

# Caminos hacia el tren Talgo del futuro. El aligeramiento y la innovación como herramientas para la sostenibilidad

## *Pathways to the Talgo Train of the Future. Lightweighting and Innovation as Tools for Sustainability*

Eduardo de la Guerra Ochoa<sup>1\*</sup>, Francisco José García Piñero<sup>2</sup>, Víctor Meroño Domínguez<sup>3</sup>, Javier Fernández Valverde<sup>4</sup>, Marta Cerdeira Peinado<sup>2</sup>

### Resumen

La industria ferroviaria busca aumentar la capacidad del sistema ferroviario, aportando flexibilidad para alinear la capacidad y la demanda, aumentar la disponibilidad, fiabilidad y eficiencia energética reduciendo el coste del ciclo de vida (LCC), logrando una mejora del confort de los pasajeros y del atractivo del transporte ferroviario.

Una de las líneas de acción para resolver los desafíos anteriores es la introducción de nuevas estructuras más ligeras de caja y/o rodadura, ya que ambos son algunos de los componentes más pesados del tren. El potencial de ahorro de peso (aproximadamente un 30 % y un 50 %, respectivamente) y el uso de nuevos materiales y procesos en las estructuras dará como resultado una reducción del consumo de energía, menores inercias, menor desgaste de vía y un aumento de la capacidad de transportar mayores cargas útiles.

**Palabras clave:** aligeramiento, eficiencia, capacidad, CFRP, materiales, impacto, estructura, caja, material rodante, procesos, reciclado.

### Abstract

*The railway industry seeks to increase the capacity of the railway system, providing flexibility to align capacity and demand, increasing availability, reliability and energy efficiency by reducing the life cycle cost (LCC), improving passenger comfort and increasing the attractiveness of rail transport.*

*One of the lines of action to tackle the aforementioned challenges is the introduction of new lighter bodies and/or running gear structures, as both of these are among the heaviest components of the train. The potential weight savings (approximately 30 % and 50 %, respectively), and the use of new materials and processes in structures will result in reduced energy consumption, lower inertias, reduced track wear, and increased capacity to carry higher payloads.*

**Keywords:** *Lightening, efficiency, capacity, CFRP, materials, impact, structure, box, rolling stock, processes, recycling.*

## 1. INTRODUCCIÓN

Para seguir siendo competitivo y afrontar el reto proyectado por la Comisión Europea de que el ferrocarril sea la columna vertebral del transporte en Europa, todo el sector ferroviario europeo combina sus esfuerzos con el doble objetivo de estar más cerca de las expectativas de los usuarios finales de los servicios ferroviarios y lograr ese cambio modal al ferrocarril tan buscado.

Esa columna vertebral del transporte está sustentada en tres pilares básicos que se han de mantener y potenciar [1]:

- Es diverso. Las ventajas del tren no son solo para turistas y viajeros. Las empresas y los transportistas de

mercancías pueden cambiar al ferrocarril y beneficiarse de ofertas cada vez más competitivas y de bajo coste para transportar sus mercancías por toda Europa, al mismo tiempo que reducen su huella de carbono.

- Es verde y sostenible. El ferrocarril está electrificado en gran medida y emite mucho menos CO<sub>2</sub> que los viajes equivalentes por carretera o aire. Representa solo el 0,4 % de las emisiones de gases de efecto invernadero del transporte de la UE, mientras que todo el transporte de la UE representa el 25 % de las emisiones totales de la UE. Además, es el único medio de transporte que entre 1990-2017 ha reducido constantemente sus emisiones y consumo de energía, al tiempo que utiliza cada vez más fuentes de energía renovables, es decir, el sector ferroviario es capaz de ofrecer reducciones drásticas de emisiones por dos vías. En la figura 1 se ilustra el cambio modal desde otros sectores más contaminantes y la propia reducción de sus emisiones directas, con la paulatina sustitución de los equipos diésel por otros medios alternativos (baterías, supercondensadores,

\* Autor de contacto: [edelaguerra@talgo.com](mailto:edelaguerra@talgo.com)

<sup>1</sup> Doctor ingeniero industrial. Departamento de Innovación de Producto. Patentes Talgo. Calle Las Norias, 92, 28221 Majadahonda (Madrid).

<sup>2</sup> Ingeniero mecánico. Ingeniero de materiales. Departamento de Innovación de Producto. Patentes Talgo.

<sup>3</sup> Ingeniero mecánico. Departamento de Innovación de Producto. Patentes Talgo.

<sup>4</sup> Ingeniero industrial. Departamento de Innovación de Producto. Patentes Talgo.

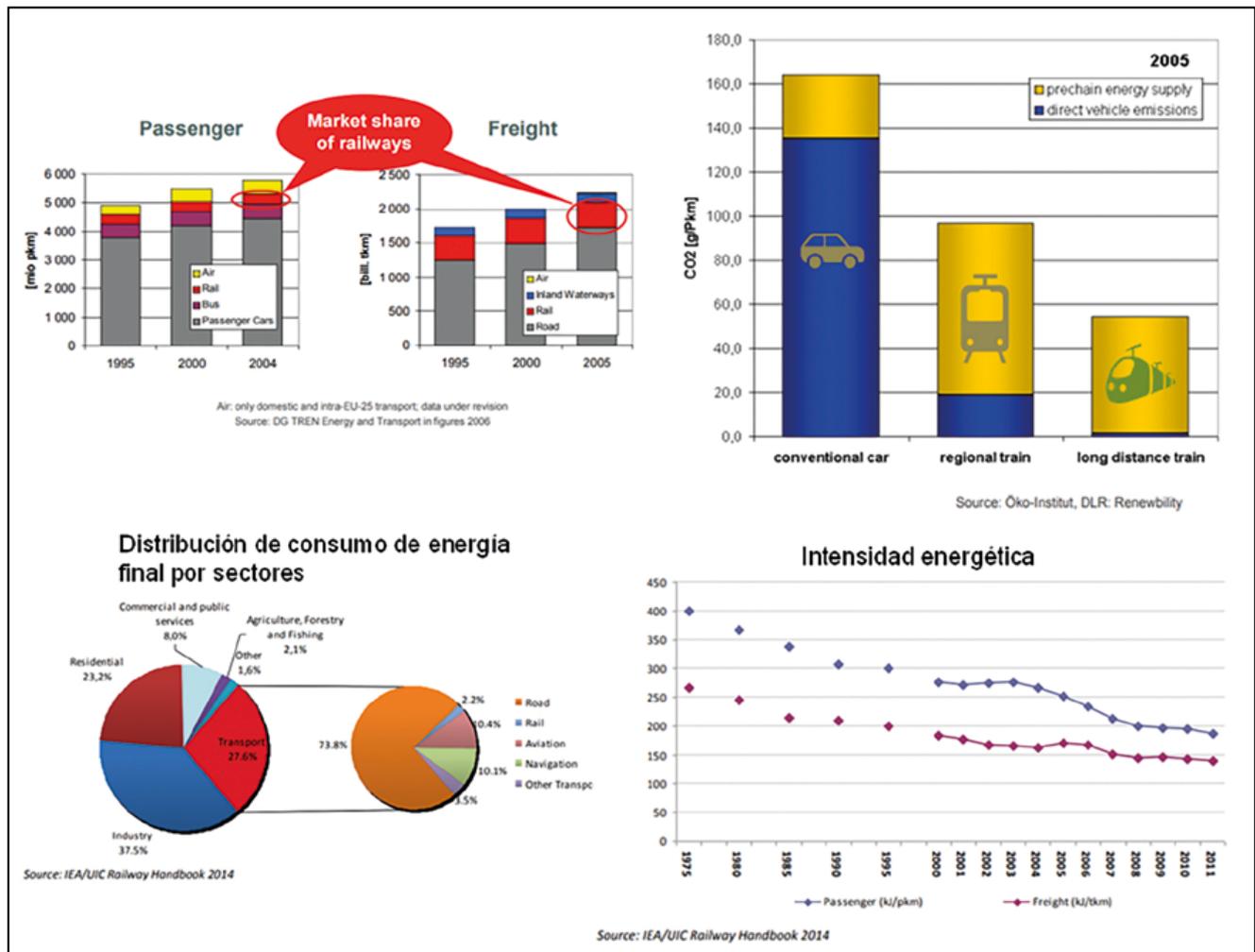


Figura 1. Gráficos sobre emisiones y consumo energético.

hidrógeno, combustibles sintéticos, etc.) y la disminución de la intensidad energética utilizada [2, 3].

- Es asequible, cómodo y seguro. Es el modo de transporte terrestre más seguro con la menor incidencia de accidentes mortales (0.1 muertes por cada mil millones de pasajeros/km entre 2011 y 2015). Todo esto se consigue gracias a un férreo marco normativo enfocado en la seguridad en el que se valida y ensaya casi todo.

En este artículo se van a presentar dos proyectos relacionados con el aligeramiento realizados por el departamento de innovación de producto de Talgo, en el que se ha desarrollado un bastidor de rodal AVRIL con una reducción en peso cercana al 50 % y se está trabajando en el desarrollo de una caja intermedia del Talgo 350 en consorcio junto a Aernnova, Tecnalía y FIDAMC en el que se esperan conseguir reducciones cercanas al 25 %. El objetivo de ambos es estudiar la viabilidad técnica y económica del proceso de aligeramiento, de nuevos materiales, procesos de fabricación y uniones en entornos ferroviarios y aplicaciones estructurales.

¿Por qué es importante el aligeramiento?, o ¿qué relación tiene con todo lo anterior? El aligeramiento, entendido como una herramienta para un fin, es una palanca para afianzar los puntos anteriores. Este camino es similar al seguido en el mundo aeronáutico, marítimo y de automoción con las particularidades propias del entorno

ferroviario en cuanto a volúmenes y cadencias de producción y costes objetivos.

- Reduce el consumo energético si usamos la fórmula de Davis [4], que por sencilla no deja de ser práctica e ilustrativa,  $F_{resistencia} = -(A + B \cdot v + C \cdot v^2)$ , el término independiente está ligado a la masa y, dependiendo de las condiciones (rampas, tipologías, etc.), la masa puede ser responsable de más del 30 % de la resistencia, a velocidad nominal. Si tenemos en cuenta aceleraciones, la reducción de masa pueden suponer importantes ahorros energéticos y, por ende, económicos. Para el caso estudiado, tren de alta velocidad, 30 años de vida, se traduce en un ahorro entorno a los 5-8 €/kg ahorrado.
- Reducción del coste de accesos a vía, basado en la reducción del daño sobre infraestructura al tener menor masa semi-suspendida y masa suspendida. Basado en el modelo de cálculo del canon británico [5] se estima que se puede reducir el coste de mantenimiento en el entorno de 6-12 €/kg ahorrado.
- Aumento de la capacidad de los trenes, ya sea por aumento de la carga de pago o mejora/introducción de nuevos equipos. Se ha estimado un aumento de la capacidad del 5-10 % y unos 50-100 €/kg ahorrado. Todo se traduce en unos menores costes de operación (decremento de los €/pax/km).

El principal desafío de todo esto es la introducción de nuevos materiales y procesos para el entorno ferroviario, cumpliendo en lo posible con la normativa vigente y detectando las carencias en la misma (tal como se reflejó en el proyecto europeo REFRESCO [6]), así como el desarrollo de las metodologías para diseñar, analizar, ensayar, fabricar y mantener.

## 2. METODOLOGÍA

El proyecto se ha dividido en cuatro etapas principales: proceso de diseño y análisis, incluyendo una investigación sobre métodos de validación y estado del arte, ensayos a nivel de subcomponente, fabricación de prototipos (figura 2) y ensayos a escala completa (banco y vía).

La primera premisa de ambos demostradores es que sean totalmente compatibles en términos de interfaces con los trenes existentes para facilitar sus pruebas en vía. El bastidor de rodal se basa en la plataforma Talgo AVRIL y la caja en el Talgo 350. Con estas interfaces claras, se tiene una envolvente dónde desarrollar el diseño.

De origen, el rodal convencional del AVRIL es un bastidor mecano-soldado con acero estructural S355 y la caja del Talgo 350, que es un “tubo” hecho con perfiles de extrusión soldados entre ellos y chapa mecano-soldada en diversas aleaciones de aluminio (AW 6082, AW 6005A, AW 5083).

Conocidos los materiales y procesos de origen se realizaron unos estudios conceptuales sobre diseño y materiales, evaluando alternativas existentes (tabla 1 y figura 3).



Figura 2. Prototipo de rodal ligero.

Tabla 1. Rigidez a tracción específica, rigidez a flexión y resistencia específicas (relativos respecto acero S355 de referencia)

	$(E_t/\rho)_{S355}$	$(E_t^{1/3}/\rho)_{S355}$	$(R_{p,0.2}/\rho)_{S355}$	Promedio
S355 (Ref)	1	1	1	1.00
Apilado CFRP	2.5	4.1	4.8	3.80
Al-Cu-Li	1.1	2.1	5.8	3.00
Ti (near-β)	0.9	1.4	5.2	2.50
Al-Mg-Zn-Cu-Zr	1	1.9	4.3	2.40
Maragin	0.9	0.9	5.2	2.33
Al-Mg-Zn-Cu	1	2	3.8	2.27
Ti (β-metaestable)	0.9	1.4	4.5	2.27
Al-Li	1.1	2.2	3.3	2.20
Apilado GFRP	0.75	2.4	3.4	2.18
Ti (α+β)	0.9	1.4	4.1	2.13
Al-Cu	1	2	2.6	1.87
Inox. PH	0.9	1	2.8	1.57
Multifase	1	1	2.3	1.43
HSLA	1	1	1.9	1.30
Aleado + QT	1	1	1.8	1.27
DPLA	1.1	1.1	1.4	1.20
Inox. Duplex	1	1	1.5	1.17

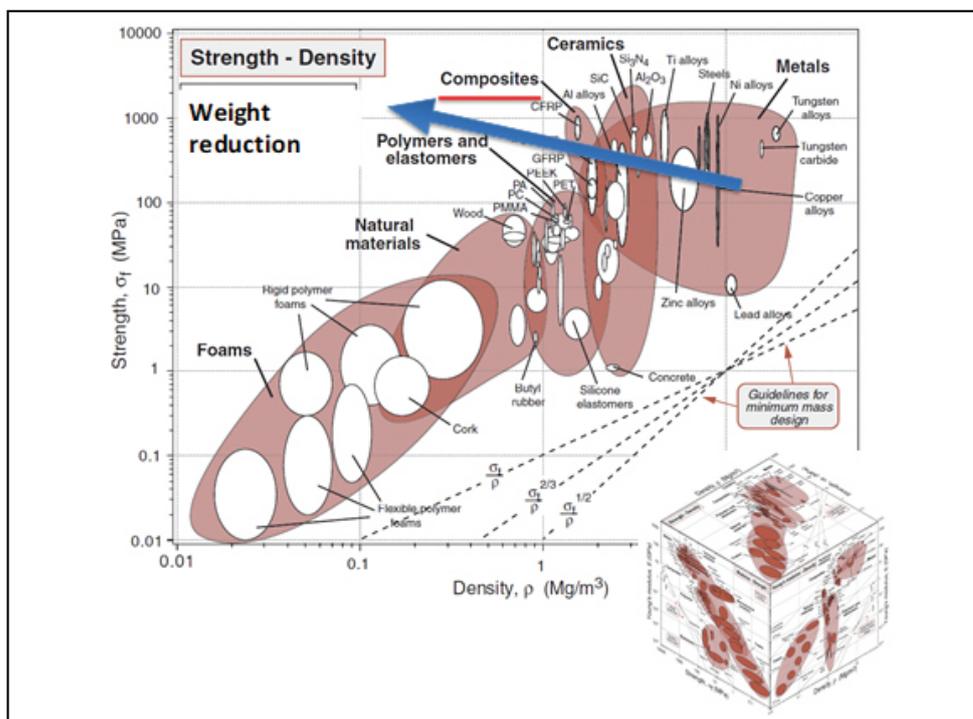


Figura 3. Diagramas de Ashby [7].

De todo lo anterior se concluyó que el material que puede ofrecer una mayor reducción de peso será un material compuesto de matriz polimérica reforzado con fibra de carbono, CFRP. Estos materiales, además, ofrecen ventajas adicionales como: propiedades configurables, ofrecen el mejor comportamiento ante cargas variables, buen comportamiento ante agentes ambientales, buena conformabilidad -se consiguen formas complejas sin usar soldaduras-, y buen comportamiento a baja temperatura. Por otro lado, presenta otros inconvenientes: limitado comportamiento ante cargas de fuego, exige control de propiedades, la tipología de material y los métodos de fabricación no son estándar para la industria ferroviaria, así como unos costes directos superiores a los metales convencionales en el sector.

## 2.1. Experiencias previas

Como tal, los materiales poliméricos reforzados con fibras no son nuevos en el sector, se emplean ampliamente en estructuras secundarias (carenas exteriores e interiores, frontales, trampillas, etc., (ver figura 4), pero su utilización en estructura primaria solo se ha limitado hasta ahora a proyectos de innovación o patentes.



**Figura 4.** Morro, techo y laterales de cabina del Talgo AVRIL-S106 realizados en CFRP.

Se recogen a continuación algunos de los ejemplos encontrados sobre el aligeramiento de estructuras, que incluyen el empleo de aleaciones de acero no convencionales, aluminio o polímeros reforzados con fibra de vidrio (GFRP) o carbono (CFRP):

- 1997 GEC-Alstom presentó una patente para la realización de un bastidor de *bogie* en piezas de aluminio forjado [8].
- Messerschmit Boelkow Blohm (MBB) llegó a fabricar un prototipo en 1986 de bastidor de *bogie* de fibra de vidrio que patentó en 1975.
- Patente [9] solicitada por GEC-Alstom en 1992, para un bastidor fabricado en material compuesto (sin concretar una tipología en particular).
- Eurobogie (dentro del programa Eureka [10]) en estudio por la Universidad de Reading en 2011 de un *bogie* de mercancías con un bastidor con función añadida de suspensión primaria fabricado íntegramente en GFRP con un potencial ahorro de peso de del 30 %, del que se alcanzó a probar el concepto a escala 1:5 en un tren de pasajeros durante cinco años sin daños aparentes.

- En 2014 se puso en pruebas un desarrollo en CFRP de la tradicional viga “lateral” y la suspensión primaria e integrarlo en un solo componente para *bogie* de metro. Se integra el *bogie* denominado “ef-Wing” de Kawasaki [11], en pruebas en los metros de Tokio y Nueva York.
- Septiembre de 2018, la compañía china CRRC, presenta un desarrollo completo, “CETROVO”, de vehículo de metro con caja y bastidor de *bogie* en CFRP [12].
- El instituto británico IRR, junto con Alstom Transport, Magma Structures, ELG Carbon Fibre Ltd., y las universidades de Birmingham y Huddersfield, dentro del marco europeo Run2Rail, propone un bastidor completo de *bogie* de mercancías usando parcialmente un compuesto de fibra reciclada [13].

En breve se esperan también ejemplos de inclusión de piezas de fabricación aditiva en piezas de responsabilidad estructural. Para las cajas, similares ejemplos se pueden encontrar en la bibliografía.

De manera general y fuera de proyectos de innovación, casi todas las estructuras de motrices y locomotoras, vagones de mercancías o bastidores de rodadura se realizan en acero estructural a partir de perfiles o chapas mecano-soldados. Por otro lado, casi todas las estructuras de coches de viajeros de alta velocidad o larga distancia se realizan en aluminio a partir de perfiles de extrusión soldados.

## 2.2. Diseño y cálculo

Teniendo claro que la base del diseño sería la fibra de carbono, quedaba por resolver uno de los factores limitantes: la resistencia al fuego. Tras unos años de desarrollo, la existencia de pre-impregnados (o pre-preg) de CFRP que cumplen con la EN 45545-2 [14] HL2 R7 ha hecho posible el uso de la fibra de carbono para aplicaciones estructurales manteniendo los requisitos de seguridad exigidos a nivel normativo. La definición del método de fabricación con material compuesto es la decisión más importante que se debe tomar para iniciar el proceso de diseño. En este caso, dada la existencia únicamente de pre-impregnados, se ha optado por el proceso de laminado manual con el pre-preg y curado en horno/autoclave para caja y rodal, respectivamente (figura 5). Además del tema del fuego, otros requisitos no estructurales se han tenido en cuenta durante el diseño: conductividad, compatibilidad electromagnética, impacto, etc. [15-18].

A partir de ahí ya se puede trabajar en el diseño y en cómo realizar los moldes y útiles, teniendo en cuenta el control de la precisión superficial, el sentido del crecimiento de las espesores y radios, el aspecto visual y los montajes con otras piezas, ya que, debido a las limitaciones del proceso de fabricación de los prototipos, no es posible la integración de todas ellas en un “one-shot”.

Basado en la experiencia de diseño en otros sectores (aeronáutico, automóvil), se realizan los estudios de cortes, transiciones y patronaje de laminados, definición de zonas de mecanizado y láminas de sacrificio, ángulos de desmoldeo, radios de curvatura admisibles y todo lo relacionado con uniones (agujeros, pernos remachables, tornillería o zonas de adhesivado) (figura 6).

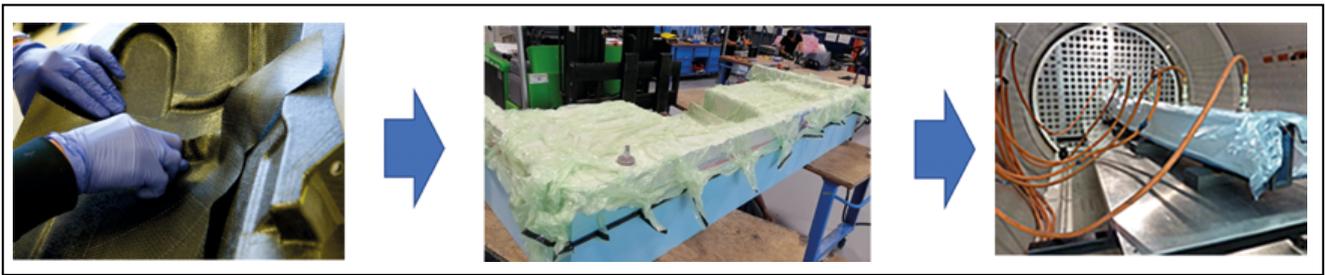


Figura 5. Representación esquemática del proceso de fabricación.

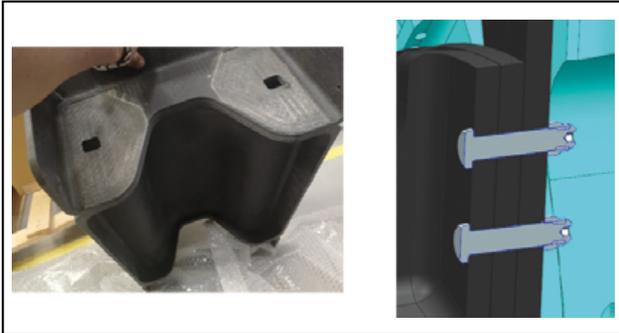


Figura 6. Zona mecanizada y diseño de una unión con perno remachable.

En el rodal se consigue un conjunto de aproximadamente 15 piezas incluyendo cepos, pasos de rueda, soportes de balancines de guiado, etc. Geometrías tridimensionales realizadas con laminados monolíticos de fibra para conseguir un conjunto que tenga la resistencia necesaria con el mínimo peso.

Para la caja, la integración es mayor debido a la menor complejidad geométrica, quedando 7 grandes subconjuntos para integrar. En este caso, en vez de laminados monolíticos de manera generalizada, se opta por estructuras sándwich de CFRP y núcleo de PET (polietileno tereftalato) para aportar la rigidez necesaria al conjunto junto con unas vigas pultruidas en las esquinas de los paneles (figura 7). Además de la fibra, y a fin de validar otros metales y simplificar el diseño de las interfases, los diseños se complementan con elementos de titanio mecanizados, componentes en acero inoxidable de alta resistencia fundidos y mecanizados y herrajes mecanizados fabricados en acero al carbono de alta resistencia y aluminio.

Todos estos subconjuntos están montados, como se ha comentado, con procesos de unión poco convencionales en este tipo de componentes: pegado y unión mecánica con remache tipo Hi-Lok, un remache de alta resistencia y eficacia usado ampliamente en el mundo aeronáutico.

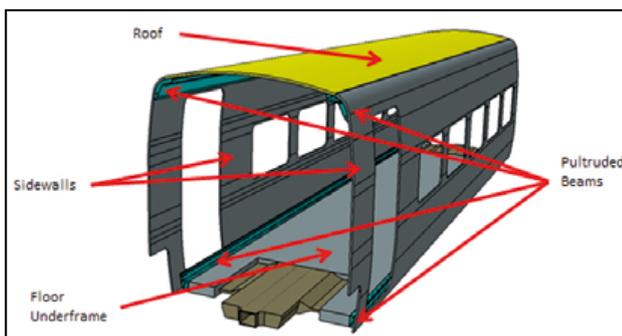


Figura 7. Diseño e integración de la caja ligera.

Una vez que el diseño se ha concretado, se pasa al proceso de análisis estructural. Para ello se han utilizado las cargas de servicio y cargas excepcionales normativas de la EN 13749 [19] y la EN 12663-1 [20] habituales para el diseño de bastidores y cajas respectivamente. La principal diferencia del análisis del compuesto respecto a lo recogido en la normativa, son los criterios de aceptación, ya que éstos quedan restringidos para el cálculo de estructuras metálicas.

Los criterios utilizados durante el análisis para material compuesto han sido: criterio de máxima deformación, criterio de Tsai-Wu y máxima tensión interlaminar [21]. A continuación, se incluye una breve descripción de cada uno de ellos:

- Criterio de máxima deformación (en el plano de la lámina). Es equivalente al criterio de Saint-Venant para materiales isotrópicos. Es un criterio conservador y es relevante en las partes planas de la pieza. El fallo se produce si no se satisface:

$$\begin{aligned} \text{Tracción: } & \varepsilon_{11} < X_{et} \ (\varepsilon_{11} > 0); \ \varepsilon_{22} < Y_{et} \ (\varepsilon_{22} > 0) \\ \text{Compresión: } & |\varepsilon_{11}| < X_{ec} \ (\varepsilon_{11} < 0); \ |\varepsilon_{22}| < Y_{ec} \ (\varepsilon_{22} < 0) \\ \text{Cortadura: } & |\gamma_{12}| < S_e \end{aligned}$$

Siendo:

- $X_{et}(X_{ec})$  = Máxima deformación normal de tracción (compresión) admisible en la dirección 1
- $Y_{et}(Y_{ec})$  = Máxima deformación normal de tracción (compresión) admisible en la dirección 2
- $S_e$  = Máxima deformación tangencial admisible

- Criterio de Tsai-Wu. Es uno de los conocidos como "criterios interactivos" y está basado en el criterio de Tsai-Hill (sigue el criterio de plastificación de Hill, que a su vez se basa en el criterio de Von Mises para materiales isotrópicos). Es de uso muy extendido, (incluido en la mayoría de los softwares de elementos finitos) y predice la rotura mediante una ecuación en la que intervienen todas las componentes de tensión.

$$F_1\sigma_{11} + F_2\sigma_{22} + F_{11}\sigma_{11}^2 + F_{22}\sigma_{22}^2 + F_{66}\sigma_{12}^2 + 2F_{11}\sigma_{11}\sigma_{22} < 1/sr$$

Siendo  $F_i, F_{ij}$  = Resistencia del material en las direcciones específicas

- Máxima tensión interlaminar. Se analizan las tensiones que aparecen a través del espesor. Especialmente relevante en bordes de pieza y/o radios.

$$\tau_{xz}/\gamma_z < ILSS$$

ILSS = Máxima tensión interlaminar admisible

Este análisis se realiza en todas las láminas que componen el laminado, considerando un fallo de la pieza cuando se da el fallo en la primera lámina. Es, por tanto, un proceso más complejo que el análisis que se realiza a los modelos metálicos.

Para la definición de los factores de seguridad, se tiene en cuenta que:

- Se determinan factores de seguridad atendiendo a distintos aspectos relativos al material compuesto (tabla 2 [22]).
- Se distinguen entre caminos de carga “principales no redundados” y caminos de carga “principales redundados y/o secundarios” (diferencia en la exigencia de la caracterización de propiedades exigibles al material).
- sf cargas excepcionales = 3.5-4.
- sf cargas servicio = 6-7.

**Tabla 2.** Consideraciones para definir el factor de seguridad

Concepto	Factor parcial	Observaciones
Proceso fabricación	1.5	Apilado manual (“Hand lay-up”)
Ambientales	1.1	Envejecimiento (principalmente fluencia)
	1.2	Efectos de Calor-Humedad
Tipo de sollicitación	1	Carga Excepcional
	2	Carga de Servicio
Tipo fallo del material	1.5	Carga última (rotura)
Caracterización propiedades admisibles	1	Obtenido en Base A
	1.1	Obtenido en Base B
	1.21	Obtenido en valor Promedio
Metodología análisis	1.1	Teoría lineal de Laminados por FEA
Base de cargas de Análisis	1	EN 13749 [19]/EN 12663 [20]

Tal como se recoge en la tabla 2, los análisis se han realizado mediante modelo de elementos finitos (software de análisis estructural ANSYS) (figura 8).



**Figura 8.** Modelo de elementos finitos (FEM) del rodal y de la caja.

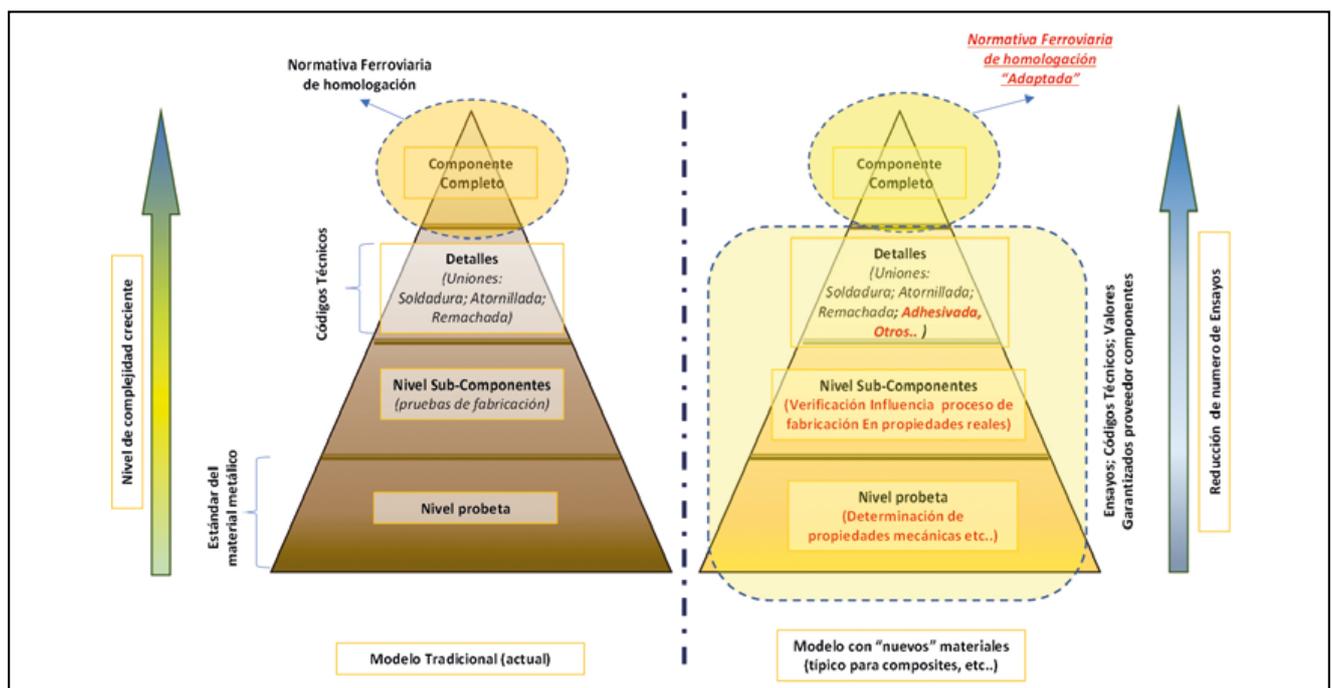
Para la realización del análisis es necesaria una caracterización del material más allá de la hoja de características del material. Recordemos que estos tipos de materiales no son algo estandarizado que se pueda comprar, es un material que se fabrica. En la figura 9a se recoge la pirámide de validación empleada en contraposición a la clásica, donde toda la caracterización a nivel del material se supone cubierta al emplearse materiales según norma.

En este apartado se expondrán algunos ejemplos de los tres primeros escalones de la pirámide, dejando para el apartado 2.4 los ensayos a nivel componente.

Se han realizado correlaciones entre probetas de laminados y simulación a partir de ensayos [23-25] donde se pueden observar los bajos errores obtenidos (tabla 3). Estos ensayos también sirvieron para calcular el factor de seguridad parcial “Caracterización propiedades admisibles” de la tabla 2.

De igual manera, se caracterizaron detalles de diseño en laboratorio a nivel probeta para establecer niveles concretos de deformación admisibles en zonas más complejas como pueden ser áreas con agujeros practicados o uniones mecánicas o pegadas (ensayos *open hole*, *bearing pass-by*, *lap-shear*, etc.) (figura 9b).

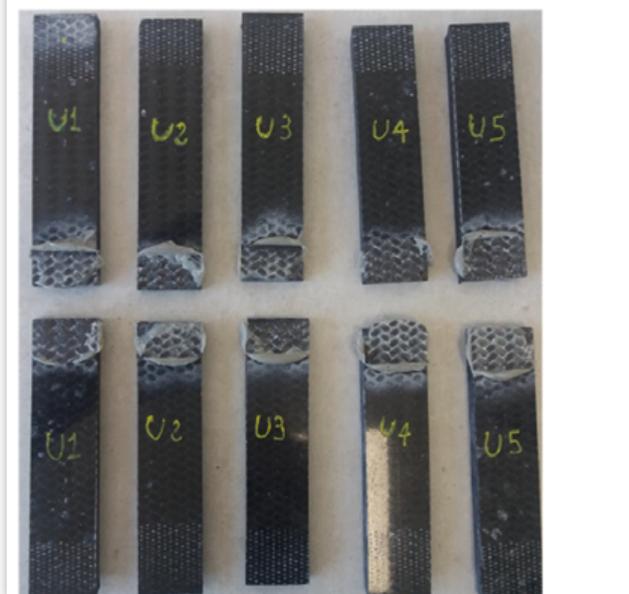
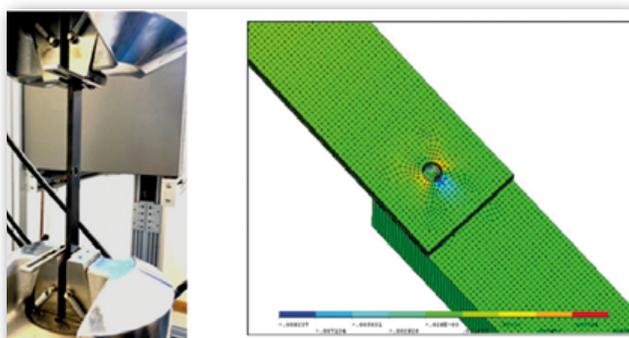
Cómo último ejemplo, se recogen los estudios de impacto, concretamente impacto de balasto. En base a lo



**Figura 9a.** Pirámide de validación tradicional y la aplicada a nuevos materiales.

**Tabla 3.** Correlación entre ensayos y FEM

Propiedad Mecánica		Laminado 1		Laminado 2	
		Ensayo	FEM	Ensayo	FEM
<b>Tracción (0°) ASTM D3039 [23]</b>					
Módulo de Young	(GPa)	49.4	49.7	72.1	73.7
Error	(%)	0.61		2.22	
<b>Compresión (0°) ASTM D6641 [24]</b>					
Módulo de Young	(GPa)	48.9	49.6	70.7	73.6
Error	(%)	1.43		4.07	
<b>ILSS ASTM D2344 [25]</b>					
ILSS	(MPa)	46.8	53.0	51.8	53.1
Error	(%)	13.25		2.5	

**Figura 9b.** Caracterización de agujeros y adhesivos, y correlación con FEM.

observado durante la operación comercial en acero y aluminio, los impactos solo suponen una ligera deformación plástica y endurecimiento local. Sin embargo, para otros materiales requiere un estudio específico.

El impacto de balasto es un fenómeno que puede ser significativo a alta velocidad ( $v > 200$  km/h), sobre todo si la altura del balasto sobre la vía no está del todo controlada o cuando hay algún fenómeno natural como la nieve o el hielo. Estos impactos pueden provocar picaduras y golpes sobre bastidores de *bogies*, ejes, carenas, ventanas o la propia estructura de las cajas (figura 10).

Para ello, se ha realizado una caracterización siguiendo el procedimiento de ASTM D7136 [26] para el estudio de la resistencia al daño de un compuesto de matriz

**Figura 10.** Daños por abrasión e impacto en un rodal en servicio y en una ventana.

polimérica reforzado con fibra en un evento de caída de un peso utilizando el impactador de punta angulosa procedente de la NF-F-07-101 [16] en vez del impactador hemisférico de la ASTM D7136 [26]. De acuerdo con la NF se establecen niveles de energía desde 12 J (K1) hasta 285 J (K11) y no aporta criterios sobre que niveles de energía son los adecuados para cada caso.

Con el fin de seleccionar la energía de diseño para el compuesto, se han realizado ensayos en torre de caída con probetas metálicas (acero y aluminio en diferentes espesores) y se han comparado con los impactos vistos en los trenes en servicio (figura 10). Los resultados muestran correlaciones entre el daño local en el punto de impacto (profundidad), el área dañada y la energía del impacto (figura 11). Teniendo en cuenta que el daño habitual observado en el tren es de unos 3 o 4 mm de diámetro (7 o 12 mm<sup>2</sup>), la energía de impacto que aparece en impactos ocurrido en servicio podría corresponderse con un valor inferior a 25 J.

En el compuesto de cierto espesor, el daño local en el punto de impacto es una punción sin penetración total del espesor. La fuerza máxima, el desplazamiento y la energía se incrementan cuando aumenta la energía de impacto. El daño interno es de mayor extensión que el local, y es el responsable principal de la pérdida de resistencia debida al impacto. El tamaño del área interna dañada y el tipo de daño producido es similar independientemente del impactador utilizado, anguloso (NF-F-07-101 [16]) o hemisférico (ASTM D7136 [26]), lo que permite utilizar la experiencia y bibliografía existente en base a este último ensayo en el mundo aeronáutico como aceptable para evaluar daños en material compuesto por impacto de balasto.

Los impactos a bajas energías (de 12 J a 25 J para el espesor más bajo ensayado y de 12 J a 35 J para el espesor más grande) provocan unos daños localizados, lo que conlleva unos daños asumibles y reparables (figura 12).

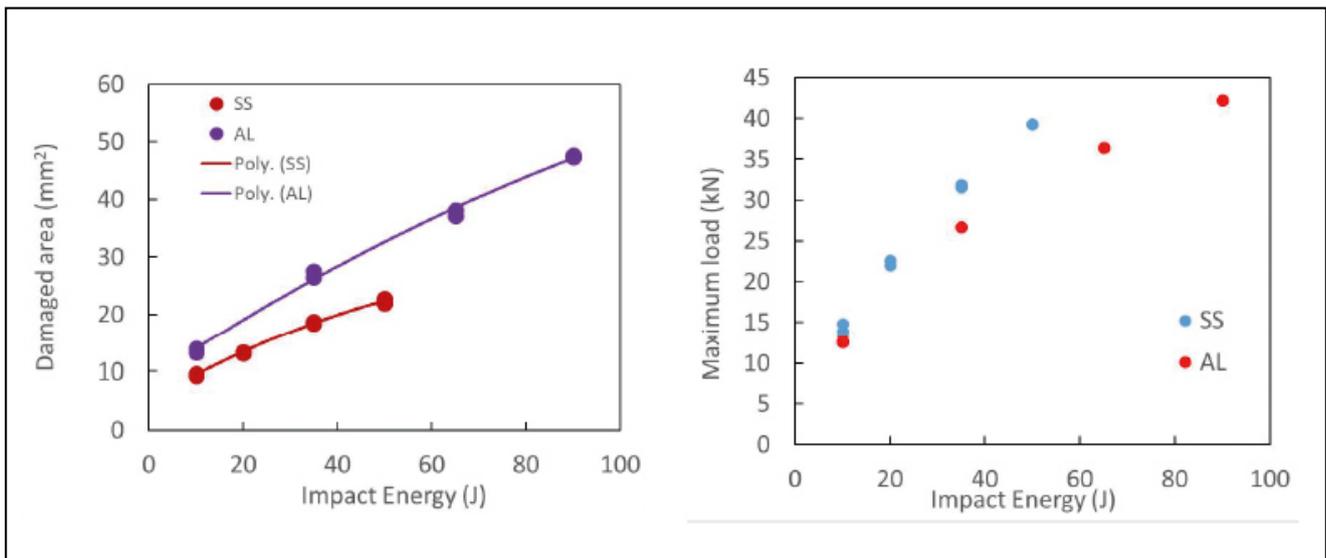


Figura 11. Correlación entre área dañada y carga con la energía de impacto en probeta metálica.

Para energías de impacto mayores, entre los 90 J y 115 J, se produce el fallo en la probeta, por lo que se considera 60 J como el límite de energía que se puede admitir. Por encima de 35 J, en estructura primaria y camino principal de carga, habría que poner una protección frente al impacto para estos materiales. Este requisito podría subir hasta los 60 J para estructura secundaria o donde no sea camino principal de carga.

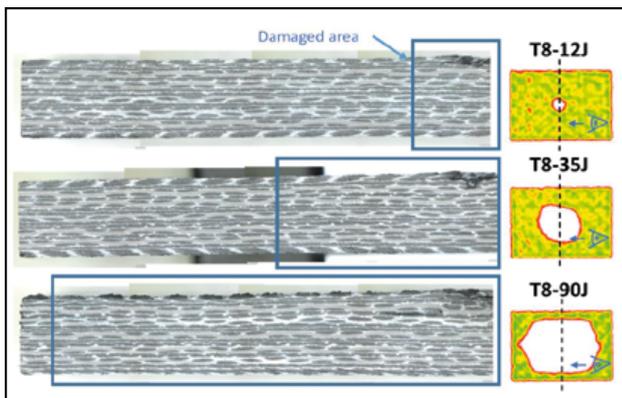


Figura 12. Probetas de CFRP inspeccionadas después del impacto.

Con todos estos ensayos de caracterización y el análisis, se ha cerrado el diseño y se ha pasado a la fase de fabricación en el caso del rodal. En la caja, al ser más compleja la fabricación de útiles y moldes, la fabricación no se finalizará hasta mediados del 2022.

### 2.3. Fabricación

Este primer prototipo es un compendio de procesos y materiales nuevos para el mundo ferroviario, y se ha colaborado con alrededor de 10 socios repartidos por España y Europa para ir uniendo los diferentes conocimientos y experiencias.

Como se ha comentado, para la parte de compuestos del rodal, se ha empleado un proceso de *hand lay-up* y material pre-impregnado, curado en autoclave, una

tecnología empleada en monocascos de automoción y que se adapta muy bien a la realización de prototipos. Para la parte metálica, distinguimos los cajones metálicos superiores, donde va alojado el conjunto de la estabilizadora, que están fundidos y mecanizados en acero inoxidable de alta resistencia (GX4CrNi13.4), y los herrajes para los que se han empleado acero al carbono de alta resistencia (42CrMo4) y titanio (Ti6Al4V) mecanizados. Como referencia, la parte de compuesto representa el 38 % del peso total y es la que mayor ratio €/kg ahorrado se obtiene.

Se han construido 3 unidades prototipo para diferentes fases de validación (EN 13749 [19] incluida) con las que se pretende validar todo lo visto en las fases de diseño y cálculo.

Resultado: casi 400 kg de reducción de peso sobre el bastidor de acero del AVRIL manteniendo todas las interfaces existentes (figura 13).

Además del proceso de fabricación, se ha trabajado conjuntamente para la definición de un proceso de chequeo de calidad e inspección de defectos internos y externos, que incluye tomografía (figura 14), ultrasonidos y comprobación dimensional.



Figura 13. Prototipo 1 del rodal ligero (posición invertida para montaje). Incluye toda la instrumentación de galgas extensométricas para ensayo estático.

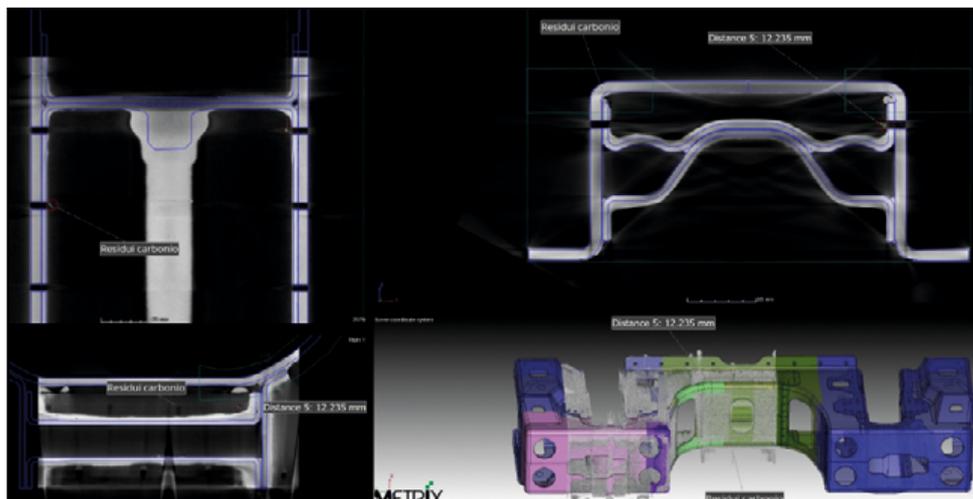


Figura 14. Tomografía del rodal.

#### 2.4. Ensayos en banco

Con la primera unidad se ha realizado el ensayo estático en banco de acuerdo con las cargas definidas en la EN 13749 [19]. Además de los casos normativos se han realizado casos de correlación para ajustar el modelo de elementos finitos a nivel global. En el caso de la fibra es importante

tener una buena correlación con el modelo debido a que, aunque se colocan las galgas en los puntos críticos, el fallo no tiene por qué darse en la lámina exterior donde está colocada la galga, si no que puede darse en alguna lámina interior. Hay que correlacionar los resultados medidos directamente con los resultados en las láminas interiores o puntos críticos.

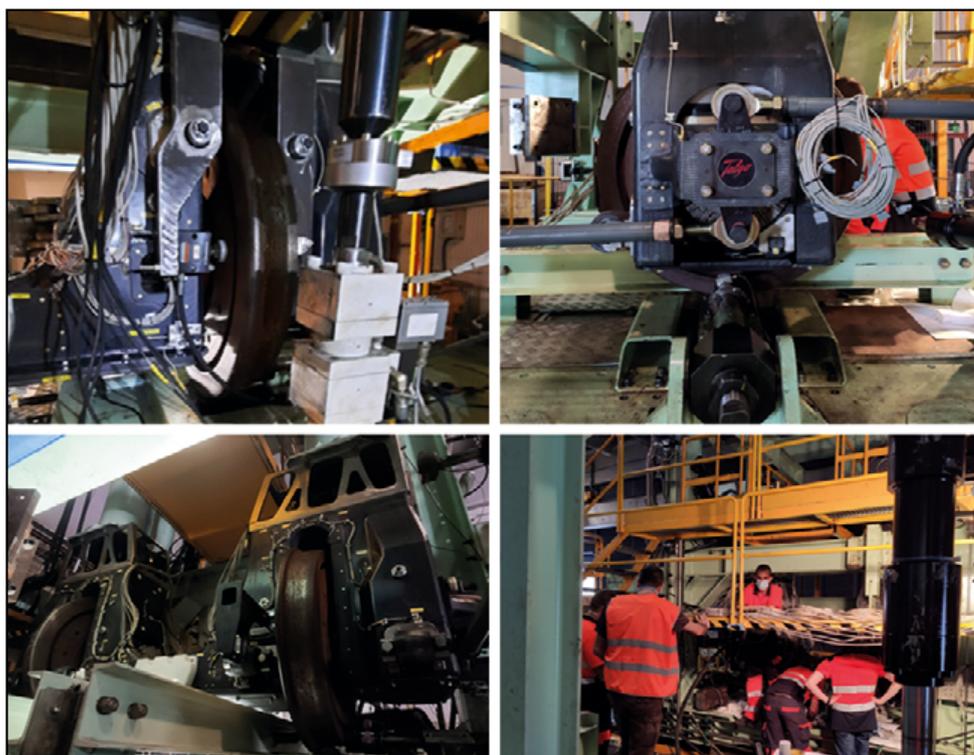


Figura 15. Ensayo en banco del rodal.

Los resultados del ensayo han sido favorables, no han aparecido daños visibles en el componente incluso habiendo llevado al componente a un 25 % más de carga que lo requerido en situación excepcional.

El ensayo de fatiga (10.000.000 de ciclos) está en marcha. Durante el ensayo, además de la monitorización con galgas extensométricas, se van a realizar inspecciones por ultrasonidos a los 0, 6.000.000, 8.000.000 ciclos y final de ensayo para evaluar posibles daños internos y progresión de los mismos.

Para la caja se procederá de manera similar una vez fabricada, ensayo en banco (figura 16) de acuerdo con la EN 12663-1 [20].

### 3. ESTANDARIZACIÓN Y NORMALIZACIÓN

Todos estos desarrollos, enmarcados dentro la iniciativa Shift2Rail, se acompañan del desarrollo de normativa a nivel europeo para inclusión de nuevos materiales en el sector. Esta falta de estandarización y normalización es una de las



**Figura 16.** Banco de ensayo de cajas.

principales barreras para la adopción de estas soluciones y una de las razones por las que pocos proyectos, mostrados en el apartado 2.1., se han visto en el mercado.

Actualmente, Talgo en representación de AENOR, participa en el grupo de trabajo CEN TC256/SC2/WG54 *Railway Applications - New Materials - Process Standard for the Introduction of New Materials*. Es el primer paso después de REFRESCO (<http://www.refresco-project.eu/>) y se quiere ir añadiendo información a todas las normas que se autolimitan a materiales metálicos, como las anteriormente mencionadas EN 13749 y EN 12663-1.

#### 4. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Se ha conseguido bajar el peso de un bastidor de rodal cerca de 400 kg habiéndolo validado estáticamente en banco y con el ensayo de fatiga en marcha. Se ha diseñado una caja con una reducción de peso del 25 % (aprox. 1 t) con todas las ventajas que conlleva respecto al ahorro energético, mantenimiento en vía y capacidad de carga. La aplicación de materiales compuestos es la más rentable en términos de €/kg ahorrado. Para el diseño se han tenido en cuenta criterios estructurales y no estructurales, superando los requisitos de la EN 45545 [14] relativos a fuego, humo y toxicidad.

En cuanto a los trabajos futuros se está trabajando en ampliar las posibilidades en cuanto a procesos de fabricación cumpliendo los requisitos de fuego, pensando en procesos de mayor cadencia como infusión, RTM (*Resin Transfer Moulding*) y procesos fuera de autoclave. Además, se está trabajando en nuevos materiales reprocesables, reparables y reciclables, ligeros, resistentes con bajos LCC (*Life Cycle Cost*) y LCA (*Life Cycle Assessment*).

#### 5. AGRADECIMIENTOS

Este proyecto está dentro de la iniciativa Shift2Rail, específicamente parte del proyecto PIVOT y PIVOT2. Ha recibido financiación del programa Horizonte 2020 de la Unión Europea en virtud de los acuerdos de subvención 777629 y 881807.

#### 6. REFERENCIAS

[1] Comisión Europea (2021). Año Europeo del Ferrocarril. [https://europa.eu/year-of-rail/why-rail\\_en](https://europa.eu/year-of-rail/why-rail_en)

[2] UIC-IRRB (2015). A Global Vision for Railway Development. [https://uic.org/IMG/pdf/global\\_vision\\_for\\_railway\\_development.pdf](https://uic.org/IMG/pdf/global_vision_for_railway_development.pdf)

[3] UNIFE (2016). UNIFE Position Paper on Digitalisation of Railways. <https://www.unife.org/wp-content/uploads/2021/03/UNIFE-POSITION-PAPER-ON-DIGITALISATION-OF-RAILWAYS.pdf>

[4] García Álvarez, A., y González Franco, I. (2021). Dinámica de los trenes en alta velocidad. *Cinemática Ferroviaria*. [https://www.tecnica-vialibre.es/documentos/Libros/2021%2003%2008%20DinamicaTrenes%20y%20Cin%20\\_V15%20marzo%202021.pdf](https://www.tecnica-vialibre.es/documentos/Libros/2021%2003%2008%20DinamicaTrenes%20y%20Cin%20_V15%20marzo%202021.pdf)

[5] Network Rail (2017). Variable Usage Charge (VUC) guidance document. <https://www.networkrail.co.uk/wp-content/uploads/2017/11/CP5-VUC-Guidance-document.pdf>

[6] De la Guerra, E. (2016). REFRESCO Project. Deliverable D9.2 Technical Recommendations Document.

[7] Ashby, M.F. (2004). *Materials Selection in Mechanical Design*. Oxford: Butterworth-Heinemann.

[8] Rimbaud, M., et al. (1997). *Bogie Frame* (Patente US5653177A).

[9] Devallez, A., y Guiot, J.L. (1992). *Bogie for a Railway Vehicle Comprising a Chassis Made of Composite Material* (Patente FR2669596A1).

[10] EUREKA (1997). EUREKA project EU-1841 EUROBOGIE. Advanced Rail Suspension Using Fibre-Reinforced Plastics, 1997-2003.

[11] Kawasaki ef-Wing (2015). [https://global.kawasaki.com/en/corp/sustainability/green\\_products/efWING.html](https://global.kawasaki.com/en/corp/sustainability/green_products/efWING.html)

[12] CRRC (2018). CETROVO's demo revealed by CRRC at the Inno Trans 2018 in Berlin. <https://www.youtube.com/watch?v=QNoQd9S0xGI>

[13] ELG Carbon Fibre-University of Huddersfield's Institute for Railway Research (2019). <https://www.hud.ac.uk/news/2019/december/carbon-fibre-rail-bogie-unveiled/>

[14] AENOR (2016). UNE-EN 45545-2:2013+A1:2016. Aplicaciones ferroviarias. Protección contra el fuego de vehículos ferroviarios. Parte 2: Requisitos para el comportamiento frente al fuego de los materiales y componentes.

[15] AENOR (2017). UNE-EN 50121-1:2017. Aplicaciones ferroviarias. Compatibilidad electromagnética. Parte 1: Generalidades.

[16] AFNOR (2002). NF F07-101. Applications ferroviaires. Essai de choc par simulation de projection de ballast.

[17] AENOR (2011). UNE-EN 50215:2011. Aplicaciones ferroviarias. Material rodante. Ensayos del material rodante al término de su construcción y antes de su puesta en servicio.

[18] AENOR (2018). UNE-EN 50153:2014/A1:2018. Aplicaciones ferroviarias. Material rodante. Medidas de protección relativas a riesgos eléctricos.

[19] AENOR (2011). UNE-EN 13749:2011. Aplicaciones ferroviarias. Ejes montados y bogies. Métodos para especificar los requisitos estructurales de los bastidores de bogie (Ratificada por AENOR en junio de 2021).

[20] AENOR (2015). UNE-EN 12663-1:2011+A1:2015. Aplicaciones ferroviarias. Requisitos estructurales de las cajas de los vehículos ferroviarios. Parte 1: Locomotoras y material rodante de viajeros (y método alternativo para vagones de mercancías).

[21] Miravete, A., et al. (2007). *Materiales Compuestos*. Vol. I y II. Barcelona: Editorial Reverté.

[22] De la Guerra, E. (2018). PIVOT Project. D1.2 Demonstrators Specification: Main Characteristics and Requirements of Carbody and Components.

[23] ASTM International. ASTM D 3039, Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials.

[24] ASTM International. ASTM D 6641, Standard Test Method for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials Using a Combined Loading Compression (CLC) Test Fixture.

[25] ASTM International. ASTM D 2344, Standard Test Method for Short-Beam Strength of Polymer Matrix Composite Materials and Their Laminates.

[26] ASTM International. ASTM D 7136, Standard Test Method for Measuring the Damage Resistance of a Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite to a Drop-Weight Impact Event.