

# Aligeramiento de un remolque de camión

Claes Fredriksson<sup>1</sup> y Joel Galos<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Granta Design, 300 Rustat House, 62 Clifton Rd, Cambridge, CB1 7EG, UK

<sup>2</sup>Department of Engineering, University of Cambridge, Trumpington St, Cambridge, CB2 1PZ, UK

First published September 2017.

© 2017 Granta Design Limited



## Contenido

1. ¿Cuál es la situación actual?.....	2
2. ¿Qué puedes hacer con CES EduPack? .....	3
3. Cómo comparar y filtrar materiales con CES EduPack.....	5
4. Eco Audit del aligeramiento de un remolque.....	6
5. Discusión y control de realidad.....	7
6. ¿Qué aporta CES EduPack a la comprensión? .....	8
Referencias.....	8

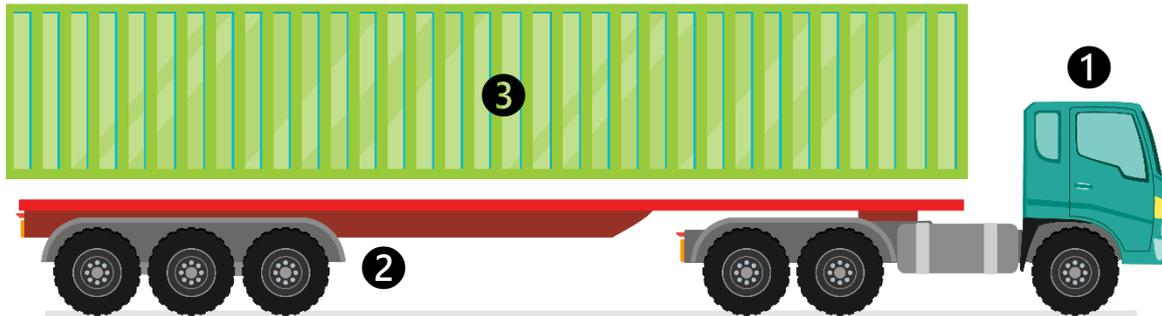
## Resumen

CES EduPack proporciona un enfoque racional y sistemático a la selección de materiales, esencial en ingeniería y diseño. Además, facilita la comprensión del proceso de selección con fines didácticos. Las bases de datos disponibles permiten consultar de forma rápida y visual información detallada sobre materiales en múltiples áreas especializadas. En este caso práctico avanzado, nos centramos en las decisiones de materiales en la industria del transporte, tratando de reducir el consumo energético de los vehículos pesados.

Los resultados muestran cómo la madera de balsa de grano final (*end-grain*) intercalada entre láminas de poliéster reforzado con fibra de vidrio es comparable a las opciones de contrachapado y madera dura, en cuanto a propiedades mecánicas. Comprobamos el comportamiento mecánico de forma independiente mediante ensayos experimentales de flexión a tres puntos. Aligerar el remolque usando estos paneles sándwich supone un ahorro de alrededor de 300 kg de peso, aunque, como cabe esperar, esto supone un coste. Usando la herramienta *Eco Audit+*, se puede ver cómo los costes energéticos y económicos iniciales se recuperan en menos de un año al reducir el consumo de combustible, además de generar una menor huella de carbono.

## 1. ¿Cuál es la situación actual?

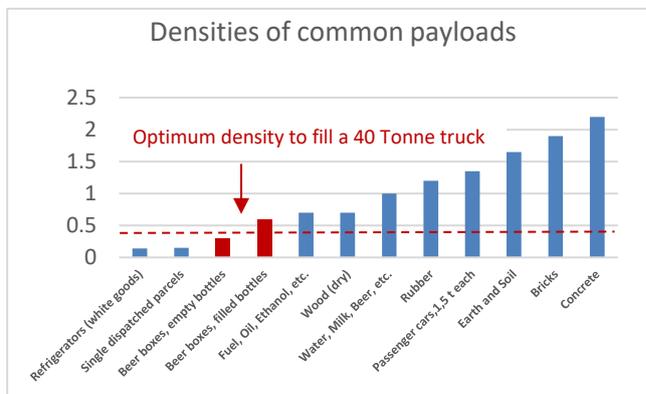
El sector del transporte es uno de los principales contribuyentes a las emisiones de gases de efecto invernadero a nivel mundial, y la carretera es sin duda una de las principales vías de transporte de mercancías. En la actualidad, los vehículos de mercancías pesadas (VGP) de más de 3,5 toneladas representan casi una cuarta parte de las emisiones de carbono del transporte por carretera y alrededor del 6% de las emisiones totales de gases de efecto invernadero de la Unión Europea, y se espera que estos valores aumenten en un 8% para 2020 [1].



Componentes principales de un vehículo de transporte de carga ① Camión ② Remolque y ③ Carga.

Se ha observado que podemos obtener una reducción aproximada del 6,5% en el consumo de combustible reduciendo la masa en vacío del remolque (ver arriba) en un 25% [2]. Esto puede parecer una reducción modesta, en relación con la posible mejora de otros factores logísticos. Sin embargo, una reducción del 6,5% en el consumo sigue siendo lo suficientemente significativa como para continuar. La reducción de la masa en vacío del remolque es probablemente el cambio de diseño más sencillo de implementar, razón por la cual se ha escogido dicho enfoque para este caso práctico Industrial.

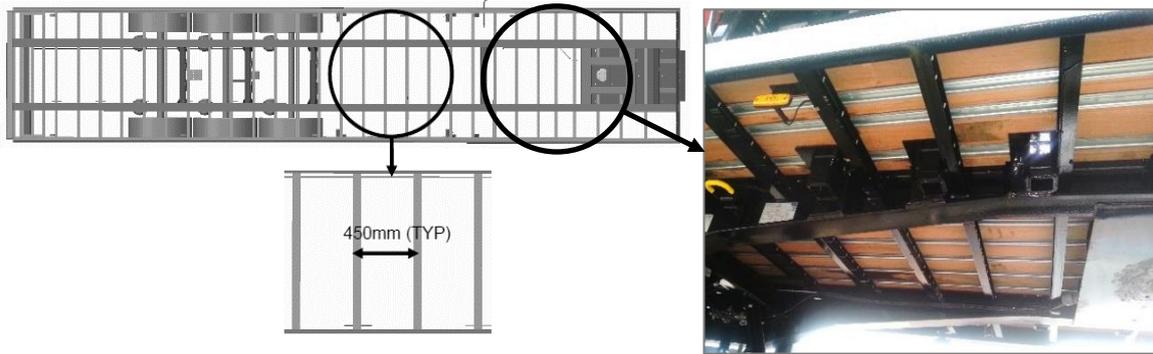
En términos logísticos, el volumen de la carga es variable, pero el peso máximo no lo es. La carga útil puede aumentarse con el peso que se ahorre al reducir la masa del remolque. El diagrama de la derecha contiene valores típicos de cargas útiles [3]. La densidad óptima de la carga útil suele estar situada entre las cajas de botellas de cerveza llenas y vacías. Dado que el peso máximo de la carga se puede aumentar gracias al aligeramiento del remolque, la reducción directa de energía y emisiones provendrá del kilometraje de carga vacía.



La tabla mostrada a la derecha recoge las contribuciones aproximadas de los principales componentes estructurales al peso de un remolque de carga de 13,6 m [4], común en Europa. La plataforma del remolque, generalmente construida con madera dura o madera contrachapada, contribuye de manera significativa al peso y, por tanto, es un buen objetivo para aligerar. Además, usar una plataforma liviana en el diseño del remolque es una mejora fácil de implementar en la flota existente, en comparación con el rediseño de las vigas de acero del chasis o del tren de rodaje. Otra estrategia de reducción de peso relativamente simple sería cambiar las ruedas de acero a aluminio o incluso a CFRP.

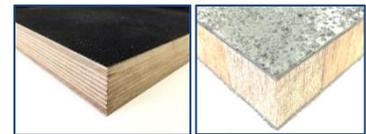
Componente de remolque	Masa aprox. kg	Masa aprox. %
Chasis y estructura	1800	43
Ruedas y neumáticos (6)	570	7
Tren de rodaje ( <i>bogie</i> )	1200	29
Plataforma	700	17
Enganche	150	4

Las plataformas de remolques de camiones deben cumplir la norma ISO1496 para contenedores de carga, y representan un área aproximada de 27 m<sup>2</sup> en los remolques de 13,6 m. Su grosor típico es de 30 mm.



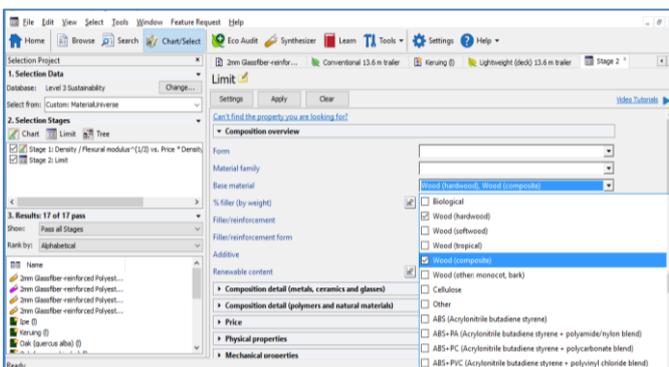
Vista superior del remolque sin plataforma (izquierda), y vista inferior con plataforma de madera (derecha).

Una plataforma de remolque ligera podría estar constituida por muchas configuraciones diferentes, incluyendo paneles monolíticos, contrachapados (imagen izquierda) o híbridos (por ejemplo, un panel tipo sándwich con núcleo de balsa, imagen derecha). La naturaleza altamente costosa de la construcción del remolque, así como la geometría del chasis del remolque de acero convencional, hace que los paneles tipo sándwich sean potenciales candidatos para esta aplicación. Una estructura tipo sándwich podría ayudar a aumentar la resistencia y rigidez bajo flexión, al mismo tiempo que reduciría el peso. De hecho, los paneles sándwich ya se están utilizando en las paredes laterales de los remolques de carretera con forma de caja, así como en pasos peatonales elevados, cuya estructura de acero es similar a la de un remolque.



## 2. ¿Qué puedes hacer con CES EduPack?

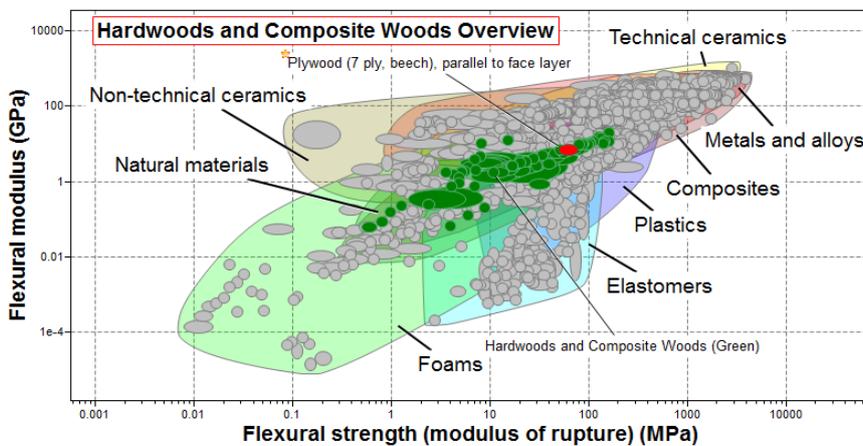
CES EduPack aporta un enfoque sistemático y comprensible a la selección de materiales. Se basa en el trabajo del profesor Mike Ashby [5] y compañeros/as. Los datos y las herramientas incluidas en el software permiten analizar y comparar diferentes alternativas para plataformas ligeras de remolques. La base de datos del Nivel 3 cuenta con más de 500 tipos de madera, así como con varios modelos de estructuras laminadas y paneles tipo sándwich en la herramienta *Synthesizer*, que está disponible en algunas ediciones. Para este proyecto vamos a utilizar la base de datos de Nivel 3 *Sustainability*. Esta edición contiene el *Synthesizer*, que permite estudiar las propiedades de los híbridos estructurales, y también la herramienta *Eco Audit+* para evaluar los beneficios en el ciclo de vida de las plataformas aligeradas.



El presente estudio está enfocado a encontrar y comparar materiales alternativos que cumplan con los requisitos de diseño. Esto puede dar pie a un debate en el aula, sobre dichos requisitos y las respectivas decisiones de diseño. Comenzamos buscando materiales de base madera, similares a los que se utilizan actualmente. Seleccionamos el subconjunto *Material Universe: All Bulk Materials*, después de hacer clic en *Gráfico/Seleccionar* en la barra de herramientas principal. A continuación, usamos la etapa *Límite*, y en *Composition Overview*, seleccionamos maderas duras y compuestas (*hard wood, composite wood*). Se obtienen casi 70 opciones. Ahora podemos representarlas, haciendo clic en la herramienta *Gráfico*. Dado que es sencillo modificar o agregar etapas a posteriori, comenzamos representando la rigidez a flexión frente a la resistencia a flexión (*flexural stiffness vs. flexural strength*), como muestra del comportamiento mecánico general.

Overview, seleccionamos maderas duras y compuestas (*hard wood, composite wood*). Se obtienen casi 70 opciones. Ahora podemos representarlas, haciendo clic en la herramienta *Gráfico*. Dado que es sencillo modificar o agregar etapas a posteriori, comenzamos representando la rigidez a flexión frente a la resistencia a flexión (*flexural stiffness vs. flexural strength*), como muestra del comportamiento mecánico general.

Utilizamos la madera contrachapada, una opción muy común, como referencia. Usa la función *Buscar* con **Plywood (7-ply)** (contrachapado de 7 capas). Agrégalo a *Favoritos* haciendo clic con el botón derecho. También puedes cambiar el *Color del registro* a rojo y usar la función *Traer al frente* para dar más visibilidad.



- Datashet
- Locate in Browse Tree
- Highlight
- Record Color >
- Bring to Front**
- Send to Back
- Remove from Subset
- Add to Favorites
- Remove from Favorites
- Default Name
- Rename
- Delete
- Format Label

El gráfico anterior muestra que las maderas, y en particular la madera contrachapada, presentan propiedades apropiadas para nuestra aplicación. En el siguiente paso filtramos la selección de maderas. Incluimos solo las que, de acuerdo con las hojas de datos del programa, se usan en plataformas de camiones (**truck floors**). Obtenemos 24 registros de madera y 8 de aluminio. Hay que tener en cuenta que todas las maderas aparecen por duplicado, ya que sus propiedades son anisotrópicas y existen diferentes registros para las propiedades transversales y longitudinales. Por lo tanto, volvemos a la ventana *Buscar* y agregamos "(l)", como se muestra a la derecha, para eliminar los registros de metales y maderas transversales. Esto reduce los resultados a una docena de maderas. Seleccionamos todos estos registros y, con un clic derecho, usamos la herramienta *Añadir a favoritos*. Los favoritos ahora contendrán estos 12 materiales más el contrachapado (*Plywood*), previamente agregado. Finalmente, creamos un material en representación de un panel sándwich, como se sugirió anteriormente.

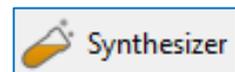
Search

Database: Level 3 Sustainability Change...

truck floors (l)

MaterialUniverse (12)

- Keruing (l)
- Sepetir (l)
- Ipe (l)
- Sassafras (l)
- Sweetgum (l)
- Oak (quercus virginiana) (l)
- Oak (quercus alba) (l)
- Oak (quercus bicolor) (l)
- Oak (quercus lyrata) (l)
- Oak (quercus michauxii) (l)
- Oak (quercus robur) (l)
- Oak (quercus stellata) (l)



**Balanced**

Predicts the performance of balanced sandwich structures

Assumptions:

- Face-sheet to core bonding is perfect
- Face-sheets remain flat under loading (no dimpling on honeycomb cores)

Source Records

Face-sheet: Polyester/E-glass fiber, woven fabric, 45wt% glass, biaxial lay-up

Core: End-grain balsa (0.22)

Model Variables

Enter values or range of values. For example, 1; 3; 8 or 1-8.

Face-sheet thickness: 2 mm Number of values: 10

Core thickness: 20 - 40 mm Number of values: 4

Model Parameters

Support and load conditions: Simply supported Central load

Span: 0.45 m

Record Naming

Face-sheet: Glassfiber-reinforced Polyester

Core: End-grain Balsa

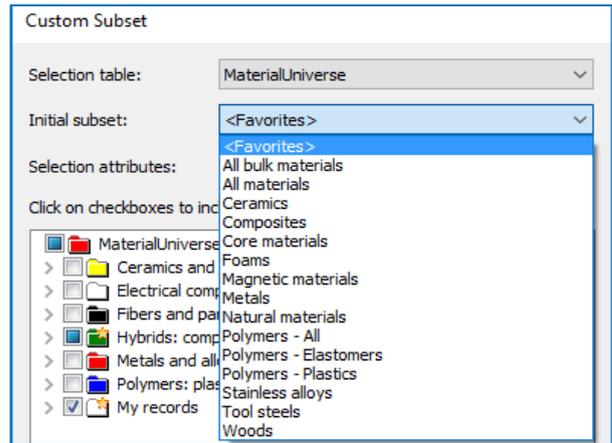
This model will generate 4 records

Previous Create Cancel

Con la herramienta *Synthesizer*, disponible en ciertas ediciones avanzadas de CES EduPack, podemos crear nuevos materiales. Utiliza modelos que estiman las propiedades de algunos híbridos estructurales, como los paneles sándwich. El material de las caras es un poliéster reforzado con fibra de vidrio (GFRP), con un 45 wt% (en peso) de laminado biaxial. Está en la carpeta *Hybrids... > Composites > Polymer Matrix...* La madera de balsa de grano final se encuentra en *Hybrids... > Composites > Natural material composites > Woods...* En base a datos de remolques reales, se elige una carga puntual con apoyos a 0,45 m. El valor del espesor del núcleo (25,4 mm) está basado en la literatura [6]. Tras completar la *Nomenclatura de los registros*, se genera una hoja de datos con las propiedades estimadas en la carpeta *Mis registros*, en *MaterialsUniverse*. Finalmente, podemos representarlo y compararlo con los 13 registros favoritos.

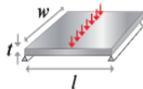
### 3. Cómo comparar y filtrar materiales con CES EduPack

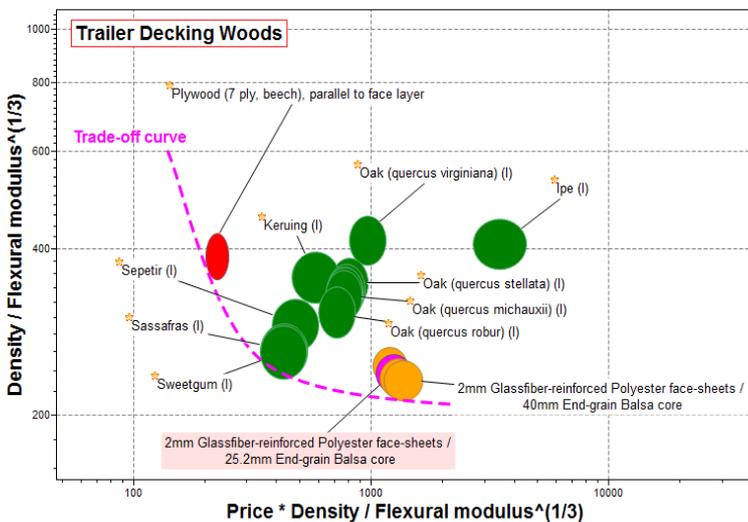
Al realizar el gráfico, los *Favoritos* se pueden representar fácilmente desde *Personalizado: Define tu propio subconjunto* en el menú desplegable "Seleccionar de". La opción *Mis registros (My records)* puede incluirse explícitamente en el subconjunto, como se muestra a la derecha. A continuación, en el cuadro de diálogo de la herramienta *Gráfico*, la función *Avanzado* nos permite añadir y modificar los índices del material para la masa mínima, **M1**, y para el coste mínimo, **M2**, respectivamente. Es un **Diseño limitado por la rigidez**, ya que lo que queremos es minimizar la flexión de la plataforma.



#### Stiffness-limited design at minimum mass

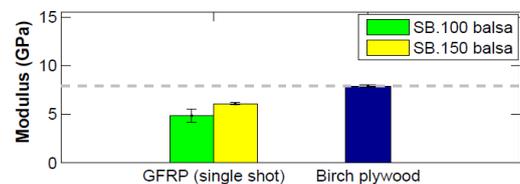
Trazando los índices del material para masa y coste mínimos, podemos evaluar visualmente las diferentes opciones. **La función** define un diseño de panel bajo flexión limitado por la rigidez, y se asume que el grosor es la variable libre. Las *Restricciones* ya están consideradas, ya que estamos usando un subconjunto de materiales que ya están en uso. Los objetivos están definidos por los índices que se encuentran en *Aprende > Material Selection > Performance Indices*.

FUNCTION AND CONSTRAINTS <sup>1</sup>		MAXIMIZE <sup>2</sup>	MINIMIZE <sup>2</sup>
Panel in bending		length, width fixed; thickness free	$E_t^{1/3} / \rho$



En el gráfico de la izquierda, hemos trazado **M1 = Densidad / Módulo de flexión ^ (1/3)** en el eje Y, y **M2 = Precio \* Densidad / Módulo de flexión ^ (1/3)** en el eje X. El contrachapado (*Plywood*) es la opción con mejor relación precio/rigidez a flexión. Las maderas duras comunes, como el *Keruing* o el roble (*Oak*), tienen un comportamiento similar, pero son más caras. Los paneles sándwich son los más ligeros, pero también más caros. El contrachapado y los paneles sándwich se encuentran en el frente de Pareto que se puede generar con la herramienta *Curva*. El sándwich con núcleo de balsa de 25,2 mm ofrece una buena relación precio/densidad.

Las propiedades estimadas del panel sándwich son competitivas, como lo respaldan los datos experimentales mostrados a continuación de un sistema muy similar (núcleo de 1 pulgada). El panel sándwich creado con el *Synthesizer* presenta una rigidez a flexión,  $E_f$ , de 4,47- 6,36 GPa (barra verde), que concuerda con los valores experimentales del sistema equivalente (barra amarilla, 2 mm GFRP / 25,4 mm de madera de balsa SB 150 Balsa / 2 mm GFRP). La hoja de datos de *7 Ply Beech Plywood*,  $E_f = 6-9$  GPa, es comparable al contrachapado de abedul (*birch plywood*) ensayado, representado en la gráfica por la barra azul [6].



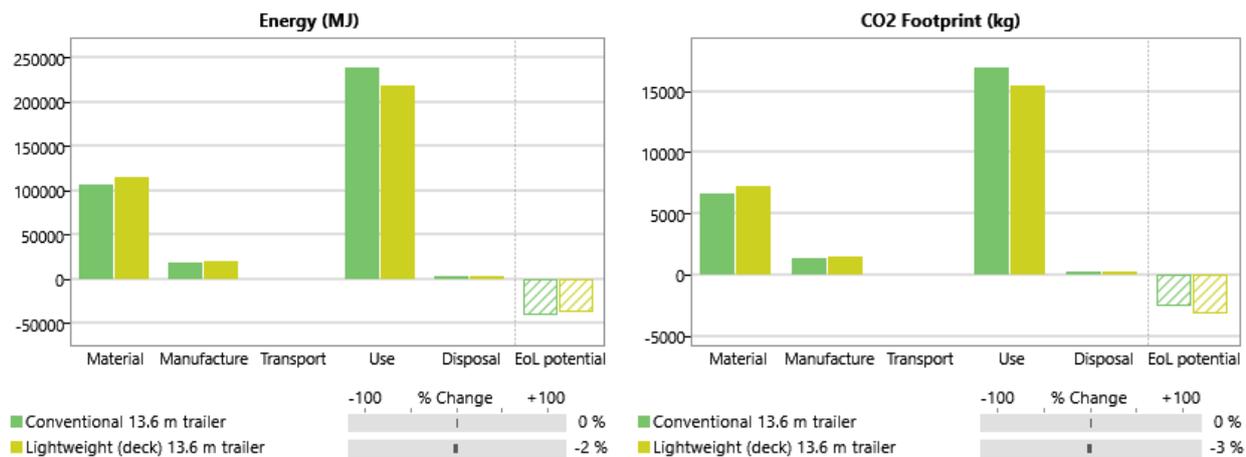
### 3. Eco Audit del aligeramiento de un remolque



Reemplazando ciertos componentes estructurales, se pueden lograr reducciones significativas de la masa. Hemos utilizado la herramienta *Eco Audit+* para investigar los beneficios de la reducción del peso en el ciclo de vida, en comparación con un remolque convencional. A continuación, se muestra la lista de materiales simplificada (BOM) del remolque de referencia, con plataforma de madera dura:

Qty.	Component name	Material	Recycled content	Mass (kg)	Primary process
1	Chassis beams	High strength low alloy steel, YS355, hot rolled	Typical %	1800	Rough rolling
1	Running gear system (bogie)	High strength low alloy steel, YS350, cold rolled	Typical %	1200	Rough rolling
1	Decking	Keruing (I)	Virgin (0%)	689	Incl. in material value
1	Scrub plate	Carbon steel, AISI 1080, as rolled	Typical %	150	Rough rolling
6	Tyres	Styrene butadiene rubber (SBR, 30% carbon black)	Virgin (0%)	50	Polymer molding
6	Wheels	High strength low alloy steel, YS350, cold rolled	Typical %	45	Rough rolling

A continuación, vemos los datos del *Eco Audit* para la huella de energía y CO<sub>2</sub> en Europa. Las barras verdes oscuras representan la referencia. Para un camión comercial *diesel* de 32 toneladas con una fase de uso móvil de 1 año, recorriendo 200 km al día, 300 días del año, los materiales representan el 29% de la energía total del remolque y la fase de uso el 65%. Como se puede apreciar, existe una estrecha relación entre el uso de energía y las emisiones de CO<sub>2</sub>. El peso de una plataforma convencional oscila entre 606 kg (Plywood) y 689 kg (Keruing). Como es habitual, los datos ecológicos tienen una mayor incertidumbre que los mecánicos.



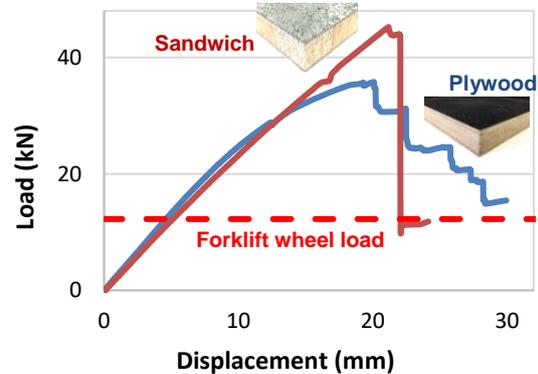
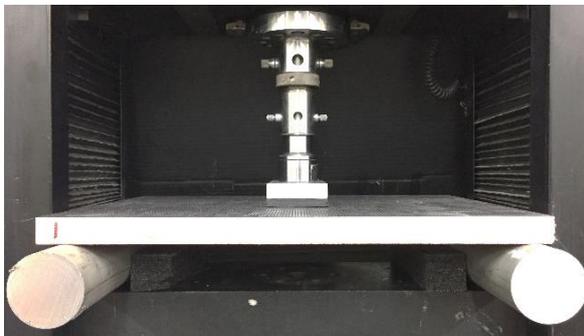
Las barras en amarillo verdoso representan el remolque ligero propuesto. La lista de materiales para este caso incluye una plataforma de panel sándwich de 330 kg como posible reemplazo, lo que resulta en una reducción de su peso a aproximadamente la mitad. En el *Eco Audit* anterior, se puede observar cómo las mejoras obtenidas en la fase de uso (también 200 km al día, 300 días al año) compensan el aumento de uso de energía durante la fase de producción y fabricación del material. En total, la reducción de peso da un resultado estimado de 2-3% menos de energía y huella de CO<sub>2</sub>. Y esto teniendo en cuenta únicamente el primer año de uso. Asumiendo un uso de 5 años, la reducción estimada es mayor: 7%.

Qty.	Component name	Material	Recycled content	Mass (kg)	Primary process
1	Chassis beams	High strength low alloy steel, YS355, hot rolled	Typical %	1800	Rough rolling
1	Running gear system (bogie)	High strength low alloy steel, YS350, cold rolled	Typical %	1200	Rough rolling
1	Decking	End-grain balsa (0.22)	Virgin (0%)	159.1	Incl. in material value
2	Decking	Polyester/E-glass fiber, woven fabric, 45wt% glass, biaxial lay-up	Virgin (0%)	83.7	Resin transfer molding (RTM)
1	Scrub plate	Carbon steel, AISI 1080, as rolled	Typical %	150	Rough rolling
6	Tyres	Styrene butadiene rubber (SBR, 30% carbon black)	Virgin (0%)	50	Polymer molding
6	Wheels	High strength low alloy steel, YS350, cold rolled	Typical %	45	Rough rolling

## 4. Discusión y control de realidad

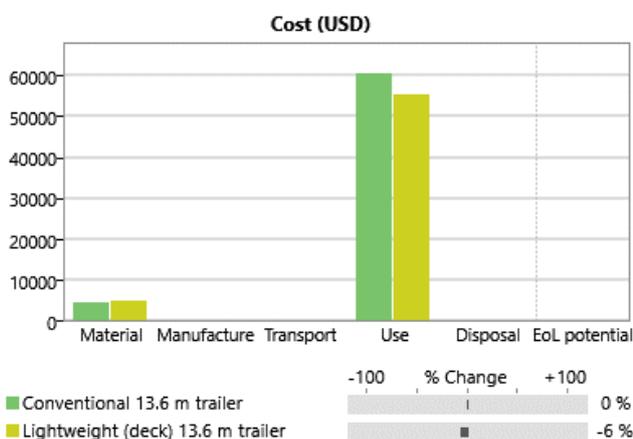
En este Caso Práctico Industrial Avanzado, nos apartamos ligeramente de la metodología tradicional y sistemática de selección de materiales, usada principalmente para seleccionar materiales en nuevos productos. En el estudio del remolque de camión, el objetivo es mejorar el material utilizado para una aplicación determinada, asumiendo un *diseño restringido*. Realizamos la investigación sencillamente limitando la elección a materiales existentes, que después utilizamos como referencia para evaluar un nuevo candidato, sugerido en la literatura. Al representar gráficamente los objetivos en conflicto, asumimos que el espesor es un parámetro libre de diseño, lo que puede no ser cierto en caso de tener una geometría predeterminada. Además de la evaluación comparativa de la estructura híbrida sugerida en el gráfico, debemos verificar que el comportamiento mecánico de la plataforma con el espesor dado sea adecuado.

Los paneles sándwich de poliéster reforzado con GFRP y madera de balsa de grano final han resultado ser la combinación de materiales óptima en cuanto a coste de materia prima y rendimiento mecánico. Estos paneles pueden fabricarse de manera rápida y sencilla, y son un 45% más livianos que las plataformas de remolque convencionales. Las propiedades de un panel sándwich de 30 mm de espesor, se han obtenido mediante un ensayo de flexión a tres puntos bajo condiciones controladas a temperatura ambiente [6].



La norma ISO 1496 define un escenario para la carga de una carretilla elevadora. En el diagrama de arriba, la carga se representa con una línea roja discontinua [6]. Como se puede ver, el panel sándwich pasa la prueba, superando a la muestra de referencia de contrachapado (*Plywood*) y quedando confirmada su validez.

Como señalaba el diagrama de compensación de la sección 3, según el índice del material M2, los paneles sándwich son significativamente mejores en relación coste/rigidez que las demás alternativas. Realizar una comparación que tenga en cuenta el combustible ahorrado al reducir la masa no es fácil. El análisis de coste (*Cost Analysis*) del *Eco Audit+*, ofrece la posibilidad de estimar rápidamente estos beneficios.



El *Eco Audit+* brinda una idea aproximada de los costes desde la perspectiva del ciclo de vida. Nos confirma que la estructura híbrida es más cara en cuanto a materiales y fabricación, pero que el total casi no varía (-1%) al considerar el menor gasto de combustible. En un período de 5 años, el ahorro se estima en un 6%, como se puede ver a la izquierda. El país elegido en *Eco Audit* afectará los precios del combustible, por lo que, si se selecciona EE. UU. en lugar de Europa, los costes de combustible disminuyen, invirtiendo el beneficio económico durante el primer año (+2%). Sin embargo, tras 5 años, el beneficio total obtenido sería del 5%.

## 5. ¿Qué aporta CES EduPack a la comprensión?

CES EduPack es un recurso excelente para enseñar el proceso de diseño trabajando con herramientas visuales interactivas. El docente puede mostrar fácilmente cómo tomar decisiones adecuadas sobre materiales, y los estudiantes pueden explorar diferentes formas de seleccionar y evaluar materiales en proyectos realistas. Nuestros Casos Prácticos Industriales Avanzados pretenden inspirar y guiar el desarrollo de productos, proporcionar los conocimientos necesarios y facilitar la comprensión de la materia.

En este caso práctico sobre el aligeramiento de un remolque con CES EduPack, las conclusiones son:

- La base de datos *Sustainability* contiene una gran cantidad de materiales especializados y datos organizados de manera práctica. Hemos explorado con éxito las maderas para plataformas de remolques. También proporciona herramientas avanzadas, particularmente útiles para este caso.
- Las *herramientas de visualización* nos permiten acceder fácilmente a una visión general de las propiedades de los materiales para comparar diferentes opciones para las plataformas de remolque, demostrando, por ejemplo, que el contrachapado es una alternativa muy competitiva.
- La herramienta *Synthesizer* puede usarse para crear nuevas opciones de paneles sándwich, sugeridas por la investigación, que pueden ser comparadas con los materiales en uso actualmente.
- La herramienta *Eco Audit+* nos ha ayudado a estimar los beneficios en el ciclo de vida del nuevo panel híbrido en términos de energía, huella de carbono y coste.

Los resultados muestran que la madera de balsa intercalada entre láminas de poliéster reforzado con fibra de vidrio es competitiva en cuanto a propiedades mecánicas con respecto a la opción del contrachapado (ensayo bajo flexión a tres puntos). Un remolque ligero con llantas de aleación de aluminio y el panel de sándwich sugerido tendría alrededor de 300-400 kg menos de peso en vacío. Estos cambios, naturalmente, implicarían cierto coste. Sin embargo, los resultados del *Eco Audit+* muestran que los mayores costes iniciales económicos y de energía se recuperarían en menos de un año gracias al ahorro de combustible.

### Agradecimientos

Este trabajo se basa en parte en una investigación realizada en colaboración con el Departamento de Ingeniería de la Universidad de Cambridge, financiado por el Centro para Transporte Ferroviario Sostenible y por el Consejo de Investigación de Ingeniería y Ciencias Físicas (Grant Reference EP / K00915X / 1).

### Referencias

1. *Transport & Environment*. “*Smarter, Safer, Cleaner: How Small Changes to Lorry Design Can Make a Big Difference*” Publicado en línea el 14 de febrero de 2012.  
<https://www.transportenvironment.org/publications/smarter-safer-cleaner-how-small-changes-lorry-design-can-make-big-difference>
2. Odhams, A., Roebuck, R., Lee, Y., Hunt, S., y Cebon, D., “*Factors influencing the energy consumption of road freight transport*”, Proc. Inst. Mech. Eng. Part C–J. Mech. Eng. Sci., vol 224 (9), pp1995–2010, 2010.  
<http://dx.doi.org/10.1243/09544062JMES2004>.
3. Glaeser, K. “*Performance of articulated vehicles and road trains regarding road damage and load capacity*”, en el *11<sup>th</sup> International Symposium on heavy Vehicle Transportation Technology, Melbourne, Australia, 2010*.
4. Galos, J.L., “*Lightweight Composite Trailer Design*”, Tesis Doctoral (Universidad de Cambridge, 2017).  
<https://doi.org/10.17863/CAM.8922>.
5. Para la metodología, ver por ejemplo, M F Ashby, “*Materials Selection in Mechanical Design*”, 5ª edición, Butterworth Heinemann, Oxford, UK. (2016) ISBN: 978-0-08-100599-6.
6. Galos, J.L., Sutcliffe, M.P.F, Newaz, G. “*Design, fabrication and testing of sandwich panel decking use in road freight trailers*”, publicado en *Journal of Sandwich Structures and Materials*, aceptado en sept. 2016.