminio 6061.

1.4.1.3 GFRP

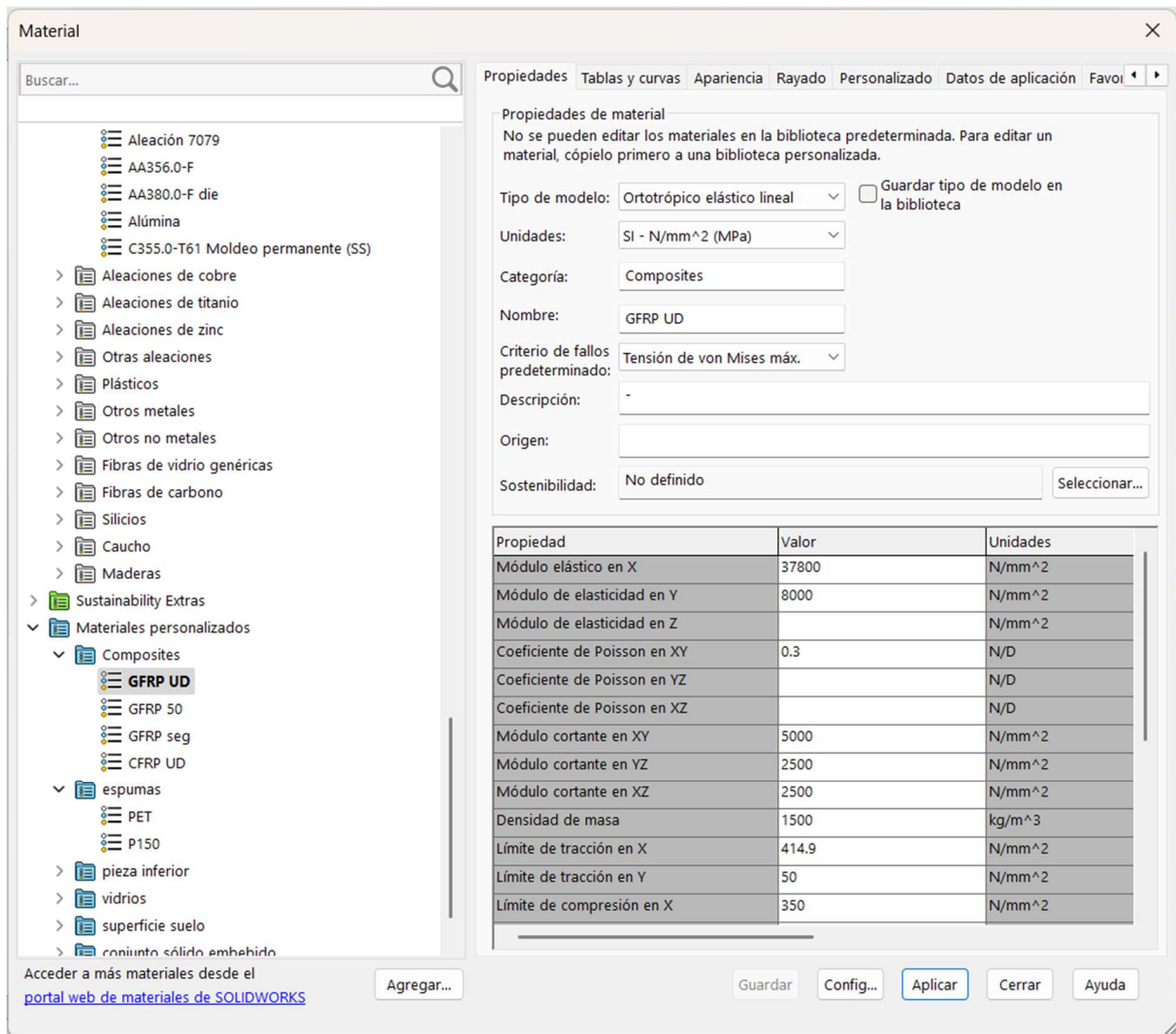


Figura 29. Ficha técnica en SolidWorks GFRP con fibras longitudinales.

1.4.1.4 GFRP

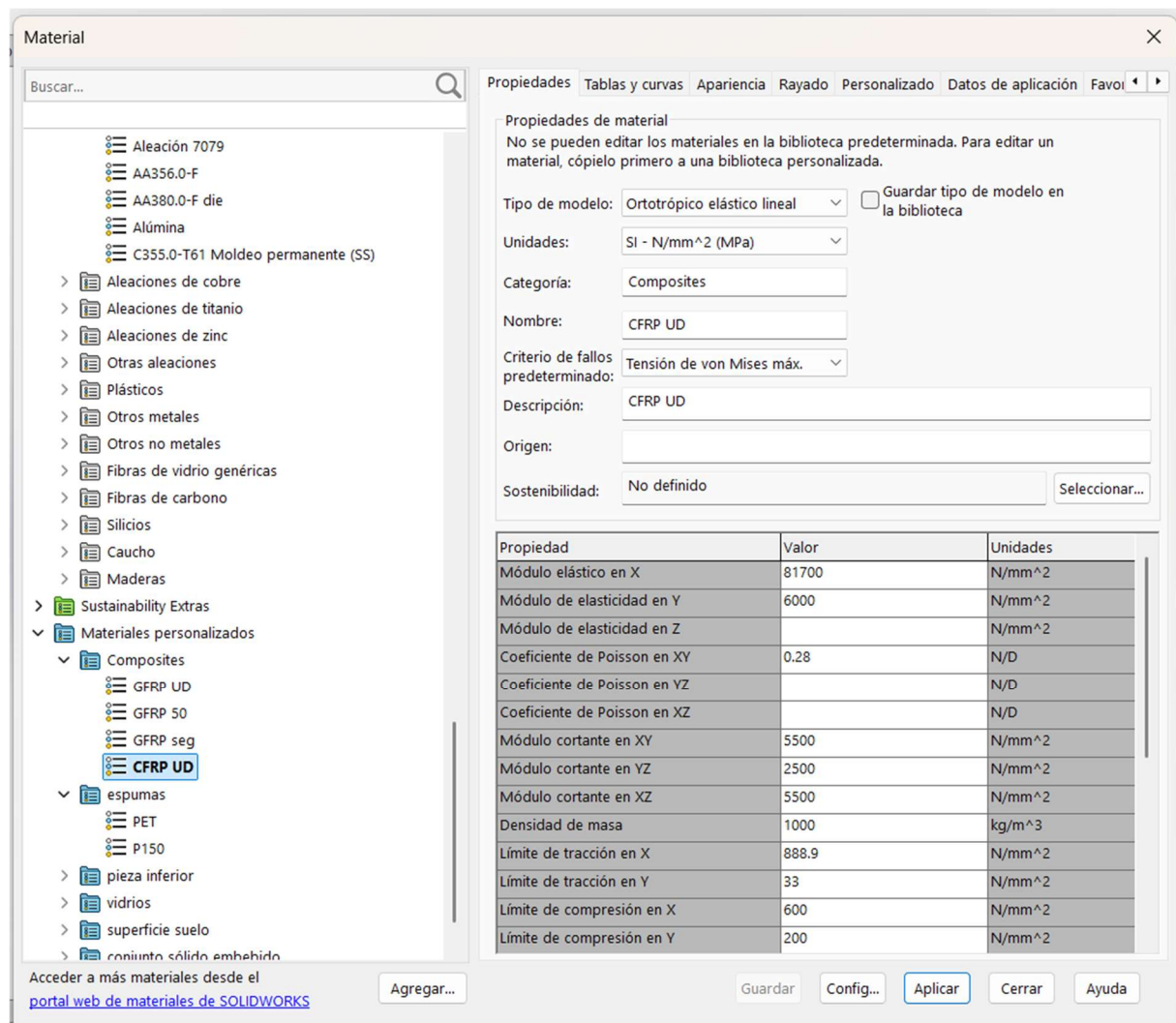


Figura 30. Ficha técnica en SolidWorks CFRP con fibras longitudinales.

1.4.1.5 Espuma PET

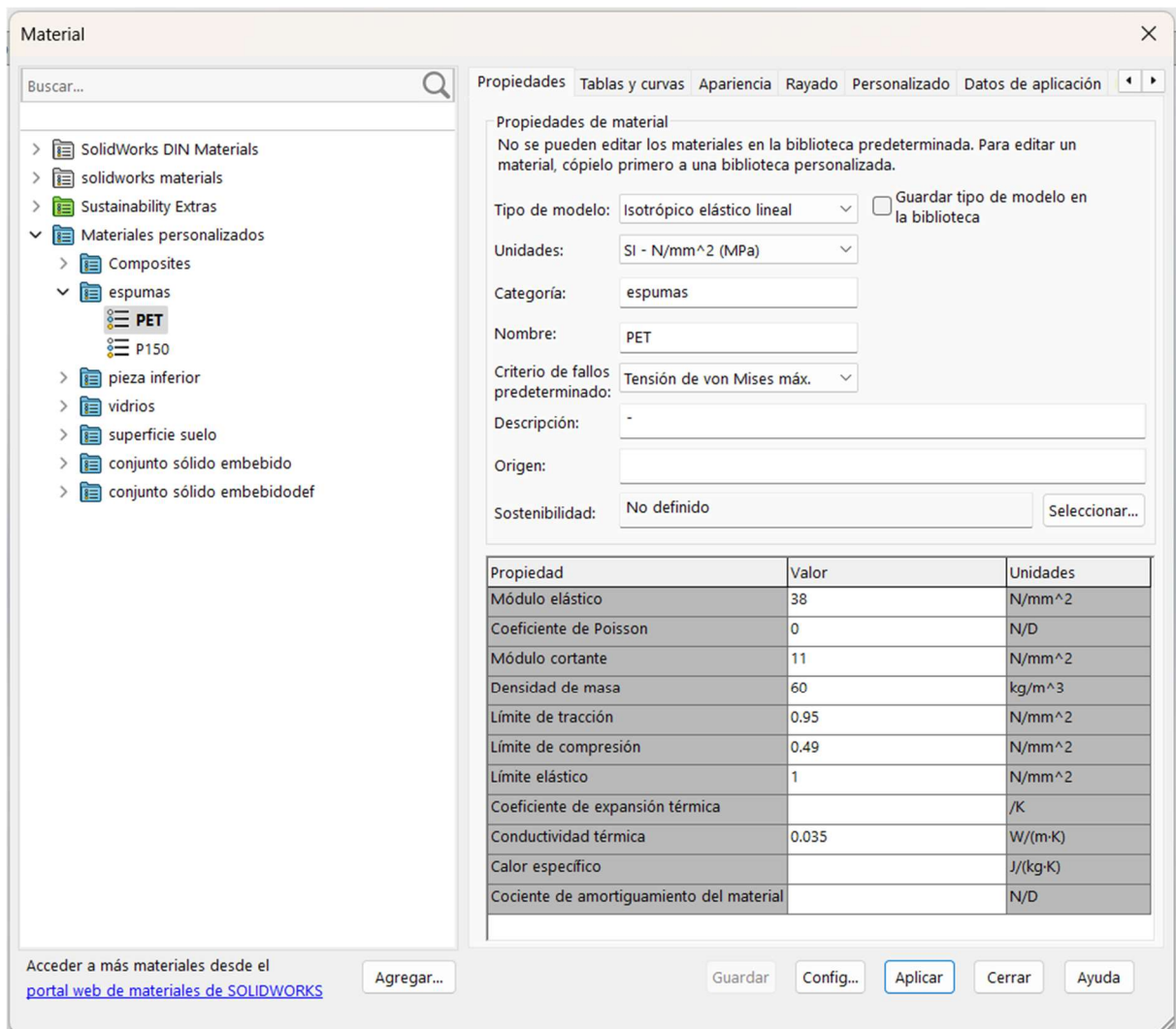


Figura 31. Ficha técnica en SolidWorks espuma PET.

2. BIBLIOGRAFÍA

- ASM International. (1990). *ASM Handbook, Vol. 1: Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys*.
https://www.asminternational.org/documents/10192/1849770/05258G_Sample_Chapter.pdf
- Callister, W. D. & R. D. G. (2018). *Materials Science and Engineering: An Introduction (10th ed.)*.
<https://www.wiley.com/en-us/Materials+Science+and+Engineering%3A+An+Introduction%2C+10th+Edition-p-9781119405498>
- CEN. (2004). *EN 10025-2: Hot rolled products of structural steels – Part 2*.
<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/f29a42d2-4a87-41f2-b7c8-b7489eead1f6/en-10025-2-2004>
- Diab Group. (2021). *Divinycell P Datasheet*. <https://www.diabgroup.com/products/cor/core-materials/divinycell-p>
- DuPont. (2020). *Kevlar® Technical Guide*. <https://www.dupont.com/knowledge/kevlar-technical-guide.html>
- European Committee for Standardization. (2016). *EN 45545-2: Railway applications – Fire protection on railway vehicles*.
- Granqvist, C. G. (2014). *Handbook of Inorganic Electrochromic Materials*. Elsevier.
<https://www.sciencedirect.com/book/9780444895643/handbook-of-inorganic-electrochromic-materials>
- Mallick, P. K. (2007). *Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design*.
- Pilkington Glass (NSG Group). (2017). *Laminated and Toughened Safety Glass Datasheet*.
<https://www.pilkington.com/en/global/building-products/commercial/our-products/architectural/laminated-safety-glass>
- Röhm GmbH. (2020). *Plexiglas® PMMA Datasheet*. <https://www.plexiglas.de/en/products/plexiglas-sheet>
- Totten, G. E. & M. D. S. (2003). *Handbook of Aluminum: Vol. 1. Physical Metallurgy and Processes*.
<https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/9780203913304/handbook-aluminum-george-totten-david-mackenzie>

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ventaja e inconvenientes del acero de alta resistencia	5
Figura 2. Láminas de acero S355, ejemplo de acero HSLA.....	6
Figura 3. Diferencias en la composición química entre los aceros inox 304 e inox 316(ASM International, 1990). 7	
Figura 4. Láminas de acero AISI 304.	7
Figura 5. Ventajas e inconvenientes del uso del aluminio para usos estructurales.	8
Figura 6. Perfiles de aluminio 6061.....	8
Figura 7. Ventajas y desventajas del CFRP para aplicaciones estructurales.	10
Figura 8. Tejido CFRP.....	11
Figura 9. Ventajas y desventajas del GFRP para aplicaciones estructurales (Mallick, 2007).....	12
Figura 10. Planchas de GFRP.....	13
Figura 11. Ventajas y desventajas del AFRP para aplicaciones estructurales.....	13
Figura 12. Tejido de kevlar®.	14
Figura 13. Ventajas y desventajas de las espumas estructurales para aplicaciones estructurales.....	14
Figura 14. Espuma polimérica.....	15
Figura 15. Ventajas e inconvenientes de los compuestos termoplásticos para aplicaciones estructurales.....	16
Figura 16. Ventajas e inconvenientes del PEEK.....	16
Figura 17. Disposición de capas de un panel sándwich.....	17
Figura 18. Panel con núcleo de espuma PET.	18
Figura 19. Ventajas e inconvenientes del vidrio laminado.....	19
Figura 20. Rotura de vidrio laminado.....	19
Figura 21. Ventajas e inconvenientes del vidrio templado	20
Figura 22. Fragmentos de vidrio templado tras su rotura.	20
Figura 23. Ventajas e inconvenientes del PMMA.....	21
Figura 24. Láminas de PMMA transparente.	21
Figura 25. Funcionamiento del recubrimiento PDLC.	22
Figura 26. Apariencia del recubrimiento PDLC, encendido y apagado respectivamente.....	22
Figura 27. Ficha técnica en SolidWorks acero S355 J0.	24
Figura 28. Ficha técnica en SolidWorks aluminio 6061.....	25
Figura 29. Ficha técnica en SolidWorks GFRP con fibras longitudinales.	26
Figura 30. Ficha técnica en SolidWorks CFRP con fibras longitudinales.....	27
Figura 31. Ficha técnica en SolidWorks espuma PET.	28

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Ventaja e inconvenientes del acero de alta resistencia.....</i>	<i>5</i>
<i>Tabla 2. Diferencias en la composición química entre los aceros inox 304 e inox 316(ASM International, 1990)..</i>	<i>7</i>
<i>Tabla 3. Ventajas e inconvenientes del uso del aluminio para usos estructurales.....</i>	<i>8</i>
<i>Tabla 4. Ventajas y desventajas del CFRP para aplicaciones estructurales.</i>	<i>10</i>
<i>Tabla 5. Ventajas y desventajas del GFRP para aplicaciones estructurales (Mallick, 2007).</i>	<i>12</i>
<i>Tabla 6. Ventajas y desventajas del AFRP para aplicaciones estructurales.</i>	<i>13</i>
<i>Tabla 7. Ventajas y desventajas de las espumas estructurales para aplicaciones estructurales.....</i>	<i>14</i>
<i>Tabla 8. Ventajas e inconvenientes de los compuestos termoplásticos para aplicaciones estructurales.....</i>	<i>16</i>
<i>Tabla 9. Ventajas e inconvenientes del PEEK.</i>	<i>16</i>
<i>Tabla 10. Ventajas e inconvenientes del vidrio laminado.</i>	<i>19</i>
<i>Tabla 11. Ventajas e inconvenientes del vidrio templado</i>	<i>20</i>
<i>Tabla 12. Ventajas e inconvenientes del PMMA.</i>	<i>21</i>
<i>Tabla 13. Ficha técnica en SolidWorks acero S355 J0.</i>	<i>24</i>
<i>Tabla 14. Ficha técnica en SolidWorks aluminio 6061.</i>	<i>25</i>
<i>Tabla 15. Ficha técnica en SolidWorks GFRP con fibras longitudinales.</i>	<i>26</i>
<i>Tabla 16. Ficha técnica en SolidWorks CFRP con fibras longitudinales.....</i>	<i>27</i>
<i>Tabla 17. Ficha técnica en SolidWorks espuma PET.....</i>	<i>¡Error! Marcador no definido.</i>

FIN DEL DOCUMENTO



Universidad
Zaragoza

4. ALTERNATIVAS ESTRUCTURALES

ANEXO

Autor:

Esther Ciriano Fernández

Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura

2025

ÍNDICE

0. Abstract	3
1. Adaptación del modelo base	4
1.1 Alternativas de diseño base	5
1.1.1 Estructura “tesela”	5
1.1.2 Estructura “redondeada”	5
1.1.3 Conclusiones	6
2. Cálculo estructural	7
2.1 Método de cálculo utilizado	7
2.1.1 Aplicabilidad	7
2.1.2 Funcionamiento	7
2.1.3 Criterio de fallo	8
2.2 Cargas aplicadas	11
2.2.1 Sistemas pesados	11
2.2.2 Esfuerzos provocados por las cargas	13
2.2.3 Apoyos	13
2.2.4 Peso del vehículo	14
2.3 Dificultades encontradas	15
2.4 Diseño inicial	15
2.5 Diseño y cálculo estructural	17
2.5.1 Estructura metálica	17
2.5.2 Estructura “space frame”	22
2.5.3 Estructura en composites	28
2.5.4 Análisis de resultados	49
2.6 Conclusiones fase II	50
2.6.1 Proyecciones de futuro	52
3. Bibliografía	53

0. ABSTRACT

Con el objetivo de resolver que estructura se adapta mejor a los requisitos del proyecto se desarrolla la misma estructura, pero diseñada en diferentes materiales y, por tanto, diferentes comportamientos a esfuerzos.

Las diferentes estructuras son las siguientes:

- **Estructura “metálica”:** estructura principal fabricada en metales que combinan ligereza y resistencia, aunque la apariencia y acabado final se consigue empleando composites como se ha hecho hasta ahora en el ámbito ferroviario.
- **Estructura “space frame”:** compuesta de un marco metálico que se encarga del soporte de la carga principal del vehículo. Este marco lleva superpuesto diferentes piezas de material compuesto que le dan el acabado y geometría final.
- **Estructura “composites”:** desarrollada completamente en material compuesto, salvo los refuerzos que son fabricados en fibra de carbono.

Una vez se desarrollan las tres estructuras se realiza el cálculo FEM de cada uno de ellos para su comparativa y elección de la opción óptima en relación a criterios como la viabilidad funcional o la vida útil, entre otros.

1. ADAPTACIÓN DEL MODELO BASE

Como se ha mencionado en el apartado correspondiente a los antecedentes, se parte de un minibús ya en funcionamiento debido a la similitud en prestaciones.

Sin embargo, aplicando la normativa correspondiente de gálibos, el vehículo se ha redimensionado para el máximo aprovechamiento del servicio que ofrece.

Las dimensiones principales del vehículo de referencia son las que se exponen en la siguiente tabla.

Capacidad		
Ocupantes (personas)	Ud.	22,00
Dimensionamiento		
Longitud	mm	6000,00
Anchura		2650,00
Altura		3300,00
Distancia al suelo		350,00
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	6,84

Tabla 1. Dimensiones del vehículo ferroviario(Sancho, 2024).

Una vez se tienen las dimensiones del volumen general del coche, se disponen los sistemas eléctricos dimensionados en el anexo 2 “Dimensionamiento de sistemas eléctricos”, para el conocimiento de los esfuerzos que ejercen en el cálculo estructural.

1.1 Alternativas de diseño base

Antes del desarrollo de las tres alternativas de las que se realizará el cálculo estructural, se desarrolla un diseño base de la estructura interna el cual será adaptado, en caso de ser necesario, para su fabricación en cada material con los procesos más eficaces.

No obstante, la estética final de las tres alternativas será la misma, sino lo más semejante posible, para realizar una comparativa realista que evidencie la alternativa de mayor potencial, en función de ciertos parámetros de interés, partiendo de la misma geometría volumétrica.

1.1.1 Estructura “tesela”

Con el objetivo de mimetizar el componente formal con la estética de Barcelona, según una de las máximas que guiaron el arte de Gaudí, se diseña el área de la estructura bajobastidor con forma de romboide consiguiendo una forma similar a la tesela empleada por el artista.

Además, se ve un claro aditivo al componente innovador que, ya de por sí, está instaurado en el proyecto.

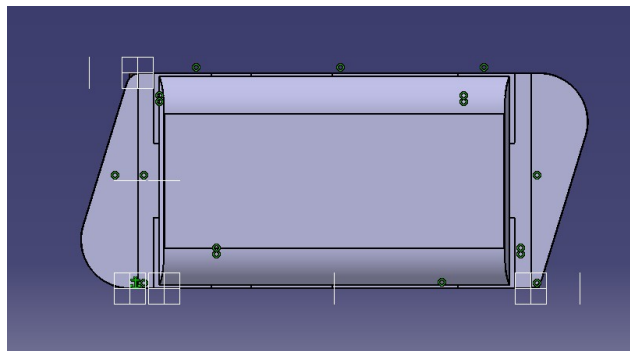


Figura 1. Planta del coche con forma de tesela.

1.1.2 Estructura “redondeada”.

Por otro lado, se diseña una estructura cuyo componente formal se acerca más a los modelos que existen en la actualidad con un guiño a los primeros tranvías eléctricos de la ciudad de Barcelona, ya que tenían los cabeceros de los coches redondeados y la sección transversal frontal y trasera de los mismos cuadrada.

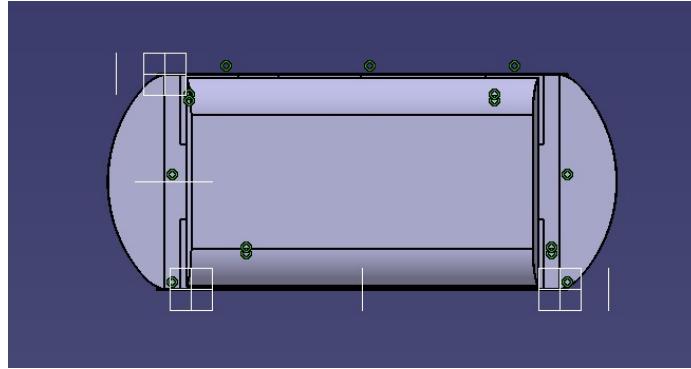


Figura 2. Planta del coche con acabados redondeados.

Esta alternativa presenta mayor facilidad de estandarización en vistas de la necesidad de cambio o reparación de componentes estructurales y facilidad de disposición de los sistemas eléctricos.

1.1.3 Conclusiones

Para la elección del diseño con mayor potencial de desarrollo para las tres alternativas del que será base se escogen diferentes criterios que serán determinantes para el correcto diseño de estas. A continuación, se listan los diferentes criterios enfrentando ambos diseños:

Criterio	Estructura	
	"tesela"	redondeada
Simplicidad de fabricación		x
Estandarización		x
Aerodinámica		x
Innovación	x	
Reproducibilidad		x

Tabla 2. Comparativa diseño base para las alternativas.

Finalmente, se resuelve que el diseño más óptimo para el posterior desarrollo de las alternativas es el correspondiente a la estructura redondeada.

2. CÁLCULO ESTRUCTURAL

2.1 Método de cálculo utilizado

Para la validación o desecho de las alternativas estructurales se lleva a cabo el cálculo FEM, por sus siglas en inglés *Finite Element Method*.

Este consiste en un método numérico que describe el comportamiento físico de estructuras bajo esfuerzos provocados por las cargas que soporta a través de la resolución de ecuaciones diferenciales. Para el cálculo se produce la división de la estructura en elementos pequeños conocidos como finitos, de modo que se simplifique la resolución de la ecuación diferencial.

2.1.1 Aplicabilidad

El FEM tiene un amplio campo de aplicación debido a que puede tratar geometrías complejas o cargas no lineales. Además, el material en que se ha fabricado el elemento a calcular puede no ser homogéneo.

Por otro lado, sirve tanto para cálculos estáticos, en base a deformaciones y esfuerzos, como dinámicos tratando, por ejemplo, cargas cíclicas. Para este caso en concreto, el FEM se limita al estudio estático de las cargas.

2.1.2 Funcionamiento

Para la correcta aplicación de este método es necesario, en primera instancia, la definición de la geometría de la estructura a analizar, teniendo en cuenta los materiales aplicados, así como sus comportamientos frente a diferentes esfuerzos.

Una vez se ha definido por completo la estructura se realiza lo que se conoce como “mallado” o división de la misma en elementos finitos más pequeños y sencillos, de carácter geométrico. Cuantos más elementos se dispongan más detalle tendrá el cálculo, pero será de mayor complejidad operacional.

Al obtener los elementos finitos se deben concretar las condiciones de frontera, es decir, las restricciones que condicionan el movimiento de la estructura como son los soportes o uniones.

El siguiente paso supone la aplicación de las diferentes cargas en la estructura, estáticas o dinámicas como hemos mencionado en el apartado de aplicabilidad.

Con todo esto, se obtiene un sistema de ecuaciones diferenciales a resolver cuyos resultados evidencian la rigidez de la malla o los desplazamientos de sus nodos de los cuales se pueden extraer los diferentes esfuerzos sufridos por la estructura.

Dependiendo del material del que se trate, se interpretan dichos resultados en base a diferentes criterios. Como puede ser, para este caso, el criterio de Von Mises para materiales isótropos lineales como son los aceros y aluminios o el criterio de Tsai-Wu para materiales anisótropos como son los materiales compuestos.

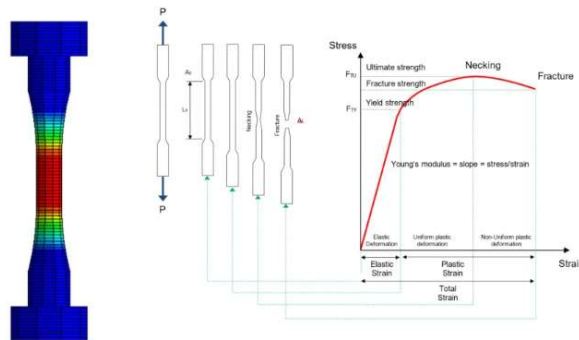


Figura 3. Ejemplo FEM aplicado a la deducción de la plasticidad de un elemento metálico.

2.1.3 Criterio de fallo

2.1.3.1 Estructuras con materiales metálicos

El método empleado para determinar el fallo del material se basa en el criterio de **Von Mises** en referencia a la deformación plástica que sufren, concretamente materiales dúctiles e isotrópicos, como son los metales, al ser sometidos a energías de distorsión como el peso de los diferentes elementos.

Según Von Mises, el material falla cuando la energía de distorsión a la que se somete un material supera la resistencia a fluencia del mismo, lo que se justifica en base a que la deformación plástica de un material se produce cuando la distorsión sobre el material es tan grande que supera la energía interna del material a la deformación, magnitud que queda representada con el límite elástico (o de fluencia) característico de cada material.

El esfuerzo de Von mises se calcula a través de la aplicación de la siguiente ecuación:

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{1}{2} ((\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2)}$$

Ecuación 1. Esfuerzo de Von Mises (siendo σ_i las componentes de los esfuerzos).

En base a esta ecuación se sabe la situación del fallo de un material si se cumple la siguiente relación:

$$\sigma_{VM} \geq \sigma_0$$

Ecuación 2. Relación de fallo según el criterio de Von Mises (siendo σ_0 el límite de elástico del material)

Este criterio es idóneo para materiales dúctiles e isotrópicos debido a que su fallo no se produce por deformación frágil, sino plástica.

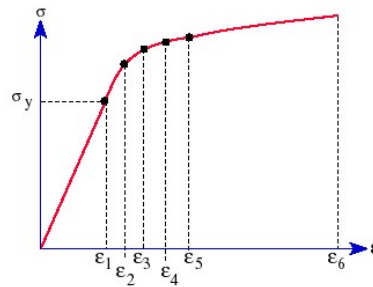


Figura 4. Modelo genérico de plasticidad de Von Mises.

Sin embargo, como marca la normativa para estructuras de material rodante, el diseño del mismo debe mantener un amplio FS de 2,5 debido a que no se realizan ensayos de validación experimental (CEN, 2010).

2.1.3.2 Estructura con materiales compuestos

Para este caso particular se emplea como método de detección de fallo el criterio de **Tsai-Wu**, ya que el criterio de Von Mises no es adecuado para materiales anisótropos (Daniel, 2006), como es el caso de los materiales compuestos, ya que no considera la anisotropía del material por lo que no diferencia los esfuerzos en función de la dirección de las fibras del material.

Se toman los materiales compuestos como ortótropos, siendo un caso particular de los categorizados como anisótropos, de modo que, en vez de tener el mismo comportamiento en todas las direcciones posibles, se considera que tienen comportamientos diferidos frente a los esfuerzos en las tres direcciones principales. De esta manera, se simplifican los cálculos en SolidWorks al poder categorizar la fibra de carbono como material compuesto ortótropo.

Por otra parte, se toma el criterio de Tsai-Wu y no el de Tsai-Hill, siendo este último más sencillo, debido a que uno de los requisitos más importantes del proyecto es la garantía de seguridad del vehículo. Este requisito se traduce en considerar los diferentes esfuerzos en direcciones multiaxiales, siendo longitudinal, transversal y perpendicular al plano compuesto por el tejido de la fibra de vidrio; de modo que obtengamos un coeficiente de seguridad lo más realista posible en aras de suplir el requisito anteriormente mencionado.

$$F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 + F_3\sigma_3 + F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{33}\sigma_3^2 + F_{12}\sigma_1\sigma_2 + F_{13}\sigma_1\sigma_3 + F_{23}\sigma_2\sigma_3 + F_{66}\tau_{12}^2 \leq 1$$

Ecuación 3. Criterio de Tsai-Wu (siendo σ_i los esfuerzos normales, τ_{ij} los esfuerzos cortantes y F_i o F_{ij} la resistencia del material compuesto en función de la dirección o la interacción entre resistencias respectivamente).

A partir de esta ecuación se obtendrá un valor, el Factor de Seguridad, que se compara para la resolución, satisfactoria o no, de la estructura calculada. La comparación de valores es la siguiente:

- **FS > 1** -> la estructura es segura y no falla ante los esfuerzos
- **FS = 1** -> la estructura está al límite de fallar y conviene reforzarla

- **FS < 1** -> la estructura, muy probablemente, falla bajo los esfuerzos aplicados.

Si embargo, al tratarse de componentes estructurales para el transporte de pasajeros se debe guardar un margen alto con el valor límite de modo que el conjunto pueda soportar malos usos o situaciones adversas. Por esta razón, se toma como válido un Factor de Seguridad mínimo de valor 3, como determinan los requisitos estructurales para vehículos ferroviarios sometidos a cargas estáticas (CEN, 2010). Para este caso con materiales compuestos el FS (Factor de seguridad) es más elevado que el caso de metales (FS= 2,5) debido a su costosa reparación en caso de rotura, por lo que se debe guardar un margen superior.

2.1.3.3 Deformación unitaria

Este criterio de fallo es común a las diferentes alternativas ya que se centra en el confort del pasajero y la no deformación excesiva del material fuera y dentro del servicio del vehículo.

Siempre que el vehículo cumpla con los requisitos mencionados en los apartados anteriores de esta sección, se toma como un valor de referencia el obtenido según la siguiente ecuación:

$$f_{\max} \leq \frac{L}{300}$$

Ecuación 4. Valor de la flecha máxima en ámbito ferroviario (UIC 566, n.d.).

Siendo L la luz entre apoyos.

2.1.3.4 Análisis de resultados

En aras de conseguir un análisis más específico del comportamiento de las diferentes superficies de la estructura, esta se divide en tres grupos de componentes que sufren las mismas cargas. Estos tres grandes grupos son:

- **Superior:** formado por el techo y el recubrimiento de los sistemas eléctricos ubicados en él, soportando únicamente los esfuerzos provocados por dichos sistemas.
- **Medio:** formado por las columnas que unen el techo del vehículo con la parte baja de las paredes y los cabeceros del coche. Esa zona soporta los esfuerzos provocados por el peso del conjunto superior y el propio peso del material de esta zona.
- **Inferior:** se compone del suelo y las partes bajas de las paredes laterales y ambos cabeceros. Será la zona que más esfuerzos debe soportar, al tener que resistir el peso de los dos conjuntos anteriormente mencionados, el peso del vehículo, el resto de sistemas ubicados bajo bastidor, el pasaje, el diseño interior del coche y los esfuerzos provocados por los puntos de apoyo con los sistemas de amortiguación de los bogies.

Las ventanas y parabrisas se han ocultado en el estudio para la mejor apreciación de los resultados de las tensiones sobre la estructura. Sin embargo, se han incluido en el estudio como esfuerzos sobre los diferentes conjuntos.

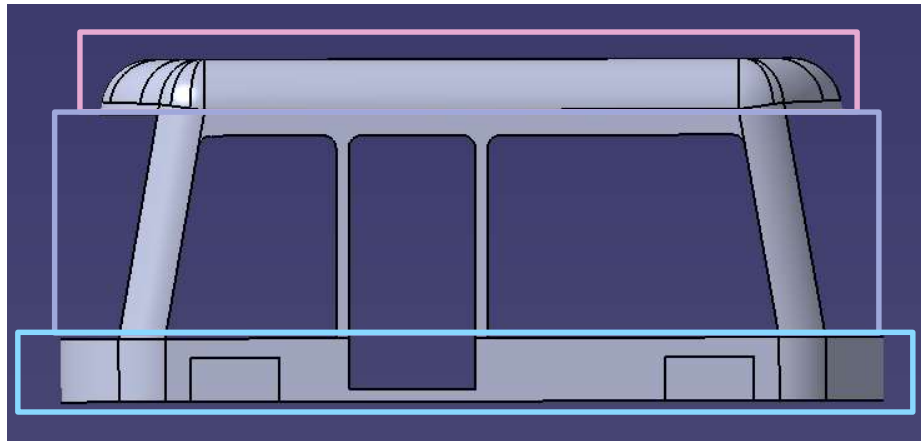


Figura 5. División del vehículo por grupos de componentes. De arriba abajo: en rosa, grupo superior; en morado, grupo medio; y en azul, grupo inferior.

2.2 Cargas aplicadas

Estas cargas son estimadas para poder imitar la realidad física de su comportamiento. Se han tomado las cargas que ejercen esfuerzos sobre la estructura ya que la magnitud y área de aplicación de todas ellas, gracias a la aproximación realizada, son conocidas.

En el caso de la aplicación de cargas dirigidas por la gravedad al estar en conocimiento de la magnitud, dirección y punto de actuación permite definir los esfuerzos provocados con gran fidelidad.

2.2.1 Sistemas pesados

Previo al diseño de las alternativas estructurales, se realiza el dimensionamiento y pesaje aproximado de los sistemas principales y más voluminosos y de mayor pesaje que se detalla en el anexo 2 “Dimensionamiento de cargas” redactado al efecto, con el objetivo de que, con su ubicación en la estructura, se consiga determinar la resistencia y viabilidad aproximados de la estructura bajo los esfuerzos resultantes de dichos elementos.

Además, 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.

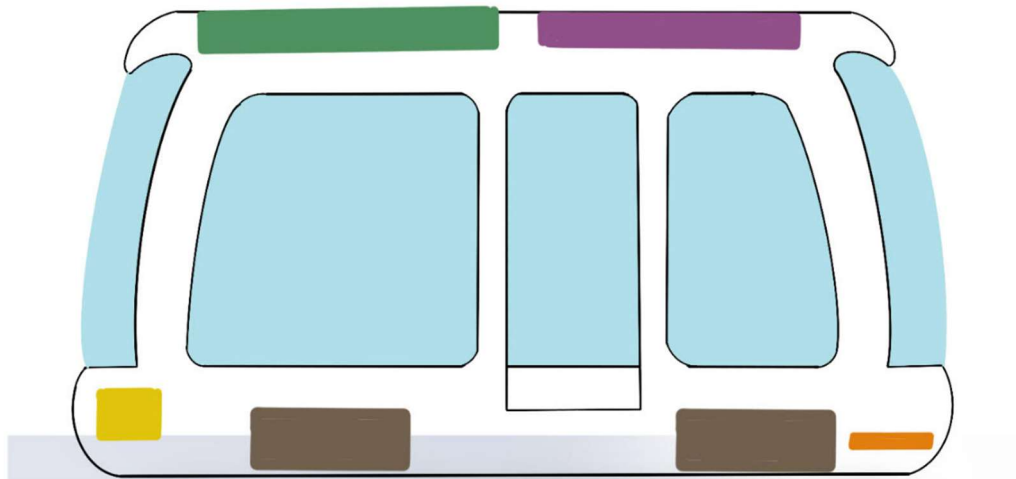


Figura 6. Vista en perfil del área transversal del coche con los volúmenes de los sistemas básicos dimensionados. En blanco el coche, en azul las ventanas, en marrón los conjuntos de los bogies, en naranja la bobina de inducción, en amarillo el conjunto de la batería, en verde el cajón eléctrico y en 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.

2.2.2 Esfuerzos provocados por las cargas

En el anexo 2 “dimensionamiento de cargas” se obtiene el pesaje de cada conjunto que perturba la estructura. En este apartado se aplica la gravedad, de modo que se obtenga la magnitud del esfuerzo que ejerce cada conjunto en la zona de aplicación en la que se ha ubicado en el apartado anterior. Todos ellos se encuentran recogidos en la siguiente tabla:

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	9331,00	91535,72
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 3. Resumen pesos y fuerzas comunes a las tres alternativas para el cálculo estructural.

Si bien no son tenidas en cuenta todas las cargas aplicadas en un caso real, se ha considerado los equipos más grandes y pesados, así como el diseño interior de modo que se obtenga una aproximación lo suficientemente fiel a la realidad.

2.2.3 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, la estructura de un vagón de tranvía apoya sobre los cajón-bogie. Sin embargo, 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).

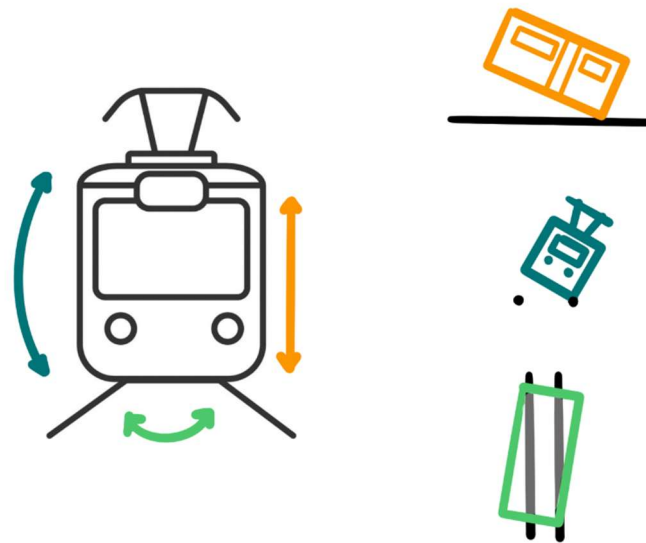


Figura 7. Movimientos relativos de un vagón de tranvía.

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.

2.2.4 Peso del vehículo

El peso del vehículo es multifactorial ya que dependerá de la propia geometría de la estructura, los materiales, el espesor de los mismos, los acabados, entre otros. Es por esto, que el peso se aplica mediante la gravedad durante la realización del cálculo estructural en cada caso.

No obstante, en el caso de la estructura metálica y “space frame”, como el acabado final es idéntico a la alternativa diseñada en materiales compuestos, se les añadirá el peso resultante de esta última como esfuerzo extra.

Si bien es cierto que en las dos primeras alternativas el material compuesto será de menor grosor ya que solo tendrá función estética, mediante la aplicación del peso de “la estructura en composites” que

aguante los esfuerzos aplicados al conjunto dará un margen suficiente para obtener un óptimo acabado final a base de materiales compuestos en caso de ser, alguna de las dos, seleccionadas.

2.3 Dificultades encontradas

Como consecuencia de la simultaneidad de este proyecto con el correspondiente al diseño del interiorismo del mismo vehículo se ha encontrado la dificultad adicional de conseguir una estructura completamente compatible con el que será el interior del vehículo. Lo que supone el cumplimiento de ciertas normativas que afectan a la disposición interior a parte de la normativa aplicable a la estructura y dimensiones generales.

Además, la longitud total del coche es reducida si se compara con la de un coche de tranvía convencional.

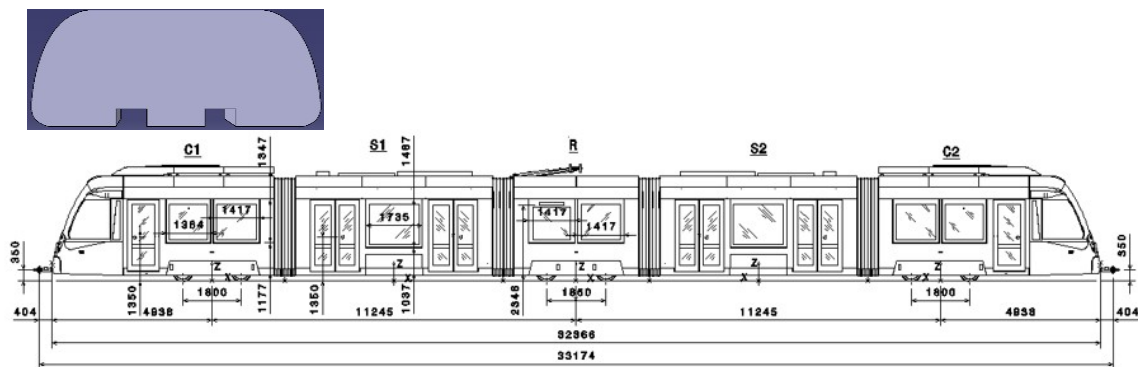


Figura 8. Comparativa entre las dimensiones de un tranvía convencional y el volumen general del Monocab.

2.4 Diseño inicial

Tras la investigación inicial realizada y recogida en el anexo 1 sobre el entorno de aplicación, se concluye que se quiere conseguir una estética sobria y cuidada, aunque con un guiño a la aportación artística y cultural de una de las figuras más representativas de la ciudad de Barcelona como es Antoni Gaudí, dentro del marco estético del modernismo.

Es por esto que se persigue la forma de “tesela” con tendencia a formas geométricas rectas, tan recurrentemente utilizada por el artista, aunque con cierto respeto hacia las formas redondeadas para que no suponga una aportación negativa a la propia aerodinámica del vehículo.

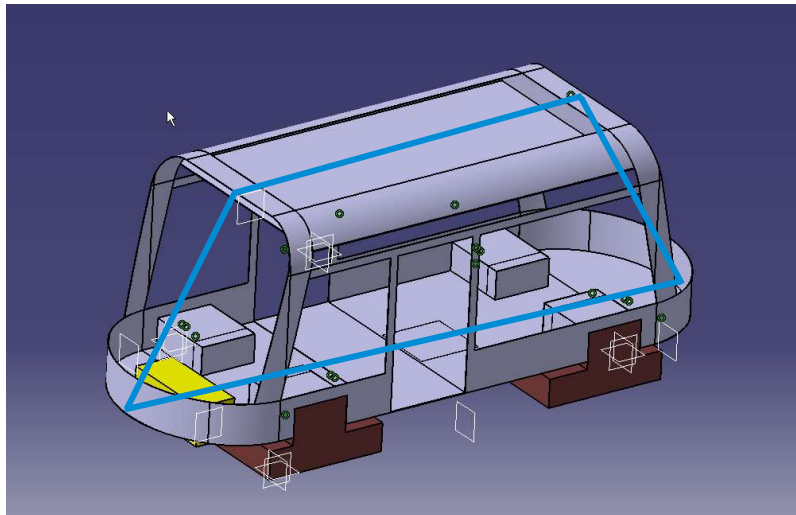


Figura 9. Perímetro de forma geométrica del primer diseño del vehículo.

Además, los cabeceros junto con los parabrisas (no incluidos en la figura anterior) dotan al conjunto de cierto componente estético moderno, para no caer en el carácter rectangular propia de la estética de épocas anteriores. De modo que este nuevo vehículo pueda servir como marca de progreso y avance de un transporte tan limpio como es el tranvía en la actualidad.

Por otro lado, como su implementación está pensada para zonas masificadas como consecuencia de atracciones turísticas, se dota al coche de la mayor superficie acristalada posible, velando por el confort del usuario y la posibilidad de observar el entorno en el que se encuentra a través de la ampliación del campo de visión desde el interior del tranvía.

Siguiendo con la línea de mejora la experiencia del usuario, se diseña el cabecero curvo para conseguir la sensación de “mirador” de modo que el usuario logre un grado más de inmersión en el entorno y no obtenga únicamente la visión plana a través de las ventanas laterales.

Para la simplificación de la estructura, se opta por no diseñar una cubierta completa para el techo, sino que se ocultan los componentes sobre este con un carenado a la altura del sistema de mayor cota vertical, en este caso, el cajón eléctrico. Con esto se consigue evitar la necesidad de practicar orificios de ventilación para el sistema de climatización y el resto de aparatos eléctricos en la estructura de modo que se debilite la superficie en la que se practiquen, al igual que reducir el peso al no incluir una nueva superficie meramente estética.

En cuanto a la disposición y tipología de los bogies, se resuelve que la mejor opción es un bogie convencional con las dimensiones adaptadas a las reducidas cotas de este vehículo. Gracias a estas dimensiones no resulta tan inestable como un tranvía convencional por lo que no amplía la problemática del proyecto ni compromete la seguridad del pasaje. Se debe tener en cuenta las dimensiones del bogie, ya que resta espacio al habitáculo y debe desarrollarse en concordancia con las normativas aplicables al diseño de interiores de tranvías y trenes ligeros.

2.5 Diseño y cálculo estructural.

De cada una de las alternativas se parte desde su estado más simplificado formado por los elementos básicos que generan el volumen de la estructura en cada caso.

El proceso hasta llegar a la estructura final es reiterativo y se basa en 3 pasos principales:

- **Investigación:** en esta fase se lleva a cabo la recopilación de datos necesaria para el diseño de las diferentes partes del coche.
 - Inicial: búsqueda de información sin precedentes a cerca de la geometría óptima.
 - A partir de la primera iteración: búsqueda de elementos y geometrías de refuerzo que aporten mayor resistencia y rigidez al conjunto.
- **Diseño / rediseño:** modelado de la geometría volumétrica de las diferentes partes del vehículo.
 - Inicial: modelado, desde cero, de la estructura sobre la que se realizará la simulación del cálculo FEM.
 - A partir de la primera iteración: implementación de refuerzos y nervaduras que eviten la deformación por encima del límite elástico de los diferentes materiales de cada conjunto.
- **Prueba y evaluación:** simulación del cálculo FEM sobre las estructuras para la validación del conjunto.
 - Iteración inicial e intermedias: ejecución del cálculo FEM e interpretación de los resultados que evidencian las zonas que precisan de refuerzos.
 - Prueba final: interpretación de los resultados finales y extracción de conclusiones para los diferentes casos.

2.5.1 Estructura metálica

Esta alternativa se diseña íntegramente en metales, siendo el acero estructural S355 J0 empleado en zonas críticas como son la estructura bajo bastidor ya que será la que mayor esfuerzo deba soportar de todo el conjunto; o la estructura del parachoques en vistas de garantizar la seguridad del coche en caso de impacto. Por otro lado, la aleación de aluminio empleada es la 6061-T4, debido a su buena relación densidad-resistencia de modo que se consigue una estructura muy resistente, pero con cierta reducción de peso correspondiente a la parte superior de la misma.

Para la alternativa en metal, se empieza modelando 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.

2.5.1.1 Primer análisis

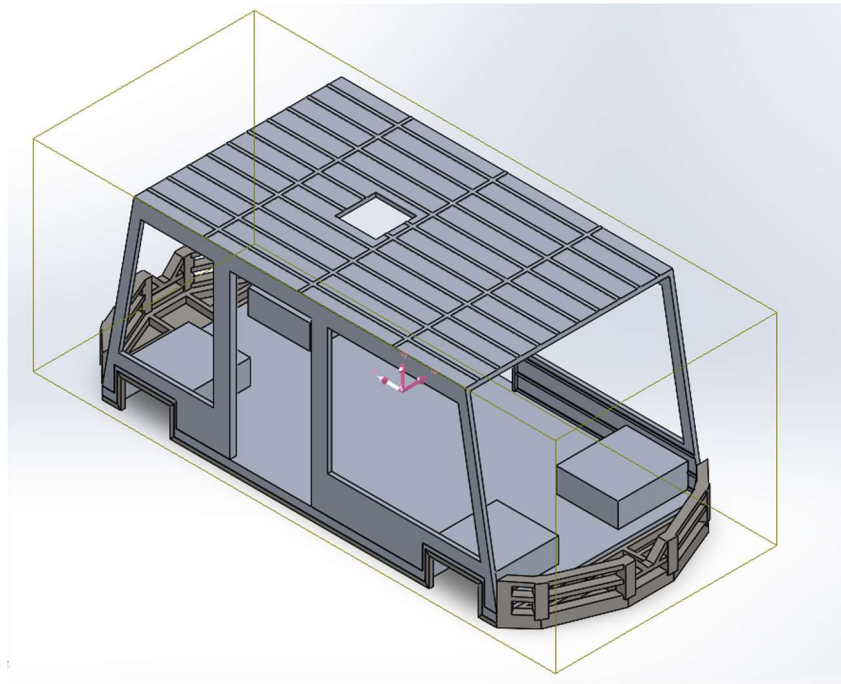


Figura 10. Diseño inicial de la estructura metálica.

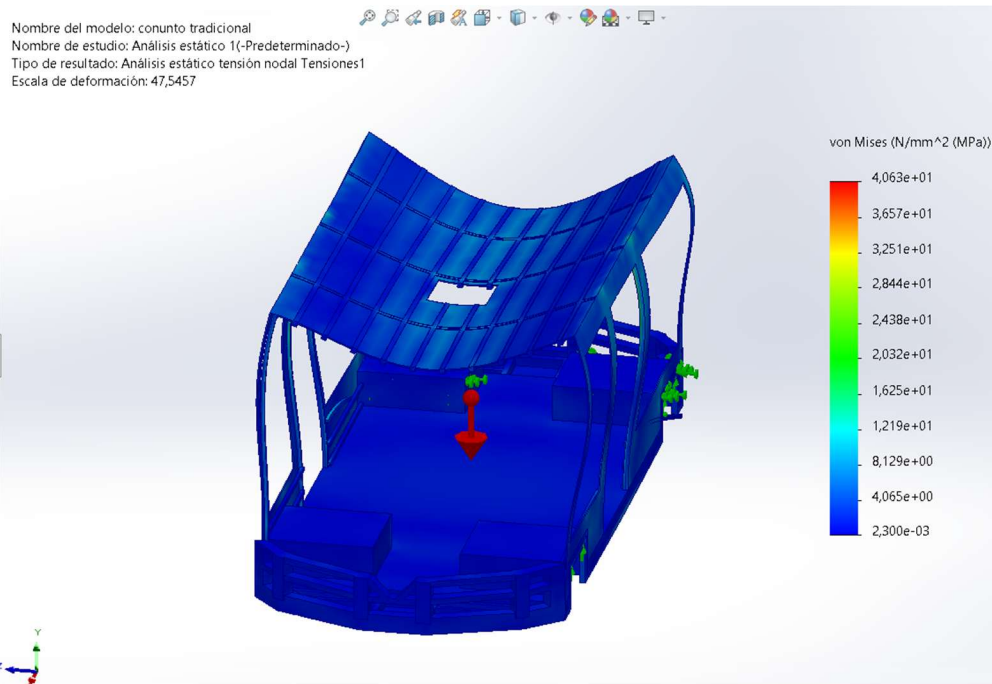
Como se ha mencionado en el apartado correspondiente a los criterios de fallo; se debe tener en cuenta para la interpretación de resultados el Factor de Seguridad a respetar en relación al material empleado en la estructura, en este caso aluminio 6061.

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

Ecuación 5. 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.

A continuación, se exponen los resultados del cálculo estructural.



Figuras 11. Resultados del primer análisis estático tensional nodal de la estructura metálica con una escala de deformación de 50 aproximadamente.

Lo primero que se debe tener en cuenta es el valor máximo de tensión sufrido por el conjunto, siendo 40,63 MPa. Este valor no supera el límite admisible calculado en la ecuación 5, en concreto, supone el 36,9% del límite admisible por lo que se puede considerar completamente seguro.

Al en la **parte superior** del conjunto se observa un rango de tensiones entre los 32 y los 40,63 MPa. Estas tensiones adquieren su valor máximo en zonas críticas como son el centro de la placa del techo y los puntos de unión entre esta placa y los marcos verticales de ventanas y puertas. Tiene sentido que estos sean puntos de concentración de tensiones ya que el centro de la placa superior es el punto más alejado de los puntos de apoyo en esta zona y los marcos de las puertas son las superficies más estrechas del conjunto y deben soportar el peso de los sistemas eléctricos ubicados en el techo.

La tensión sufrida en cada zona va acorde con la deformación que sufre el conjunto en el mismo punto.

En cuanto a la **zona media** se tratan tensiones de menor valor que en la superior, siendo entre 8 y 24 MPa, por lo que se puede extraer que las columnas trabajan bien la transmisión de carga de la zona superior a la inferior.

Por último, analizando la **zona inferior** presenta tensiones mínimas entorno a los 5 MPa en toda su superficie por lo que cumple con la rigidez buscada, como era de esperar el contar con refuerzos de acero bajo la superficie del suelo.

Como con conclusión de este primer análisis se deduce que se tiene un conjunto sobre reforzado por lo que se realizan cambios en la estructura del mismo para aligerar en cierto grado el conjunto manteniendo su eficacia y rigidez.

2.5.1.2 Análisis final

La principal modificación es el cambio de los componentes en S355 J0 a aluminio 6061. Además, hay una optimización de los espesores y una reducción del número de perfiles de refuerzo dispuestos bajo el suelo y el techo.

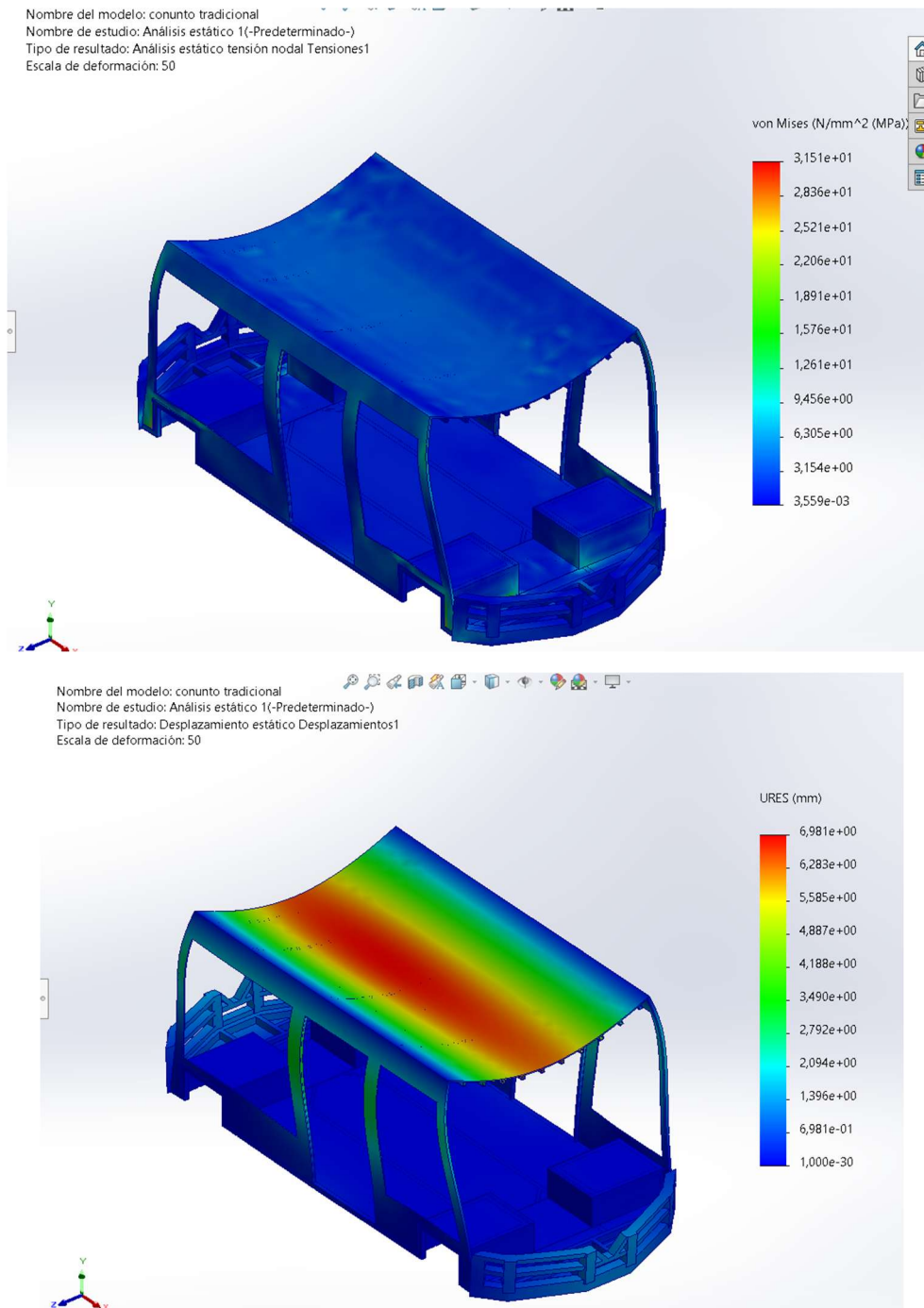


Figura 12 y 13. Resultados de resultados del último análisis estático tensional nodal y de la flecha máxima, respectivamente, de la estructura metálica con una escala de deformación de 50.

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.

La tensión máxima corresponde a los puntos de unión de los marcos de las puertas con el techo como se predijo con anterioridad, esto es así debido a que la parte superior del coche es la más débil al recaer todo el peso sobre los marcos y ventanas que van de la parte superior a la inferior.

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.

2.5.1.3 Conclusiones

De este estudio FEM, considerando tanto tensiones como desplazamientos se extrae que el diseño tiene la suficiente robustez para aguantar las tensiones aplicadas ya que no hay zonas cuya deformación comprometa la seguridad de la estructura.

Además, no solo no es necesario reforzarla sino que se encuentra sobredimensionada para que, en caso de que futuros proyectos, pueda resistir mayores cargas sin la necesidad de una nueva fase de rediseño. Por esto, se podría llegar a una nueva optimización mediante de la reducción de material en las zonas de menor solicitud.

Masa total (Kg)	2252,4
Materiales	Aluminio 6061

Tabla 4. Tabla resumen características técnicas estructura metálica final.

El diseño final, sigue siendo robusto y recto, de modo que los procesos de fabricación con metales resulten lo más sencillos posible al tratar con una geometría simplificada. Sin embargo, lo que dota al conjunto del volumen final redondeado y con mayor valor estético es el material compuesto que se ensambla como fase final del proceso de fabricación del coche.

2.5.2 Estructura “space frame”

Esta alternativa supone un paso más hacia el aligeramiento de los medios de transporte masivos por lo que se emplea una estructura particular conocida como “space frame” o “estructura de armazón espacial” cuyo diseño se basa en generar el volumen de la estructura mediante elementos lineales para la distribución de las fuerzas que se transfieren a lo largo del conjunto.

La estructura “space frame” inicial está formada, únicamente, por el marco que genera el perímetro del material compuesto, además de refuerzos bajo bastidor. La estructura completa se fabrica en aluminio 6061 en vistas de conseguir la mayor reducción de peso posible.

Además, los perfiles en L se ubican en las zonas en las que el marco debe aguantar el mayor peso del material compuesto que le dará el acabado final con el objetivo de ayudar al ensamblado y unión de ambos materiales. El resto de perfiles tienen sección rectangular ya que su función principal es dar cohesión y rigidez al conjunto, pero no soportan los esfuerzos de mayor magnitud dentro del mismo.

En el diseño se implementan refuerzos en “X” para ayudar a equilibrar los momentos de flexión provocados por fuerzas no son completamente simétricas.

Por otro lado, con el objetivo de buscar las dimensiones óptimas de los perfiles se opta por escoger perfiles de 100 x 100 mm de sección y 8 mm de espesor. Si bien las dimensiones más empleadas para elementos estructurales metálicos en trenes ligeros son de 120-100 mm de alto, 80-60 mm de ancho y 3-6 mm de espesor(Steel and Composite Structures in Rail Vehicles, 2014),(FRA, 2020); se sobredimensiona el perfil con el objetivo de conocer el margen disponible para la optimización de dichas medidas.

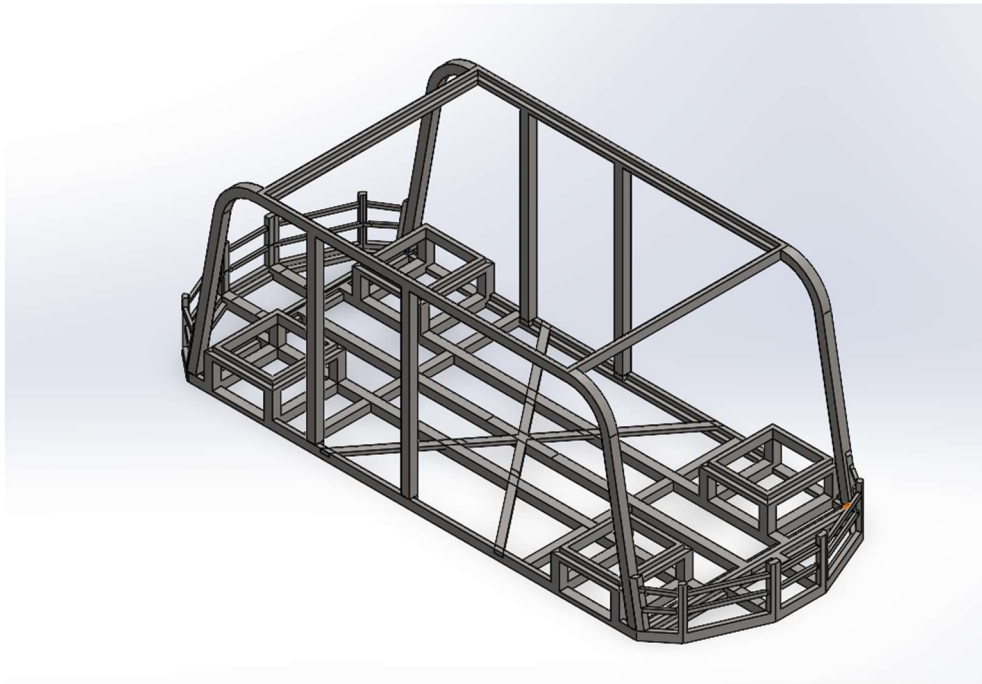


Figura 14. Diseño inicial de la estructura "space frame".

A continuación, se muestran los resultados del primer análisis de esta estructura.

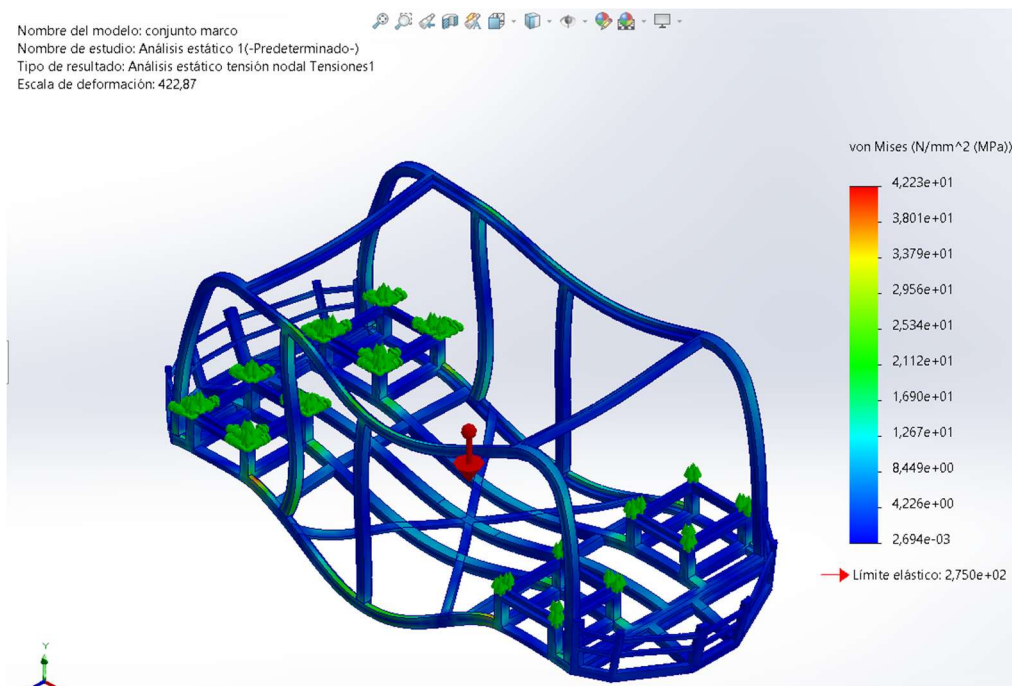


Figura 15. Resultados tensión Von Mises del primer cálculo de la estructura "space frame" con una escala de deformación de 400 aproximadamente.

Como se ha justificado el FS de referencia es de 2,5 por lo que la tensión máxima admisible por el conjunto es la misma que en el caso de la estructura metálica, 110 MPa.

Se observa en la Figura 15 que el máximo valor de la tensión de Von Mises sufrida por el conjunto es de 42,23 MPa, lo que supone el 38,39% del valor máximo admisible. Al ser un porcentaje muy reducido del valor mínimo se opta por el rediseño de la estructura.

Es por esto, que va a sufrir un proceso de optimización tanto de la distribución de los perfiles como la sección transversal y del grosor de los perfiles debido al amplio margen respecto de los valores máximos admisibles.

2.5.2.1 Cálculo final

En el cálculo anterior se ha concluido que la estructura es susceptible a mejora tanto de espesores como de la distribución general de los perfiles por lo que, se eliminan los perfiles en "X" y se cambia la sección transversal de los perfiles a 100 x 60 mm con un espesor en la zona inferior de 6 mm y la zona superior de 4 mm.

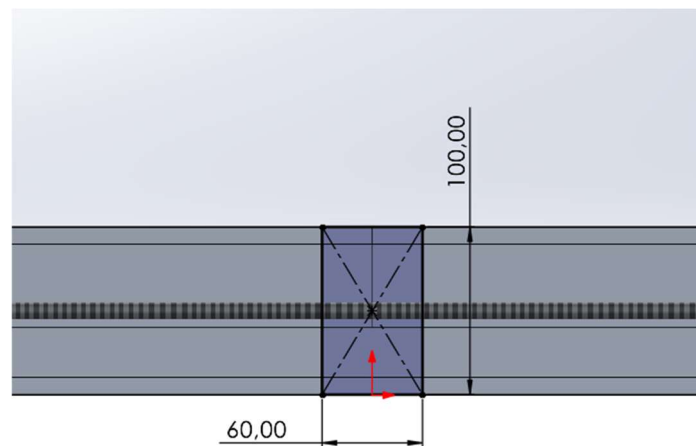


Figura 16. Dimensiones generales de los perfiles de la zona inferior del conjunto.

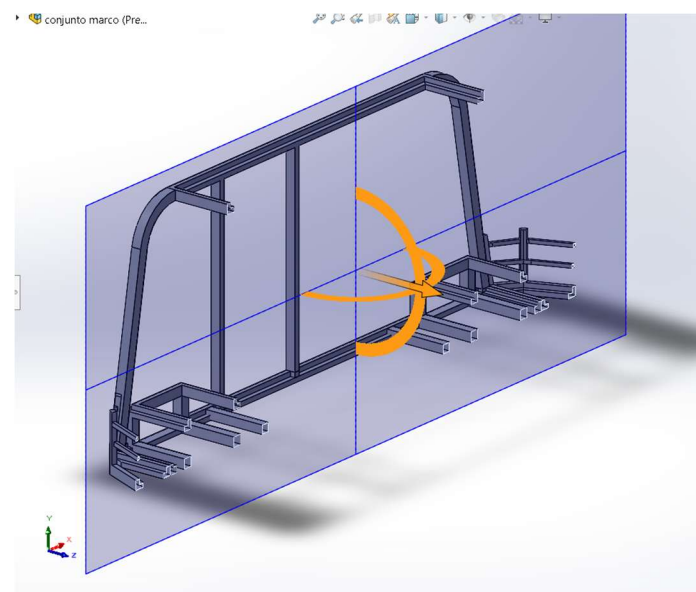


Figura 17. Vista seccionada del conjunto.

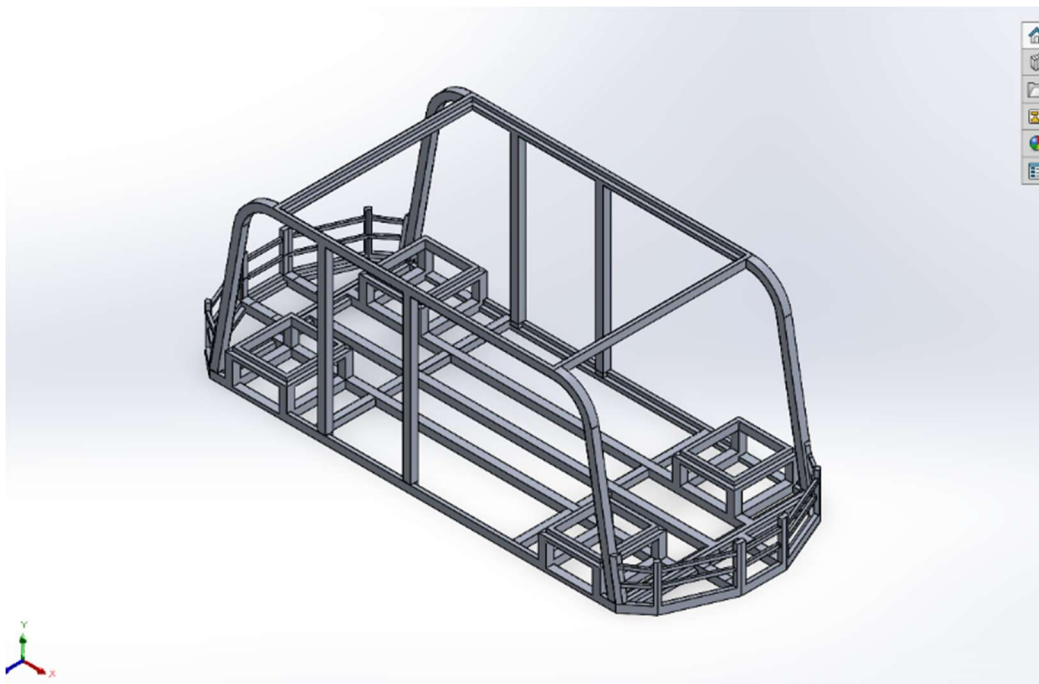


Figura 18. Rediseño de la distribución de los perfiles de la estructura “space frame”.

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, como se enuncia en el anexo 3. Materiales. Aunque el GFRP aportará cierta rigidez y resistencia al conjunto.

Todos los perfiles son de sección cuadrada o rectangular con un grosor de pared de 6 mm para la parte inferior y los dispuestos en dirección vertical. A diferencia de los perfiles de la zona superior cuyo grosor es de 4 mm al precisar de menor rigidez.

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

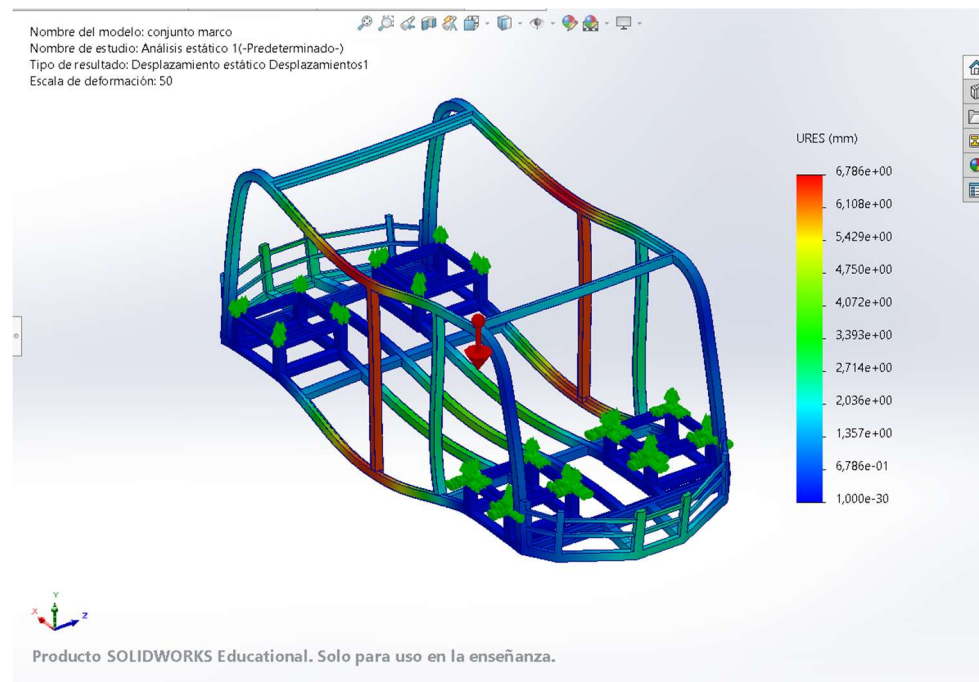
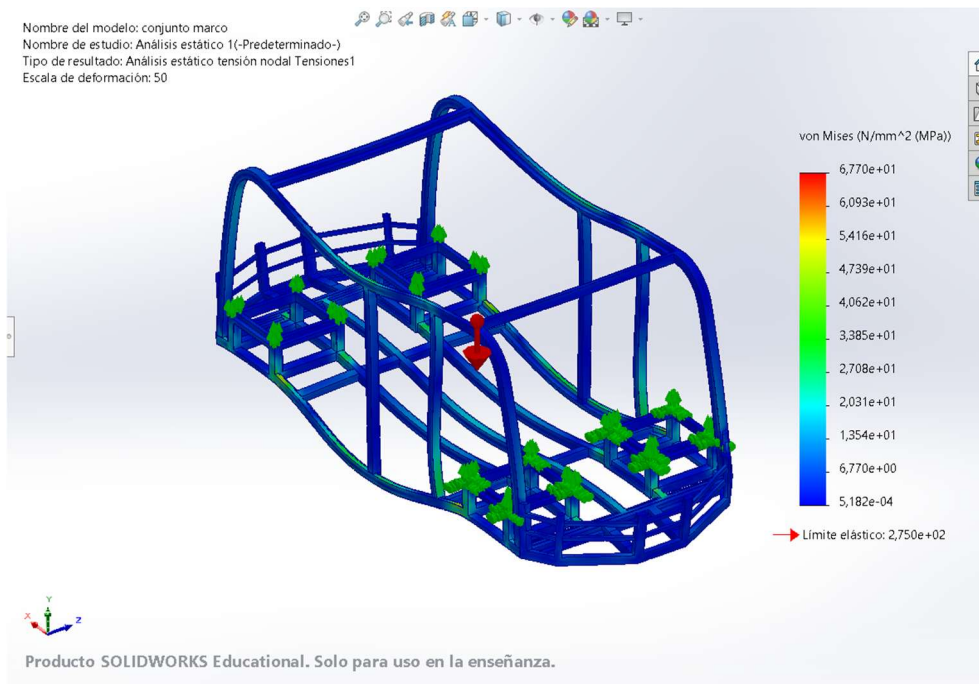


Figura 19 y 20. Resultados tensión de Von Mises y desplazamientos respectivamente con una escala de deformación 50.

De la Figura 20, 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 6, 7 y 8. 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.

2.5.2.2 Conclusiones

La estructura que se plantea en este caso, cumple con la normativa y los márgenes necesarios para no sufrir un fallo catastrófico.

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

Tabla 5. Tabla resumen de las características principales de la estructura "spaceframe" final.

2.5.3 Estructura en composites

Al igual que las alternativas anteriores, el diseño inicial de la alternativa en materiales compuestos se basa en las superficies que componen el conjunto.

Para el diseño destinado al cálculo estructural, se ocultan tanto las tapas de los bogies como los carenados de todo el conjunto debido a que no soportan cargas, solo aportan peso al conjunto, por lo que son tenidos en cuenta en la aplicación de la gravedad y, por tanto, del peso final del conjunto, pero no interaccionan con ningún elemento de los considerados que supongan esfuerzos.

Por otro lado, en este caso se tienen dos líneas de diseño simultáneas pero que sufren procesos independientes; diferenciando entre rediseño con motivo íntegramente estético y el rediseño de los perfiles de refuerzos con motivo de mejorar la resistencia a esfuerzos del conjunto.

2.5.3.1 Diseño inicial.

Este primer diseño se basa en una geometría recta para asegurar la solidez del conjunto. Sin embargo, la curvatura practicada en ambos cabeceros pretende reducir la sensación de rigidez del conjunto. Como se trata de un vehículo que circula en ambas direcciones la geometría exterior es simétrica pese a que la ubicación de las puertas no lo sea.

En primera instancia, el método seguido para el diseño se basa en generar un conjunto de superficies al cual, a la hora de lanzar el cálculo FEM, se le dota del espesor requerido. Dentro de este conjunto de superficies quedan embebidos perfiles diseñados por modelado.

Si bien es cierto que SolidWorks suele dar problemas con la interacción de elementos modelados y los diseñados por superficies, este primer cálculo nos indica una aproximación de los grosores finales tanto de las pieles como del núcleo del material compuesto, además de la disposición y grosor de los perfiles de refuerzo embebidos ya que quedan expuestas las zonas críticas del conjunto.

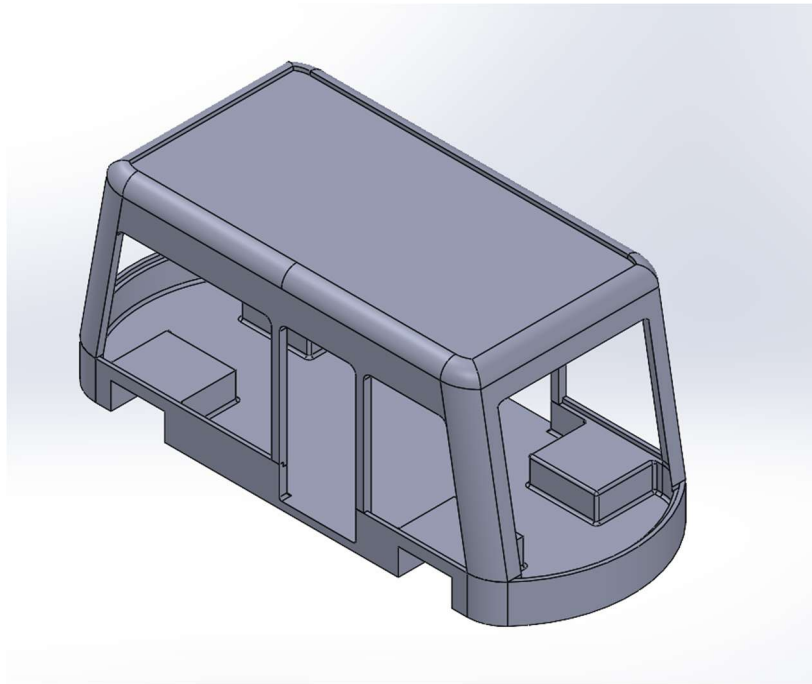


Figura 21. Diseño inicial de la estructura en composites.

Para la apreciación de la diferencia de resistencia y atendiendo a los esfuerzos de torsión se realiza un cálculo orientando la mitad de las fibras 45° y la otra mitad -45° . Tras analizar los resultados se concluye que, para un vehículo de dimensiones reducidas y compacto como es el caso que concierne a este proyecto, la disposición en ángulo de las fibras no hace otra cosa que debilitar el conjunto por lo que se descarta esta opción.

De este primer análisis también se obtiene la combinación de espesores pieles-núcleo con la que se va a trabajar, siendo lo más espesos posibles dentro del margen tomado de modo que los refuerzos a implementar sean los mínimos posibles. Se obtiene un grosor de pared total de 100 mm, 92 mm correspondiente al núcleo de espuma PET y 4 mm de cada piel de GFRP.

2.5.3.2 Primer rediseño estético.

Basándose en el primer diseño se realiza un proceso de redondeo del volumen general del vehículo. Por otro lado, se cambia el sistema de modelado debido al formato de cálculo de SolidWorks.

Este rediseño se modela como una único sólido, sobre el que equidistan superficies a las cuales se les dota de espesor y material inmediatamente antes del lanzamiento del análisis estático. Además, con el objetivo de rigidizar el conjunto se generan extrusiones de perfiles con sección rectangular embebidos en el núcleo del material compuesto, de modo que no interrumpan la fibra de vidrio ya que no haría otra cosa que debilitar el conjunto. Con este segundo diseño se consiguen resultados de mayor proximidad al comportamiento real.

La estructura queda como un volumen más redondeado cambiando la geometría de los cabeceros aportando curvatura con lo que se consigue un acabado menos agresivo.

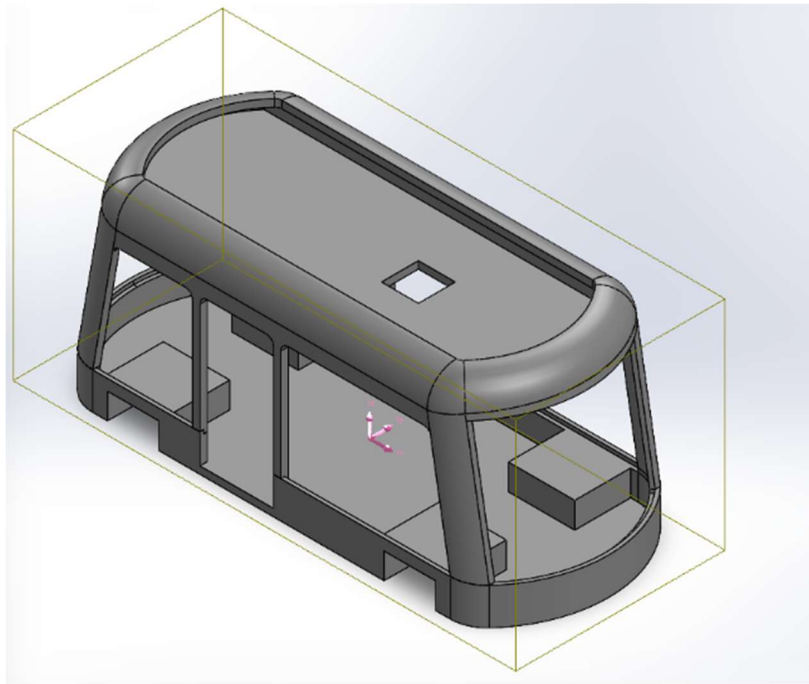


Figura 22. Rediseño estético del vehículo.

Finalmente, se le añaden los faldones de seguridad, los cuales dejan un margen mínimo con el suelo para evitar posibles accidentes de atrapamiento bajo el coche o la introducción no deseada de elementos del entorno en el área bajo bastidor. También se colocan las tapas tras las que se encuentran los bogies y que permiten el acceso en caso de necesitar mantenimiento rápido o no existe la posibilidad de acceder a la parte inferior del vehículo. Por otro lado, se implementa una cubierta en el techo abierta en su parte superior de modo que permita la ventilación de los sistemas eléctricos a la vez que los “esconde” de la vista del usuario para conseguir un mayor valor estético.

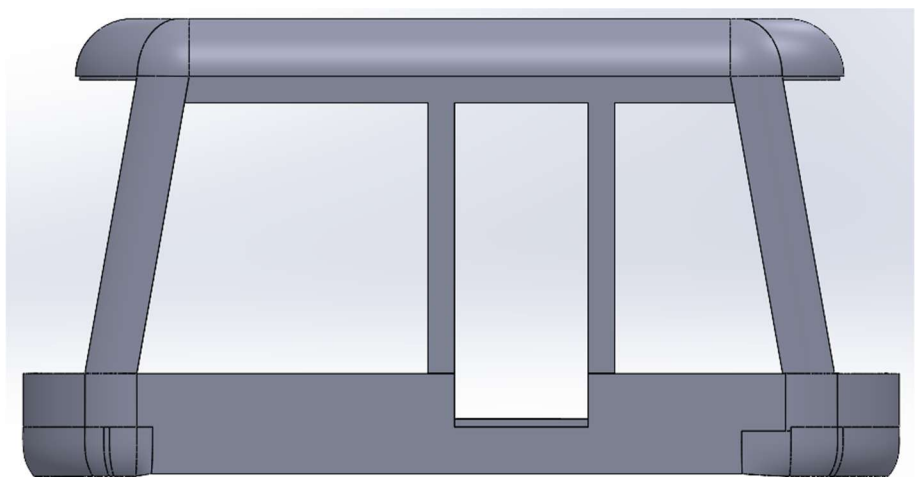


Figura 23 y 24. Vista de alzado y perfil del vehículo con los faldones, cubierta del techo y las tapas de los cajón bogie.

2.5.3.3 Implementación de perfiles embebidos

Una vez se tiene una estética general bastante acorde a lo que se buscaba desde un principio se implementan perfiles embebidos en el núcleo del material compuesto con el objetivo de no tener que aumentar el grosor de las pieles o el núcleo más de lo necesario para conseguir una estructura resistente y robusta.

Se colocan perfiles a 300 mm de separación de sección transversal rectangular tanto longitudinal como transversalmente. A excepción de puntos críticos como los puntos de contacto entre los apoyos y la superficie horizontal o bajo la zona que delimitan las puertas ya que se consideran zonas críticas, por lo que necesitan refuerzo. Sin embargo, en la zona del centro de disponen dos perfiles en forma de "X" para su refuerzo ante el esfuerzo de cortadura que sufre el suelo del vehículo debido a la torsión durante su actividad.

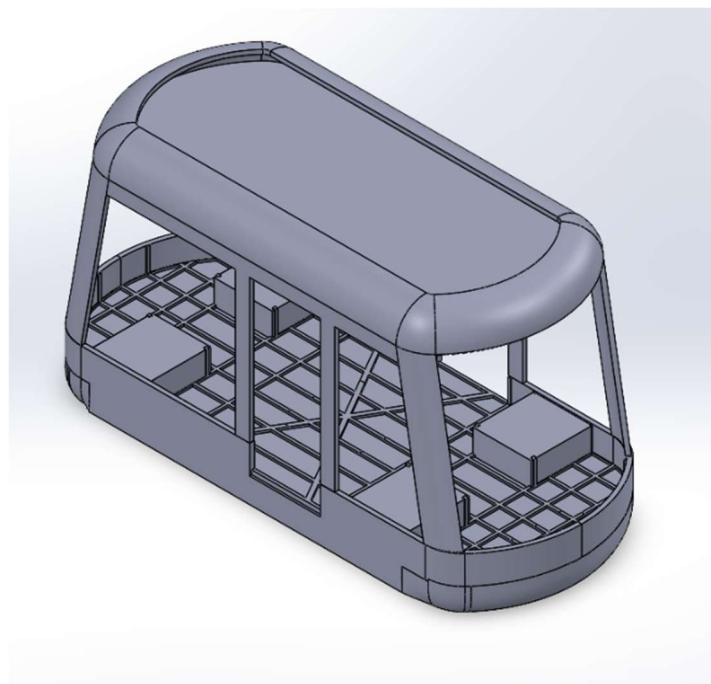


Figura 25. Vista isométrica de los perfiles de refuerzo.

Se observa la cara superior de los perfiles debido a que, como se ha mencionado anteriormente tienen la misma altura que el espesor del núcleo. Cuando, en el análisis se engruesan las superficies estos perfiles quedan ocultos.

2.5.3.3.1 Resultados primer cálculo

A continuación, se muestran los resultados del cálculo estático de la estructura.

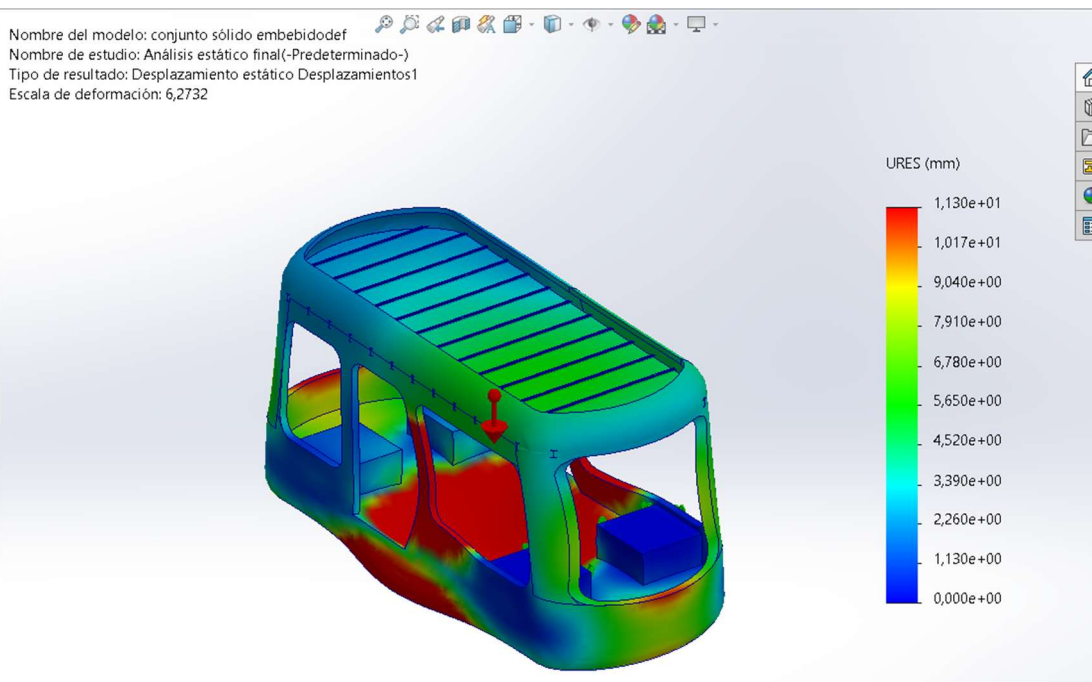
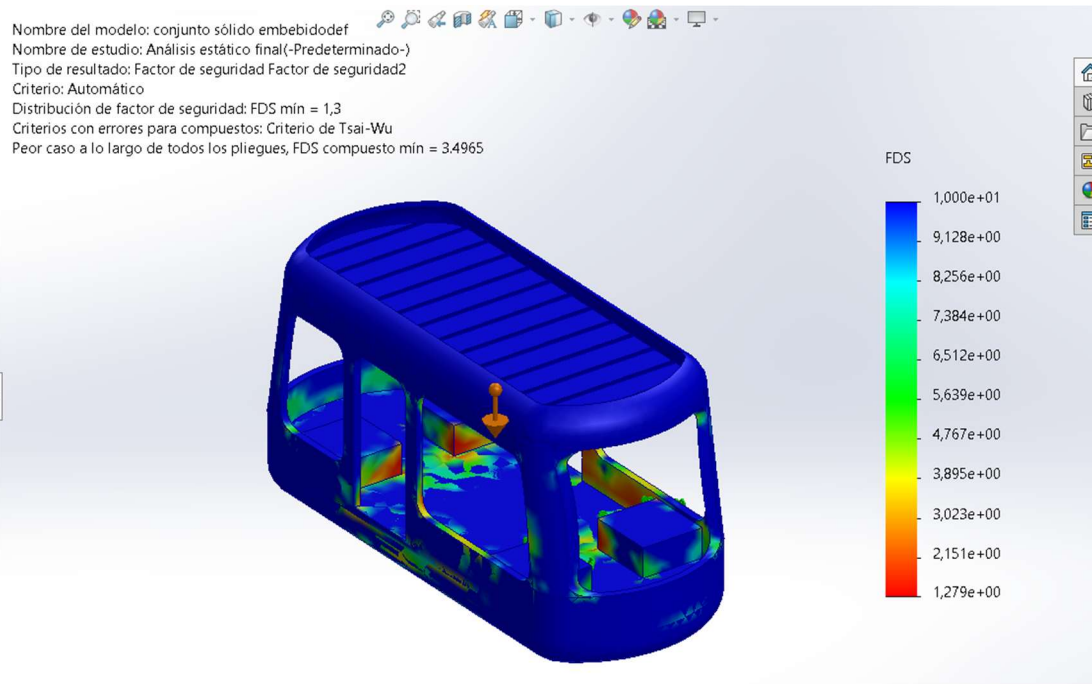


Figura 26 y 27. Resultados análisis estático del Factor de Seguridad y los desplazamientos respectivamente, con una escala de deformación 6.

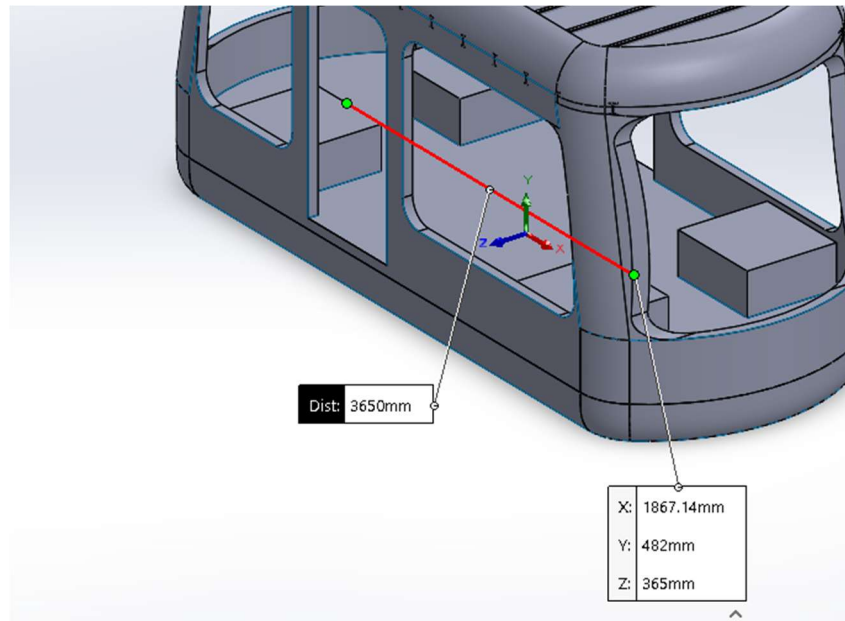


Figura 28. Distancia entre los apoyos del vehículo.

En este caso se observa que el FS mínimo encontrado en el vehículo es de 1,279 lo que está muy por debajo del valor buscado, FS = 3, mencionado en el apartado sobre los criterios de fallo.

Es por esto que no se realiza el análisis de resultados exhaustivos si no que se extraen las zonas que precisan mejoras para que sean reforzadas en el rediseño previo al siguiente cálculo. Estas zonas son las uniones entre las paredes verticales y el suelo debido a la gran deformación que sufre este último llegando en su zona central a los 11,3 mm. No obstante, entra dentro del límite admisible como verifica la siguiente ecuación:

$$f_{adm} = \frac{3650}{300} = 12,17 \text{ mm}$$

Ecuación 9. Deformación máxima admisible para el cálculo inicial

Sin embargo, al ser una deformación tan grande y con un Factor de Seguridad tan bajo, este desplazamiento podría verse reducido tras las modificaciones pertinentes en la estructura.

2.5.3.4 Diseño final

En cuanto a la estética se realiza una modificación final por lo que se opta por cambiar los marcos con el objetivo de que, tanto desde su perspectiva lateral como frontal y trasera, se perciba más redondeado y cercano, restando apariencia pesada al vehículo. Además, se cambia la dirección de curvatura de dichos marcos de modo que sea una geometría más sencilla en cuanto al ensamblado de los parabrisas.

Este cambio no debería hacer que los resultados fluctuasen en exceso ya que la curvatura se práctica de manera tangente a los marcos existentes por lo que se añade material a las columnas del vehículo. Al ser un material muy liviano, no debería afectar a la capacidad de resistencia del vehículo, si acaso, reforzarlo.

Por último se modifica la distancia entre el marco de la puerta y los bogies debido a necesidades del diseño interior en cuanto normativa (European Union Agency for Railways, 2022).

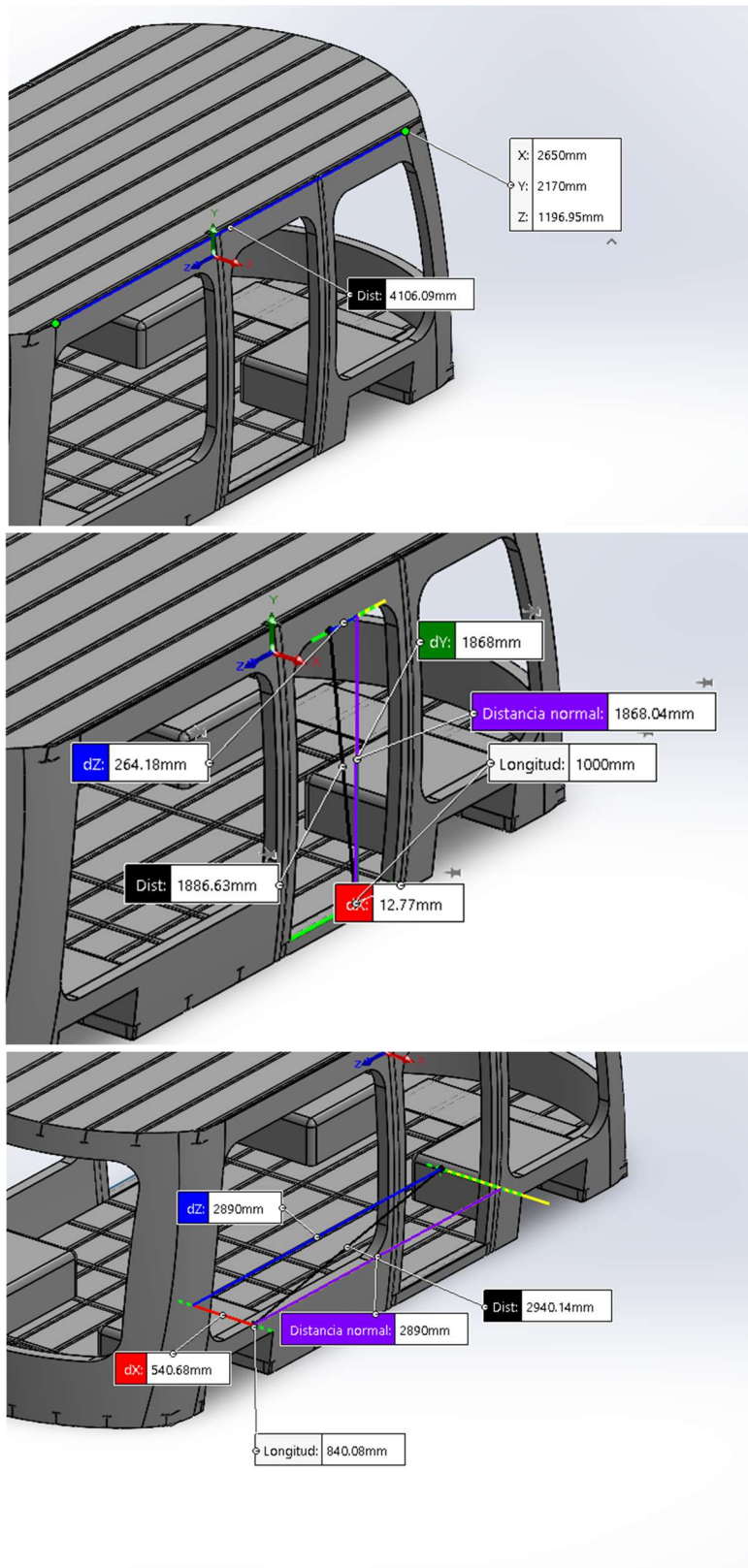


Figura 29. Distancias entre puntos de apoyo del techo, marcos de puerta y suelo respectivamente

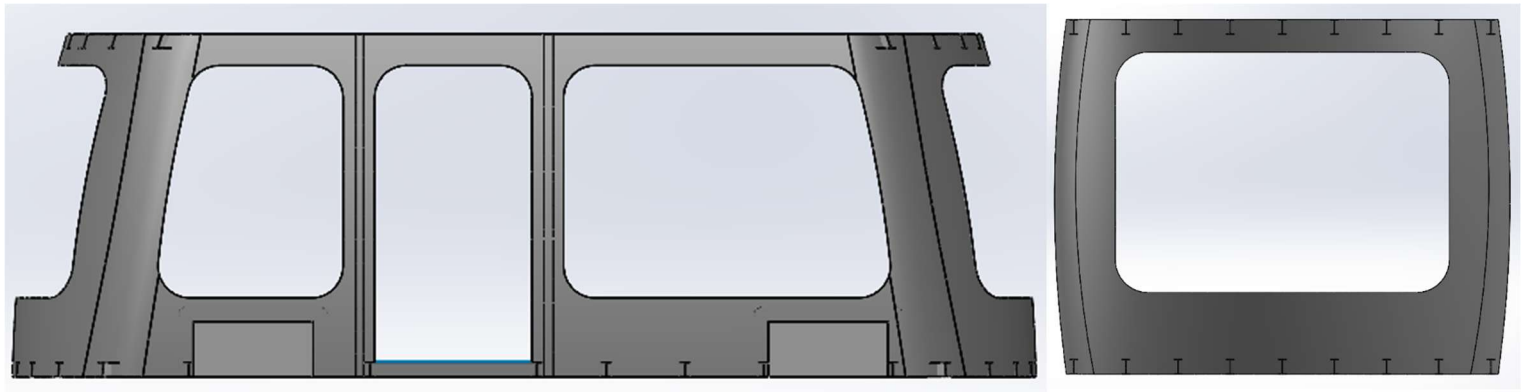


Figura 30. Rediseño de los marcos de los cabeceros desde la vista lateral y frontal / trasera respectivamente.

Por otro lado, en cuanto a modificaciones que no se aprecian a simple vista, se cambia la sección de los perfiles de rectangular a perfiles en “I” tanto en el suelo como en el techo, ya que tienen mejor comportamiento a flexión y ayudarán a darle mayor rigidez, resistencia y al aligeramiento de peso del conjunto resultante.

Esto es así ya que, los 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).

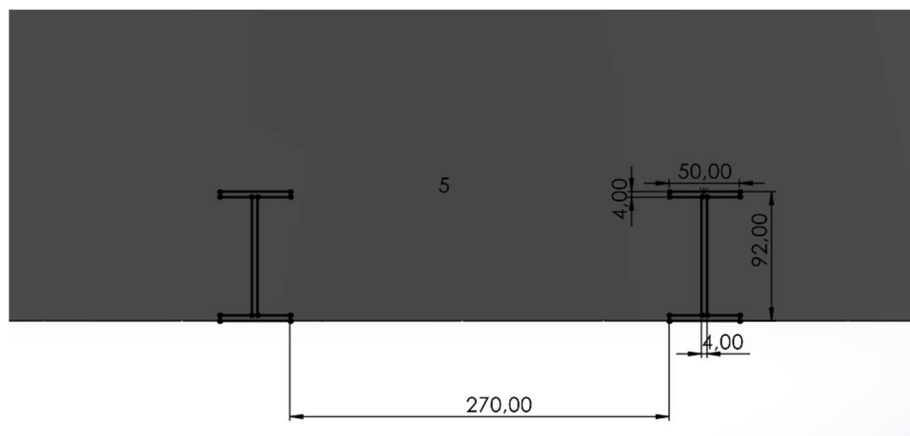


Figura 31. Sección transversal perfiles I longitudinales del suelo

Por otro lado, como se ha visto en los resultados del cálculo anterior, si bien los perfiles dispuestos en forma de “X” ayudan al refuerzo ante esfuerzos de torsión, para nuestro caso particular se precisa mayor resistencia a tracción y compresión. Por este motivo, se elimina dicha disposición y se implementan refuerzos transversales de las mismas características que los expuestos en la figura 21.

Sin embargo, 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.

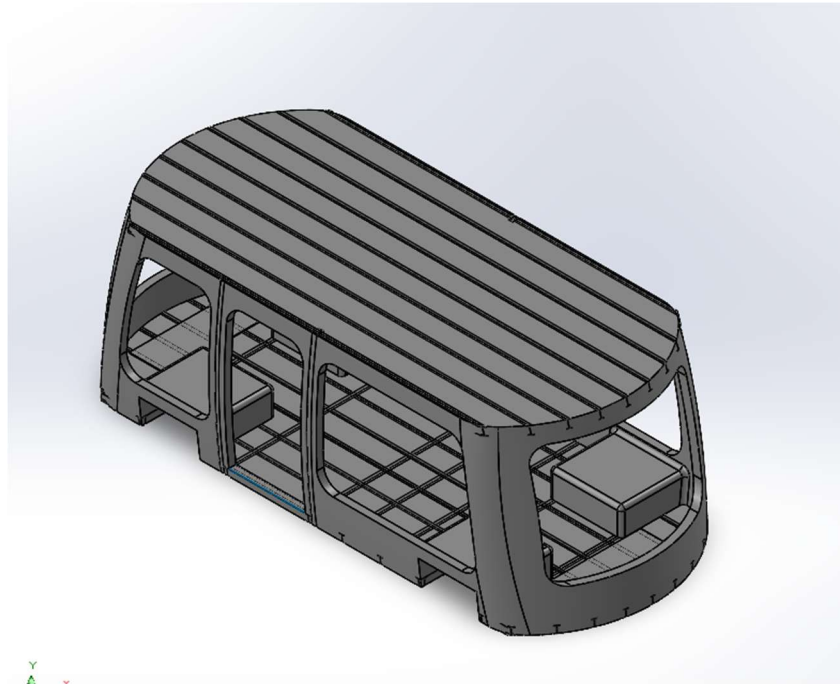
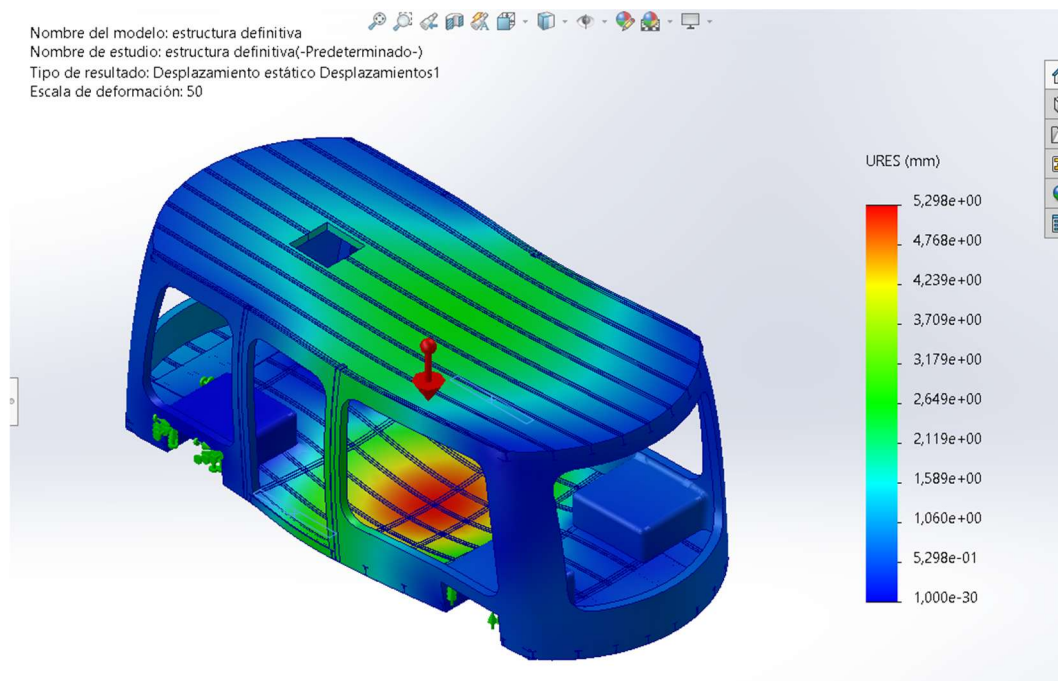
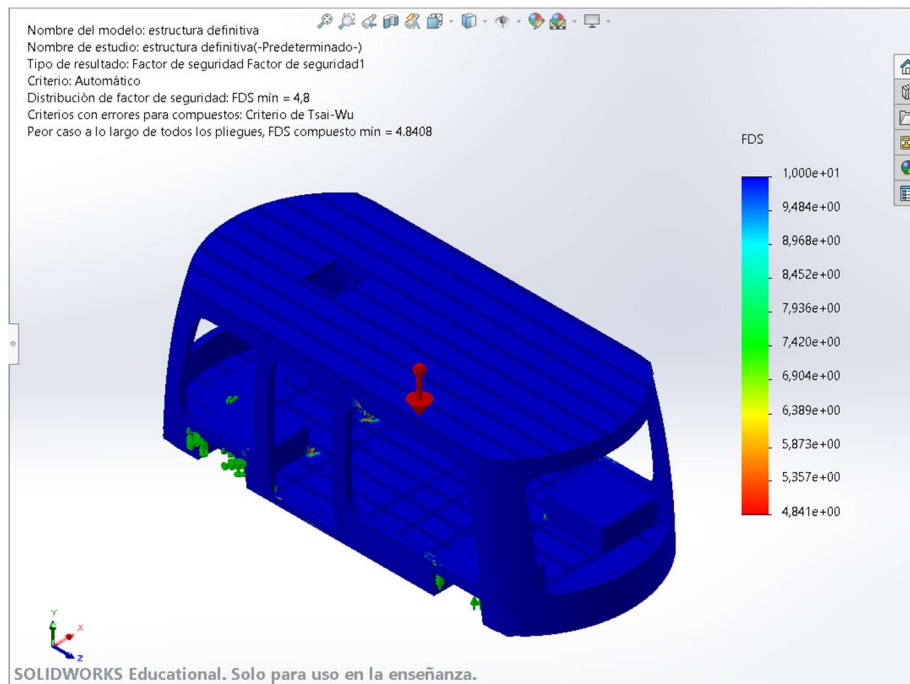


Figura 32. Rediseño de la distribución de perfiles de refuerzo.

2.5.3.4.1 Resultados cálculo final

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



Figuras 33 y 34. Resultado final del Factor de Seguridad y del desplazamiento respectivamente, con una escala de deformación 50.

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 10. 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 11. 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 12. 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.

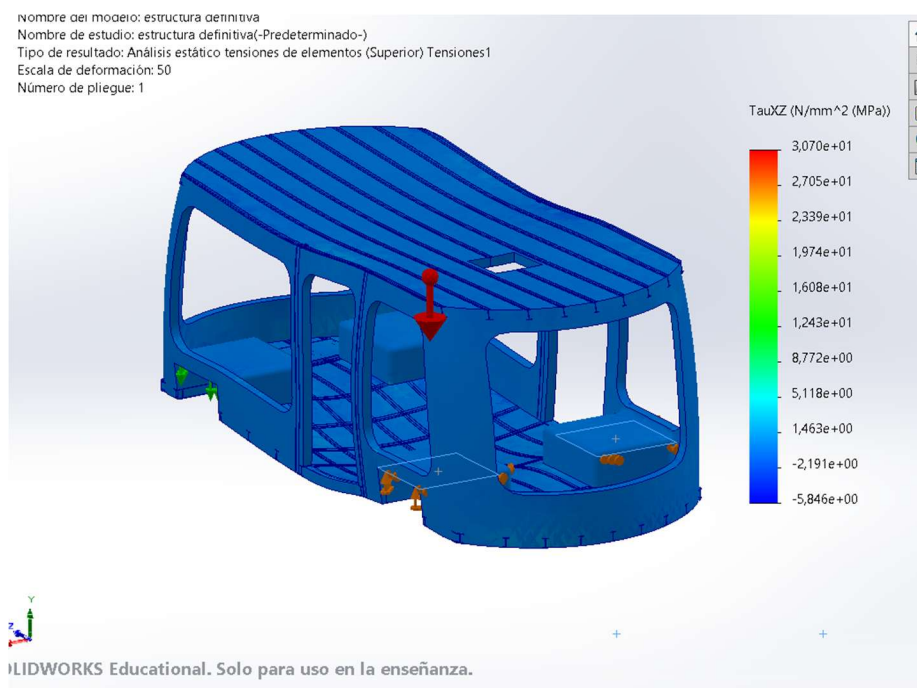
Una vez de concluye que cumple los dos requisitos básicos se analizan los esfuerzos de **torsión y cortadura** de modo que se verifique la eficacia total de la estructura.

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.

Esto es así ya que en cada uno de esos planos se encuentra la siguiente información:

- τ_{YZ} para el cortante de las cargas están en Y sobre las direcciones longitudinales en Z.
- τ_{XY} para el cortante de las cargas en Y sobre las direcciones transversales en X.
- τ_{XZ} para tener en cuenta la torsión alrededor de Z por las cargas en X que serán las que generen el momento de torsión.

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.



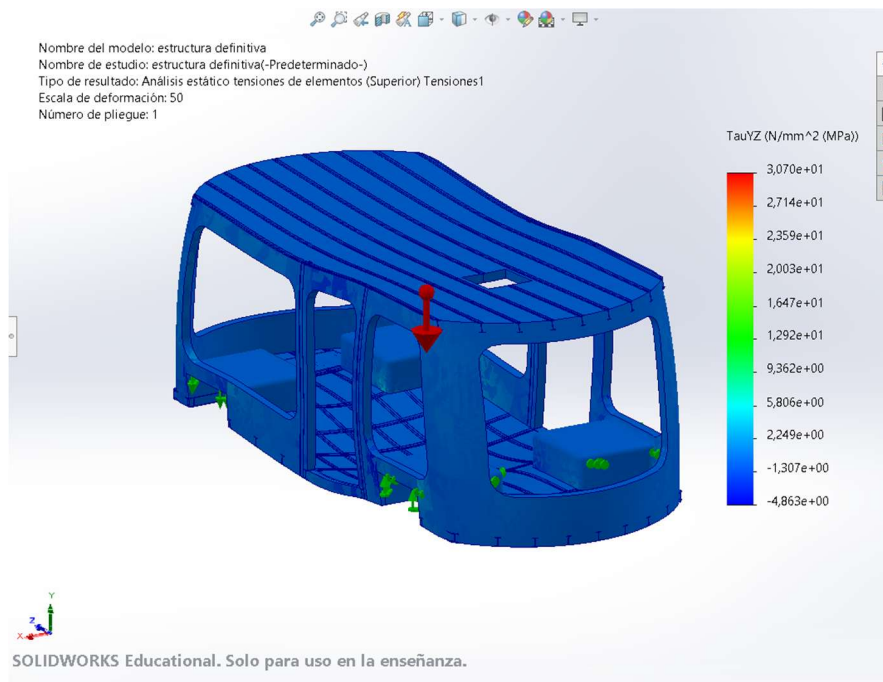
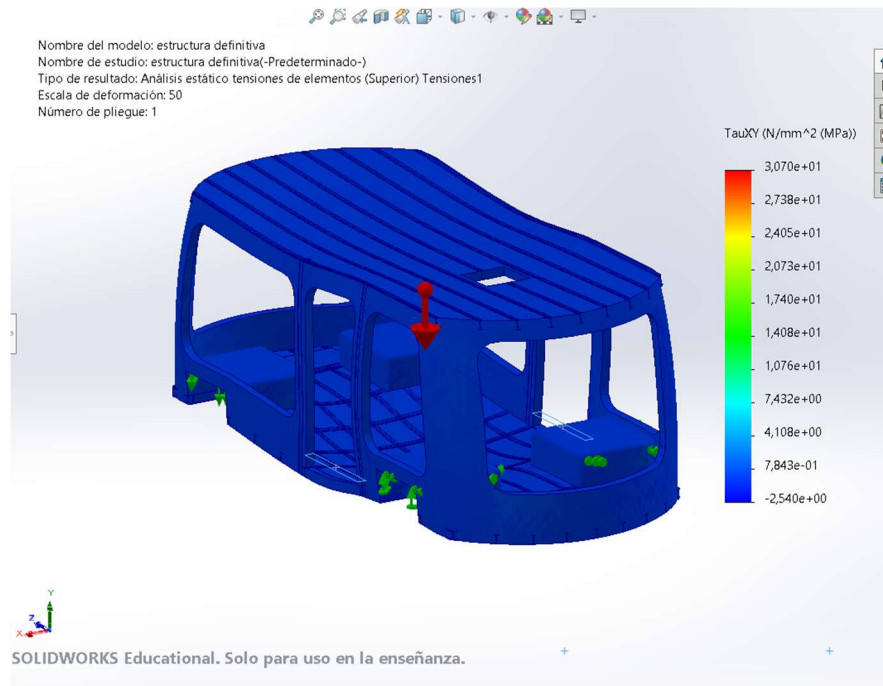


Figura 35, 36 y 37. Esfuerzos de cortadura en los planos XZ, XY y YZ respectivamente.

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.

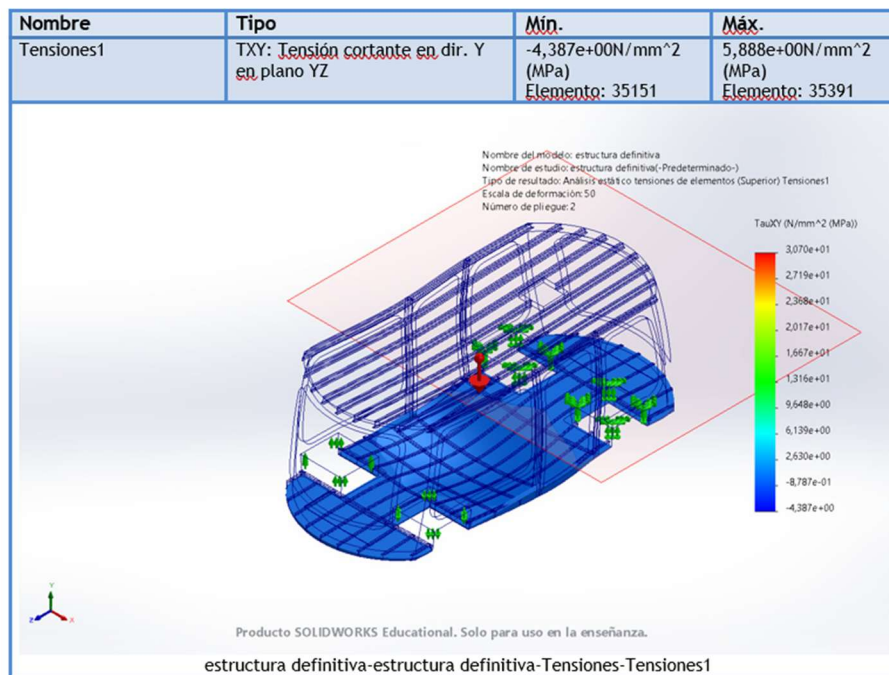


Figura 38. Corte de plano perpendicular a la planta para conocer el máximo valor de cortadura del núcleo.

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 13. 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:

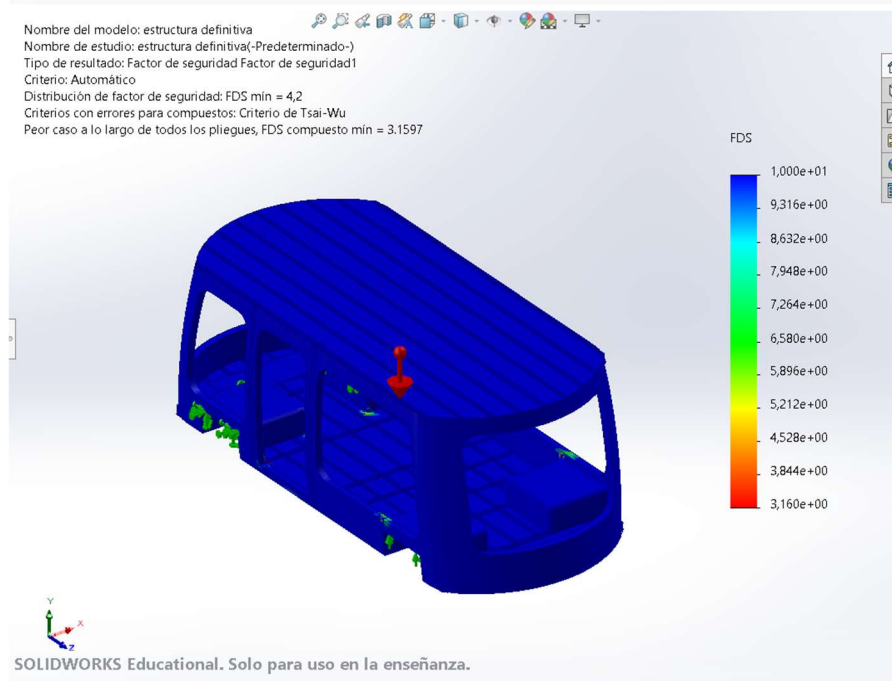
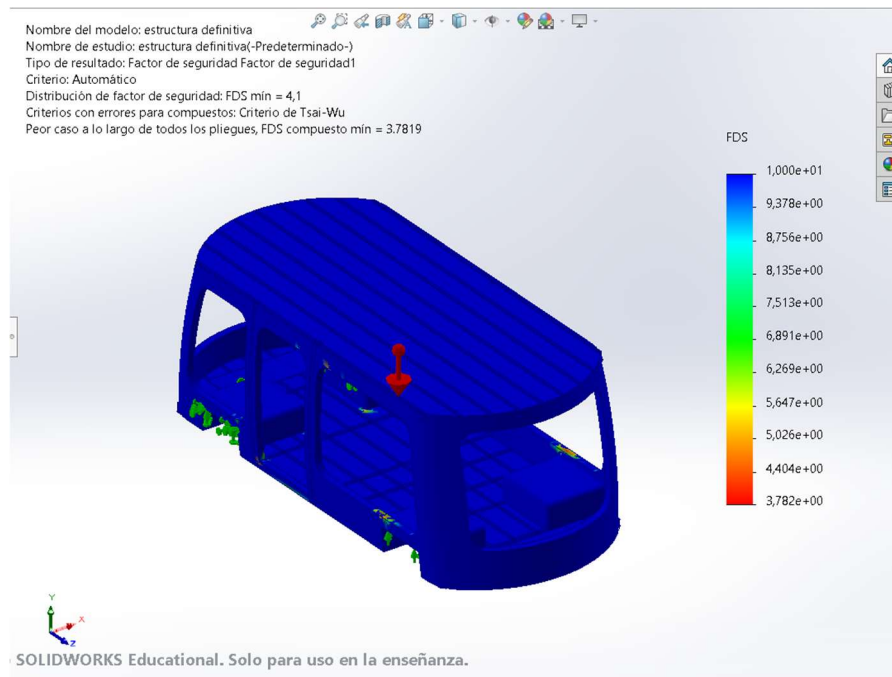
$$\tau_{adm} = \frac{2500}{3} = 833,33 \text{ MPa}$$

Ecuación 14. 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.



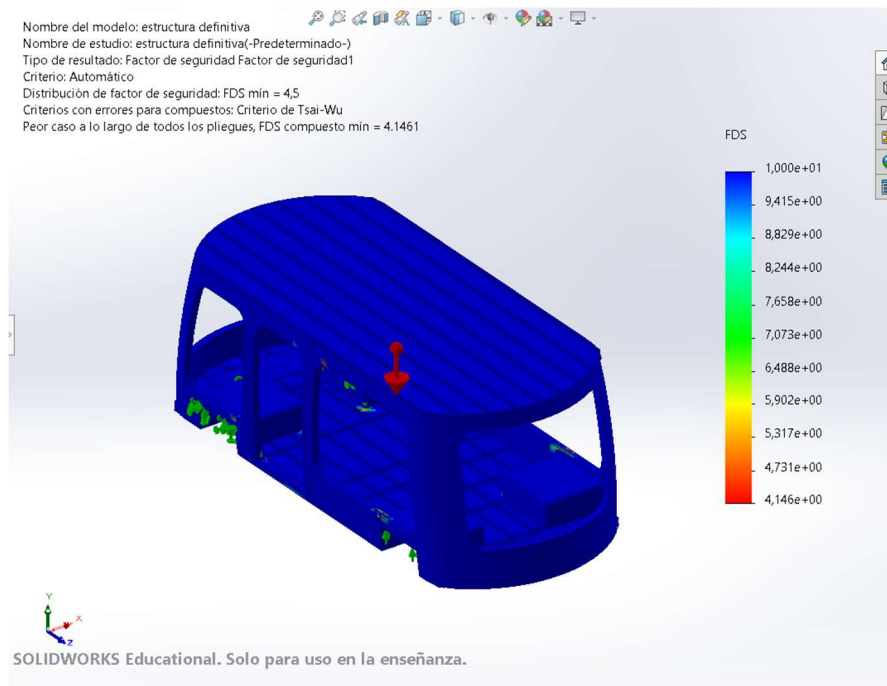


Figura 39, 40 y 41. Cálculo de alternativas con las fibras del GFRP dispuestas a 45° y -45°, 45° y 0°; y 90° y 0° respectivamente.

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.

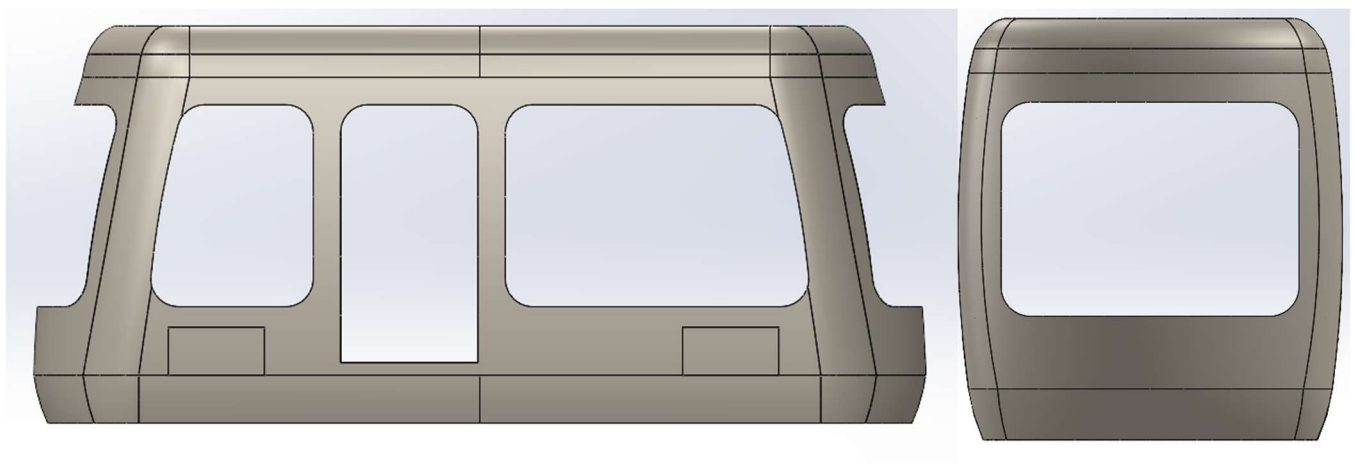


Figura 42. Alzado y vista lateral del diseño final de la estructura con los faldones y acabados.

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

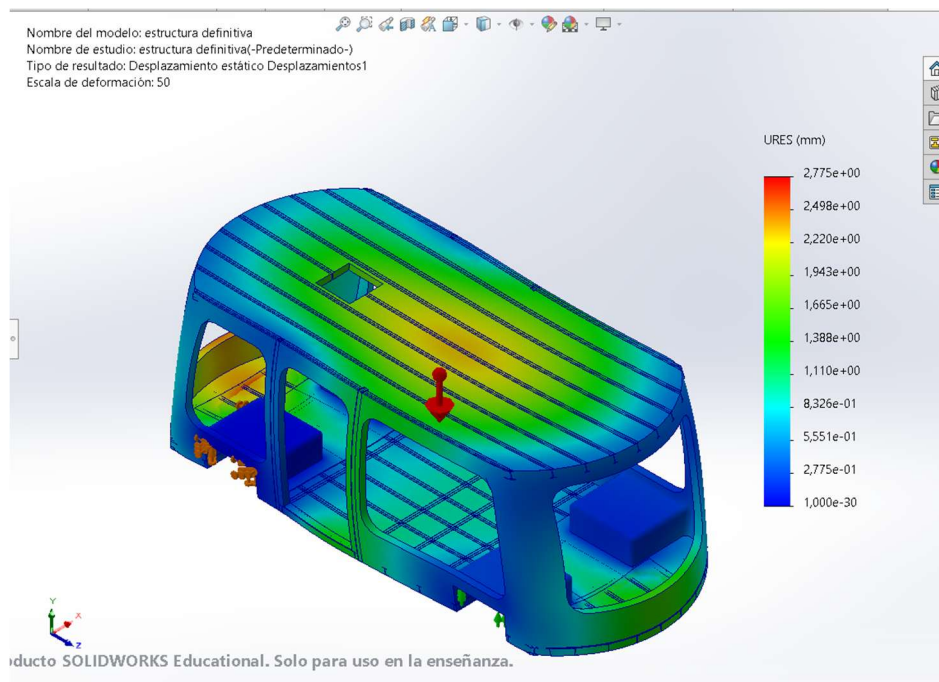
Tabla 6. Tabla resumen de las propiedades principales de la estructura en composites.

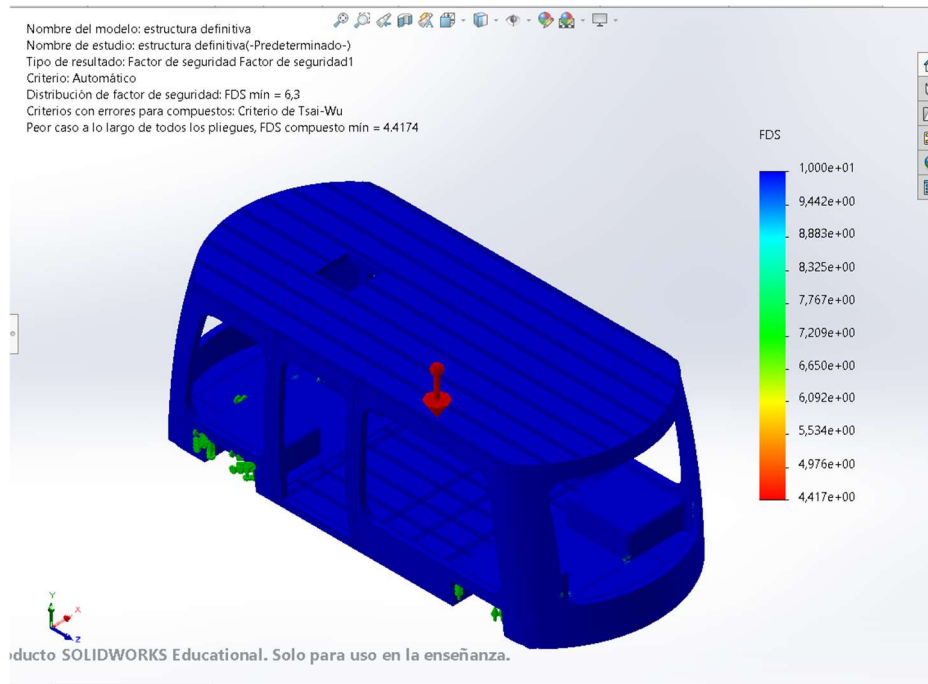
2.5.3.4.2 Casos de carga para la estructura elegida.

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.





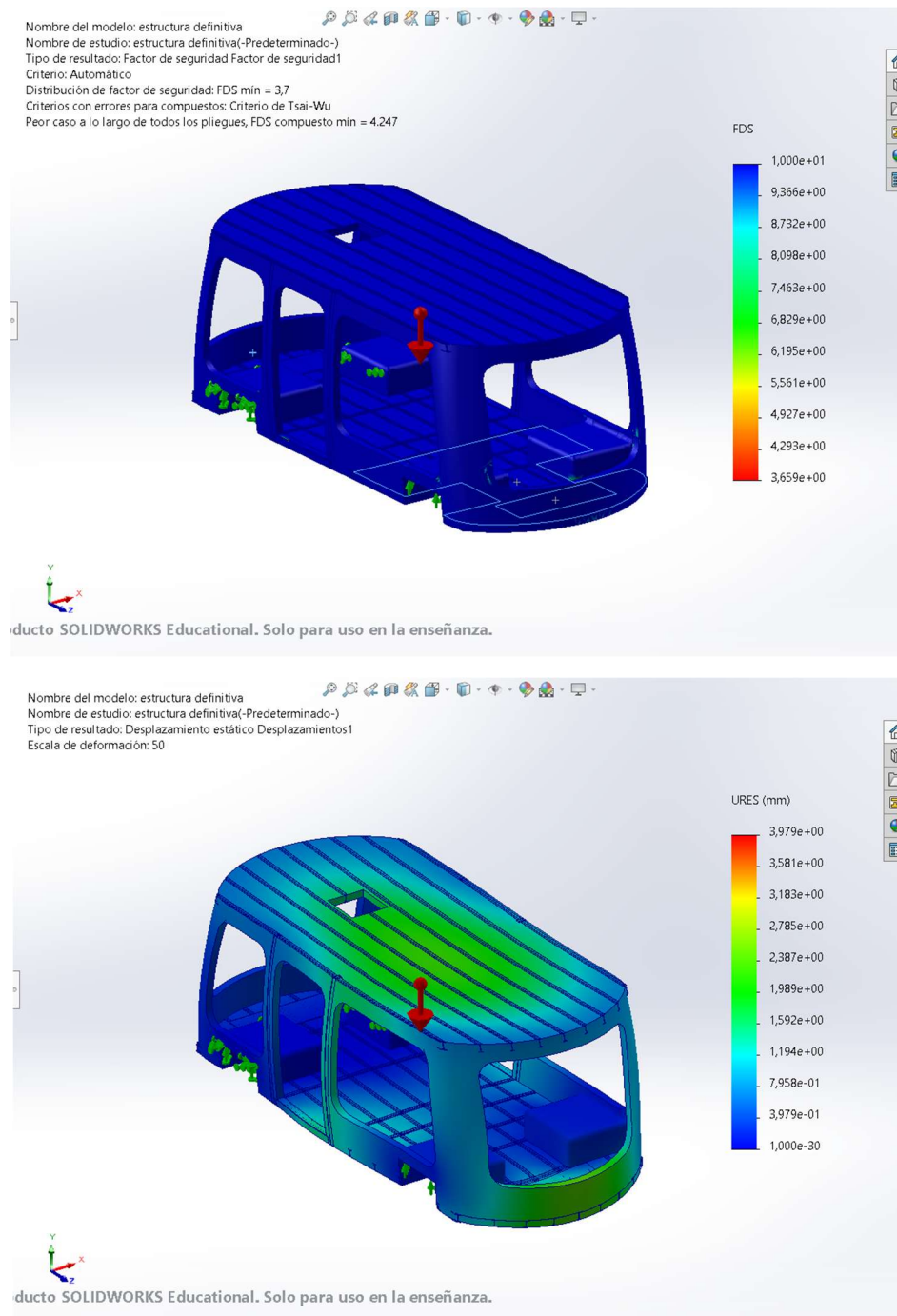
Figuras 43 y 44. Resultado del Factor de Seguridad y los desplazamientos respectivamente, para el caso de carga excepcional en ambos extremos del vehículo.

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.



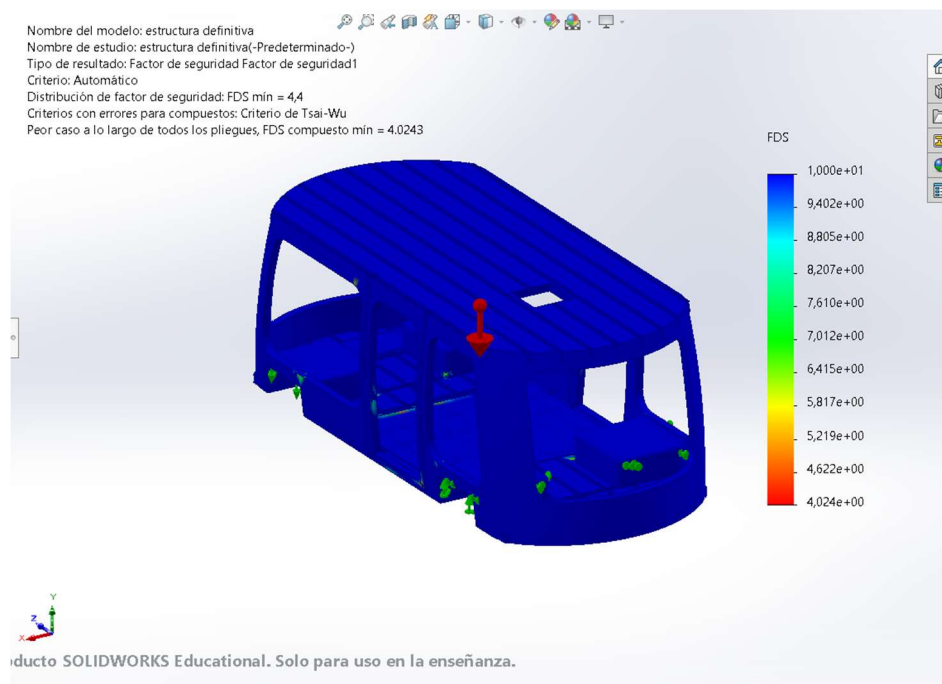
Figuras 45 y 46. Resultado del Factor de Seguridad y los desplazamientos respectivamente, para el caso de carga excepcional en un extremo del vehículo.

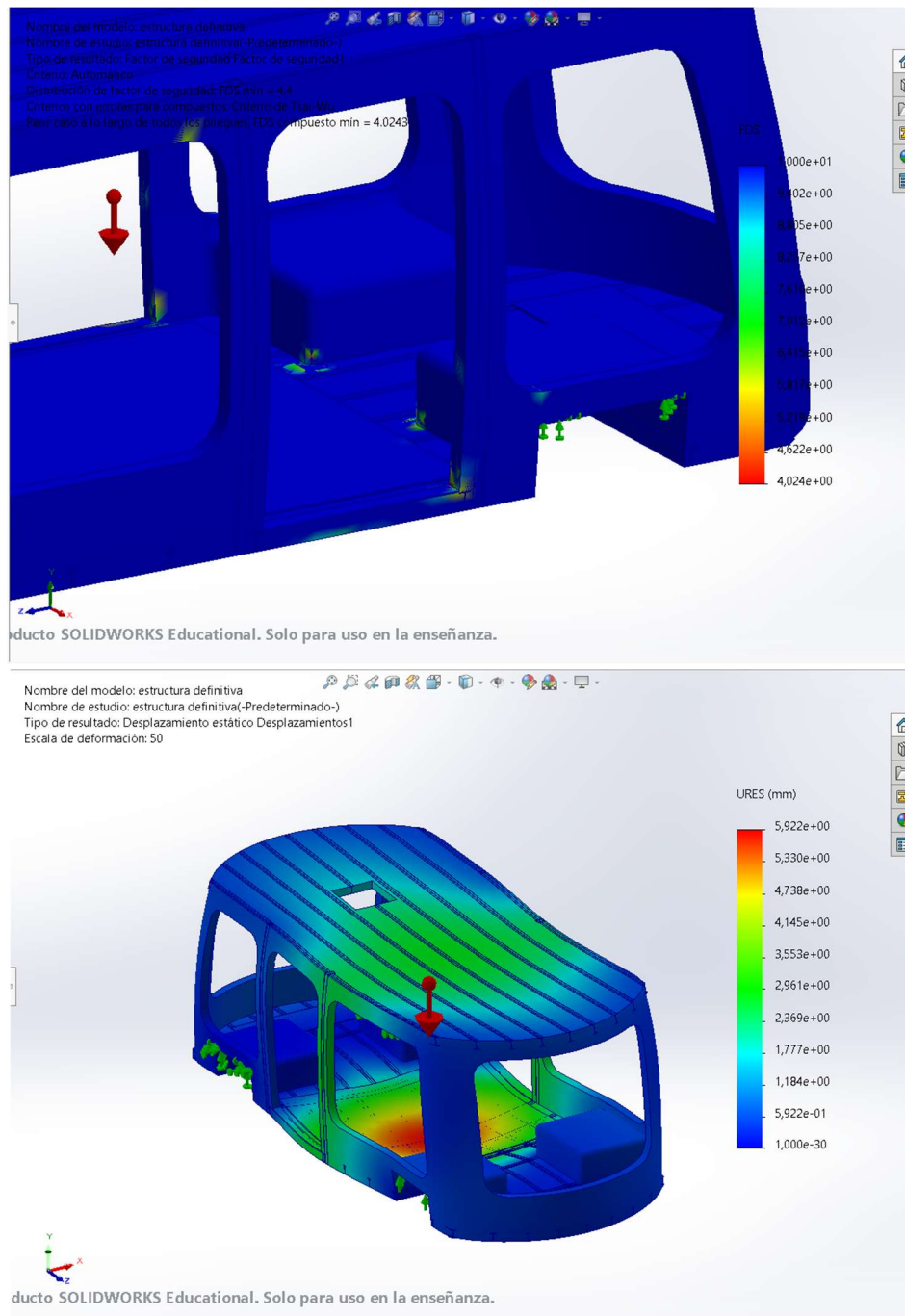
La leyenda muestra una deformación máxima de 3,979 mm localizada en el extremo que sustenta el esfuerzo del pasaje, sin embargo, frente a la flecha máxima para la zona inferior supone el 41,3% de esta por lo que la deformación es admisible. Además, en cuanto al Factor de seguridad se observa que

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 47, 48 y 49. 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.

2.5.4 Análisis de resultados

El resultado que más interés suscita es el peso total del conjunto ya que es el objetivo original del proyecto. Sin embargo, como se ha mencionado con anterioridad, ambas estructuras metálicas, solo están aportando el peso estructural por lo que para acercarse al peso que tendrían en la realidad de le suma la mitad del peso de la estructura en materiales compuestos una vez retirado el peso de los refuerzos en CFRP, ya que es el propio metal el que soporta las cargas.

Se toma la mitad del peso de la tercera alternativa ya que los grosores empleados están orientados al soporte de cargas, 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 7. 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, se evidencia que la reducción de material y refuerzos que han sufrido ambas alternativas han debilitado la estructura siendo en ambos casos la deformación máxima mayor a la estructura en materiales compuestos. 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.

2.6 Conclusiones fase II.

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.

Los criterios seleccionados surgen, en su mayoría, de los requisitos propios del proyecto. Estos, se explican a continuación:

- **Seguridad:** tratándose de un vehículo de transporte urbano, garantizar la salud y el bienestar de los usuarios que hagan uso de su servicio resulta primordial.
- **Sostenibilidad:** teniendo en cuenta que el entorno de aplicación son núcleos urbanos europeos, es necesario contribuir con la reducción de la contaminación de los mismos o, en caso de no poder ayudar a la reducción de la polución, no ser motivo de su incremento.
- **Durabilidad:** siendo que los proyectos de material rodante precisan de un elevado presupuesto, aunque sean en relación a trenes ligeros, se demanda que la vida útil de los vehículos permita su amortización y la consecución de margen de beneficio.
- **Peso:** en base a los antecedentes del proyecto, para un vehículo movido íntegramente por baterías, el peso total del coche es un factor determinante en referencia a la autonomía y el rendimiento de las mismas.
- **Procesos de fabricación:** al tratarse diferentes materiales dentro de una misma alternativa, el coste de los diferentes procesos de fabricación de cada uno, así como del ensamblado y unión del conjunto final puede aumentar notoriamente el coste final del proyecto.
- **Escalabilidad:** aunque se haya cogido como ejemplo de entorno de aplicación la ciudad de Barcelona, este proyecto tiene proyección de ser implementado en otras ciudades europeas, por lo que la buena capacidad adaptación a diferentes entornos es de gran importancia.
- **Innovación:** como proyecto surgido del departamento de I+D+i, no resultaría satisfactorio diseñar un coche con las mismas prestaciones de un modelo ya existente con la única diferencia formal de ser mono cabina.

- **Mantenimiento:** tratándose de materiales cuyas propiedades mecánicas y, por tanto, cuyo comportamiento difiere en tal grado surge la cuestión del mantenimiento que conllevará la concepción de un vehículo en base a las diferentes alternativas estructurales. Además, cabe destacar que cuanto mayor sea el mantenimiento requerido mayor será el coste asociado.

Criterio	Ponderación	Estructura		
		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 8. 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.

2.6.1 Proyecciones 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.

La continuación de cálculos más concretos y avanzados como simulaciones dinámicas y esfuerzos de fatiga o la exploración con los niveles de autonomía 4-5 en función de lo que permita la normativa europea, son vías futuras de estudio.

Desarrollo de sistemas concretos como el cableado, la puerta, la rampa para personas con movilidad reducida o la posible implementación de ventanas fotosensibles que regulen la cantidad de luz que entra en el habitáculo.

En todas estas posibles vías de estudio encaja la estructura calculada ya que tiene un amplio rango con respecto a los valores que supondrían el fallo del conjunto. Sin embargo, esta estructura está diseñada para ser fácilmente modificable ya que entra dentro de un proyecto vivo al no estar sujeto a requisitos de diseño cerrados o demasiado limitantes.

3. BIBLIOGRAFÍA

CEN. (2010). *EN 12663-1:2010*.

Daniel, I. M. & I. O. (2006). *Engineering Mechanics of Composite Materials*. Oxford University Press.

Davies, J. M. (2001). *Lightweight Sandwich Construction*.

Esther Ciriano. (2021). *Apuntes Física*.

European Union Agency for Railways. (2022). *TSI PRM: People with Reduced Mobility*.

FRA. (2020). *Crashworthiness Performance and Weight Analysis*.

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

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

Steel and Composite Structures in Rail Vehicles. (2014).

UIC 566. (n.d.).

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Planta del coche con forma de tesela.	5
Figura 2. Planta del coche con acabados redondeados.	6
Figura 3. Ejemplo FEM aplicado a la deducción de la plasticidad de un elemento metálico.	8
Figura 4. Modelo genérico de plasticidad de Von Mises.	9
Figura 5. División del vehículo por grupos de componentes. De arriba abajo: en rosa, grupo superior; en morado, grupo medio; y en azul, grupo inferior.	11
Figura 6. Vista en perfil del área transversal del coche con los volúmenes de los sistemas básicos dimensionados. En blanco el coche, en azul las ventanas, 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.	12
Figura 7. Movimientos relativos de un vagón de tranvía.	14
Figura 8. Comparativa entre las dimensiones de un tranvía convencional y el volumen general del Monocab... ..	15
Figura 9. Perímetro de forma geométrica del primer diseño del vehículo.	16
Figura 10. Diseño inicial de la estructura metálica.	18
Figuras 11. Resultados del primer análisis estático tensional nodal de la estructura metálica con una escala de deformación de 50 aproximadamente.	19
Figura 12 y 13. Resultados de resultados del último análisis estático tensional nodal y de la flecha máxima, respectivamente, de la estructura metálica con una escala de deformación de 50.	20
Figura 14. Diseño inicial de la estructura “space frame”.	23
Figura 15. Resultados tensión Von Mises del primer cálculo de la estructura “space frame” con una escala de deformación de 400 aproximadamente.	23
Figura 16. Dimensiones generales de los perfiles de la zona inferior del conjunto.	24
Figura 17. Vista seccionada del conjunto.	24
Figura 18. Rediseño de la distribución de los perfiles de la estructura “space frame”.	25
Figura 19 y 20. Resultados tensión de Von Mises y desplazamientos respectivamente con una escala de deformación 50.	26
Figura 21. Diseño inicial de la estructura en composites.	29
Figura 22. Rediseño estético del vehículo.	30
Figura 23 y 24. Vista de alzado y perfil del vehículo con los faldones, cubierta del techo y las tapas de los cajón bogie.	30
Figura 25. Vista isométrica de los perfiles de refuerzo.	31
Figura 26 y 27. Resultados análisis estático del Factor de Seguridad y los desplazamientos respectivamente, con una escala de deformación 6.	32
Figura 28. Distancia entre los apoyos del vehículo.	33
Figura 29. Distancias entre puntos de apoyo del techo, marcos de puerta y suelo respectivamente.	34
Figura 30. Rediseño de los marcos de los cabeceros desde la vista lateral y frontal / trasera respectivamente..	35
Figura 31. Sección transversal perfiles l longitudinales del suelo	35
Figura 32. Rediseño de la distribución de perfiles de refuerzo.	36
Figuras 33 y 34. Resultado final del Factor de Seguridad y del desplazamiento respectivamente, con una escala de deformación 50.	37
Figura 35, 36 y 37. Esfuerzos de cortadura en los planos XZ, XY y YZ respectivamente.	40
Figura 38. Corte de plano perpendicular a la planta para conocer el máximo valor de cortadura del núcleo.	41
Figura 39, 40 y 41. Cálculo de alternativas con las fibras del GFRP dispuestas a 45º y -45º, 45º y 0º; y 90º y 0º respectivamente.	43

<i>Figura 42. Alzado y vista lateral del diseño final de la estructura con los faldones y acabados.</i>	43
<i>Figuras 43 y 44. Resultado del Factor de Seguridad y los desplazamientos respectivamente, para el caso de carga excepcional en ambos extremos del vehículo.</i>	45
<i>Figuras 45 y 46. Resultado del Factor de Seguridad y los desplazamientos respectivamente, para el caso de carga excepcional en un extremo del vehículo.</i>	46
<i>Figuras 47, 48 y 49. Resultado del Factor de Seguridad y los desplazamientos respectivamente, para el caso de carga excepcional en el centro del vehículo.</i>	48

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Dimensiones del vehículo ferroviario(Sancho, 2024)..... 4

Tabla 2. Comparativa diseño base para las alternativas. 6

Tabla 3. Resumen pesos y fuerzas comunes a las tres alternativas para el cálculo estructural. 13

Tabla 4. Tabla resumen características técnicas estructura metálica final. 22

Tabla 5. Tabla resumen de las características principales de la estructura “spaceframe” final. 27

Tabla 6. Tabla resumen de las propiedades principales de la estructura en composites..... 44

Tabla 7. Tabla comparativa de los resultados de las diferentes estructuras. 49

Tabla 8. Comparación de las diferentes alternativas. 51

ÍNDICE DE ECUACIONES

<i>Ecuación 1. Esfuerzo de Von Mises (siendo σ_i las componentes de los esfuerzos).</i>	8
<i>Ecuación 2. Relación de fallo según el criterio de Von Mises (siendo σ_o el límite de elástico del material).</i>	8
<i>Ecuación 3. Criterio de Tsai-Wu (siendo σ_i los esfuerzos normales, τ_{ij} os esfuerzos cortantes y F_i o F_{ij} la resistencia del material compuesto en función de la dirección o la interacción entre resistencias respectivamente).</i>	9
<i>Ecuación 4. Valor de la flecha máxima en ámbito ferroviario(UIC 566, n.d.).</i>	10
<i>Ecuación 5. Tensión de Von Mises máxima permitida teniendo en cuenta el Factor de Seguridad.</i>	18
<i>Ecuación 6, 7 y 8. Deformación máxima admisible de la zona superior, media e inferior respectivamente.</i>	27
<i>Ecuación 9. Deformación máxima admisible para el cálculo inicial.</i>	33
<i>Ecuación 10. Desplazamiento máximo admisible de la zona superior.</i>	38
<i>Ecuación 11. Flecha máxima admisible para la zona media del conjunto.</i>	38
<i>Ecuación 12. Flecha máxima admisible en la parte inferior del vehículo.</i>	38
<i>Ecuación 13. Límite de tensión de cortadura admitido por el núcleo.</i>	41
<i>Ecuación 14. Límite de tensión de cortadura admitido por las pieles en el plano XY.</i>	41

FIN DEL DOCUMENTO



Universidad
Zaragoza

5. FABRICACIÓN Y ENSAMBLADO

ANEXOS

Autor:

Esther Ciriano Fernández

Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura

2025

ÍNDICE

0. Abstract	3
1. Fabricación.....	4
1.1.1 RTM o moldeo por transferencia de resina.....	4
1.1.2 VARTM o infusión por vacío	4
1.1.3 Conclusiones	5
2. Unión y ensamblado.....	6
2.1.1 Unión adhesiva.....	7
2.1.2 Uniones mecánicas.....	7
2.1.3 Conclusiones	8
3. Tratamientos superficiales.....	9
3.1.1 Acabado final	10
4. Bibliografía	11

0. ABSTRACT

La principal dificultad del proceso de fabricación recae en las grandes dimensiones del vehículo y en el empleo de materiales relativamente jóvenes como son los materiales compuestos.

Por otro lado, se trata con un grosor de núcleo PET de 92 mm y dos pieles de GFRP de 4 mm cada una. Con estos grosores y teniendo en cuenta el gran volumen de conjunto que debe resultar, se debe seleccionar el proceso que mantenga las exigencias mecánicas y de seguridad, así como ser productiva y económicamente viable.

1. FABRICACIÓN

Los procesos que se van a comparar son los más comunes en la fabricación de conjuntos con material compuesto, estos son RTM (Resin Transfer Molding) o modelo por transferencia de resina y VARTM (Vacuum Assisted Resin Transfer Molding) o infusión de resina al vacío.

1.1.1 RTM o moldeo por transferencia de resina.

El proceso de RTM (Resin Transfer Molding) se enfoca en la producción de piezas de materiales compuestos. Según este proceso consta de diferentes etapas que se exponen a continuación (Instituto Politécnico Nacional, 2019):

1. **Preparación y cerrado del molde.** El molde consta de dos partes, inferior y superior, de modo que quede sellado herméticamente durante el proceso de inyección de resina. El refuerzo, en este caso de GFRP, queda sobre las paredes de este molde y adopta su geometría, diseñada para la obtención de la forma final. La espuma PET, como núcleo del material compuesto queda entre los moldes con la resina.

Además, resulta imprescindible la práctica de canales de inyección, que aseguren el reparto homogéneo de la resina; y de ventilación, para que el aire atrapado durante el proceso de inyección pueda ser liberado y no comprometa la calidad de la pieza final.
2. **Inyección de resina.** La resina es inyectada a través de los canales anteriormente mencionados y fluye a través del molde. Durante este proceso se puede controlar la temperatura y presión dentro del molde para una correcta fluidez de la resina.
3. **Curado y desmoldeo.** Con el objetivo de que la resina endurezca y consiga las propiedades mecánicas deseadas, así como que se produzca una adherencia eficaz al núcleo del material compuesto, es necesario el curado de la resina mediante calor y presión mediante resistencias dentro del molde. Tras el curado la pieza está lista para ser extraída del molde.

1.1.2 VARTM o infusión por vacío

Los pasos a seguir pueden verse modificados en función de la aplicación o el material específicos ya que el proceso no es universal. Los pasos a seguir, en un plano general, son los que se recogen a continuación (Marpa Vacuum, 2024).

1. **Preparación del laminado en el molde.** El molde con la preforma se impregna con agente desmoldante y se coloca, en este caso, la fibra de vidrio con la disposición adecuada.
2. **Instalación de la bolsa de vacío.** Con el objetivo de evitar la formación de burbujas por la penetración de aire a través de las conexiones con tubos, se coloca una bolsa de plástico alrededor del perímetro del molde a la que se aplica vacío mediante una bomba.
3. **Evacuación del aire del laminado.** Con la extracción del aire del laminado la bolsa se comprime y presiona la fibra de modo que se compacten y no aparezcan burbujas.

4. **Inyección de resina.** Se inyecta la resina que, por las condiciones de vacío, fluye y se reparte de manera homogénea ya que no existe aire que ofrezca resistencia a su circulación por el molde.
5. **Curado de la resina.** Etapa en la que se produce el endurecimiento de la resina a temperatura ambiente o con calor para que se produzca más rápido.
6. **Desmolde de la pieza.** Cuando se ha endurecido por completo se retira la bolsa de vacío y el resto de elementos para proceder al lijado de la rebaba y aplicación de tratamientos superficiales.

1.1.3 Conclusiones

Aunque el RTM deje acabados de gran calidad, el coste de los moldes de la preforma es mayor respecto al costo de los moldes para VARTM, además de la mayor complejidad de trabajo con piezas de gran tamaño ya que precisa de complejos sistemas de inyección por lo que suele reservarse para componentes de tamaño mediano o que precisen gran calidad de acabado como pueden ser las cubiertas exteriores (Saeedi, 2023).

Por otro lado, el utillaje que precisa VARTM resulta más económico que el empleado en RTM (Hindersmann, 2019). Cabe mencionar la eficaz producción de estructuras de gran tamaño como palas de aplicación eólica mediante VARTM, por lo que en caso de modificación o ampliación de las medidas del coche seguiría siendo un proceso viable (Mishnaevsky, 2017)

En nuestro ámbito particular, el ferroviario, la infusión permite la inclusión de núcleos PET validados según EN 45545 para asegurar el cumplimiento de fuego y humos, velando por la seguridad contra incendios (3A Composites Core Materials, n.d.).

La principal desventaja del VARTM es la obtención de peores calidades en los acabados o el riesgo de aparición de porosidades sobre todo al tratarse de laminados de gran área y espesor. Sin embargo, con un óptimo diseño de flujo o mallas de distribución este riesgo se vería minimizado (Korzhikova-Vlakh, 2021).

Con toda esta información, se concluye que el proceso principal de fabricación para la estructura es la infusión por vacío. Sin embargo, para elementos de menor tamaño y que precisan acabados limpios y precisos como son los faldones o los embellecedores se recurre a la transferencia de resina.

2. UNIÓN Y ENSAMBLADO

En un proceso de diseño estructural resulta clave la correcta elección de métodos de unión, ya que son los transmisores de tensiones entre las diferentes partes que integran el conjunto. Además, se pueden convertir en puntos de concentración de tensiones y afectar a la rigidez general del vehículo. Por esto, se analizan y comparan métodos de unión adhesivos y mecánicos para seleccionar el método óptimo.

Por otro lado, cabe mencionar que el diseño para el ensamblado de las diferentes partes del conjunto final se ha diseñado con un sistema “lap joint” o unión de solape, de cómo que encajen físicamente todas las piezas para conseguir una unión mediante adhesivos de mayor resistencia y estabilidad.

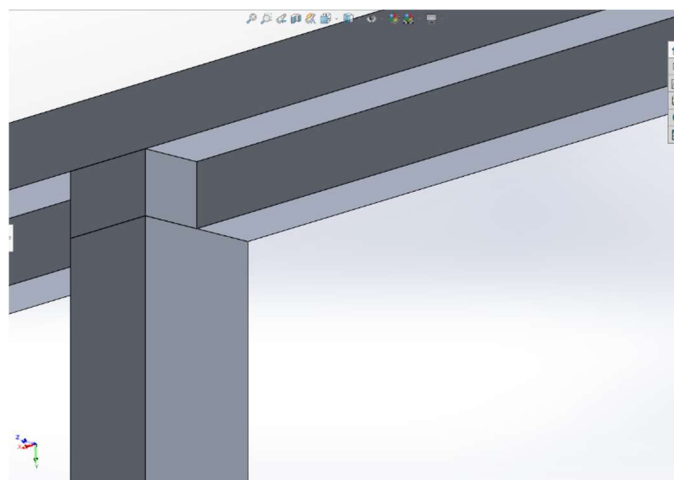


Figura 1. Ejemplo de la unión de solape en la estructura.

Para escoger el método más óptimo para la unión de las piezas, se debe tener en cuenta tanto la geometría como el material y espesor de los distintos elementos a unir.

El diseño final tiene un espesor de pared de 100 mm, de los cuales 4 mm pertenecen a cada piel de GFRP y el resto pertenecen al núcleo de PET.

Por otro lado, se deben tener en cuenta los requisitos que debe cumplir el método de unión independientemente de su tipología. Estos requisitos son:

- Buena transferencia de cargas entre los diferentes elementos.
- Garantizar una alta resistencia mecánica.
- Elevada resistencia ante agentes externos, como puede ser un clima agresivo.
- Compatibilidad química y/o mecánica con los materiales a adherir.
- No alterar el acabado superficial en exceso, de modo que estéticamente quede limpio y cohesionado con el conjunto.
- No resultar perjudicial para el usuario de cara a un posible contacto.

- Mantener la integridad estructural frente a esfuerzos dinámicos consecuencia de la actividad del vehículo.

Por esto, a continuación, se describen diferentes tipos de unión para la resolución de la alternativa óptima para este caso particular.

2.1.1 Unión adhesiva

En concreto, deben ser específicamente compatibles para el caso de uniones entre paneles de materiales tipo sándwich, por lo que se emplean uniones adhesivas que cumplan la normativa de fuego y humos EN 45545 y sean de altas prestaciones, al estar tratando con elementos críticos de la estructura. Estas uniones adhesivas se reducen a las epoxi, poliuretano o acrílico(Saeedi, 2023), (Ulbritch, 2022).

El uso de adhesivos, en el caso de unión de materiales compuestos, siempre es la opción más recomendada. Esto es así debido a la buena distribución de los esfuerzos aplicados de modo que se evitan puntos de concentración de carga, evitando comprometer la estructura de manera innecesaria.

Previamente a la aplicación de cualquier adhesivo, se debe tener en cuenta que la superficie requiere de tratamiento antes de la aplicación del adhesivo como puede ser limpieza o lijado, de modo que se eliminen impurezas y suciedad y se consiga una unión eficaz y sin alteraciones.

A la hora de unir materiales compuestos, los adhesivos son la alternativa principal, ya que sigue en la línea del aligeramiento del producto resultante. En concreto, los adhesivos estructurales de epoxi para aplicaciones de alta resistencia (Öchsner, 2008) debido, principalmente, a su compatibilidad con el GFRP y CFRP y su alta resistencia al corte y al pelado.

Sin embargo, el uso de este adhesivo en exceso puede suponer tensiones internas que comprometan la eficacia de la unión resultante por lo que se emplean capas de no más de 0,5 mm de espesor. (Petrie, 2021).

En concreto, se emplean adhesivos epoxi en uniones completamente rígidas que deban soportar grandes esfuerzos a compresión y que, por tanto, requieran de gran elasticidad para que la unión no falle. Sin embargo, para uniones que precisen resistir el movimiento característico de apertura de las diferentes partes, por ejemplo con el fin de realizar el mantenimiento dentro del cajón-bogie, se emplean adhesivos de poliuretano ya que gracias a la gran elongación del material, resiste con gran eficacia movimientos reiterados.

2.1.2 Uniones mecánicas

Al tratarse de una estructura fabricada íntegramente en material compuesto, en caso de emplear uniones mecánicas, se debe disponer de insertos en la estructura que soporten el esfuerzo compresivo, no se puede introducir el elemento de unión en contacto directo con el material compuesto.

Estos insertos evitan posibles incompatibilidades en cuánto a corrosión o procesos térmicos(Gmbh & Co, 2022). Por otro lado, de no haberlos, puede llevar a la rotura del núcleo o de las pieles (Carlsson, n.d.).

En la práctica de orificios en el material compuesto no hace otra cosa que debilitarlo y generar puntos de concentración de tensiones; a pesar de que la estructura ya contenga dichos perfiles embebidos en el núcleo que permiten la perforación segura del material compuesto.

Entre los posibles métodos de unión, para este caso particular desatacan las siguientes:

- **Atornillado en insertos macizos.** La unión atornillada se produce en los extremos del material compuesto, en la que se elimina el núcleo PET para generar la unión directamente contra un bloque macizo de GFRP.
- **Remachado no metálico.** Empleada en uniones con bajo requerimiento estructural y que no requieran de apertura reiterada, como los embellecedores.
- **Sistemas lengua-ranura.** Aplicados en elementos de fácil ensamblado y bajo requerimiento estructural como cubiertas o faldones.
- **Uniones híbridas con adhesivos.** Cuyo uso se reduce a zonas con elevada recurrencia en el mantenimiento. De modo que, aunque el adhesivo se degrade hay redundancia en la unión y ambas partes permanezcan juntas. Este puede ser el caso de accesos a equipos eléctricos o las tapas de los bogies.

2.1.3 Conclusiones

Las uniones adhesivas requieren de mayor precisión y mantenimiento al necesitar de una superficie minuciosamente tratada para la buena impregnación con el componente adhesivo, además de darse reparaciones de mayor complejidad y haber riesgo de peleo del material compuesto si las uniones no se diseñan correctamente. Sin embargo, al tratarse de elementos estructurales críticos se consigue un reparto uniforme de tensiones y la preservación de la integridad estructural del conjunto como se ha diseñado originalmente; además de conseguir un sellado eficaz protegiendo componentes eléctricos frente a la humedad y otros factores.

Por ello, la alternativa óptima para la estructura del coche es la unión adhesiva debido a la evasión de puntos de concentración de tensiones y consiguiendo su reparto continuo, se mantiene la resistencia íntegra del material compuesto al no debilitar ni pieles ni núcleo con perforaciones y se garantiza la robustez del conjunto al no alterarlo ni aportar peso con nuevos elementos.

Sin embargo, las uniones mecánicas no metálicas se consideran soluciones viables para unión de piezas sin requerimiento estructural específico como cubiertas, faldones o embellecedores que precisan desmontaje con mayor frecuencia.

Por esto, se considera la combinación de los métodos planteados en los apartados anteriores. Esto es así, debido a que en estructuras en las que la eficacia y seguridad del conjunto resulta tan imprescindibles, que se concluyen uniones redundantes, con el objetivo de que si una de las dos falla, el conjunto pertenece como un único sólido por presencia de la segunda. (Structural Adhesive Joints in Engineering, 1997).

3. TRATAMIENTOS SUPERFICIALES

El material compuesto tiene una gran resistencia a agentes externos como pueden ser los corrosivos, así como buena capacidad de absorción de energía. Sin embargo, el vehículo va a estar constantemente expuesto a entornos exigentes, en concreto Barcelona, siendo el foco de aplicación principal de este proyecto. Es por esto que, en términos de durabilidad, tanto ambiental como estética superficial, resulta imprescindible la aplicación de tratamientos y recubrimientos.

Al analizar el ambiente de la ciudad catalana se extrae un 70% de humedad relativa (*Climate Data*, 2025) y una elevada exposición a radiación ultravioleta. A estos factores, se le suman una ciudad en la que se combinan agentes oxidantes procedentes del ambiente salino, con polución originada de un ambiente urbano ampliamente activo. Todos ellos resultan factores críticos en cuanto a la degradación de polímeros y matrices compuestas se refiere.

Como se ha mencionado anteriormente; y como se explica de manera más extensa en el anexo 3 “Materiales”, el GFRP presenta muy buenas propiedades mecánicas, sin embargo, es vulnerable a la radiación UV, a la hidrólisis o a la microfisuración de la matriz que puede ser provocada por cambios repetitivos de temperatura. Por otro lado, el PET es muy estable térmicamente, pero tiene cierta tendencia a absorber humedad si no es tratado, lo que afecta a su rendimiento.

De estos comportamientos se extraen los requisitos básicos que deberán cumplir los tratamientos susceptibles a aplicación. Estos requisitos se listan a continuación:

- Mejora de la barrea contra la humedad y la corrosión.
- Protección frente a radiación UV.
- Ampliación de la durabilidad estético y aerodinámico.

Para la preparación de la superficie es aconsejable el lijado mecánico de la misma para su posterior limpieza con algún agente que elimine los contaminantes superficiales resultantes contaminantes y de desmoldeo (Esther Ciriano, 2023). Además, dependiendo de la selección del agente limpiador se puede conseguir un mayor grado de adherencia entre la superficie de la estructura y los recubrimientos a aplicar.

Con el objetivo de conseguir una superficie continua y libre de imperfecciones y poros se aplica una imprimación, por ejemplo epoxi, para su relleno y eliminación de imperfecciones.

Además, para proteger al GFRP de la degradación producida por la radiación ultravioleta conseguir evadir el amarilleo y reducción de propiedades del material, se aplica una capa de anti-UV y/o HALS (Hindered Amine Light Stabilizers).

Al acabado normal de la estructura se le pueden añadir revestimientos autolimpiables de modo que resulte antiadherente frente a la suciedad y contaminantes. Así como, películas antivandálicas que permitan la limpieza de grafitis y arañazos sobre todo en zonas bajas de la estructura.

3.1.1 Acabado final

Finalmente y en referencia al acabado final, se aplican las capas del color base oportunas. Seguidamente se enmascara con cinta la superficie para conseguir los patrones y se pinta del color correspondiente (Esther Ciriano, 2023). Tras su secado se aplica barniz para su protección y mayor durabilidad y se procede al secado final.

4. BIBLIOGRAFÍA

- 3A *Composites Core materials*. (n.d.). Retrieved September 6, 2025, from <https://www.3accorematerials.com/en/markets-and-products/airex-foam/airex-t90-fire-resistant-foam>
- Carlsson, L. A. & P. (n.d.). *Experimental characterization of Advanced Composite Materials*.
- Climate Data*. (2025). <https://es.climate-data.org/europe/espana/cataluna/barcelona-1564/>
- Esther Ciriano. (2023). *Apuntes "Ampliación de materiales."*
- Gmbh & Co. (2022). *3D I CORE PET GR Foam*.
- Hindersmann, A. (2019). Confusion about infusion: An overview of infusion processes. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*.
- Instituto Politécnico Nacional. (2019). *RTM (Resin Transfer Molding)*.
- Korzhikova-Vlakh, E. (2021). *Advances in Porous Polymers*.
- marpa vacuum. (2024). <https://marpavacuum.com/infusion-de-resina-proceso/>
- Mishnaevsky, L. (2017). *Materials for Wind Turbine Blades: An Overview*. MDPI.
- Öchsner, da S. (2008). *Modeling of Adhesively Bonded Joints*. Springer.
- Petrie, E. M. (2021). *Handbook of Adhesives and Sealants*. McGraw-Hill.
- Saeedi, A. ; M. M. M. ; S. M. M. (2023). *Recent advancements in the applications of fiber-reinforced polymer structures in railway industry--A review*.
- Ulbritch, A. (2022). *Novel composite design approaches for structural lightweight components of railway vehicles - development, technological realization and test*.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ejemplo de la unión de solape en la estructura. 6



Universidad
Zaragoza

6. APARIENCIA VISUAL

ANEXOS

Autor:

Esther Ciriano Fernández

Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura

2025

ÍNDICE

0. Abstract	3
1. Diseño estructural final	4
2. Diseño de alternativas iniciales.....	6
2.1.1 Diseño I	7
2.1.2 Diseño II	9
2.1.3 Diseño III	11
3. Selección de alternativa.....	14
3.1 Desarrollo de alternativa final	14
3.2 Conclusiones fase III	18
4. Bibliografía	19

0. ABSTRACT

Una vez se ha concluido la fase I con la resolución del diseño estructural final, se procede a desarrollar el carácter estético del Urban MonoCab, para lo cual se plantean una base de alternativas del diseño aunando el minimalismo que inunda la sociedad actual con un movimiento artístico que tanto cohesiona la historia europea como es el movimiento moderno del siglo XX. Son los grandes núcleos urbanos europeos el entorno de aplicación del presente proyecto.

Para una consulta con mayor detenimiento de los principios del movimiento moderno consultar el anexo 1

1. DISEÑO ESTRUCTURAL FINAL

Una vez se ha resuelto satisfactoriamente el cálculo de la estructura del coche, se diseñan las tapas correspondientes a los huecos destinados a los bogies, los faldones del vehículo y el carenado superior.

Estos elementos, tienen como objetivo evitar, en la medida de lo posible, accidentes, así como velar por la durabilidad y buen estado de los sistemas bajo-bastidor del coche frente a desperfectos o elementos no deseados depositados en la vía y situaciones adversas provocadas por la climatología u otros factores. El sentido estético es el principal objetivo del carenado ubicado en el techo, el cual se eleva hasta una altura total de 2,9 metros para que se escondan los sistemas eléctricos ubicados en el techo del rango de visión del usuario, pero sin tapar lo suficiente, de modo que dichos sistemas tengan el espacio suficiente tanto para el mantenimiento como para la ventilación.

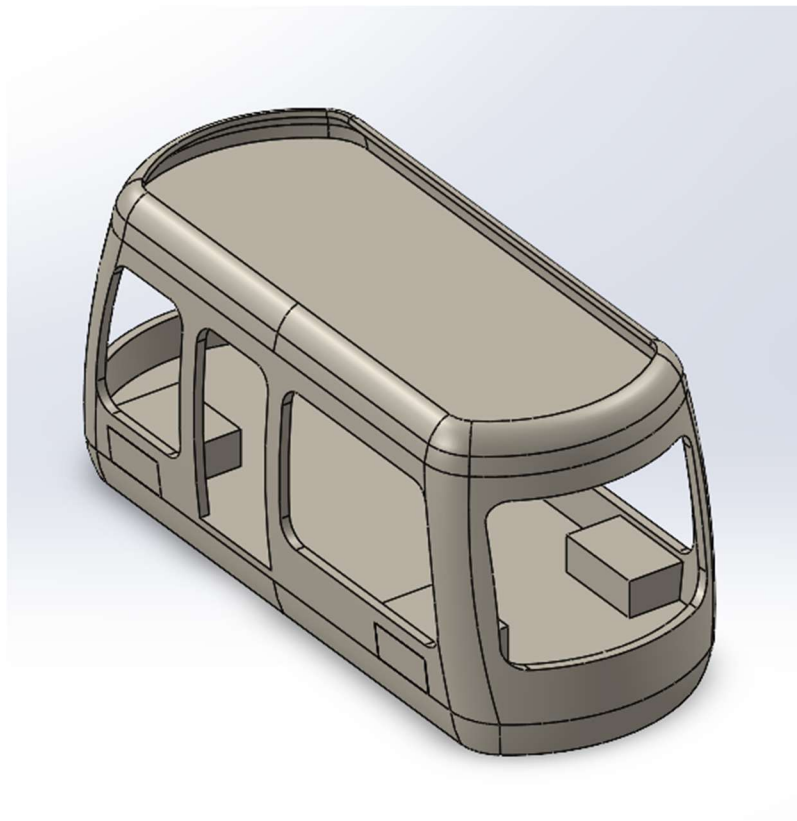
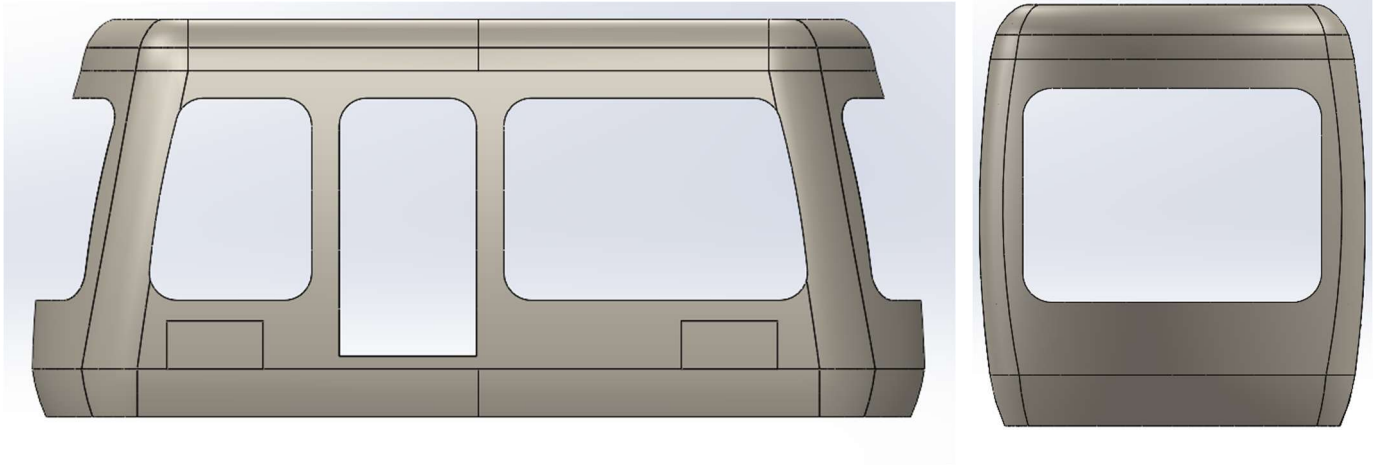


Figura 1. Vista isométrica de la geometría final.



Figuras 2 y 3. Vista en alzado y perfil de la estructura final.

Se puede apreciar que se ha seguido la línea de acabados redondeados y cercanos, ya que al ser un concepto novedoso como vehículo autónomo se busca la evasión de estigmas por parte del usuario, mediante la aparición de un vehículo estéticamente cuidado y amigable en el que se intuya la importancia del diseño y los acabados.

2. DISEÑO DE ALTERNATIVAS INICIALES

Pese a ser cada alternativa diferente, todas se basan en los mismos principios. Dichas bases del diseño quedan recogidas en el siguiente listado:

- Romper con la horizontalidad, de modo que dé una sensación de aligeramiento frente a la robustez y rigidez que denota la estructura por sí sola.
- Cohesionar el minimalismo predominante actual con el movimiento moderno, como herramienta de unión entre culturas europeas del siglo XX.
- En referencia al punto anterior, se desea obtener un diseño aplicable, no solo a Barcelona, sino al resto de urbes importante europeas.
- Lograr un diseño completamente acorde con el diseño interior, realizado simultáneamente que el presente proyecto.
- Mantener el factor innovador por el que se rige el proyecto.
- Conseguir una flota de coches cuyos colores principales puedan ser modificados, aunque compartan el diseño de los patrones y /o formas. De modo que se obtengan, mínimo, seis alternativas de diseño en base a la modificación de los colores.
- Incluir los colores de la paleta tomada como referencia.



Figura 4. Paleta de colores seleccionada para el diseño estético.

De esta paleta se toman dos colores como “neutros” que sirven como nexo de unión entre los diferentes coches de la flota, ya, que el color principal de cada uno es el que se modifica y dota de un cierto grado de personalización a cada vehículo acentuando el carácter innovador y dando mayor visibilidad al hecho de ser un vehículo monocabina y de dimensiones reducidas.

La selección de colores es la siguiente:

- “Neutros”:
 - SW 9083 Dusted Truffle código RGB #9c8373.
 - SW 7106 Honied White código RGB #f8eedb.
- Principales:
 - SW 6383 Golden Rule código RGB #cc9249.
 - SW 6881 Cayenne código RGB #c04d35.
 - SW 6566 Framboise código RGB #7c3655.
 - SW 9176 Dress Blues código RGB #2b4360.
 - SW 6769 Maxi Teal código RGB #017478.
 - SW 6927 Greenbelt código RGB #017244.

2.1.1 Diseño I

2.1.1.1 Inspiración

Para el primer diseño, prima el minimalismo frente al resto de bases del diseño. Se busca un efecto de “coche teselado” como guiño al trencadí (Gaudí, Trencadís en mosaicos modernistas) de la obra catalana de Gaudí.



Figura 5. Figura en el Parque Güell de Gaudí en Barcelona, España (Antoni Gaudí, 1900).

Se toma como referencia el Parque Güell, ya que es uno de los mayores exponentes del artista en el uso de este recurso artístico. Sin embargo, con la mencionada búsqueda del minimalismo se observa una notoria reducción de colores y formas.

Con el objetivo de conseguir este “efecto trencadí”, se dibujan formas grandes e irregulares en la totalidad de la superficie del coche con cuatro de los colores representativos de la ciudad de Barcelona. Además, aprovechando que las piezas de estos mosaicos no necesariamente son rectas, los perímetros de las diferentes secciones han sido curvadas para conseguir esa ruptura con la horizontalidad y una aportación de dinamismo al conjunto.

Por otro lado, respecto a la gama cromática se siguen las tendencias del movimiento moderno con predominio de colores cálidos y su combinación con tonos fríos. Otra obra que se toma como referencia es la del artista moderno Piet Mondrian.

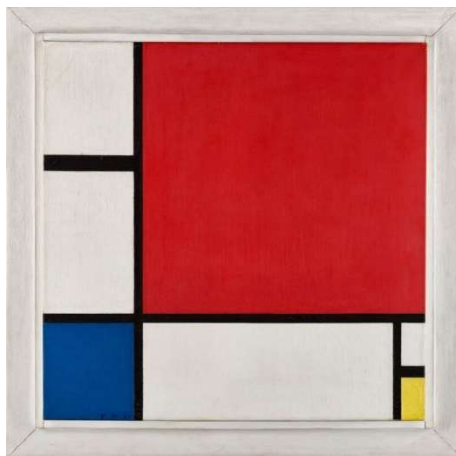


Figura 6. “Composición II en rojo azul y amarillo” de Piet Mondrian (Piet Mondrian, n.d.).

A raíz de estas influencias, se obtiene un diseño minimalista con cuatro de los colores de la paleta seleccionada. La flota de coches se diferenciaría al alternar la distribución de los colores por las particiones creadas.

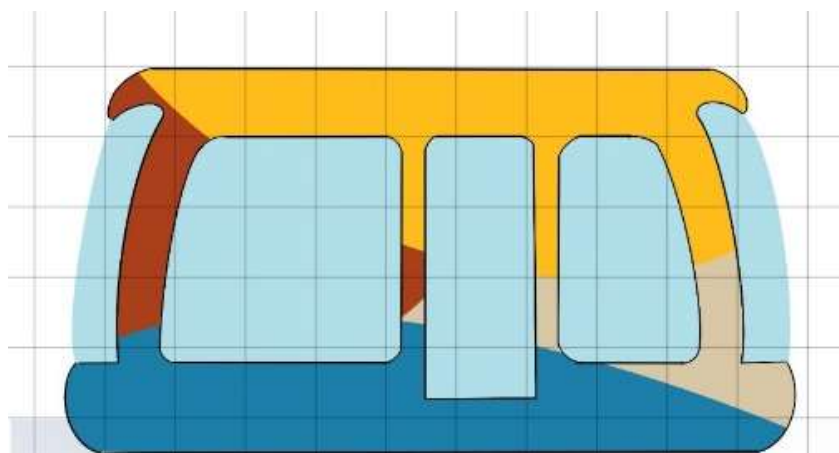


Figura 7. Primera alternativa de diseño exterior del Urban MonoCab.

2.1.2 Diseño II

Para el segundo diseño se toman más influencias de la arquitectura modernista, en vez de la pintura y escultura como en el caso anterior.

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. Sin embargo, queda regido por el principio del minimalismo de modo que se persigue un diseño que no desentone con la estética de las ciudades actuales.

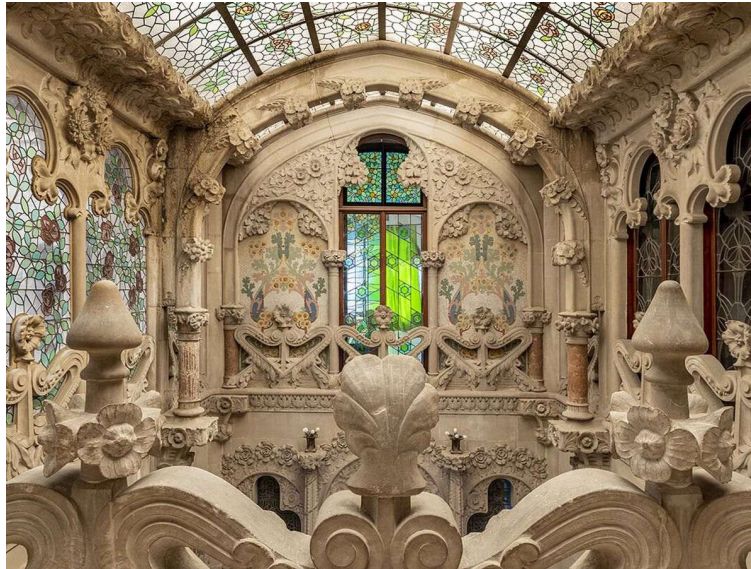


Figura 8. Casa Navás en Reus, Tarragona. De Lluís Domènech i Montaner (Montaner, n.d.)

De la Casa Novás, se aprecia la adición de formas redondeadas a una composición robusta, lo que dota al conjunto de personalidad y denota un gusto por el detalle y lo ornamental.



Figura 9. Casa Tassel en Bruselas, Bélgica. De Víctor Horta (Víctor Horta, n.d.)

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, en las que, además, se deja el material de fabricación, hierro, a cara vista como gran novedad del modernismo.



Figura 10. Parque Güell en Barcelona, España. De Antoni Gaudí (Antoni Gaudí, 1900).

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.

Como resultado de estas influencias se obtiene un diseño tricolor que combina líneas rectas y de geometría definida con otras sinuosas y de carácter abstracto.

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.

Además, con el objetivo de conseguir un conjunto unificado se emplea el mismo estilo de formas en la parte superior e inferior, así como la adición de una única línea de sección irregular que recorre el coche con tendencia diagonal desde su parte inferior hasta la superior.

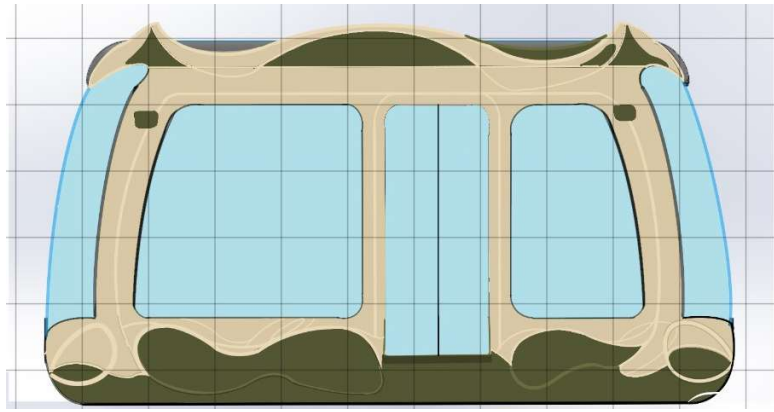


Figura 11. Segunda alternativa de diseño exterior del Civitam.

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

2.1.3 Diseño III

La tercera alternativa es la que más difiere de las planteadas. Se basa en los antiguos tranvías de la ciudad de Barcelona y la estética que inundaba la época que constituye el auge e innovación de este medio de transporte.

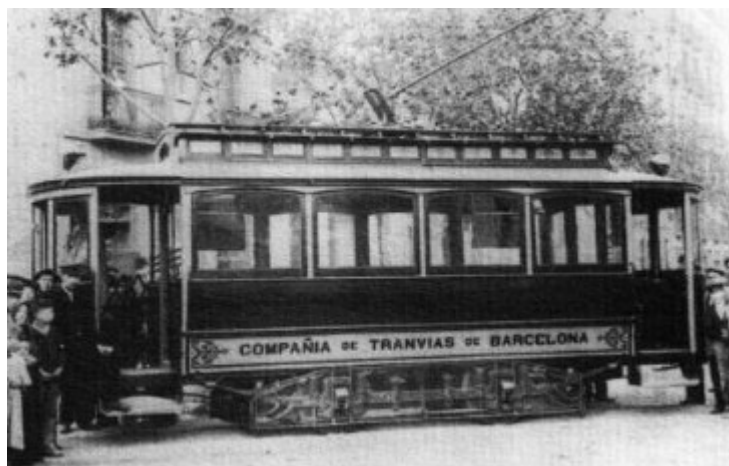


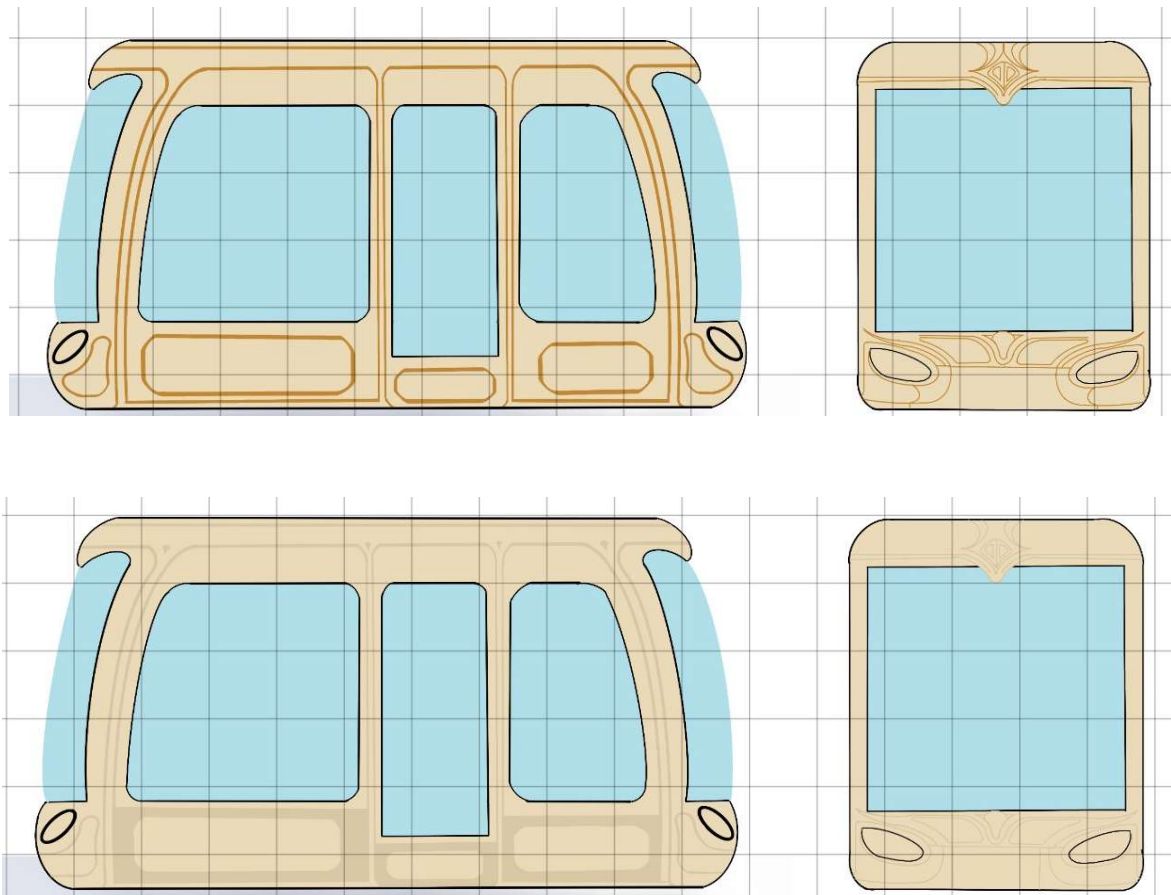
Figura 12. Primer tranvía eléctrico en Barcelona, España. En 1899 (Jordi Palmer, 2024).

Este primer tranvía tenía una estética minimalista pero con ciertos detalles como los marcos de las ventanas que encajaban con la estética del momento.



Figura 13. Tramvia Blau de acceso al Tibidabo en Barcelona, España (rutadelmodernisme.com, s.f.).

Por otro lado, en este conocido modelo se advierte un diseño más cuidado y, por tanto, con más protagonismo en la estética del conjunto.



Figuras 14 y 15. Tercera alternativa, con sus dos variantes, de diseño exterior del Urban MonoCab.

Como resultado de las inspiraciones mostradas anteriormente, se obtiene un diseño que, siendo el más complejo de los propuestos, aún conserva el tono minimalista.

Se rellena la superficie del coche con líneas que emulan los marcos de las ventanas y puertas tan aceptados en el siglo XX. Además de un cabecero con una ornamentación basada en líneas, consiguiendo una reducción de peso visual que no resultaría en el caso de rellenar estas formas generadas.

3. SELECCIÓN DE ALTERNATIVA

Para la selección de la alternativa, se sigue el mismo proceso que en el anexo 4 de desarrollo de alternativas estructurales; de modo, que se identifican una serie de criterios que ayudan a la resolución del diseño con el mayor potencial en el proyecto. Dichos criterios se explican de manera más extensa continuación:

- Estética general. Este factor atiende a criterios de armonía y cohesión entre los diferentes elementos y formas del conjunto.
- Contemporaneidad. Nivel de integración del diseño en el marco histórico del momento, desde las bases del diseño modernista.
- Escalabilidad. Capacidad del diseño de ampliarse a la flota entera que formará el servicio final del vehículo, así como su integración en diferentes ciudades europeas.
- Innovación. Capacidad de diferenciación y grado de originalidad respecto a los transportes públicos actuales.
- Combinación de colores. Armonía cromática entre los colores del diseño y las diferentes combinaciones para el resto de vehículos de la flota.

		Alternativas		
		I	II	III
Estética general	30%	7	9	8
Contemporaneidad	20%	7	8	6
Escalabilidad	20%	7	7	8
Innovación	20%	7	8	6
Combinación de colores	10%	8	7	7
Total		7,2	8,0	7,1

Tabla 1. Criterios de ponderación para la selección de la alternativa final.

Finalmente, el diseño que ha tenido mayor puntuación en la tabla de ponderación y que por tanto, se prevé con mayor potencial es el diseño II.

3.1 Desarrollo de alternativa 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.

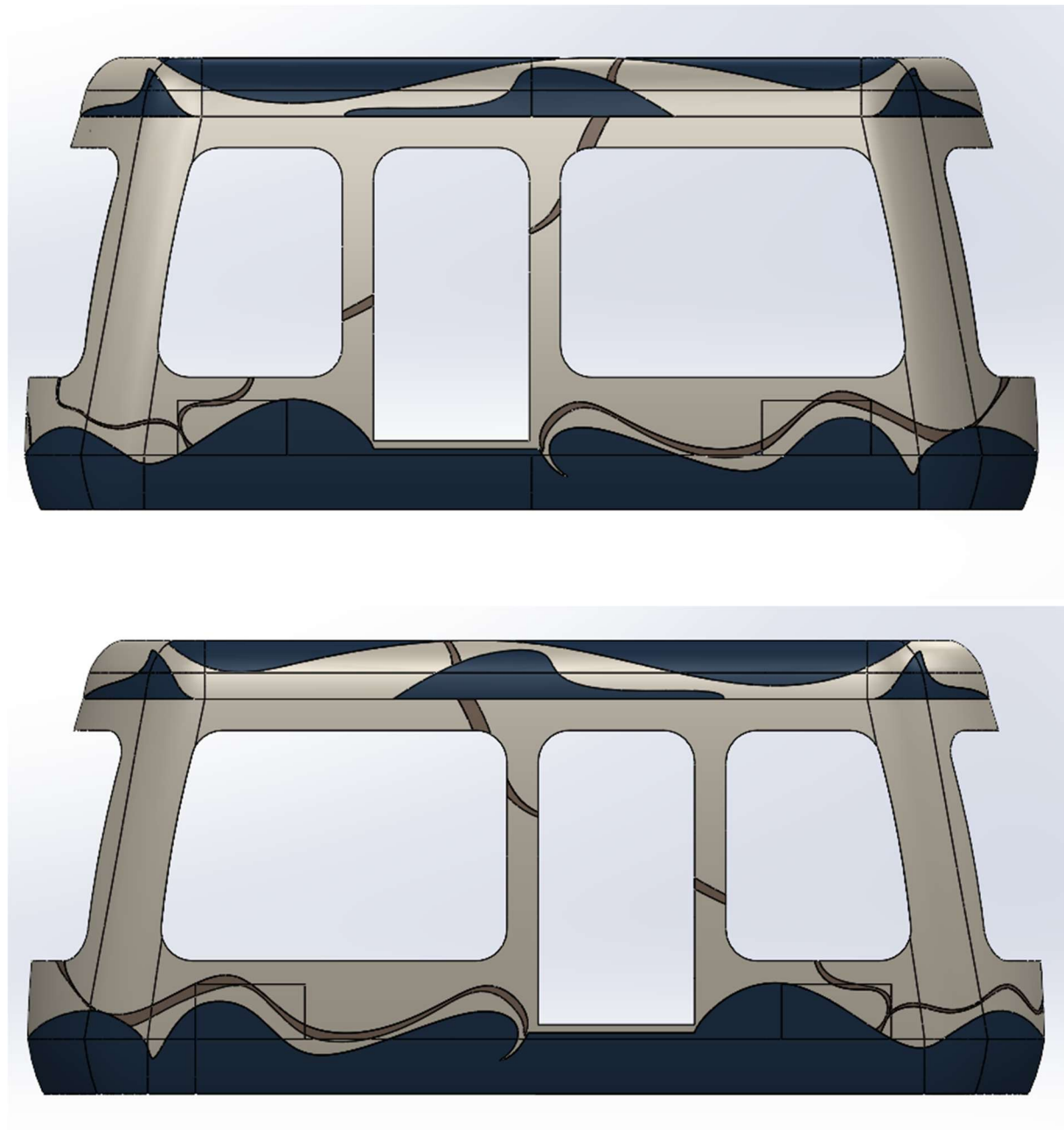


Figura 16 y 17. Diseño estético final en las paredes laterales.

El diseño base seleccionado, *Figura 11*, evoluciona de una fase conceptual a una más realista. Para ello, se eliminan los salientes de los carenados propios del vagón debido a que su fabricación supondría costes adicionales innecesarios en el proyecto.

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.

Como se ha mencionado antes, se busca romper con la simetría que caracterizan todos los vehículos destinados al transporte público, de modo que se le añada un grado más de innovación estética; siempre siguiendo línea de un diseño minimalista y sin zonas sobrecargadas.

Se juega con las formas sinuosas para 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.

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.

Cabe destacar, que se emplea el espacio negativo como recurso estético ya que la mayoría de la superficie se encuentra sin patrón. Sin embargo, una vez el vehículo se ponga en marcha y se llene de usuarios los grandes ventanales dará una sensación de que ese espacio vacío se ha completado.

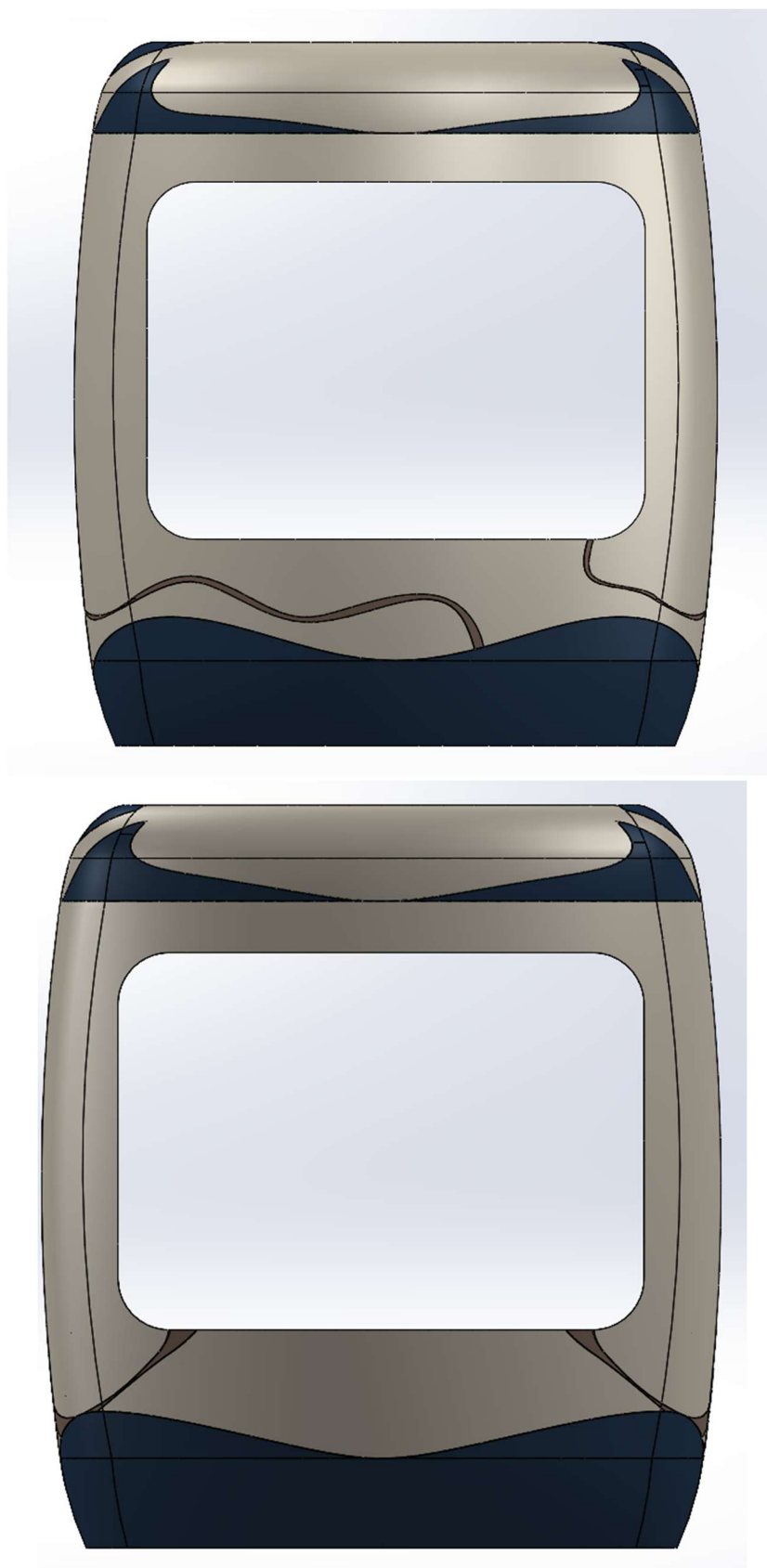


Figura 18 y 19. Diseño estético final en los cabeceros.

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.

3.2 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, sino 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, sino 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. BIBLIOGRAFÍA

Antoni Gaudí. (1900). *Park Güell*.

Montaner, L. D. i. (n.d.). *Casa Navás en Reus*.

Piet Mondrian. (n.d.). *Composición II en rojo azul y amarillo*.

Víctor Horta. (n.d.). *Casa Tassel*.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Vista isométrica de la geometría final. 4

Figuras 2 y 3. Vista en alzado y perfil de la estructura final..... 5

Figura 4. Paleta de colores seleccionada para el diseño estético. 7

Figura 5. Figura en el Parque Güell de Gaudí en Barcelona, España (Antoni Gaudí, 1900). 7

Figura 6. “Composición II en rojo azul y amarillo” de Piet Mondrian (Piet Mondrian, n.d.). 8

Figura 7. Primera alternativa de diseño exterior del Urban MonoCab. 8

Figura 8. Casa Navás en Reus, Tarragona. De Lluís Domènech i Montaner (Montaner, n.d.) 9

Figura 9. Casa Tassel en Bruselas, Bélgica. De Víctor Horta (Víctor Horta, n.d.) 9

Figura 10. Parque Güell en Barcelona, España. De Antoni Gaudí (Antoni Gaudí, 1900). 10

Figura 11. Segunda alternativa de diseño exterior del Civitam. 11

Figura 12. Primer tranvía eléctrico en Barcelona, España. En 1899 (Jordi Palmer, 2024). 11

Figura 13. Tramvia Blau de acceso al Tibidabo en Barcelona, España (rutadelmodernisme.com, s.f.). 12

Figuras 14 y 15. Tercera alternativa, con sus dos variantes, de diseño exterior del Urban MonoCab..... 12

Figura 16 y 17. Diseño estético final en las paredes laterales..... 15

Figura 18 y 19. Diseño estético final en los cabeceros. 17

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Criterios de ponderación para la selección de la alternativa final.</i>	<i>14</i>
--	-----------



Universidad
Zaragoza



7. IMAGEN CORPORATIVA

ANEXOS

Autor:

Esther Ciriano Fernández

Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura

2025

ÍNDICE

0. Abstract	3
1. desarrollo de la imagen corporativa	4
1.1 Nombre	4
1.2 Manual de marca	4
1.2.1 Logotipo	4
1.2.2 Símbolo	7
1.2.3 Versión a una tinta	7
1.2.4 Versión en negativo.....	8
1.2.5 Usos indebidos	8
2. Renders.....	10

0. ABSTRACT

Una vez se ha cerrado el diseño físico del coche, se procede a desarrollar la imagen corporativa en torno al presente proyecto con vistas a dotarlo de valor añadido y atractivo.

1. DESARROLLO DE LA IMAGEN CORPORATIVA

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, en 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 seleccionado para estos títulos de proyecto.

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

1.2 Manual de marca

A partir del nombre se quiere diseñar un logotipo que siga la estética propia del Civitam.

Es por esto que el diseño de esta, surge como consecuencia del nombre dado al vehículo, el cual, junto con la estética explicada en el anexo 9, alternativas estéticas, tiene como consecuencia el desarrollo formal de esta parte del proyecto.

Se desarrollan los elementos gráficos básicos que recojan la esencia del proyecto de Civitam.

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.

Bajo estas premisas, se obtiene un logotipo en la que hay dos elementos difernciables 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 visión desde dentro. Además, las ventanas también tienen este carácter innovador al contar con tecnología para poder adaptarse a las necesidades de confort del usuario al poder controlar su opacidad.



Figura 1. Logotipo original Civitam.

Como se menciona en el anexo 1. Hay una flota de seis vehículos recorriendo un circuito de manera simultánea. 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 2. Logotipo con los colores de los vehículos de la flota.

Por último, se crea el símbolo que se ubica en la cabecera del coche. Este es 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.

La gama de colores expuesta en la Figura 2, es la única aceptada en la aplicación de marca, por lo que el uso de cualquier color o tonalidad que difiera de estos, será considerado como uso indebido de la imagen de marca de Civitam.

1.2.2 Símbolo

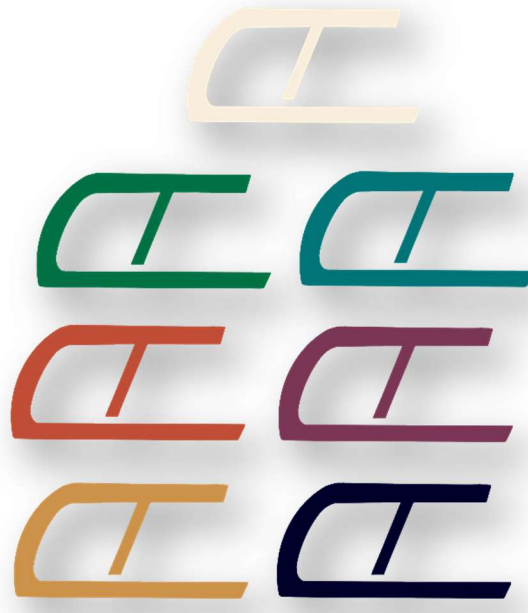


Figura 3. Símbolo a partir del logotipo con la gama cromática válida.

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 es 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.

1.2.3 Versión a una tinta

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



Figura 4. Versión del logotipo a una tinta.

1.2.4 Versión en negativo

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



Figura 5. Versión logotipo en negativo.

1.2.5 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.

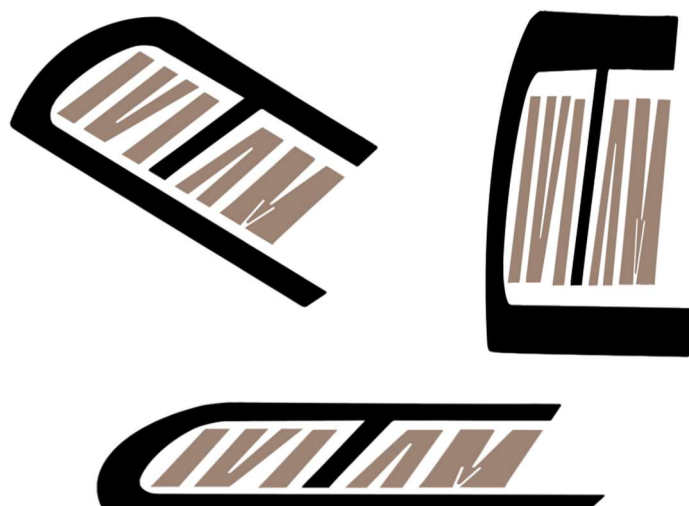


Figura 6. Cambio de dimensiones del logotipo.



Figura 7. Uso de colore son corporativos.



Figura 8. No respeto sobre fondos de color.

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. Cada uno de un color, de los cuales hay más detalles en el anexo 10. Alternativas estéticas.



Figura 9. Render 1/4.

Como segundo render se aprecia el Civitam con el color original en un stand de arquitectura efímera, como si fuese una feria de material rodante en la que se presenta el nuevo vehículo. Además, se opta por una perspectiva frontal para poder apreciar el cabecero curvo del coche final.



Figura 10. Render 2/4.

El tercer render quiere hacer ver la diferencia de tamaño entre el Civitam y el tranvía actual de Barcelona, de modo que se resalte la necesidad de un vehículo que pueda circular por calles en las que un vehículo de transporte urbano convencional no está capacitado.



Figura 11. Render 3/4.

Y por último, se presenta el tranvía durante su actividad por una rotonda emblemática de Barcelona, con lo que se muestra uno de los objetivos del vehículo, la descongestión de núcleos urbanos grandes, ya que muchos de ellos se encuentran masificados en zonas de alto interés turístico.



Figura 12. Render 4/4.

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Logotipo original Civitam.</i>	<i>5</i>
<i>Figura 2. Logotipo con los colores de los vehículos de la flota.</i>	<i>6</i>
<i>Figura 3. Símbolo a partir del logotipo con la gama cromática válida.</i>	<i>7</i>
<i>Figura 4. Versión del logotipo a una tinta.</i>	<i>7</i>
<i>Figura 5. Versión logotipo en negativo.</i>	<i>8</i>
<i>Figura 6. Cambio de dimensiones del logotipo.</i>	<i>8</i>
<i>Figura 7. Uso de colores corporativos.</i>	<i>8</i>
<i>Figura 8. No respeto sobre fondos de color.</i>	<i>9</i>
<i>Figura 9. Render 1/4.</i>	<i>10</i>
<i>Figura 10. Render 2/4.</i>	<i>11</i>
<i>Figura 11. Render 3/4.</i>	<i>12</i>
<i>Figura 12. Render 4/4.</i>	<i>13</i>

FIN DEL DOCUMENTO