



**industriales**  
etsii

**Escuela Técnica  
Superior  
de Ingeniería  
Industrial**

# **UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA**

**Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Industrial**

## **Selección de materiales para componentes estructurales**

### **TRABAJO FIN DE GRADO**

**GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA (BOE 30-11-2011)**

**Autor:** Hernández Fernández, Juan  
Antonio

**Director:** Pamies Porras, Ramón  
Francisco

**Codirector:** Sánchez Rodríguez, Cristian

Cartagena, 10 de diciembre de 2020



**Universidad  
Politécnica  
de Cartagena**

## **AGRADECIMIENTOS Y DEDICATORIA**

*A la Universidad Politécnica de Cartagena y todos sus profesores, por la excelente formación que recibí.*

*A mi director de TFG, Ramón Pamies, por su consideración, su profesionalidad y apoyo incondicional para llevar este trabajo por buen cauce. Pero, sobre todo, por su buena voluntad.*

*A mi codirector, Cristian Sánchez, por trasmitirme su entusiasmo y amabilidad al comienzo del primer TFG que la pandemia obligó a suspender.*

*A mis amigos, mis compañeros, con los que he compartido más que apuntes, maravillosos momentos.*

*A mi pareja, Ana; por su apoyo incondicional, por confiar en mi en los momentos en los que me veía superado. Por estar siempre en los mejores instantes, y mucho más importante, en los peores.*

*A mi familia, lo más importante. Sin ellos no habría sido posible todo esto, pero, por encima de todo, no sería la persona que hoy en día soy.*

# ÍNDICE

1. Introducción .....	7
1.1 Los materiales en el diseño .....	7
1.2 Evolución histórica de los materiales .....	11
1.3 Ecodiseño: Impacto medioambiental de la industria y los materiales. Aplicación en la industria automotriz.....	15
1.4 Reciclaje de materiales, economía circular y no circular .....	21
2. Objetivos .....	24
• Seleccionar materiales para fabricar estructuras en función de sus propiedades mecánicas, durabilidad, procesabilidad e impacto ambiental.....	24
• Establecer la viabilidad de las diferentes opciones presentadas ambiental y económicamente.....	24
3. Metodología.....	25
3.1 Cambridge Engineering Selector (CES).....	25
3.2 Ecoauditoría (análisis de ciclo de vida) .....	29
3.3 Selección de materiales conforme a propiedades mecánicas:.....	33
4. Resultados.....	36
4.1 . Componentes de automóviles: comparativa y diferentes opciones de selección. 36	
4.2 Análisis del ciclo de vida de algunos componentes estructurales de automóviles: ecoauditorías.....	49
4.3 Evaluación económica de los componentes.....	88
5. Resumen y conclusiones .....	91
6. Bibliografía.....	94

## Tabla de imágenes

Figura 1-1. Interacciones entre material, función, forma y proceso. [1].....	8
Figura 1-2. Atributos del material condicionados por la funcionalidad. [1].....	9
Figura 1-3. Taxonomía de los materiales [1].....	11
Figura 1-4. Evolución histórica de los materiales. Importancia relativa. Nótese que la escala no es lineal [1].....	14
Figura 1-5. Economía de vida circular de los materiales y productos. ....	22
Figura 3-1. Herramientas y servicios varios proporcionados por CES EduPack .....	25
Figura 3-2. Búsqueda de materiales y procesos en CES.....	27
Figura 3-3. Descripción y propiedades de materiales en CES (chasis de aluminio).....	28
Figura 3-4. Crear gráfico de propiedades en CES .....	29
Figura 3-5. Gráfico de propiedades CES (Precio vs Densidad) .....	29
Figura 3-6. Fases dominantes de la vida de un producto .....	30
Figura 3-7. Material, fabricación y fin de ciclo del producto-1 .....	30
Figura 3-8. Material, fabricación y fin de ciclo del producto-2 .....	31
Figura 3-9. Transporte y uso del producto.....	31
Figura 3-10. Gráficas CO <sub>2</sub> (kg) y Energía consumida (MJ).....	32
Figura 3-11. Resumen CO <sub>2</sub> (kg) y Energía consumida (MJ).....	32
Figura 4-1. Materiales más usados en la fabricación de componentes estructurales de automóviles [10].....	36
Figura 4-2. Proceso de fabricación de los aceros avanzados de gran resistencia (AHSS) ...	39
Figura 4-3. Componentes estructurales fabricados con AHSS. Nótese que los AHSS están designados como aceros de tercera generación (3GEN) [13] (Esta ilustración es cortesía de United States Steel Corp., Pittsburgh).....	40
Figura 4-4. Diagrama global de clasificación de los aceros. ....	41

Figura 4-5. Principales piezas manufacturadas de fundición de hierro en vehículos [14].....	41
Figura 4-6. Carrocería de aluminio del Audi A8 (2010) [16] .....	44
Figura 4-7. Materiales de la carrocería del BMW serie 5 (2010) [16] .....	45
Figura 4-8. Estructura de los polímeros termoplásticos. En línea (izquierda), ramificada (derecha).....	47
Figura 4-9. Estructura de los elastómeros. ....	47
Figura 4-10. Estructura molecular de los polímeros termoestables .....	48
Figura 4-11. Parachoques y capó de fibra de vidrio.....	49
Figura 4-12. Ruta de transporte del vehículo desde la fábrica en Poissy, Francia (A), hasta el concesionario en Cartagena, España (B) .....	51
Figura 4-13. Modelo Peugeot 208 año 2020.....	52
Figura 4-14. Diagrama de los tratamientos térmicos para el endurecimiento estructural de la aleación de aluminio 2017.....	54
Figura 4-15. Proceso de deformación plástica (estampación en frío).....	56
Figura 4-16. Proceso de deformación plástica (laminado).....	57
Figura 4-17. Desarrollo sostenible.....	58
Figura 4-18. Energía consumida (MJ) en las diferentes fases de vida del chasis como componente de un vehículo .....	61
Figura 4-19. Energía consumida y ahorrada (MJ) en el fin de vida del chasis. Nótese que las energías correspondientes a los chasis <b>reciclados son positivas</b> , puesto que se han representado en valor absoluto en términos de <b>energía ahorrada</b> . ....	63
Figura 4-20. Huella de carbono emitida en las diferentes fases de vida del chasis como componente de un vehículo, CO <sub>2</sub> (kg).....	64
Figura 4-21. Huella de carbono emitida y ahorrada, CO <sub>2</sub> (kg) en el final de vida del chasis. Nótese que el CO <sub>2</sub> correspondiente a los chasis reciclados es ahorrado y para los otros dos, emitido. Se han representado en valor absoluto.....	65
Figura 4-22. Energía consumida (MJ) durante el uso del chasis como componente de un vehículo diésel, híbrido y eléctrico. ....	68

Figura 4-23. Huella de carbono emitida durante el uso del chasis como componente de un vehículo, CO <sub>2</sub> (kg) .....	68
Figura 4-24. Moldeo por compresión de PPGF (SMC) .....	73
Figura 4-25. Maquinaria empleada para el moldeo de un parachoques de PPGF.....	74
Figura 4-26. Energía consumida (MJ) en las distintas fases de vida de los parachoques fabricados en acero, aluminio y PPGF. ....	76
Figura 4-27. Huella de carbono emitida CO <sub>2</sub> (kg) en las distintas fases de vida de los parachoques fabricados en acero, aluminio y PPGF .....	79
Figura 4-28. Reciclado de la aleación de aluminio. Base de datos: CES EduPack.....	81
Figura 4-29. Reciclado de la fibra de vidrio SMC. Base de datos: CES EduPack.....	81
Figura 4-30. Fundición en molde de arena de un bloque motor.....	83
Figura 4-31. Energía consumida (MJ) en las distintas fases de vida del bloque motor de fundición gris y aluminio. ....	84
Figura 4-32. Energía consumida (MJ) en escala lineal en la fase de fin de vida del bloque motor de fundición gris y aluminio. Nótese que los valores serian negativos, pero están expresados en valor absoluto, en términos de energía ahorrada. ....	85
Figura 4-33. Huella de carbono emitida CO <sub>2</sub> (kg) en las distintas fases de vida del bloque motor de fundición gris y de aluminio. ....	86
Figura 4-34.. Huella de carbono eliminada, CO <sub>2</sub> (kg) en la fase de fin de vida del bloque motor de fundición y de aluminio. Nótese que los valores serían negativos, pero están representados en valor absoluto, en términos de huella de carbono reducida. ....	87

## Índice de tablas

Tabla 1. Niveles CES EduPack [5] .....	26
Tabla 2. Principales materiales para la fabricación de componentes de automóviles y su peso (Kg). .....	37
Tabla 3. Temperatura de fusión de algunos metales empleados en automoción.....	43
Tabla 4. Resumen de los materiales y peso de los componentes estudiados .....	50
Tabla 5. Valores de energía consumida y huella de carbono emitida por los chasis de aluminio y acero. ....	66
Tabla 6. Valores de energía consumida y huella de carbono de los chasis de aluminio y acero para vehículos diésel, híbridos y eléctricos.....	69
Tabla 7. Valores de energía consumida y huella de carbono de los parachoques de acero, aluminio y PPGF .....	80
Tabla 8. Valores de energía consumida y huella de carbono de los .....	88
Tabla 9. Precio de los materiales de los componentes del vehículo. ....	89

# 1. Introducción

## 1.1 Los materiales en el diseño

Hoy en día, con más materiales que nunca, las oportunidades de diseño e innovación son extraordinarias. Cada vez, nuestra capacidad tecnológica y científica es mayor: gran disponibilidad de materiales, versatilidad en la organización de procesos, mayor formación profesional, mejora en el cumplimiento de requisitos y normativas, aumento de la capacidad administrativa etc. El desarrollo tecnológico crece con celeridad, haciendo cada vez más tediosa la fase de selección del material, procurando no intentar caer en la elección de uno demasiado convencional dentro de tal amplia gama de materiales. Esa elección conservadora puede funcionar. Sin embargo, rechaza la posibilidad de innovar. El **diseño** es el proceso de traducir una nueva idea o una necesidad del mercado en la información detallada a partir de la cual se puede fabricar un producto.

Resulta inmensurable la cantidad de materiales de la que dispone el ingeniero para fabricar su diseño. Cada vez, se desarrollan materiales más novedosos y con propiedades aún más asombrosas. Este puede ser el ejemplo del grafeno, un material que podría proporcionarnos grandes avances tecnológicos en el futuro gracias a sus numerosas propiedades y aplicaciones en los distintos campos de la ciencia. Es extremadamente fino, por lo que puede considerarse bidimensional, es un superconductor, transparente, muy resistente y flexible; que ya tiene aplicación en la fabricación de algunos dispositivos electrónicos, baterías, sensores químicos o tinta conductora.

A pesar de todo, conforme avanza la fase de diseño, la selección del material se va acotando cada vez más, ajustándose de mejor manera a las funciones que vaya a desempeñar durante su vida útil. El proceso de selección resulta cuanto menos complejo y ha de tener en cuenta diferentes factores, tales como: la disponibilidad de este, la procesabilidad del producto, su función, su forma, su valor en el mercado, el impacto ambiental, etc.



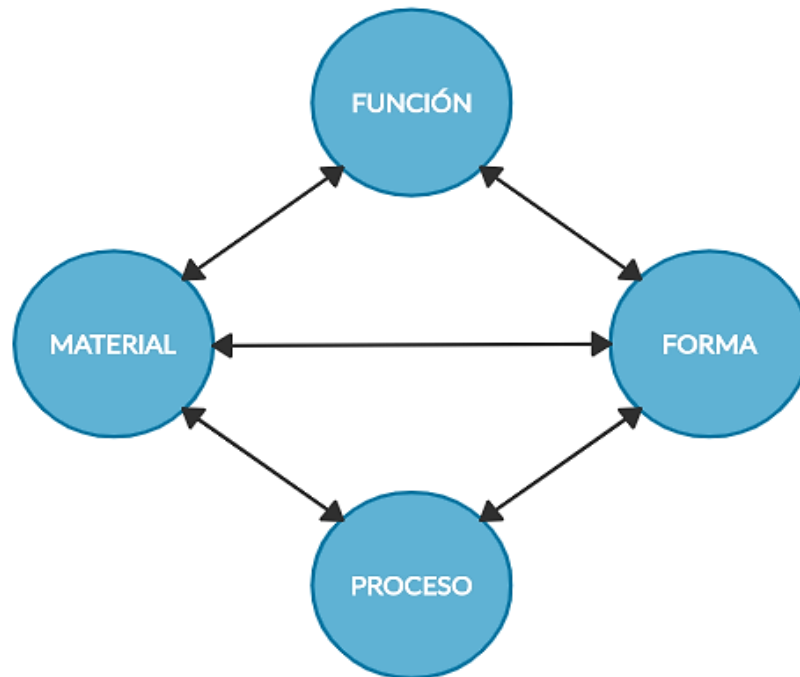


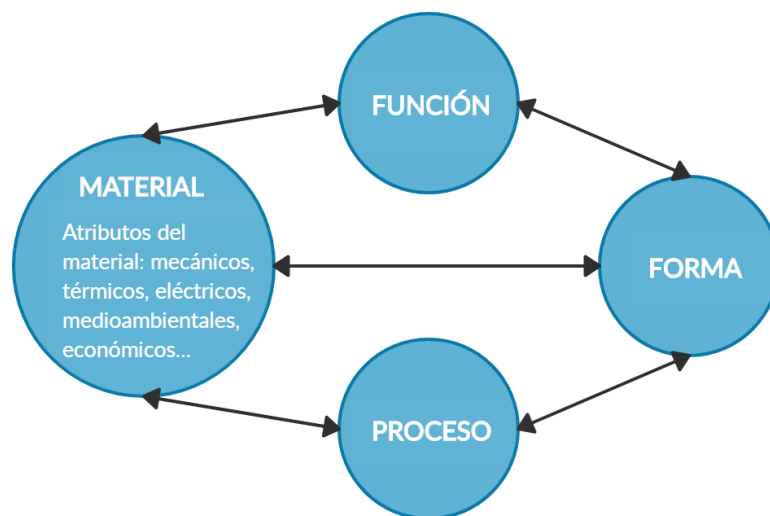
Figura 1-1. Interacciones entre material, función, forma y proceso. [1]

La distinción del material no puede realizarse independientemente del proceso de fabricación que se vaya a utilizar para dar forma y elaborar el diseño. Y, obviamente, no se puede descuidar su funcionalidad. Todos estos detalles entran en el coste final. Aun así, una correcta interacción entre las fases anteriores no tiene por qué ser suficiente para que éste tenga éxito en las ventas. En casi cualquier artículo es importante la estética: su forma, su color, su tacto... Es decir, todo aquello que favorezca la satisfacción de la persona que lo adquiere. La correcta interacción entre todos estos factores es necesaria para llevar a cabo un buen diseño. [1] *“Los buenos diseños funcionan; los excelentes además dan placer”* (Michael F. Ashby, 1999)

Así mismo, se podría decir que un diseño posee infinitas soluciones. O, mejor dicho, que no tiene una única solución posible y/o correcta. Por este motivo, junto a los temas expuestos con anterioridad (Figura 1-1. Interacciones entre material, función, forma y proceso) la experiencia e imaginación de los científicos e ingenieros es clave para llegar a una

solución; que bien, sin tener la completa necesidad de ser la más óptima, sea capaz de cumplir con su función y los requisitos demandados.

Otro punto importante en el proceso de selección del material trata de reforzar el vínculo existente entre el propio material y su función a desempeñar (*Figura 1-2. Atributos del material condicionados por la funcionalidad. [1]*). En función de cual su finalidad, el material en cuestión deberá requerir cierta resistencia, tenacidad, ligereza (baja densidad), resistencia a la corrosión, coste razonable, o bien, una combinación de éstos. Por consiguiente, será de vital importancia identificar los atributos y cualidades que deberá de tener el diseño para poder afrontar con seguridad las condiciones ambientales o de servicio a las que sea sometido. De este modo, se podrá realizar una comparación más exacta entre los diversos materiales aptos para el diseño. [1]



*Figura 1-2. Atributos del material condicionados por la funcionalidad. [1]*

Resulta significativo no prescindir en primera instancia de alguno de los posibles materiales al comienzo de la selección; dado que, se podría caer en la trampa de perder una valiosa oportunidad de diseño. Dicha praxis resulta una inversión de tiempo y dinero, la cual se intenta traducir en una optimización del diseño, que por supuesto, reducirá sus costes. Hoy

en día es de vital importancia ajustar al máximo el coste de un producto. Se busca calidad con una inversión razonable, que permita al producto ser competente dentro del mercado. Para continuar cercando la selección, como bien señala Michael F. Ashby [1]:

Es posible conseguir un mayor acotamiento mediante la clasificación de las diferentes opciones por su capacidad para maximizar el rendimiento. Normalmente, el rendimiento queda limitado por la acción conjunta de varias propiedades del material. Los mejores materiales para un tirante ligero y rígido son aquellos que tienen el mayor valor de la "modulo específico" (capacidad de un objeto sólido o elemento estructural para soportar esfuerzos sin adquirir grandes deformaciones o desplazamientos),  $E/\rho$ , donde E es el módulo de Young y  $\rho$  la densidad. Por otro lado, en el caso de un resorte, se priman los materiales con el mayor valor de  $\sigma_f^2/E$ , donde  $\sigma_f^2$  es la tensión máxima que el material es capaz de soportar. Los materiales que mejor resisten a la temperatura son los que tienen el mayor valor  $\sigma_f/E\alpha$ , donde  $\alpha$  es el coeficiente de expansión térmica; y así sucesivamente. Estos tipos de combinaciones se denominan índices del material. Se tratan de agrupaciones de propiedades tales que, al maximizarse, mejoran algún aspecto del rendimiento. Se obtienen de los requisitos de diseño de un componente mediante un análisis de la función, objetivos y limitaciones.

Dicho criterio se asemeja a un tipo de selección basado en las propiedades mecánicas del material; punto que será comentado más adelante en el capítulo de *Metodología*.

Como ya se ha mencionado, los materiales se caracterizan por un conjunto de atributos en los que incluyen sus diversas propiedades: físicas, químicas (mecánicas, térmicas, eléctricas...), además de sus características en cuanto a su procesabilidad, coste y consecuencias medioambientales que produciría su obtención, fabricación, transporte, uso y fin de vida. La taxonomía de los materiales (*Figura 1-3. Taxonomía de los materiales* [1]) permite clasificar estos atributos y, resulta un apoyo para el proceso de selección. De esta forma, los materiales pueden subdividirse en familias, clases, subclases y miembros; donde cada uno de ellos se caracteriza por una serie de propiedades.

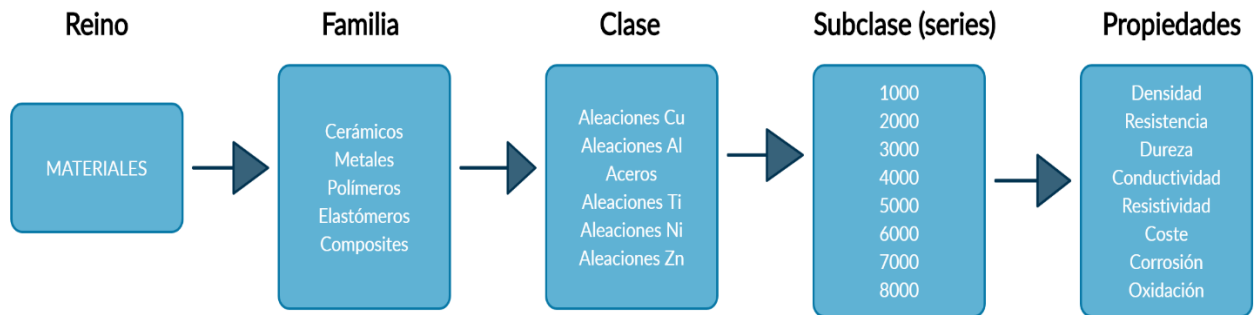


Figura 1-3. Taxonomía de los materiales [1]

## 1.2 Evolución histórica de los materiales

Aquello que siempre ha primado más un diseño, motivado a raíz de una necesidad, ha sido esa capacidad inherente del ser humano para imaginar y crear. Desde la prehistoria hasta el día de hoy, la selección de materiales para fabricar piezas, componentes, artilugios o herramientas; ha estado presente imperecederamente. De esta forma, escogiendo de manera eficiente cada material para usos determinados, el ser humano ha ido evolucionando y mejorando sus capacidades tecnológicas. Desde las primeras armas de caza fabricadas con madera y Sílex, hasta los componentes electrónicos más sofisticados hechos de silicio en la actualidad. Cada época a lo largo de la historia ha estado señalada por un tipo de material cuyo uso ha sido destacado por encima del resto. De ahí, que las diferentes civilizaciones de la historia hayan recibido el nombre del material por el cual estuvieron marcadas: Edad de Piedra, Edad del Cobre, Edad de Bronce, Edad del Hierro. La obtención del mineral de hierro necesita de una tecnología más sofisticada que la asociada a la producción de bronce, que a su vez tiene mayor complejidad que el uso de la piedra.

Con el paso del tiempo, la importancia relativa de los **metales** se ha ido incrementando de forma considerable. En la prehistoria, exclusivamente se hacía uso de metales preciosos como el oro, que eran los únicos que se encontraban en estado desoxidado y no se necesitaba de herramientas complejas para su extracción. A medida que mejoraban las técnicas de afino,

los metales se han ido haciendo cada vez más notables. Su punto álgido se encuentra en la mitad del siglo XX, coincidiendo en este periodo con la primera y segunda Guerra Mundial. Esto no es casualidad, y es que debido a los conflictos bélicos la producción basada en el metal se disparó (sector armamentístico). Hoy en día podemos encontrar aleaciones de metales mucho más sofisticadas, como las aleaciones de Ti-Ni o los aceros dúplex.

En cuanto a los **polímeros**, cabe resaltar una pendiente descendente respecto a su importancia relativa al principio de la historia. No es hasta que se descubrió por accidente el caucho vulcanizado (material del que están hechos actualmente los neumáticos) y se sintetizó el primer polímero sintético (baquelita) alrededor del año 1900, que los polímeros empezaron a cobrar mayor importancia. Surgieron así, materiales poliméricos como el polietileno (PE), polipropileno (PP), resinas epoxi y polímeros de altas prestaciones. Este último grupo se corresponde a aquellos que presentan mejores propiedades mecánicas y a los polímeros resistentes a altas temperaturas, como el ABS, PEEK, PA... Las principales aplicaciones de estos polímeros de altas prestaciones podrían ser aquellas en las que se someta al material de forma prolongada a temperaturas elevadas y desgaste. Entre las aplicaciones más usuales se encuentran la fabricación de piezas de conectores de línea de combustible y bombas de refrigerante, además de almohadillas de cojinetes en y bujes, bombas en la industria petrolífera y de generación de energía.

Por otra parte, se encuentran los **composites**. Se tratan de aquellos materiales formados a partir de la unión, mediante diferentes técnicas, de dos o más materiales. Con esto se puede llegar a conseguir ciertas propiedades de las que carecen los materiales originales por sí solos. Dichos compuestos surgen de la necesidad de obtener combinaciones de las propiedades de los cerámicos, los plásticos y los metales. En todos ellos se pueden distinguir dos componentes, fibras y matriz. Las fibras, de carácter discreto, son las encargadas de definir las propiedades mecánicas del material, según su orientación y geometría. Mientras que la matriz, de carácter continuo, es la responsable de las propiedades

tanto físicas como químicas. Además, transmite los esfuerzos a las fibras y da cohesión al material. Los podemos clasificar de la siguiente manera:

- Tipo de matriz:
  - Composites de matriz metálica.
  - Composites de matriz cerámica (CMC).
  - Composites de matriz polimérica (PMC).
  
- En función de la forma del reforzante:
  - Refuerzo por partículas.
  - Refuerzo por fibras.

Las principales matrices utilizadas en los composites son:

- Termoplásticos: son polímeros con una temperatura de transición vítrea relativamente baja que adquieren fluidez y flexibilidad al calentarse. Al enfriarse, partiendo del estado líquido como origen y en función de la temperatura a la cual sea sometido durante la solidificación, la formación de microestructuras sólidas cristalinas o no cristalinas podrá llevarse a cabo.
- Elastómeros: se tratan de aquellos polímeros con cadenas moleculares dotadas de gran libertad de movimiento. Esto los hace ser bastante flexibles.
- Termoestables: estos polímeros no son capaces de fluir por efecto de la temperatura. Poseen una estructura entrelazada, lo que los dota de cierta rigidez. Suelen tratarse de resinas. A temperatura ambiente son duros y frágiles.

Por último, se encontrarían los materiales cerámicos. Estos también poseen una pendiente descendente al igual que los polímeros en cuanto a importancia relativa desde su aparición hasta mediados del siglo pasado. Se caracterizan sobre todo por su elevada dureza y resistencia a la temperatura, por lo que suelen ser utilizados como materiales abrasivos. Cabe destacar que esto provoca, además, que se trate de un tipo de material frágil.

Como se puede observar en la siguiente ilustración, la tendencia actual de los materiales en general es conseguir una homogeneidad en cuanto a su influencia relativa. Es decir, se trata de buscar un equilibrio. [2]

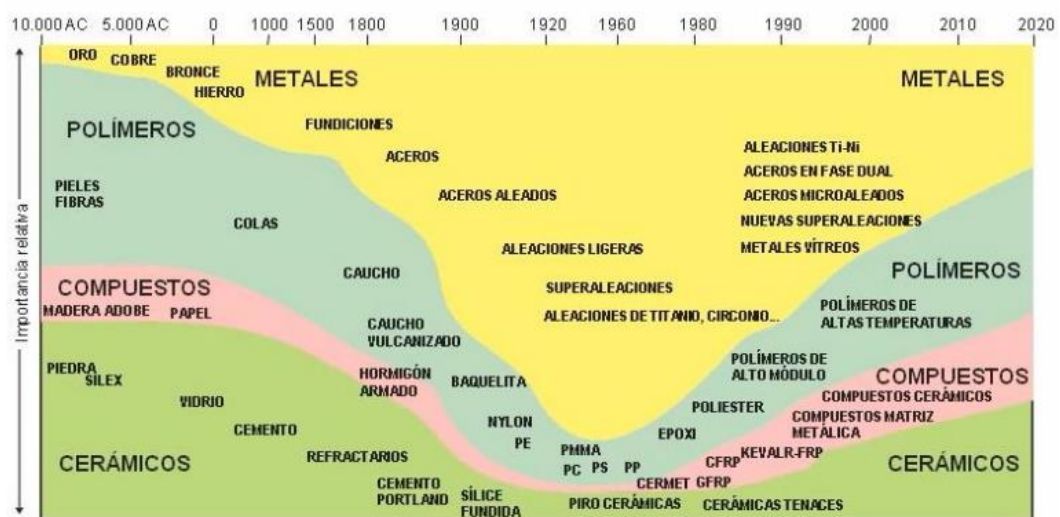


Figura 1-4. Evolución histórica de los materiales. Importancia relativa. Nótese que la escala no es lineal [1]

La evolución de los materiales en ingeniería a lo largo de la historia ha provocado que se su uso en la industria haya sido cada vez más efectivo. Actualmente, persigue encontrar propiedades como: la disminución del cote energético, reducción del peso, incremento de la resistencia y características mecánicas en general, reducción de la contaminación en su uso y desecho y la creciente tendencia a buscar materiales que sean biodegradables. [3]

### 1.3 Ecodiseño: Impacto medioambiental de la industria y los materiales. Aplicación en la industria automotriz.

La utilización de vehículos produce un **12% del total de las emisiones de CO<sub>2</sub>** en el continente europeo, lo cual repercute a que el sector automovilístico tenga que enfrentarse a una legislación cada vez más restrictiva en lo que respecta a las emisiones de CO<sub>2</sub>. La norma actualmente vigente se corresponde a **la Euro 6**, que hace una diferenciación de los límites de gases contaminantes emitidos por los vehículos diésel y gasolina. Esta norma afecta en mayor medida a los turismos con motor diésel, ya que es especialmente estricta con los con los óxidos de nitrógeno y las partículas de carbón. A principios del 2020 se realizó una actualización de la norma que dio lugar a la **Euro 6d**, que busca cumplir con el objetivo de la Comisión Europea de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en un 80 % en 2050. Se menciona en estudios como *The Material and Energy Impacts of Passenger Vehicle Weight Reduction*, que una **disminución de un 10% de la masa de un automóvil conlleva una reducción del 7% en el consumo**, lo que provoca que los materiales compuestos tengan cada vez un papel más importante debido a la ligereza que aportan, además de caracterizarse por tener buenas propiedades mecánicas. [4]

Se define impacto ambiental como “el efecto que produce la actividad humana sobre el medio ambiente”. Éste es considerado cuando se observan al menos varios tipos de contaminación, como la contaminación del aire, del agua y del suelo. La acción humana siempre repercute en mayor o menor medida en la naturaleza. Es por ello por lo que se utilizan métodos para identificar y evaluar el impacto ambiental que una actividad o proyecto pueda producir en el medio.

Todos los proyectos han de ser sometidos a una Evaluación del Impacto Ambiental. Tras la finalización de este proceso, el órgano competente, en este caso el ambiental, está en disposición de emitir el documento de Declaración de Impacto Ambiental (DIA), de carácter oficial; el cual contiene los principales puntos de evaluación, aprobando o no el proyecto desde un punto de vista ambiental. En el caso de realizarse sobre productos, materiales o servicios,



este tipo de informes se elaboran a través del análisis de ciclo de vida siguiendo las normas ISO 14040 y 14044, denominándose Declaración Ambiental de Producto (EDP por sus siglas en inglés).

La principal fuente de energía más utilizada hoy en día sigue siendo los combustibles fósiles. Es sabido que los derrames de petróleo por accidentes de buques producen daños que se reflejan en la fauna, vegetación y aguas, ocasionando un deterioro del medio ambiente. Cabe destacar el petróleo y aceites provenientes de la industria y de los automóviles llega a los océanos por mediación de ríos y drenajes de las ciudades. Se conoce que, a nivel mundial, son vertidos 3.500 millones de litros de petróleo usado a los mares.

Por otra parte, se encuentre el problema de los gases contaminantes y de efecto invernadero como el CO<sub>2</sub> que produce la industria en general y el sector automovilístico. Uno de los gases contaminantes más peligrosos es el dióxido de azufre, capaz de producir daños en el sistema respiratorio e irritaciones en la piel y ojos.

También está la cuestión de la contaminación acústica que se produce en las ciudades y las industrias, el cual puede afectar significativamente al sistema nervioso y a la capacidad auditiva de las personas.

La extracción de minerales y materiales suele producir impactos ambientales negativos. Normalmente, el daño que resulta más difícil de solventar a largo plazo es el tratamiento de las aguas. Hace años, las empresas no se veían obligadas a solventar los problemas ambientales que pudieran ocasionar y los recursos y las zonas explotadas quedaban destrozadas. Por suerte, esto ya no sucede hoy en día; o al menos, se pretende que no suceda. Debido a ello, han aparecido en los últimos años garantías y formas de asegurar que el causante directo de la contaminación de un suelo o zona explotada tenga que pagar por los problemas de contaminación que pudiera ocasionar [5].

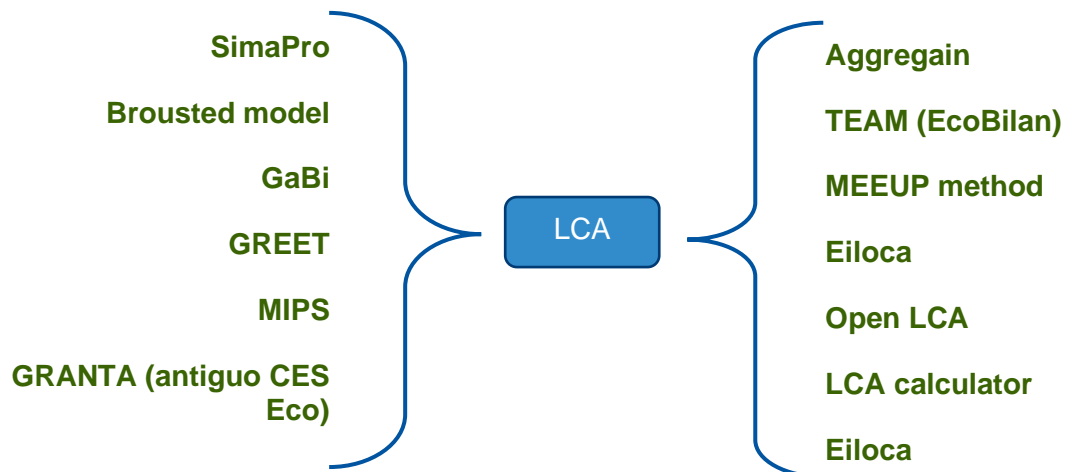
## **Clasificación y características de los impactos ambientales.**

La clasificación de los impactos ambientales tiene como objeto realizar una evaluación ambiental adecuada. Se comprueba además su magnitud e importancia. Se detallan de la siguiente manera:

- **Tipo de impacto:** Puede ser directo, si es la misma acción del proyecto la que provoca el propio impacto; o bien, indirecto, en el caso de que éste sea producido por el propio proyecto, pero no de forma inmediata. Un impacto puede resultar acumulativo si se ocasiona debido a la superposición en el tiempo de varios impactos provocados por otros proyectos o actividades en el pasado.
- **Naturaleza:** Los impactos son positivos en el caso de que produzcan efectos favorables en el medio, o negativos, si provocan efectos dañinos.
- **Magnitud:** Se refiere a la cantidad o a la dimensión de los elementos afectados por el impacto en cuestión.
- **Intensidad:** Se define como el daño ocasionado sobre un elemento. Un ejemplo de ello sería el impacto producido en un suelo cuando éste es excavado o cuando simplemente se elimina vegetación.
- **Frecuencia:** Es la periodicidad con la que surge un cierto impacto, pudiendo ser puntual, si aparece una única vez, o periódico, si se repite en el tiempo.
- **Duración:** El impacto puede ser temporal, si solamente existe durante un periodo de tiempo; o bien, permanente si este se mantiene indeterminadamente en el medio ambiente.
- **Reversibilidad:** La reversibilidad se da cuando las condiciones iniciales del medio dañado son posibles de recuperar. En caso contrario, el impacto será irreversible.

- **Extensión:** Es el área dañada por un impacto.
- **Certeza de la predicción:** Es referido a la probabilidad de que un impacto ambiental ocurra con cierta confianza.

Con el fin de hacer una selección de materiales que impliquen un trato correcto con el medio ambiente su puede hacer uso del análisis de ciclo de vida o LCA. Con este estudio se puede identificar qué fase de la vida de un producto domina en términos de impacto ambiental, mediante la evaluación del consumo energético y la huella de carbono emitida. Existen numerosos programas con amplias bases de datos que permiten la realización de este estudio. Algunos de estos programas se citan en el siguiente esquema:



Una de las ventajas de las citadas herramientas es que sus bases de datos contienen información sobre ecopropiedades de los materiales y procesos de fabricación, por lo que será de gran ayuda a la hora de hacer una selección en el contexto de reducción de impacto ambiental.

Las etapas del análisis de ciclo de vida se corresponden a:

### **Materiales:**

La gama de materiales para elegir es inmensurable. Las posibilidades abarcan todo tipo de cerámicos, vidrios, materiales compuestos, metales, aleaciones y polímeros y elastómeros. Cada uno de estos grupos se subdivide a su vez en otros con mayores especificaciones. Además, con la ayuda de métodos gráficos es relativamente sencillo acotar cierto subgrupo de materiales en función de las características que el diseñador necesite. Permite realizar estudios con varios materiales para poder compararlos y sacar conclusiones sobre el consumo energético y la contaminación que producen. Cabe destacar que esta etapa tiene en cuenta el método de obtención del material para realizar las estimaciones.

### **Fabricación:**

En esta fase se evalúa el tipo de proceso mediante el cual es manufacturado el producto. Incluye una amplia índole de conformados, como procesos de deformación plástica, mecanizados, moldeo de polímeros, fundición, fabricación aditiva, etc. Además, contiene tratamientos superficiales como imprimaciones o tratamientos térmicos, así como métodos de unión como la soldadura o adhesivos. Cada proceso precisa de un apartado en el que se refleja sus principales eco propiedades negativas y/o positivas. La mejor forma de perseguir un ecodiseño es mediante la **fabricación sostenible y el lean and sustainable manufacturing**, que se podría definir como “aquellos procesos de fabricación que reducen los impactos ambientales perjudiciales conservando los recursos naturales la energía, son seguros para los empleados, las comunidades y los consumidores y son rentables económicamente. Estos recursos permiten un uso más adecuado de la energía y de los recursos materiales utilizados en los procesos de fabricación, evitando de esta manera un derroche innecesario de energía que se traduciría en pérdidas económicas y deterioro

medioambiental. Estos conceptos serán explicados con mayor profundidad en el capítulo 4:

*Resultados.*

## **Transporte**

La fase de transporte del producto permite estudiar la contaminación y el consumo de energía durante el traslado del producto, desde la fábrica hasta su punto de venta, por ejemplo; mediante el uso de diversos medios de transporte como: ferrocarril, buque de mercancías, avión, helicóptero y transporte por carretera en tráiler de 14 y 32 toneladas. Es recomendable evitar en la medida de lo posible el transporte en estos últimos vehículos, los cuales producen una huella de carbono mucho mayor y optar por aquellos que sean medioambientalmente más sostenibles como el ferrocarril y en mayor medida la navegación marítima [6].

## **Uso**

En este nivel se estima la energía y la contaminación producida durante la utilidad del producto, que puede ser de horas, días, meses o años. Si el producto necesita directamente de energía eléctrica para su funcionamiento, es necesario especificar el ratio de potencia que éste consume. Por otro lado, si el componente forma parte de un vehículo, se ha de especificar el tipo y el combustible que utiliza, ya sea para un barco, un tren, un coche utilitario o un vehículo aéreo. Para este último escenario en el que el producto forma parte del conjunto de un vehículo, el factor que va a influir directamente en el consumo y, por tanto, en las emisiones de CO<sub>2</sub> es el propio peso del componente. La relación entre ambos es directa, mayor masa implica mayor consumo.

## **Fin de vida**

Esta última etapa del LCA estima la energía consumida y la huella de carbono emitida tras convertirse el producto en un deshecho, desperdiciado en el vertedero. Sin embargo, en función de las eco propiedades del material, de si éste es reciclable, reutilizable o puede ser sometido a algún tipo de proceso de aprovechamiento de energía mediante su degradación, también se pueden estimar los niveles de energía ahorrados o generados, así como la reducción de la huella de carbono que ello conlleva. En el caso de los materiales que conforman un turismo, casi su totalidad son reciclables, ya que la mayoría de sus componentes están fabricados de metales como el acero o el aluminio, vidrio o algunos polímeros como el poliuretano o el poliéster. Este último no es reciclable ni biodegradable, aunque puede aprovecharse para generar energía mediante su combustión.

### **1.4 Reciclaje de materiales, economía circular y no circular**

La reutilización y reciclado de materiales y componentes es una práctica muy interesante, a la vez que rentable, la cual permite ahorrar energía de forma significativa. Además, el reciclaje ayuda a minimizar la explotación de recursos naturales, ya que la economía de vida circular de algunos materiales permite que la demanda de su materia prima sea inferior. Estos métodos de explotación son normalmente invasivos y perjudican al medioambiente. Por consiguiente, el reciclado también repercute en la disminución de la huella de carbono.

Con el paso de los años, la industria ha ido evolucionando, dejando atrás el sistema económico de “**extraer-producir-usar-tirar**”. Es por ello por lo que surgió el concepto de **economía circular** que amplíe la vida de los productos para evitar una explotación de recursos y generación de residuos innecesaria del clásico sistema lineal. La economía circular se podría definir como “aquel modelo de producción y consumo que implica compartir, alquilar, reutilizar, reparar, renovar y reciclar materiales y productos existentes todas las veces que sea posible para crear un valor añadido”. En la práctica, implica reducir lo máximo posible los

residuos y desechos. El ciclo que atraviesa un producto o material cuya economía de vida es circular empieza por la obtención de la materia prima que, gracias a un diseño, pasará a ser producido o refabricado. Posteriormente será distribuido y adquirido por el consumidor, usado, reutilizado o reparado y tras completar su vida útil será desechado. Finalmente, los residuos son tratados y reciclados, de forma que es posible reintroducir el material de nuevo al comienzo de este ciclo de forma a priori, infinita. [7]



Figura 1-5. Economía de vida circular de los materiales y productos.

Hay numerosas materias primas que son finitas, y como la población mundial está aumentando, también lo hace la demanda. A largo plazo, esto supone un problema que hay que remediar dado que esto deriva a una escasez de recursos. Su extracción puede considerarse en cierto modo una industria estratégica, ya que hay ciertos países que son los productores mundiales de algunos materiales y el resto de los países dependen de ellos. La extracción de materias primas supone además un fuerte impacto ambiental al aumentar el consumo de energía y las emisiones de CO<sub>2</sub>. Por estos motivos, es conveniente instaurar una

economía de vida circular en los materiales, con medidas de reducción de la contaminación y la explotación de recursos, medidas como la prevención de residuos, diseño ecológico, el reciclado y la reutilización, que podrían generar ahorros netos de 600.000 millones de euros, o un 8% del volumen de negocios anual, para las empresas de la UE, al tiempo que reducirían las emisiones totales anuales de gases de efecto invernadero entre un 2 y un 4%. [7]

Algunos ejemplos de productos con una economía de vida circular son aquellos elaborados a partir de metales, ya sean férricos o no. El acero y el aluminio, siendo dos de los máximos exponentes dentro de la industria metalúrgica y siderúrgica, son completamente reciclables y sus propiedades no se ven perjudicadas tras este proceso. Se podría que siguen un ciclo prácticamente infinito. Además, las técnicas y procesos de reciclado de este tipo de materiales son económicamente viables y eficientes.

Sin embargo, hay algunos materiales que no pueden ser reciclados y están condenados a terminar su vida útil en el vertedero o bien, son sometidos a determinados tipos de reciclaje mediante los cuales se posibilita la generación de energía a través de la descomposición del material, como puede ser la combustión o la pirólisis, muy utilizados al final de vida útil de algunos materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras. O bien, como es el caso de algunos plásticos que son sometidos a una degradación mediante un reciclaje químico. No se aprovecha la energía del material, pero se evita su acumulación en forma de desecho. En ambos casos, la economía de vida de los materiales no es circular y resulta imposible actualmente, reutilizarlos para otras aplicaciones.



## 2. Objetivos

El principal objetivo de este trabajo reside en realizar una selección de materiales para la fabricación de determinados componentes estructurales de automóviles de uso convencional. Esta selección se realiza en base a la extracción, procesabilidad e impacto ambiental que produzca el componente durante todo su ciclo de vida; sin descuidar la importancia de unas buenas prestaciones mecánicas características de elementos como el chasis, el parachoques o el bloque motor. Se establece, por tanto, el impacto ambiental como factor principal, que será la base principal del estudio y el resto, variables complementarias; aunque no por ello dejan de ser de gran relevancia. Se hará uso de herramienta ecoauditoría del programa CES EduPack para el análisis del ciclo de vida, el cual establece la energía consumida y la huella de carbono emitida durante las fases de extracción, fabricación y uso del producto. Por lo tanto, el resto de los factores están relacionados con el impacto ambiental. Los resultados obtenidos para cada componente fabricado de distintos materiales, con propiedades similares, serán objeto de comparación y se establecerá cuál de ellos se ajusta mejor a las premisas deseadas.

Seguidamente, se realiza una evaluación económica con el fin de establecer la viabilidad económica de los diferentes componentes mediante la comparación de precios. Sin olvidar el objetivo principal de conseguir un componente funcional y que sea respetuoso con el medio ambiente y sostenible. Por este motivo, el material más económico no tiene por qué ser el más idóneo.

Los propósitos anteriores pueden resumirse en los siguientes puntos:

- Seleccionar materiales para fabricar estructuras en función de sus propiedades mecánicas, durabilidad, procesabilidad e impacto ambiental.
- Establecer la viabilidad de las diferentes opciones presentadas ambiental y económicamente.

## 3. Metodología

### 3.1 Cambridge Engineering Selector (CES)

CES EduPack es una herramienta educativa orientada para estudiantes de las ramas científico-técnicas para evaluar la selección de materiales con aplicaciones en ciencia, ingeniería, fabricación, diseño y desarrollo sostenible. Esta base de datos informatizada fue creada inicialmente por Mikel Ashby y su equipo de la Universidad de Cambridge. Sin embargo, CES EduPack ha sido posteriormente desarrollado por la empresa Granta Design en colaboración con su creador y una creciente comunidad de educadores de más de mil universidades de todo el mundo. [8]



Figura 3-1. Herramientas y servicios varios proporcionados por CES EduPack

El software proporciona numerosos servicios, como:

- Una amplia base de datos sobre procesos y materiales.

- Diversas herramientas de software de materiales.
- Recursos de apoyo: conferencias, proyectos y ejercicios.

CES EduPack consta de una base de datos dividida en tres niveles (Level 1-2-3), cada cual con un mayor número de información que el anterior, disponibles en inglés y español.

Tabla 1. Niveles CES EduPack [5]

	<b>Alcance</b>	<b>Contenido</b>
<b>Level 1</b>	Aproximadamente 70 de los materiales y procesos con mayor uso. Los materiales quedan divididos en: metales, polímeros, composites, espumas y materiales naturales	Una descripción, una imagen del material en un producto familiar, usos típicos, y datos limitados para las propiedades mecánicas, térmicas, y eléctricas.
<b>Level 2</b>	Alrededor de 100 materiales y procesos más utilizados	Mismo contenido que el nivel 1 con el añadido de datos numéricos más extensos, guías de diseño, eco propiedades y notas técnicas.
<b>Level 3</b>	Contiene más de 3750 materiales que incluyen a los a los del nivel 1 y 2.	Base de datos más extensa. Permite exprimir al máximo todos los recursos de CES

Cada nivel puede ser analizado por [9]:

- Ojear (BROWSE): Explorar la base de datos y localizar archivos a través de un índice jerárquico.
- Buscar (SEARCH): Encontrar información a través de una búsqueda de texto en los archivos.
- Selección (SELECT): Utiliza un potente buscador para encontrar archivos que cumplan con un conjunto de requisitos de diseño

### **Ojear y buscar**

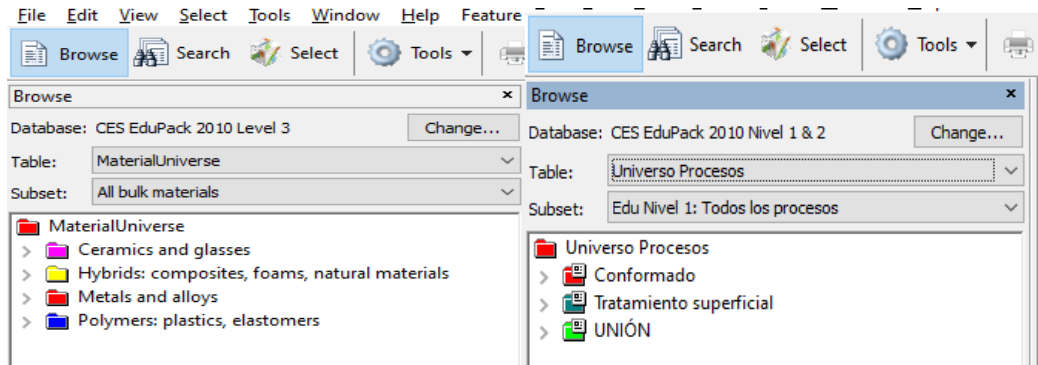
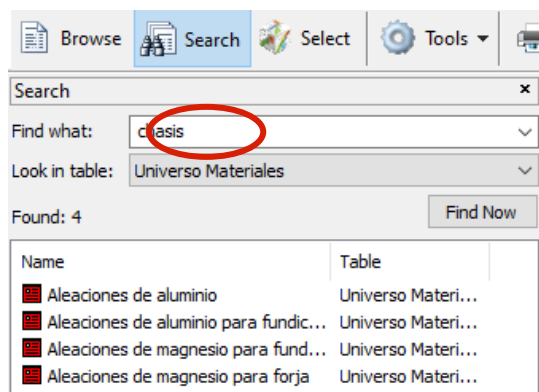


Figura 3-2. Búsqueda de materiales y procesos en CES

Si realizamos una búsqueda de cualquier componente (Search), el programa nos proporciona una serie de materiales de uso típico para su fabricación:



## Descripción

### Material

Casi todas las aleaciones de aluminio para fundición contienen entre el 5 y el 22% de silicio (Si). El silicio hace que la aleación sea más fluida para llenar el molde y se adapte a los detalles, incluso en secciones delgadas. Las adiciones de cobre (Cu) o de magnesio (Mg) permiten conseguir endurecimiento por envejecimiento. Las aleaciones Al-Si normales se utilizan para componentes y equipos marinos, utensilios de cocina, aunque debido a su buena resistencia a la corrosión en agua salada, se utilizan para pistones y camisas de motores por su buena conductividad térmica y baja expansión. Como regla general, las aleaciones de fundición tienen menor ductilidad y resistencia que las aleaciones de forja con endurecimiento por envejecimiento (con resistencia a la tracción superior a 350 MPa).

### Composición (resumen)

Al + 5 - 22% Si, algunas veces con Cu, Mg o Zn para conseguir endurecimiento por envejecimiento.

### Figura



## Propiedades generales

Densidad	2.5e3	-	2.9e3	kg/m <sup>3</sup>
Precio	* 1.28	-	1.41	EUR/kg

## Propiedades mecánicas

Modulo de Young	72	-	89	GPa
Límite elástico	50	-	330	MPa
Resistencia a tracción	65	-	386	MPa
Elongación	0.4	-	10	% strain
Dureza-Vickers	60	-	150	HV
Resistencia a fatiga para 10 <sup>7</sup> ciclos	32	-	157	MPa
Tenacidad a fractura	18	-	35	MPa.m <sup>0.5</sup>

## Propiedades térmicas

Punto de fusión	475	-	677	°C
Máxima temperatura en servicio	130	-	220	°C
¿Conductor térmico o aislante?	Buen conductor			
Conductividad térmica	80	-	160	W/m.°C
Calor específico	900	-	995	J/kg.°C
Coefficiente de expansión térmica	16.5	-	24	µstrain/°C

## Propiedades eléctricas

¿Conductor eléctrico o aislante?	Buen conductor
----------------------------------	----------------

## Propiedades ópticas

Transparencia	Opaco
---------------	-------

## Ecopropiedades

Contenido en energía, producción primaria	203	-	238	MJ/kg
Huella de CO <sub>2</sub> , producción primaria	12	-	13.1	kg/kg
Reciclaie	✓			

Figura 3-3. Descripción y propiedades de materiales en CES (chasis de aluminio)

## Gráficas de propiedades

En el apartado SELECT, mediante una determinada base de materiales orientada a lo que se pretende buscar, es posible generar gráficas de propiedades para escoger materiales:

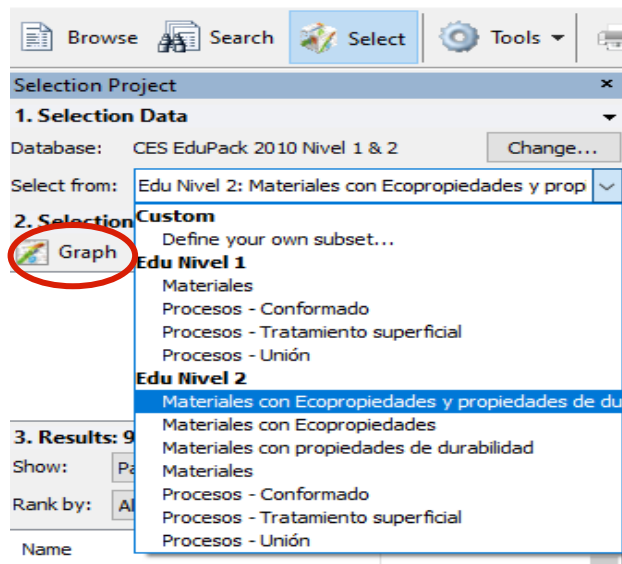


Figura 3-4. Crear gráfico de propiedades en CES

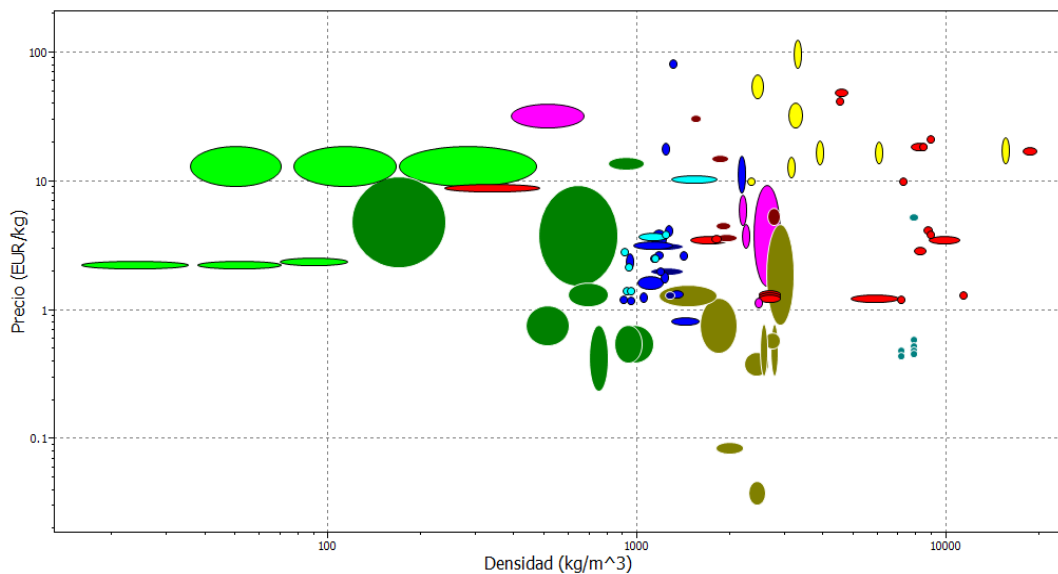


Figura 3-5. Gráfico de propiedades CES (Precio vs Densidad)

### 3.2 Ecoauditoría (análisis de ciclo de vida)

La herramienta Ecoauditoría permite obtener la energía utilizada y/o consumida, medida en MJ; y la huella de carbono emitida en kg de CO<sub>2</sub> durante las fases dominantes de la vida de un producto. (Figura 3-6)



Figura 3-6. Fases dominantes de la vida de un producto

Ofrece la posibilidad de identificar cuál de las cinco etapas anteriores es la predominante. Es decir, qué fase de la vida útil de un producto tiene mayor impacto medioambiental. Además, el análisis de ciclo de vida brinda la oportunidad de crear diversos escenarios con el fin de investigar cómo afectan los cambios de diseño en el impacto ambiental.

Para crear un escenario de estudio, seleccionamos “Eco Audit” en la pestaña Tools y agregamos el nombre del producto. Por ejemplo, realizamos una ecoauditoría para botellas de agua, hechas de plástico (PET):

#### a. Material, fabricación y fin de vida

Primero, se escoge el proceso de fabricación y el final de ciclo que va a tener el producto en cuestión. En este caso, un pedido de 100 botellas de 1 litro de agua, fabricadas de PET mediante moldeo y finalmente recicladas (escenario aleatorio próximo a la realidad).

1. Material, manufacture and end of life ?							
	Qty.	Component name	Material	Recycle content	Primary process	Mass (kg)	End of life
▶	100	Botellas	Tereftalato de polietileno (PET)	Virgin (0%)	Moldeo de polímeros	4	Recycle
*			<ul style="list-style-type: none"> <li>Metales y aleaciones</li> <li>Polímeros y elastómeros               <ul style="list-style-type: none"> <li>Elastómeros</li> <li>Polímeros                   <ul style="list-style-type: none"> <li>Termoestables</li> <li>Termoplásticos                       <ul style="list-style-type: none"> <li>Acrido-Butadieno-Estireno (ABS)</li> </ul> </li> </ul> </li> </ul> </li> </ul>				

Figura 3-7. Material, fabricación y fin de ciclo del producto-1

Los tapones se fabrican de polipropileno (PP), se moldean y se supone un fin de vida por combustión.

### 1. Material, manufacture and end of life

Qty.	Component name	Material	Recycle content	Primary process	Mass (kg)	End of life
100	Botellas	Tereftalato de polietileno (PET)	Virgin (0%)	Moldeo de polímeros	0,04	Recycle
100	Tapón	Polipropileno (PP)	Virgin (0%)	Moldeo de polímeros	0,001	Combust
▶ 100	Agua				1	

Figura 3-8. Material, fabricación y fin de ciclo del producto-2

### b. Transporte y uso

Se supone un transporte en camión de 14 toneladas desde la planta de embotellado hasta el punto de venta de 100Km.

El uso del producto será estático y de aproximadamente 2 días dentro de un refrigerador. La energía usada para refrigerar el producto en el punto de venta (energía media requerida para refrigerar 100 botellas a 4°C = 0.12 kW) [9]

### 2. Transport

	Stage name	Transport type	Distance (km)
▶	Planta de embotellado-comercio	14 tonne truck	100
*			

### 3. Use

Product life:  years

Country electricity mix:

**Static mode**  
 Product uses the following energy:

Energy input and output:

Power rating:  kW

Usage:  days per year

Usage:  hours per day

**Mobile mode**  
 Product is part of or carried in a vehicle:

Fuel and mobility type:

Usage:  days per year

Distance:  km per day

Figura 3-9. Transporte y uso del producto.



### c. Informe

Finalmente, la herramienta de análisis de ciclo de vida proporciona un par de gráficos de barras sencillos e intuitivos con los que podremos contrastar cada uno los resultados obtenidos para las distintas fases de la vida del producto y compararlos. Para el ejemplo ilustrado, se determina que la etapa de mayor consumo y la de mayor emisión de contaminantes (CO<sub>2</sub>) es la de obtención del material (polímeros termoplásticos: PET, PP). Además, es posible evaluar cada componente por separado. De esta forma, es posible ver con más detalle dónde se encuentran los puntos débiles del proceso y así, mejorar el diseño y reducir su impacto ambiental.

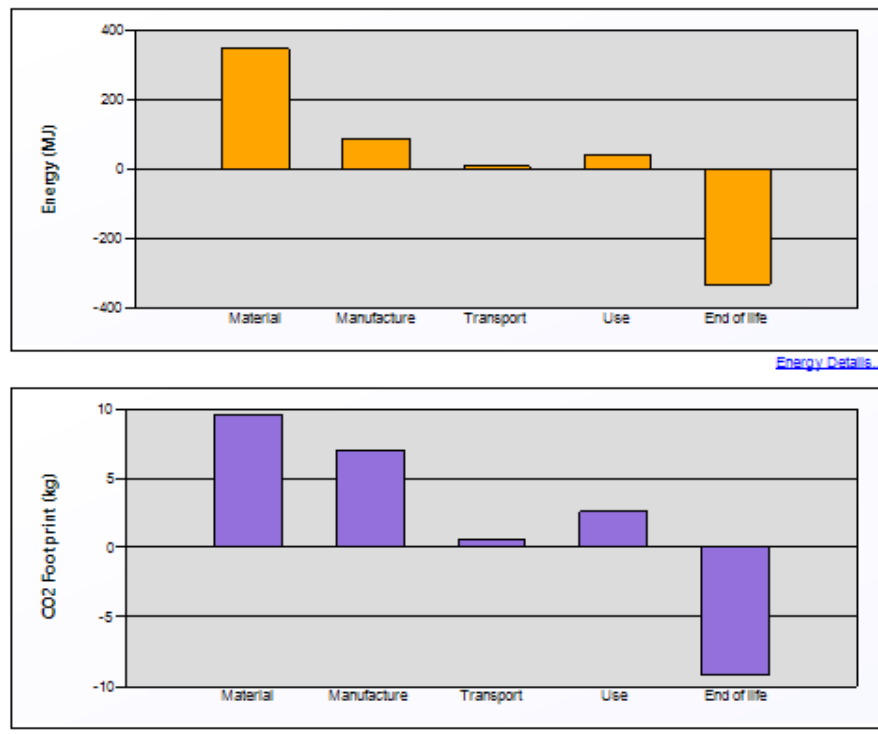


Figura 3-10. Gráficas CO<sub>2</sub> (kg) y Energía consumida (MJ)

Phase	Energy (MJ)	Energy (%)	CO <sub>2</sub> (kg)	CO <sub>2</sub> (%)
<b>Material</b>	344	223.6	9.58	90.0
<b>Manufacture</b>	87.6	56.9	7.01	65.9
<b>Transport</b>	8.85	5.7	0.628	5.9
<b>Use</b>	45.2	29.4	2.56	24.1
<b>End of life</b>	-332	-215.6	-9.14	-85.9
<b>Total</b>	<b>154</b>	<b>100</b>	<b>10.6</b>	<b>100</b>

Figura 3-11. Resumen CO<sub>2</sub> (kg) y Energía consumida (MJ)

### **3.3 Selección de materiales conforme a propiedades mecánicas:**

Cada tipo de material posee características en común con los demás, bien sean propiedades mecánicas, térmicas, formas de procesado y aplicaciones. Los metales tienen módulos de elasticidad relativamente altos, sobre todo el acero y el aluminio. Su resistencia y/o dureza pueden ser incrementadas mediante aleaciones con otros componentes, a través de tratamientos térmicos que afectan a la estructura interna del metal o bien mediante procesos de deformación en frío. En su gran mayoría, presentan una buena ductilidad, lo cual permite su conformado mediante deformación plástica de una forma relativamente sencilla. Además, son materiales que correctamente tratados adquieren una excelente resiliencia, es decir, su capacidad para absorber impactos mejora, dada su elevada capacidad de deformación. Esto permite su implementación en aplicaciones estructurales y de elementos de seguridad, como puede ser el caso de algunos elementos integrantes de un vehículo, tales como: chasis, rieles, engranajes, ejes o paragolpes, entre otros. Uno de los puntos negativos más destacables es la sensibilidad de algunos metales a la corrosión. Esto restringe el uso de metales y aleaciones para determinadas aplicaciones en las que se necesite unas propiedades mecánicas aceptables acordes al servicio. A pesar de todo, la existencia de materiales como los aceros inoxidable tipo Dúplex permiten una excelente combinación de unas propiedades mecánicas competentes y un gran comportamiento ante la corrosión.

La cerámica y los vidrios son materiales muy duros, pero, su elevada dureza conlleva una enorme fragilidad, por lo que no son aptos para la fabricación de componentes estructurales. Son rígidas, duras y resistentes a la abrasión, por eso son empleadas en la fabricación de herramientas de corte o frenos. Son capaces de conservar su dureza incluso a altas temperaturas y resisten bien la corrosión.

Por otro lado, los polímeros y elastómeros, a no ser que estén tratados, presentan unas propiedades mecánicas mediocres. Esto se debe a que son muy susceptibles a la formación, incluso a temperatura ambiente y con cargas reducidas, ya que su estructura molecular está formada por una red de cadenas poliméricas que pueden deslizarse muy

fácilmente bajo el efecto de alguna carga externa. Sus propiedades dependen de la temperatura, de modo que un polímero que es resistente y flexible a 20°C puede ser frágil a una temperatura de 4°C y ser capaz de fluir a una temperatura de 80°C. Sin embargo, un polímero tratado de la forma correcta puede competir en ciertos aspectos con algunos metales. Por ejemplo, los termoestables son capaces de soportar elevadas temperaturas sin llegar a fluir y son rígidos a temperatura ambiente. Los polímeros termoplásticos son más flexibles y tienen la capacidad de absorber impactos de cierta magnitud. Por ello son utilizados para la fabricación de piezas de la carrocería de los vehículos, susceptibles a ser reparadas.

Por último, los materiales compuestos son un grupo un tanto especial, ya que en su amplia gama está la posibilidad de combinar propiedades características más atractivas del resto de grupos de materiales. Son livianos, rígidos, resistentes y pueden ser bastante duros. La mayoría de los composites están elaborados a partir de una matriz polimérica y reforzados mediante la agregación de fibras de vidrio o carbono. Las propiedades mecánicas de esta última son excelentes, aunque su producción aun no resulta viable para su incorporación en vehículos domésticos. De todas formas, para la industria del automovilismo, la fibra de vidrio es de gran aplicación ya que es capaz de competir con el acero o el aluminio en factores como la resistencia o la capacidad de absorber impactos. Resulta útil emplear este compuesto en elementos de seguridad y de la carrocería, aligerando el vehículo sin descuidar la seguridad.

[1]

### **Propiedades mecánicas**

Las propiedades mecánicas de los materiales varían en función de su composición y microestructura. Están relacionadas con su capacidad de transmitir y resistir esfuerzos o deformaciones. Algunas de las propiedades más relevantes son:

- Módulo de elasticidad o módulo de Young (E): se define como la pendiente de la parte elástica lineal de la curva de tensión-deformación, se mide en GPa.

- Módulo de cizallamiento (G): se describe como la pendiente de la zona lineal de la curva esfuerzo cortante-deformación cortante.
- Resistencia mecánica: es capacidad del material para soportar esfuerzos. Se mide en MPa
- Ductilidad: se define como la capacidad de deformación plástica de un material antes de alcanzar el fallo.
- Dureza: capacidad de un material para evitar ser rallado por otro o resistencia del material a la deformación plástica localizada. Implica fragilidad. Se puede medir en HRC, HV, o HBW
- Resiliencia: capacidad de un material para absorber un impacto sin llegar a deformarse. Se mide en MPa

Para realizar un diseño de útil aplicación, se ha de atender a una serie de atributos necesarias para dicha aplicación y realizar ensayos para determinar la aptitud de los materiales si fuera necesario. La amplia variedad de materiales hace que no exista una única solución posible para un diseño. Como ya se ha comentado, las posibilidades son muy amplias, por lo que, a raíz de unas propiedades mecánicas preestablecidas, se ha de encontrar el material óptimo para el diseño teniendo en cuenta otros factores como la procesabilidad, el coste extracción y producción y el impacto ambiental, realizando comparaciones entre distintos materiales.

## 4. Resultados

### 4.1. Componentes de automóviles: comparativa y diferentes opciones de selección.

Los materiales utilizados en ingeniería son cada vez más sofisticados. En el mundo del automovilismo, se está evolucionando hacia componentes más ligeros y económicamente favorables. Además, al igual que en muchos otros ámbitos de la industria, en la automovilística también se persigue un desarrollo sostenible que busque un equilibrio entre desarrollo social, desarrollo económico y una máxima reducción del impacto ambiental que puedan producir los vehículos durante su fabricación y a lo largo de su vida útil. Los materiales empleados en la construcción de vehículos son numerosos, al igual que las técnicas de fabricación empleadas para obtener las piezas y componentes necesarios.

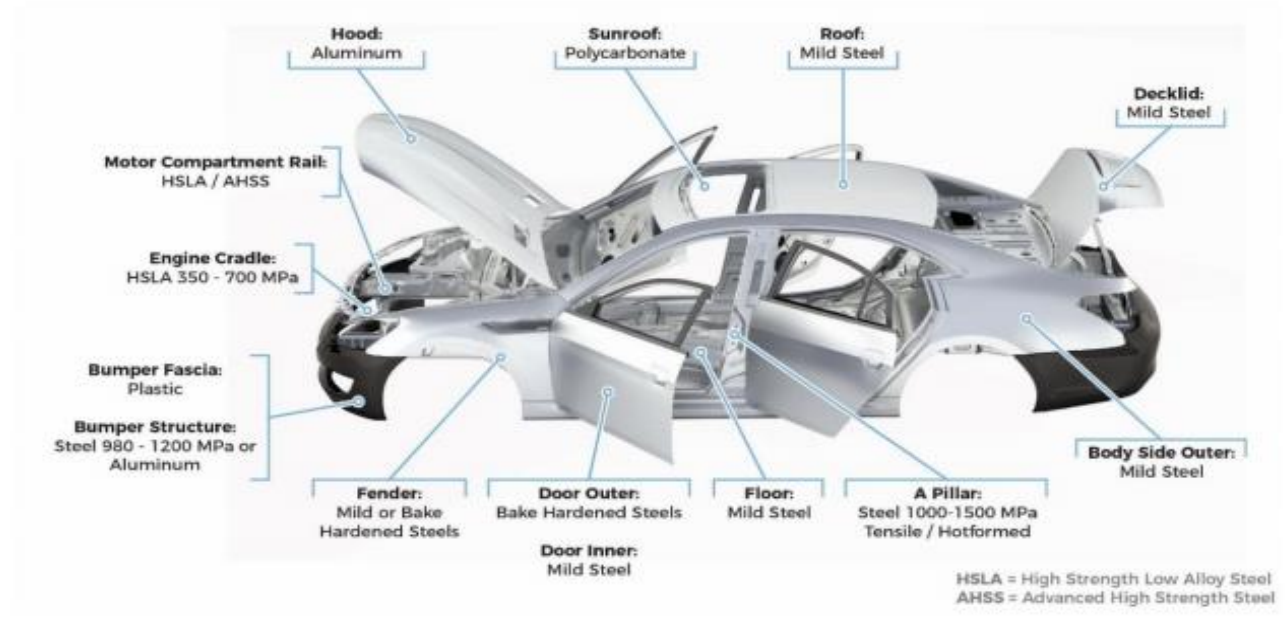


Figura 4-1. Materiales más usados en la fabricación de componentes estructurales de automóviles [10]

La siguiente tabla muestra los principales materiales y su peso empleados en la fabricación de componentes de automóviles, tanto de uso utilitario como deportivos [6]:

*Tabla 2. Principales materiales para la fabricación de componentes de automóviles y su peso (Kg).*

Material (kg)	Vehículo	
	convencional	Vehículo ligero
Acero al carbono	839	254
Acero inoxidable	0	5.8
Fundición de hierro	151	31
Aluminio (de forja)	30	53
Fundición de aluminio	64	118
Latón	26	45
Magnesio	0	3.3
Vidrio	39	33
Plásticos termoplásticos (PU y PVC)	94	65
Plásticos termoestables(poliéster)	55	41
Caucho	33	17
GFRP	0	134
GFRP	0	20
Platino (catalizador)	0.007	0.003

Los **aceros** son el material dominante del conjunto del vehículo. Solamente un 20% de su peso está destinado al chasis, el núcleo estructural del vehículo. Éste es el encargado de servir como sostén al resto de elementos y de absorber de la mejor manera los posibles impactos que se puedan producir. Otros elementos, también fabricados de acero, como puertas, elementos de suspensión, capó y demás, suponen alrededor del 60% del peso del automóvil. El elevado aprovechamiento del acero reside en sus buenas propiedades mecánicas y su coste económico inferior al de otros materiales. Cabe destacar que materiales como el vidrio, plásticos y aluminio han ido desplazando el acero en la producción de carrocerías con el paso del tiempo. [11].

Actualmente se está dando prioridad a los aceros microaleados o HSLA (High Strength low alloy), los cuales ofrecen una mayor resistencia y tenacidad que los aceros dulces o convencionales. Poseen una matriz ferrítica con presencia de perlita y carburos de aleación finamente dispersos. Contienen elementos como V, Nb, Ti, que favorecen la precipitación de los elementos de micro aleación. Su límite elástico se encuentra situado entre 210 y 550 MPa, con una tensión última de 270 a 700 MPa. Además, esta mejora de las propiedades mecánicas se traduce en un peso más liviano; ya que, se necesitará de una menor sección de los elementos.

Semejantes a los anteriores, se encuentran los denominados aceros avanzados de gran resistencia AHSS (Advanced High Strength Steels), con límites elásticos y tensiones de rotura superiores a los anteriores, como se observa en (*Figura 4-2*). Los principales componentes estructurales elaborados con estos aceros especiales son los postes y rieles delanteros y traseros. Ambos se tratan de elementos de seguridad. Su composición química es:  $Fe - 20Mn < 3Si < 4Al < 1.5C$  el elevado contenido de manganeso (17-30%) determina que el acero sea completamente austenítico a temperatura ambiente e influye en su conformado. Durante un proceso de deformación en frío, el acero adquiere endurecimiento por acritud. Sin embargo, en estos aceros la austenita retenida también se transforma progresivamente en martensita con el aumento de la tensión, por lo que la dureza adquirida

será aún mayor. El nivel de austenita retenida que se transforma en martensita dependerá del contenido de carbono. Con porcentajes bajos de carbono, la austenita retenida empezará a transformarse inmediatamente bajo deformaciones. Por otro lado, si tenemos concentraciones elevadas de carbono, es necesario aplicar tensiones más elevadas para transformación, ya que esta austenita retenida será más estable. Por ello, este acero presenta una excelente capacidad para absorber impactos que aumentará cuanto mayor sea la deformación que sufre. [11] [12]

El proceso de fabricación de estos aceros es muy eficiente, de forma que este se realiza de manera continua, sin parones. Además, una de las características que hace peculiar. Sus propiedades mecánicas mejoradas se explican mediante su composición y la realización de un proceso controlado.

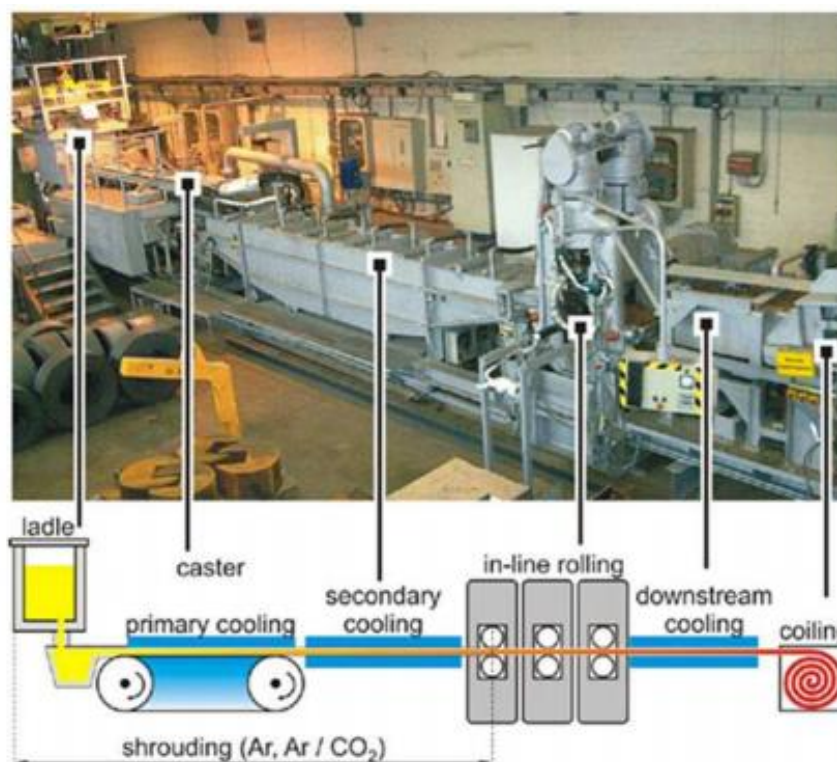


Figura 4-2. Proceso de fabricación de los aceros avanzados de gran resistencia (AHSS)



Al efectuarse un menor número de calentamientos para la fabricación de bobinas de estos aceros, el proceso necesitará de una menor demanda energética que los procesos convencionales, lo que lo convierte en uno de los tipos de fabricación de aceros medioambientalmente más sostenibles.

Es cierto que la premisa está en conseguir componentes ligeros para la construcción de turismos, lo cual se está logrando mediante la implementación de materiales ligeros con propiedades mecánicas bastante óptimas como los AHSS ya comentados o los materiales compuestos, que cada vez están teniendo mayor relevancia en el sector del automóvil. Sin embargo, se ha producido un aumento del peso absoluto de los turismos en las últimas décadas. Esto se explica con el aumento de la confortabilidad y de la seguridad. Se cruzan entonces las ideas de confort y seguridad con disminución del peso para reducir las emisiones contaminantes y el impacto ambiental. Para conseguir una armonía entre ambos conceptos, se necesitan materiales ligeros que ofrezcan buenas prestaciones mecánicas. Los aceros de alta resistencia han ocupado el puesto de los aceros dulces en este campo, donde los mencionados aceros avanzados de alta resistencia juegan un tener un papel importante en elementos de seguridad en vehículos que impliquen una elevada responsabilidad.

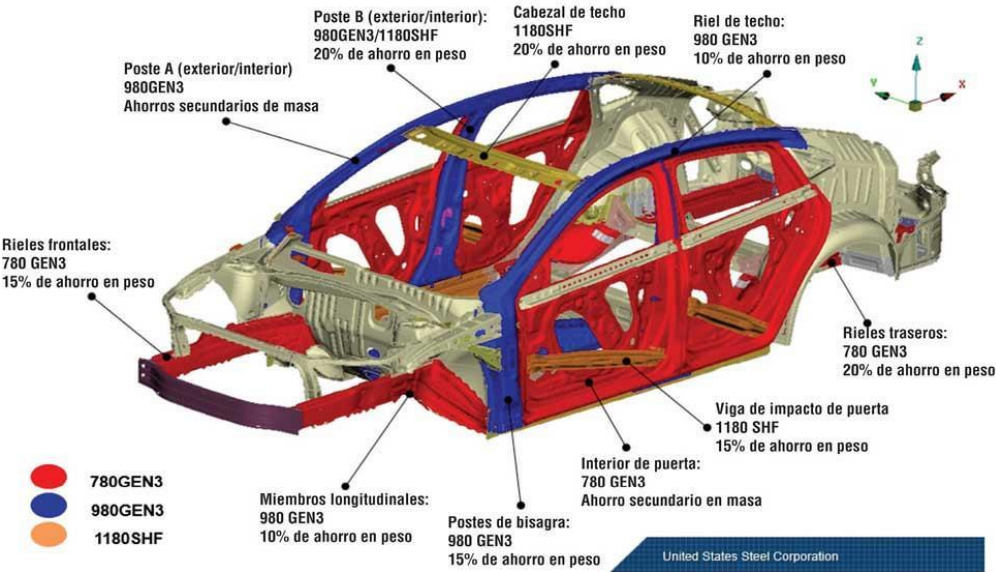


Figura 4-3. Componentes estructurales fabricados con AHSS. Nótese que los AHSS están designados como aceros de tercera generación (3GEN) [13] (Esta ilustración es cortesía de United States Steel Corp., Pittsburgh)

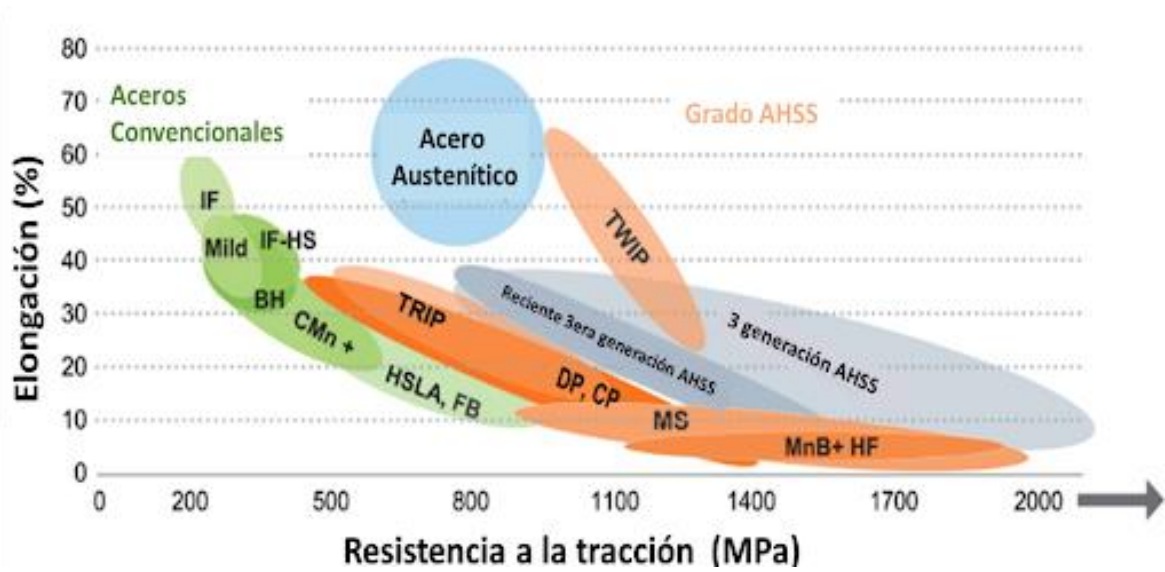


Figura 4-4. Diagrama global de clasificación de los aceros.

En cuanto a la **fundición de hierro**, supone un peso bastante menor del conjunto del vehículo. Las principales piezas manufacturadas de fundición son los frenos de disco y el tambor, horquillas, rótulas, volante de inercia, algunas piezas de transmisión o el bloque motor.

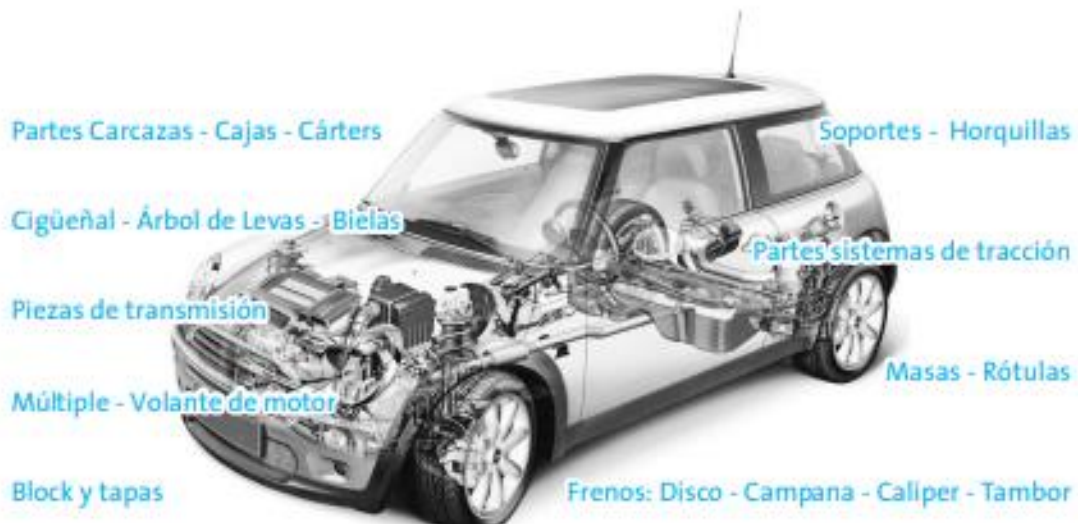


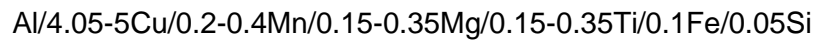
Figura 4-5. Principales piezas manufacturadas de fundición de hierro en vehículos [14]

Por lo general, se hace uso de la fundición dúctil, con un porcentaje de carbono superior al 1.7%. La definición más general podría ser “aquella aleación de hierro y carbono que permite la formación de un eutéctico en el momento de la solidificación” (es decir, un proceso en el que se forman dos fases sólidas). Su principal ventaja frente a la fundición gris es su menor fragilidad. Aun así, continúan estando por debajo de los aceros en ese aspecto.

Las aleaciones de **aluminio** son materiales cuyo uso en la fabricación de componentes de automoción se encuentra en auge. Su característica más destacable que lo convierte en un material muy útil para este campo de la ingeniería es la ligereza que aporta al vehículo, con una densidad aproximadamente 3 veces menor que la del acero ( $\rho_{Al} = 2698,4 \text{ kg/m}^3$ ;  $\rho_{Acero}=7850 \text{ kg/m}^3$ ). Un menor peso equivale a una reducción del consumo y, por ende, una disminución de las emisiones contaminantes. Además, es un material no magnético que ofrece gran resistencia a la corrosión, fácil soldabilidad, elevada capacidad para disipar el calor y fácilmente reciclable. Se requiere de poca energía para su reciclaje y el material no pierde sus propiedades, por lo que el proceso es rentable, efectivo y respetuoso con el medio ambiente. Principalmente, se fabrican de aluminio el parachoques, bloque motor, mordazas de freno, cajas de cambios, colectores de admisión, pistones, culata y numerosas partes del chasis. Un claro ejemplo es el nuevo **Audi Q7**, que ha incorporado el aluminio en muchos elementos de la carrocería. El resultado ha sido una **reducción en más de 300 kg de peso** de este SUV respecto a la generación anterior [15].

En lo que respecta a la elaboración del bloque motor, la fundición de aluminio se prima más, no solo por ser más liviano y disipar mejor el calor, sino porque su manejo en el proceso de fundición es más sencillo y seguro que en el caso del acero, al tener una temperatura de fundición menor. Es un material más caro en comparación con la fundición de hierro, pero que se está implementando cada vez más en este tipo de aplicaciones. Normalmente, a pesar de que el bloque motor esté fabricado en fundición de hierro, la culata es de aluminio. La geometría de esta pieza es más compleja y requiere de tolerancias de acabado más precisas,

por lo que su forma es conferida mediante el mecanizado. Una fundición de aluminio típica es la A201 cuya composición química es:



*Tabla 3. Temperatura de fusión de algunos metales empleados en automoción.*

<b>Material</b>	<b>Temperatura de fusión (°C)</b>
<b>Acero al carbono</b>	1516
<b>Aluminio</b>	660
<b>Aleaciones de aluminio</b>	560-650
<b>Hierro</b>	1540
<b>Fundición de hierro (gris)</b>	1350-1400

Haciendo hincapié en la ligereza que aporta el aluminio al conjunto del vehículo, a priori, resulta de gran interés incorporarlo en los autos en mayor medida. Esta disminución del peso se traduce en un aumento del rendimiento, una mayor aceleración y además necesitan una menor distancia para frenar. Una carrocería elaborada de aluminio puede pesar hasta 150 kg menos que una de acero. Tal reducción de peso supone una disminución en torno a 35l/100 km y unas emisiones de CO<sub>2</sub> de 8.8g/km menos. Algunos ejemplos de vehículos con casi la totalidad de su carrocería fabricada en aluminio son [16]:

- Audi A8 (1994, 2003, 2010): carrocería de aluminio en su totalidad, a excepción del refuerzo del pilar central que es de acero de ultra alta resistencia.
- Audi A2: carrocería completa de aluminio.
- Audi R8 (2009): carrocería completa de aluminio excepto el subchasis trasero que es de magnesio.

- BMW Z8: carrocería completa de aluminio, basado más en el concepto de estructura mediante tubulares de aluminio.

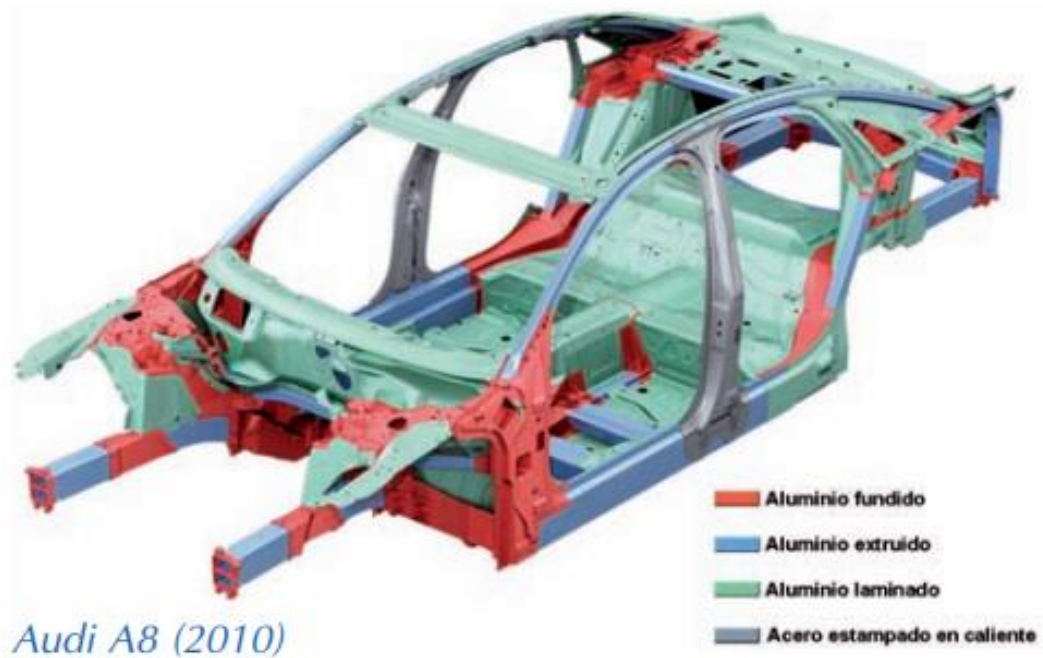


Figura 4-6. Carrocería de aluminio del Audi A8 (2010) [16]

Así mismo, los siguientes automóviles disponen de una carrocería fabricada en chapa estampada de acero, pero con diferentes componentes en aluminio:

- BMW X5 (2007): capó delantero y pases de rueda delanteros.
- BMW Serie 5 (2010): Amazón delantero de aluminio (largueros superiores, pases de ruedas delanteros), capó delantero, aletas y puertas delanteras y traseras.
- Audi A6 (2011): capó, aletas delanteras, travesaño de deformación delantero y trasero y pases de rueda delanteros, puertas delanteras y traseras, tapa maletero, bandeja trasera.

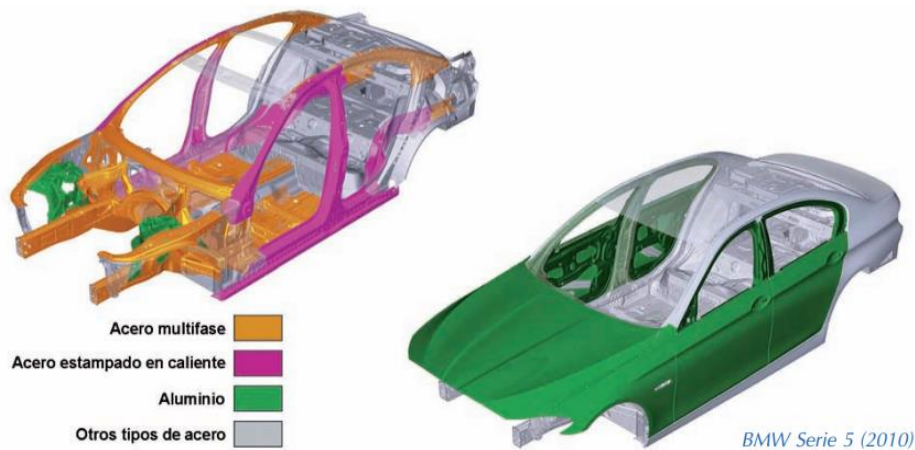


Figura 4-7. Materiales de la carrocería del BMW serie 5 (2010) [16]

### Principales desventajas del aluminio frente al acero

- El precio: se trata de un material más caro que el acero. Se encuentra sobre todo en coches de alta gama. No se hace demasiado uso en coches utilitarios convencionales.
- Resistencia mecánica: el aluminio posee una resistencia a la tracción inferior al acero con un límite elástico de 55 MPa. Sin embargo, ofrece mayor seguridad ya que es capaz de absorber mejor la energía de un impacto. Aunque esto también implica costes elevados en su reparación, que será más cara y compleja, por lo que los seguros también se cubrirán las espaldas en este aspecto, repercutiendo en la tarifa del asegurado.

En lo que respecta al **vidrio**, de forma general, se utiliza para la fabricación de los cristales del parabrisas delantero y trasero, los vidrios laterales de las puertas y sus marcos, así como el del techo panorámico que incorporan algunos vehículos. Los vidrios del automóvil tienen características especiales que los hacen diferentes de los tradicionales. Una cualidad especial es que al fracturarse por un fuerte impacto se rompe en cristales muy pequeños que suelen ser inofensivos para los ocupantes del vehículo. Forman parte de la seguridad activa del vehículo. Las técnicas de fabricación de estos vidrios son las siguientes [17]:

- Vidrio laminado: Consiste en unir dos láminas de vidrio con una película intermedia de butiral (PVB) polivinilo, etil vinil acetato (EVA) y resinas de luz ultravioleta. Dicha lámina le proporciona al cristal una cierta seguridad ante una rotura ya que los cristales quebrados quedan unidos a ella.
- Vidrio templado: Se trata de un vidrio de seguridad que es elaborado mediante tratamientos térmicos o químicos que le confieren cierta resistencia en comparación a la de un cristal convencional. Esto se logra colocando las superficies exteriores a compresión y las internas a tracción. Por lo que, cuando el vidrio se rompe, se fracciona en varios pedazos en lugar de astillarse.

Desde hace años, los **plásticos** están cada vez más presentes en los componentes de automóviles. Ya en la década de los 50 se empezaron a utilizar los primeros termoplásticos: ABS, PA, PC, etc., y unos años después se efectuaron las primeras mezclas entre plásticos. Sus propiedades mecánicas están siendo mejoradas con el paso de los años y resultan un buen sustituto de algunos materiales como metales o cerámicos en determinadas aplicaciones en la industria.

Por un lado, en los automóviles encontramos los **plásticos termoplásticos**. Están formados por una estructura molecular de agrupaciones de polímeros en línea (formando redes cristalinas) o ramificados, sin enlazamiento, siendo estos últimos los más frecuentes gracias a que la disposición de sus cadenas poliméricas les dota de gran flexibilidad. Sus principales características son que permanecen rígidos en frío y al calentarlos se reblandecen y fluyen, peculiaridades que facilitan su conformado, reparación. Es por ello por lo que estos plásticos son empleados en piezas de la carrocería susceptibles de ser reparadas, que deben soportar ciertas flexiones, o bien, que deban absorber impactos. Los polímeros termoplásticos más empleados en vehículos son: PVC, PP, ABS, PA, etc. [18]

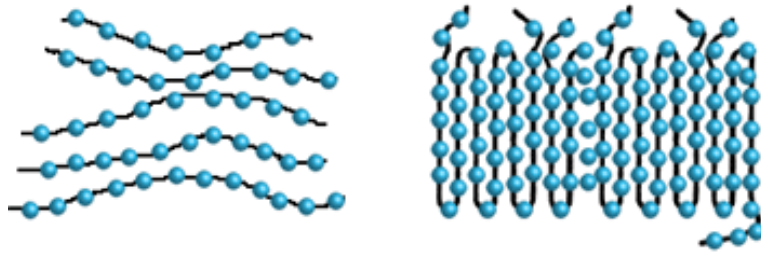


Figura 4-8. Estructura de los polímeros termoplásticos. En línea (izquierda), ramificada (derecha)

En cuanto a los **elastómeros**, son utilizados principalmente para la fabricación del caucho vulcanizado de los neumáticos, vierteaguas o juntas de goma. Su estructura molecular está formada por cadenas poliméricas unidas que proporcionan a este material buena elasticidad y flexibilidad. Son capaces de soportar elevadas temperaturas y grandes deformaciones, siendo capaces de recuperar su longitud original cuando cesa el calor o la fuerza aplicada. Los elastómeros más comunes son el caucho natural (NR), el polibutadieno (PB) o el caucho estireno-butadieno (SBR), que es el más extendido.



Figura 4-9. Estructura de los elastómeros.

Por otro lado, los **polímeros termoestables** se usan en componentes interiores de la estructura, tales como soportes del radiador, que necesitan aguantar elevadas temperaturas. En este caso, las cadenas poliméricas forman una malla de red cerrada y entrelazada que le proporciona propiedades insolubles, infusibles y de elevada rigidez. Estas características hacen que su estructura soporta mejor la acción de determinados productos químicos agresivos, el calor o la presión. (GUP, EP, poliéster).



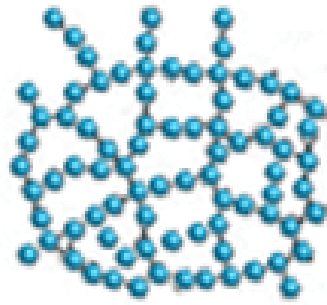


Figura 4-10. Estructura molecular de los polímeros termoestables

Por último, los composites como la **fibra de vidrio** están aumentando su popularidad en los últimos años. Una de las razones reside en las ventajas que posee en comparación con el acero, ya que este material es resistente a la corrosión, posee una elevada resistencia al desgaste producido por químicos y es un material muy ligero, lo que lo convierte en un material interesante para la fabricación de algunos componentes de automóviles, sobre todo deportivos, donde el peso es un factor crucial a tener en cuenta. Principalmente, los elementos que se manufacturan con fibra de vidrio son: los parachoques delantero y trasero, el capó, puertas y algunas partes de la carrocería. Además, se puede hacer uso de este material compuesto para fabricar la correa de distribución y la correa trapezoidal. Las fibras son impregnadas de caucho como refuerzo, dada la elevada resistencia a la tracción de la fibra de vidrio. Debido a su resistencia a la abrasión, también se ha incluido en la elaboración de embragues y pastillas de freno. Los principales aditivos antiabrasivos utilizados son  $Al_2O_3$ , SiC y a veces el  $SiC_2$ . Estos compuestos se adhieren al revestimiento, la primera de las capas que forman el material. Otro ejemplo del uso de la fibra de vidrio en la industria del automóvil son los neumáticos. La fibra de vidrio se emplea a modo de refuerzo de neumáticos. El vidrio de las fibras se mezcla con hasta un 15-30% de una resina de resorcinol-formaldehído-látex, reforzando así el neumático y aumentando su vida útil. [19]



Figura 4-11. Parachoques y capó de fibra de vidrio

#### 4.2 Análisis del ciclo de vida de algunos componentes estructurales de automóviles: ecoauditorías

Ya se ha comentado en el apartado 3.2 *Ecoauditoría (análisis de ciclo de vida)* del capítulo de metodología la herramienta **eco Audit** que ofrece Ces EduPack, su funcionamiento y los resultados que ofrece de las principales fases de vida de un producto: material, fabricación, transporte, uso y fin de ciclo. Por tanto, se ha realizado un análisis de ciclo de vida sobre ciertos componentes estructurales de vehículos convencionales.

Los parámetros a introducir en la ecoauditoría como el tipo de material del que está fabricada la pieza en cuestión y su peso, se han escogido tomando como referencia los datos de la tabla anterior (*¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.*).

Los componentes sometidos a un estudio de análisis de ciclo de vida se corresponden al **chasis, parachoques y bloque motor**, para diferentes situaciones y materiales; tomando unos **12 años de media de vida útil** del vehículo, que repercutirán exclusivamente en la fase de uso de los componentes como parte estructural de un vehículo móvil.

Tabla 4. Resumen de los materiales y peso de los componentes estudiados

Componente - Material	Peso (kg)
-----------------------	-----------

Chasis - Acero de baja aleación	300
Chasis – Aleación de aluminio 2017	150
Parachoques – Fibra de vidrio (PPGF)	8
Parachoques – Aleación de aluminio 2017	10
Bloque motor – Fundición gris	150
Bloque motor – Fundición de aluminio	90

El caso de la **fibra de carbono** resulta un tanto especial, ya que, a pesar de ser un material compuesto muy ligero y con excelentes características mecánicas (elevada flexibilidad, gran resistencia mecánica, tolerancia a elevadas temperaturas) que podrían mejorar el rendimiento del vehículo en mayor medida que los materiales citados en la *Tabla 4*, aun no se contempla su uso en vehículos utilitarios debido a su elevado coste.

#### 4.2.1 Ecoauditoría de los componentes estructurales: chasis.

Para el análisis de ciclo de vida del chasis se ha estudiado la posibilidad de fabricarlo en **acero de baja aleación y aluminio serie 2017**. No existe mucha diferencia entre los distintos tipos de aceros al carbono medioambientalmente hablando, por ello se escoge un acero aleado general. Se propone un posible escenario real para todos los componentes estudiados en cuanto al lugar de fabricación y el transporte de éstos antes de formar parte del conjunto total del vehículo y de ser trasladados al concesionario donde será puesto en venta. Se ha supuesto el lugar de manufactura en la fábrica de Peugeot en Poissy, al norte de Francia; transportado a la cadena de montaje en tren una distancia de 100 km y finalmente en un camión de 32 toneladas por carretera durante aproximadamente 1700 km desde el montaje hasta el concesionario Peugeot en el polígono industrial de La Palma en Cartagena (España).



Figura 4-12. Ruta de transporte del vehículo desde la fábrica en Poissy, Francia (A), hasta el concesionario en Cartagena, España (B)

El modelo en cuestión se trata de nuevo Peugeot 208. Un vehículo urbano con líneas deportivas y de pequeñas dimensiones, disponible en gasolina, diésel y eléctrico.



Figura 4-13. Modelo Peugeot 208 año 2020

Con el fin de recabar más información sobre la huella de carbono que pueda producir durante su vida útil, se han planteado los casos de coche de motor diésel, eléctrico e híbrido (aunque esta última opción no haya sido contemplada por el fabricante). Únicamente se ha estudiado con CES el coche con motor diésel como caso de vehículo que utiliza combustible fósil, ya que medioambientalmente no hay demasiada diferencia entre la gasolina y el diésel. La fabricación del chasis para ambos metales consta de un proceso de forjado y laminado. Además, en lo que respecta al final de vida del producto, se ha puesto en comparación un fin de ciclo en vertedero con uno en el que el material acabe siendo reciclado. De este modo se podrá denotar si existe una reducción de la energía consumida y del CO<sub>2</sub> emitido para así, intentar paliar los problemas medioambientales que esta última fase de la vida del producto pueda producir.

Las gráficas expuestas a continuación para los diferentes tipos de vehículos representan la energía consumida, medida en mega julios (MJ), y la huella de carbono medida en kilogramos de CO<sub>2</sub>. Todo ello producido en las distintas fases de vida del producto, comparando el chasis fabricado de acero acabado en la chatarrería y otro reciclado, con el elaborado en aluminio con iguales finales de vida útil. CES contempla un final de vida útil en vertedero (landfill). Sin embargo, todos los vehículos que han llegado al final de su utilidad deben de ser desechados en la chatarrería, según se dispone en **Real Decreto 20/2017, de 20 de enero**, sobre los vehículos al final de su vida útil. Este real decreto tiene por objeto “establecer medidas destinadas a la prevención de la generación de residuos procedentes de vehículos y a la recogida, a la preparación para la reutilización, al reciclado y otras formas de valorización de los vehículos al final de su vida útil, incluidos sus componentes, para así reducir la eliminación de residuos y mejorar la eficacia en la protección de la salud humana y del medio ambiente a lo largo del ciclo de vida de los vehículos”.

### **Comparativa de los chasis de acero y aluminio: vehículo diésel.**

La herramienta ecoauditoría que ofrece CES EduPack resulta útil para identificar qué fase de la vida útil de un producto domina en términos de impacto medioambiental y discutir cómo afectan los cambios de diseño a dicho impacto. El análisis del ciclo de vida del chasis y del resto de componentes a estudiar consta de las siguientes fases:

- **Materiales:**

Para el caso del chasis se ha empleado acero de baja aleación y aleaciones de aluminio para su fabricación. Relativamente hablando, el hierro se trata de un material “blando”. Al agregarle carbono se obtiene el acero, un material que, dependiente de los tratamientos posteriores a los que sea sometido, puede ser tan duro y frágil como el cristal, o dúctil y resistente como la carrocería de un automóvil, que debe estar preparada para soportar impactos y el peso del resto de componentes del auto. El acero empleado se trata de un acero de baja aleación común, como podría ser el **AISI 3140** con fines estructurales, equivalente al F1250 de la norma española. Es un acero con buena resistencia mecánica y buena capacidad de absorber impactos. Su composición es la siguiente:

C 0.38-0.43 / Ni 1.1-1.4 / Mn 0.7-0.9 / Cr 0.55-0.75 / Si 0.15-0.35/ P<0.04, S<0.04

De forma general, este tipo de aceros son tratados térmicamente para mejorar sus propiedades mecánicas. Primero es sometido a un tratamiento de normalizado, elevando la temperatura del metal hasta austenizarlo a 900°C durante 30 minutos y enfriado al aire, con el fin de homogeneizar estructuralmente el acero aleado. Posteriormente se somete a un temple a 900°C durante media hora y revenido a menor temperatura de una hora, para así endurecer el material y aliviar las tensiones residuales.

En lo que respecta al aluminio, se ha escogido una aleación de **aluminio de la serie 2017**, una aleación de aluminio con cobre (entre un 2% y un 6%) típica para componentes estructurales en general y que requieran de buenas prestaciones mecánicas. Se trata de una aleación para manufactura mediante forja trabajando en un intervalo de temperatura entre 380

y 460°C. Es endurecible mediante tratamiento térmico. Primero, es sometido a una puesta en solución a temperatura elevada (505°C) con el fin de disolver en el metal base los elementos de aleación que se hallan en fases separadas para seguidamente, realizar un temple en agua fría a menos de 40°C. Por último, el material es sometido a una maduración natural a temperatura ambiente o bien, puede emplearse una maduración artificial o revenido (160°C-180°C) que acelere la precipitación de los compuestos intermetálicos que le confieren ese endurecimiento. [20] [21]

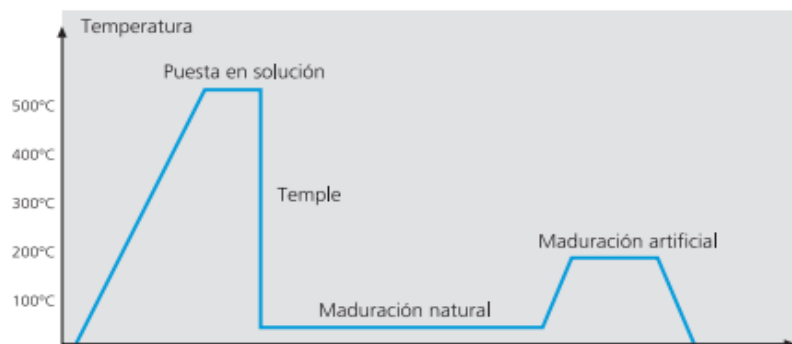


Figura 4-14. Diagrama de los tratamientos térmicos para el endurecimiento estructural de la aleación de aluminio 2017.

Dicho material se ha ido incorporando paulatinamente a las carrocerías y otros componentes estructurales de vehículos, dado que, aporta una ligereza superior al ser casi tres veces menos denso que el acero. Un menor peso equivale a una reducción del consumo y, por ende, una disminución de las emisiones contaminantes. A pesar de su mayor precio, cada vez se contempla más como sustituto del acero en el ámbito automovilístico. Resulta interesante incluir fracciones de ambos metales que ya han sido reciclados anteriormente debido a que sus procesos de reciclado son sencillos, medioambientalmente sostenibles y, además, no deterioran las propiedades del material que lo hacen apto para los servicios en cuestión.

- **Fabricación:**

La fabricación del chasis para ambos metales consta de procesos de deformación plástica como el forjado y laminado. Cerca del 90% de los productos son manufacturados mediante estos procesos.

El forjado consta de un proceso de manufactura basado en la deformación del material que viene en lingotes, mediante el impacto de una o varias herramientas que le confieren la forma deseada, ya sea en frío o en caliente. En la forja en caliente se presiona la pieza con una única compresión. Supone un 90% del total de forjados dada la necesidad de aumentar la ductilidad del material de trabajo para poder conferirle una forma precisa. La principal ventaja que ofrece el forjado en frío es el endurecimiento por deformación o acritud, pero, a cambio de un mayor consumo energético. Para el conformado de las piezas de la carrocería es típica la estampación en frío, empleando prensas hidráulicas con moldes de la misma geometría que la pieza a fabricar. Resulta un proceso rápido que permite la elaboración de lotes voluminosos en poco tiempo. Posteriormente, las partes que conforman la estructura total de la carrocería son ensambladas y soldadas. Los materiales para las matrices de la forja destacan por su extrema dureza. Sin embargo, son caros; por lo que este tipo de conformado es rentable para una producción a gran escala.

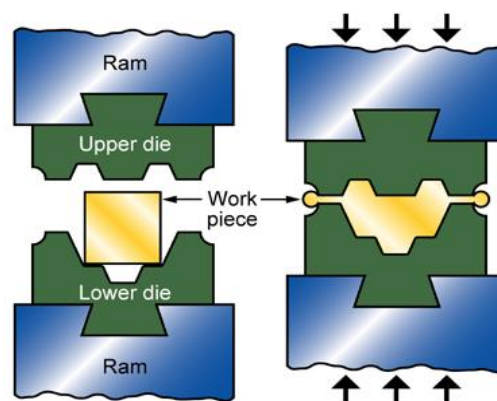






Figura 4-15. Proceso de deformación plástica (estampación en frío).

Durante el proceso de laminado, el metal se hace pasar a través de una sección donde es comprimido mediante rodillos que lo deforman plásticamente. Giran en sentidos opuestos para que fluya el material entre ellos, ejerciendo fuerzas de compresión y de cizallamiento, originadas por el rozamiento que se produce entre los rodillos y el metal. Permite el conformado de perfiles al utilizar rodillos con forma. Tiene un coste relativo de utillaje y equipamiento elevado, pero ofrece mayor flexibilidad en cuanto al tamaño del lote que la forja, para que la producción resulte económica.

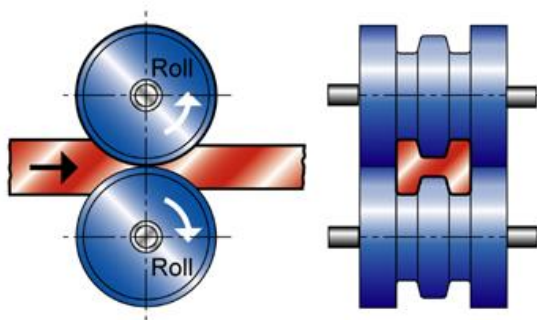


Figura 4-16. Proceso de deformación plástica (laminado).

La idea de desarrollo sostenible está cada vez más arraigada en la sociedad de la industria y el consumo y es importante tenerlo en cuenta siempre. Su principal objetivo ha sido disminuir la contaminación global. No solo es referido al ámbito industrial, sino además a los aspectos económicos y la vida humana. Por ende, se podría definir como un sistema diseñado para satisfacer las necesidades humanas preservando de forma simultánea el medio ambiente. Otra definición popular es la que propone Gro Harlem Brundtland, quien define el desarrollo sostenible como "*desarrollo que satisfaga las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades*". Las soluciones ecológicas y sostenibles no sólo afectan de manera positiva al medio ambiente debido a la reducción de las emisiones contaminantes y gases de efecto invernadero, sino también mejoran el rendimiento económico y ayudan a lograr una posición más fuerte en el mercado a las empresas.



Figura 4-17. Desarrollo sostenible.

Dentro del desarrollo sostenible se encuentra el término “fabricación sostenible”, que se podría definir como “aquellos procesos de fabricación que minimizan los impactos ambientales negativos conservando la energía y los recursos naturales, son seguros para los empleados, las comunidades y los consumidores y son económicamente rentables”. Aquí se recoge además el concepto de **lean manufacturing o fabricación ajustada**, el cual persigue

lo citado en la anterior definición. Estos recursos permiten un uso más adecuado de la energía y de los recursos materiales utilizados en los procesos de fabricación, evitando de esta manera un derroche innecesario de energía que se traduciría en pérdidas económicas y deterioro medioambiental. [22]

Con el fin de optimizarlos los procesos productivos, lo principal es conocer los tiempos de fabricación empleados: tiempos productivos, tiempos muertos, tiempos de operarios etc. Todo esto proporciona una visión general de todo el proceso productivo que permite identificar los procesos más lentos y los que necesitan mayor atención, ajustando mejor los tiempos muertos y repercutiendo de forma directa en la producción total. Algunas de las herramientas de lean manufacturing que se podrían emplear son: **Value Stream Mapping (VSM)**, el cual permite eliminar o reducir tareas de escaso valor, **sistema Kanban**, que permite controlar el inventario de stock al mismo tiempo que se ajusta la producción a la demanda, **nivelar las líneas de producción** en función de la demanda, **cambiar el push por el pull**, que consta de que los procesos que se encuentran aguas arriba son los que marcan la producción u **operarios multitarea** que ayuden en los procesos más lentos o realicen más de una tarea. [23]

- **Transporte**

El programa CES EduPack ofrece en sus ecoauditorías los siguientes medios de transporte tales como: ferrocarril, barco de mercancías, tráiler de 32 y de 14 toneladas y transporte aéreo. Para la situación expuesta anteriormente, el coche ha de ser trasladado de fabrica a montaje en Francia y después ser llevado al concesionario de destino en Cartagena (España). Se descarta directamente el transporte en avión al ser uno de los más contaminantes. Según se indica en *Materials and the Enviroment* de Michael F. Ashby, el transporte por carretera en un tráiler de 32 toneladas es bastante más contaminante que en tren o en barco. Una buena opción para reducir la huella de carbono durante la fase de transporte seria escoger aquellos cuyas emisiones contaminantes sean más leves. Al realizarse el transporte desde el

norte de Francia hasta el sureste de España, la opción del transporte marítimo puede que no tenga demasiado sentido. Por lo tanto, se optaría por uno terrestre, siendo el ferrocarril medioambientalmente más favorable.

- **Uso**

Al formar parte de un vehículo, la utilización de los componentes se verá estrictamente ligada al tipo automóvil en cuestión. El peso de cada componente influye directamente en el consumo del vehículo. En el caso de un vehículo con motor diésel y gasolina, la contaminación producida será relativamente parecida, a pesar de que el vehículo diésel emite cierto tipo de contaminantes como los óxidos de nitrógeno y azufre, no presentes en los gases de escape de los motores de gasolina. Una solución interesante a este problema sería emplear motores híbridos o eléctricos que puedan resultar menos exigentes con el medioambiente. El tema de los motores eléctricos es un campo que aún no ha alcanzado su máximo punto de desarrollo y rentabilidad. Uno de los problemas es la manera de obtener la energía eléctrica para cargar las baterías de los vehículos, y es que, gran parte de la energía proviene de la quema de carbón. La opción de las energías renovables está ahora mismo en auge. Aunque ya se está contemplando para el futuro la generación de energía eléctrica mediante la pila de hidrogeno.

- **Fin de vida**

Una de las características más destacables en cuanto al reciclaje de los materiales del chasis es que siguen una economía de vida circular, por lo que estos metales pueden ser reciclados de forma continua sin que sus propiedades se vean alteradas. Supone un ahorro energético al no tener que extraer la materia prima de nuevo.

La reutilización y reciclado de materiales y componentes es una práctica muy interesante, a la vez que rentable, la cual permite ahorrar energía de forma significativa. Además, el reciclaje ayuda a reducir la explotación de los recursos naturales, ya que la economía de vida circular de algunos materiales permite que la demanda de su materia prima

sea inferior. Estos métodos de explotación son normalmente invasivos y perjudican al medioambiente. Por consiguiente, el reciclado también repercute en la disminución de la huella de carbono. Entre los diferentes tipos de reciclaje, a grandes rasgos destacan.:

- **Reciclaje mecánico:** todos aquellos procesos y técnicas que impliquen un trabajo manual o mediante maquinaria. Este tipo de reciclaje se utiliza mucho en la clasificación de residuos mezclados y en el reciclaje del plástico
- **Reciclaje energético:** trata del reciclaje de materiales cuyo fin es el aprovechamiento energético. Se emplean residuos que no pueden ser clasificados y recuperados; bien porque técnicamente es imposible, o resulta inviable económicamente. Un ejemplo de ello es la combustión de residuos, la pirólisis y la gasificación.
- **Reciclaje químico:** se usa principalmente en plásticos. Incluye técnicas y procedimientos que implican cambios en la estructura química del material. Se busca la descomposición del polímero para la obtención de monómeros.
- **Reciclaje biológico:** se puede realizar en materias orgánicas mediante su degradación en presencia o no de oxígeno.

A continuación, se exponen las gráficas y los resultados del análisis de ciclo de vida de las diferentes opciones de chasis.:

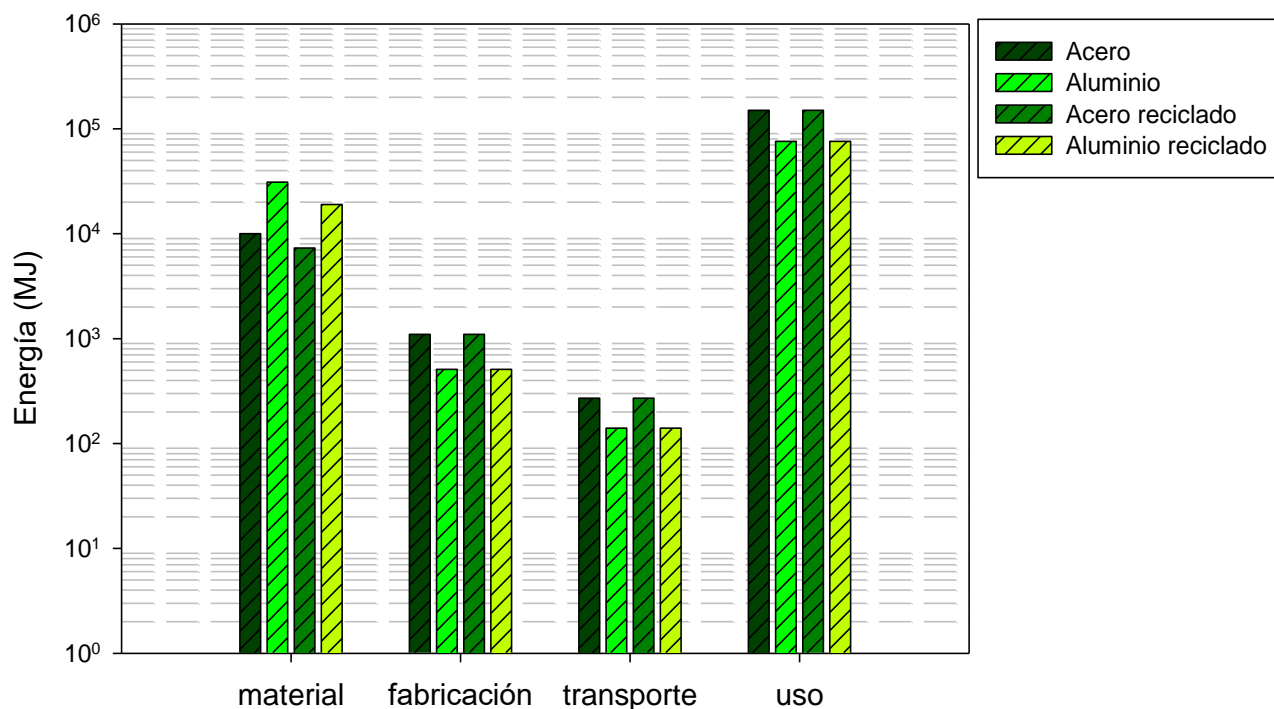


Figura 4-18. Energía consumida (MJ) en las diferentes fases de vida del chasis como componente de un vehículo

La gráfica *Figura 4-18. Energía consumida (MJ) en las diferentes fases de vida del chasis como componente de un vehículo* expone mediante un diagrama de barras en grupo la energía consumida en MJ en escala logarítmica de las distintas etapas del análisis del ciclo de vida del producto excepto el fin de uso, que se detalla posteriormente en la *figura 4-16*. Compara el consumo energético de las opciones contempladas para la fabricación del chasis (acero, aluminio y acero y aluminio reciclados) dentro de cada grupo, de forma que el contraste de los resultados resulta muy visual. Se aprecia un claro dominio en consumo energético por parte de las fases de uso y obtención del material.

El aluminio tiene un coste energético mayor que el acero en su obtención (su extracción hoy en día no está tan optimizada); incluso si éste es reciclado, sigue siendo superior al del acero completamente virgen. El ahorro energético que supone emplear una aleación de aluminio reciclada o una virgen es de alrededor de 1000 MJ. No supone un gran ahorro, pero es el más destacable. En cambio, los aceros se sitúan en torno a 2000 MJ por debajo del aluminio. Cabe destacar que los costes económicos de la obtención del aluminio también serán superiores.

En lo que respecta a la fabricación, no hay que descuidar su consumo energético porque también es elevado. Las ideas expuestas anteriormente sobre lean and sustainable manufacturing son importantes para procurar optimizar en la medida de lo posible los procesos y que así su consumo de energía disminuya. La procesabilidad del aluminio mediante fabricación por deformación plástica posee un consumo energético inferior que el acero, unos 500 MJ menos que suponen un 50% de la energía de fabricación. Esto se debe a que al tratarse de un material con una estructura con redes cúbicas centradas en las caras (FCC) tiene una mayor capacidad de deformación que un material con estructura cúbica centrada en el cuerpo (BCC), como es el caso del acero. Esto es debido a que el deslizamiento de las dislocaciones en una estructura FCC es más favorable. Un proceso de fabricación más cara implicará un aumento del precio final de producto.

El peso del producto es la característica que influye directamente en el consumo energético y en la contaminación durante su transporte. El traslado del chasis de acero consume unos 300 MJ que suponen un 50% más de energía que el de aluminio. Sería interesante realizar un estudio en el que la mayoría o la totalidad del traslado se efectuase en tren para ver las mejoras medioambientales con respecto al transporte por carretera, que es más contaminante, como ya se ha mencionado.

La vida útil del chasis como un componente que forma parte de un vehículo resulta la fase más costosa con diferencia en términos energéticos. Supone unos 90000 MJ más que los consumidos de media en la obtención del material. Su consumo durante el uso en los 12 años de vida útil estimados para el vehículo asciende a la cantidad de 105000 MJ para el chasis de acero y unos 80000 MJ para el de aluminio. De nuevo, el peso de la pieza adquiere un papel importante para el consumo y las emisiones contaminantes.

La siguiente grafica muestra la energía consumida en MJ de la última fase de la ecoauditoría:

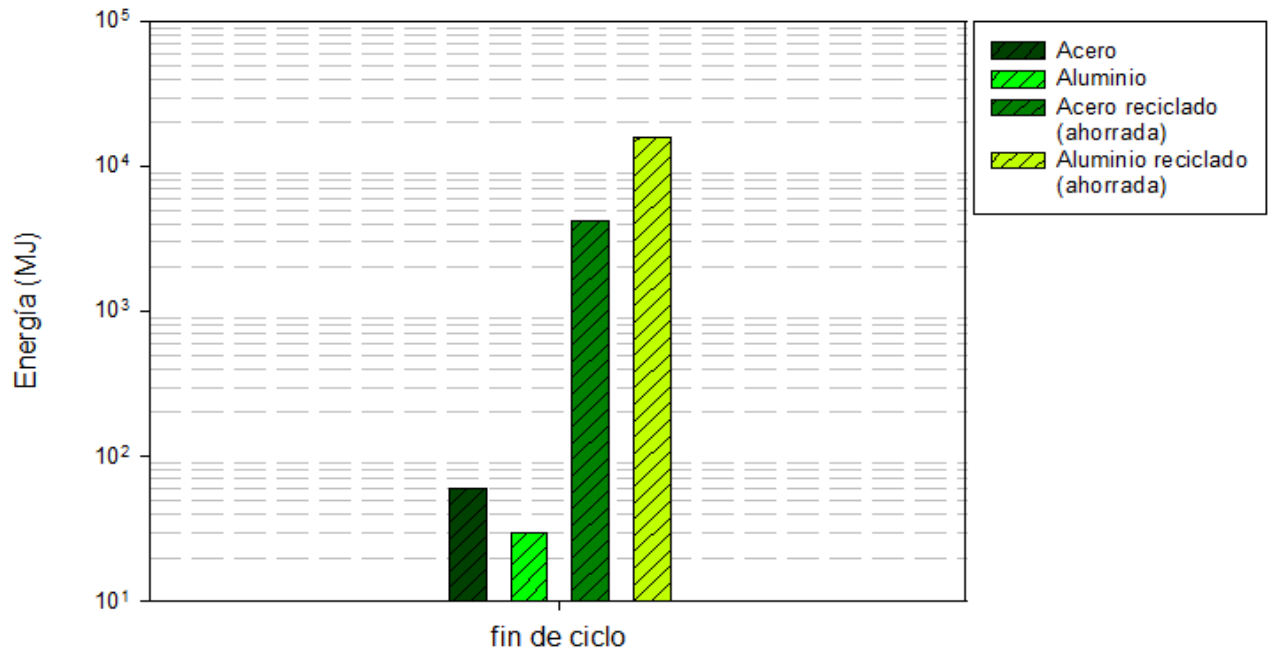


Figura 4-19. Energía consumida y ahorrada (MJ) en el fin de vida del chasis. Nótese que las energías correspondientes a los chasis **reciclados son positivas**, puesto que se han representado en valor absoluto en términos de **energía ahorrada**.

Es interesante a nivel ecológico reciclar los componentes tanto de acero como de aluminio. Como ya se ha mencionado anteriormente, estos metales poseen una tasa de reciclabilidad total y no pierden sus propiedades al hacerlo. La energía mostrada para los chasis reciclados es ahorrada. Es decir, al hacer un reciclado, se dejan de consumir 4000 MJ para el de acero y cerca de 11000 MJ para el de aluminio, el cual tiene un reciclado más efectivo.



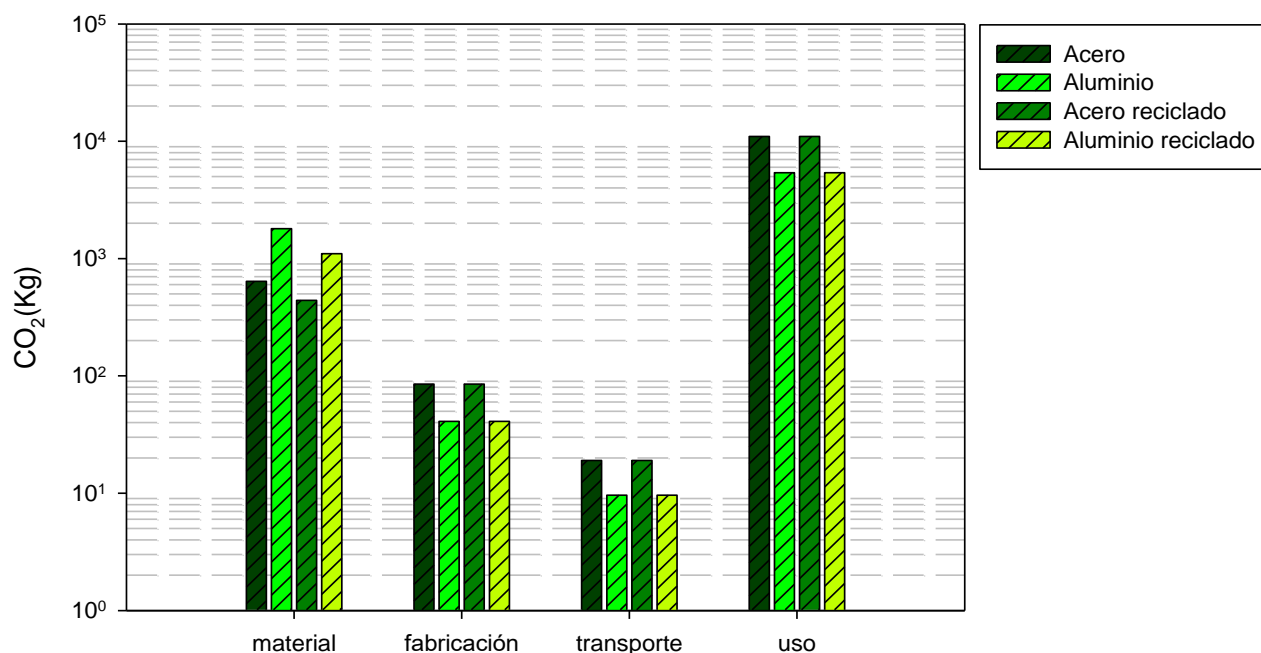


Figura 4-20. Huella de carbono emitida en las diferentes fases de vida del chasis como componente de un vehículo, CO<sub>2</sub> (kg)

Los resultados de la huella de carbono emitida en kg de CO<sub>2</sub> siguen la misma tendencia que la energía consumida para las distintas fases del ciclo de vida. Se comparan las emisiones contaminantes de las distintas fases del análisis de ciclo de vida agrupados por tipos de materiales en un gráfico de barras. Continúan predominando las etapas de obtención del material y de uso. Es evidente que existe una estrecha relación entre energía consumida y contaminación, principalmente debida a la generación de energía eléctrica.

El aluminio tiene una tasa de contaminación 1,5 veces mayor que el acero en su obtención; incluso si éste es reciclado, sigue siendo superior al del acero completamente virgen. La reducción de huella de carbono que supone emplear una aleación de aluminio reciclada a una virgen es de alrededor de 100 kg de CO<sub>2</sub>. En cambio, los aceros se sitúan en torno a 300 y 400 kg de gases contaminantes por debajo del aluminio.

En cuanto a la fabricación, de la misma forma que con la energía consumida, la manufactura del acero produce 100 kg de CO<sub>2</sub>, un 50% más que en el caso del aluminio. El procesado del acero mediante deformación plástica supone un consumo energético mayor

por lo que los gases de efecto invernadero producidos también son mayores. La explicación de esto es la anteriormente expuesta sobre la estructura de las redes cúbicas de estos materiales.

El traslado efectuado en un tráiler de 32 toneladas es la opción de transporte más contaminante. Se emiten alrededor de 10 kg de CO<sub>2</sub> para ambos chasis. El peso influye, pero la diferencia no es notable para traslado de relativamente corta duración.

Sin embargo, durante el uso del componente formando parte de un vehículo sí que puede apreciarse ligeramente la influencia del peso sobre el consumo. El ahorro de CO<sub>2</sub> que supone el uso de un chasis de aluminio con respecto a uno de acero es de un 50.9%.

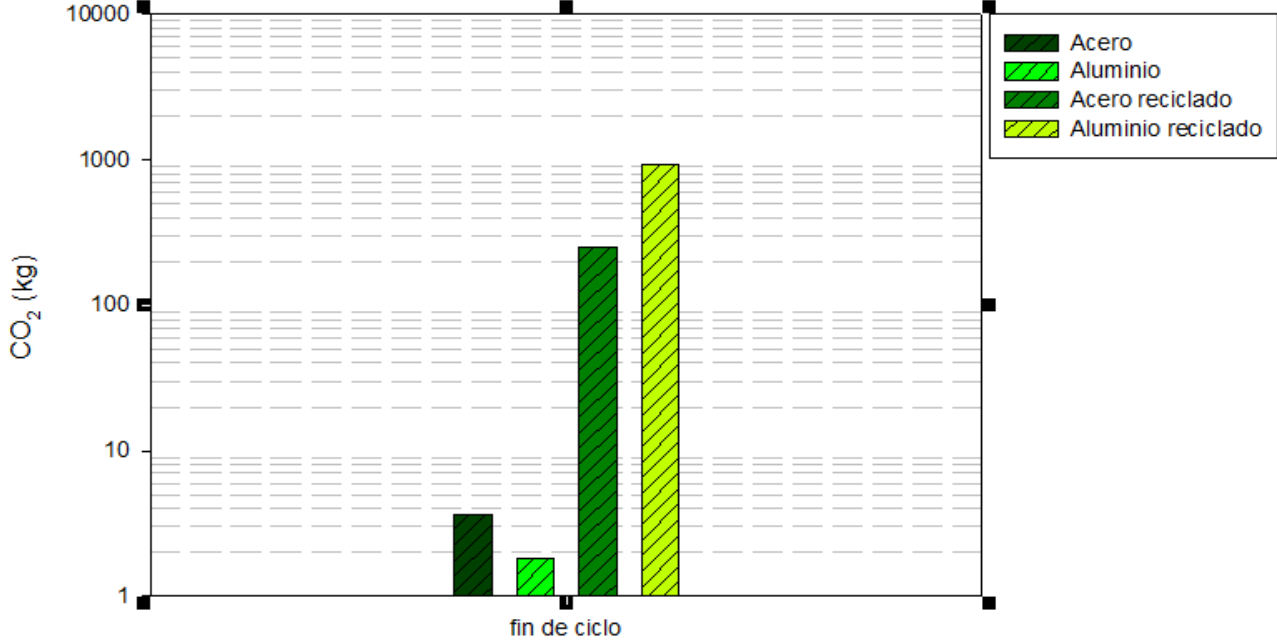


Figura 4-21. Huella de carbono emitida y ahorrada, CO<sub>2</sub> (kg) en el final de vida del chasis. Nótese que el CO<sub>2</sub> correspondiente a los chasis reciclados es ahorrado y para los otros dos, emitido. Se han representado en valor absoluto.

Se observa que al reciclar estos metales se deja de emitir una cantidad importante de gases de efecto invernadero, cerca de 250 kg de CO<sub>2</sub> para el chasis de acero y 1000 kg para el de aluminio. Luego, se empieza a corroborar la idea de que el reciclado de estos materiales es económico, medioambientalmente sostenible y supone una reducción apreciable de la huella de carbono.

Tabla 5. Valores de energía consumida y huella de carbono emitida por los chasis de aluminio y acero.

Fases	Chasis de acero de baja aleación		Chasis de aleación de aluminio serie 2017	
	Energía (MJ)	CO <sub>2</sub> (kg)	Energía (MJ)	CO <sub>2</sub> (kg)
Material	10000	640	31000	1800
Fabricación	1100	85	510	41
Transporte	270	19	140	9,6
Uso	150000	11000	76000	5400
Fin de vida: chatarrería/reciclado	60/ -4000	3,6/-250	30/-10900	1,8/-1000
<b>Total</b>	<b>161430</b>	<b>11747.6</b>	<b>107680</b>	<b>7252.4</b>

Se resumen en la *Tabla 5*. Valores de energía consumida y huella de carbono emitida por los chasis de aluminio y acero. los resultados expuestos en las anteriores graficas de energía consumida y huella de carbono emitida de los chasis fabricados en aluminio y acero.

Como se puede observar, el total de energía consumida por el chasis de acero durante su vida útil es de **161430 MJ**, lo que supone un **33,29%** más de consumo que el de aleación de aluminio, que es más ligero, tiene una tasa de reciclado más eficiente y una procesabilidad energéticamente menos costosa, aunque su obtención sea más compleja que la del acero. En términos de huella de carbono, la utilización de una carrocería de aluminio deriva en una reducción del **38,26%** de la huella de carbono con respecto al de acero, cuyas emisiones ascienden a la cantidad de **11747,6 kg de CO<sub>2</sub>**. Las fases del ciclo de vida que claramente predominan son las de **obtención del material y uso**. Únicamente formar parte de un

vehículo durante su vida útil ya supone un **92,92% del total de la energía consumida** y un **93,63% del total de kg de dióxido de carbono** emitidos a la atmosfera.

Como se ha expuesto con anterioridad en la descripción de las gráficas en cada una de las fases influyen aspectos como el peso del producto, su procesabilidad, su complejidad de obtención y su reciclabilidad. El acero resulta menos favorable en todas ellas, a excepción de la etapa de adquisición del material. Por lo tanto, se puede concluir que el chasis más contaminante, energéticamente más costoso y, por ende, menos respetuoso con el medio ambiente, sería aquel elaborado en **acero de baja aleación**.

Con el fin de reducir el impacto ambiental, se proponen acciones de mejora mediante ecodiseño tales como usar materiales reciclados, utilizar un tipo de transporte de productos más limpio, ajustar la fabricación y perseguir un desarrollo sostenible (lean manufacturing) etc. Otra opción que mejoraría el impacto ambiental del chasis como parte del conjunto de un vehículo durante la etapa de uso sería sustituir el tipo de motor. Es decir, pasar de un modelo que funcione mediante combustible fósil (diésel) a uno híbrido y otro 100% eléctrico.

### **Comparativa de los chasis de acero y aluminio: vehículos híbridos y eléctricos.**

En las siguientes graficas se muestra exclusivamente los resultados de la energía consumida y las emisiones contaminantes de los vehículos híbridos y eléctricos en la **fase de uso**, ya que para el resto de las etapas se consiguen los mismos resultados al solo tener en cuenta el material del componente (lo que se modifica aquí es el motor del vehículo). Se comparan además con el vehículo diésel para poder apreciar mejor la evolución desde un vehículo propulsado con combustible fósil a uno 100% eléctrico.

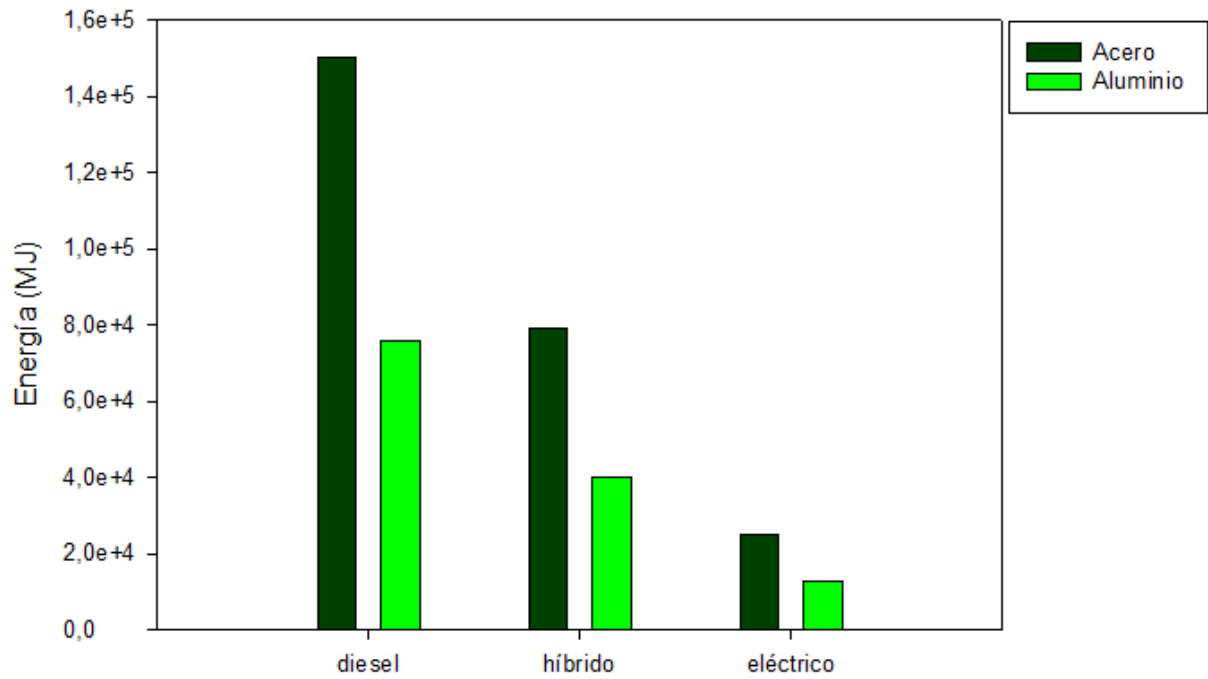


Figura 4-22. Energía consumida (MJ) durante el uso del chasis como componente de un vehículo diésel, híbrido y eléctrico.

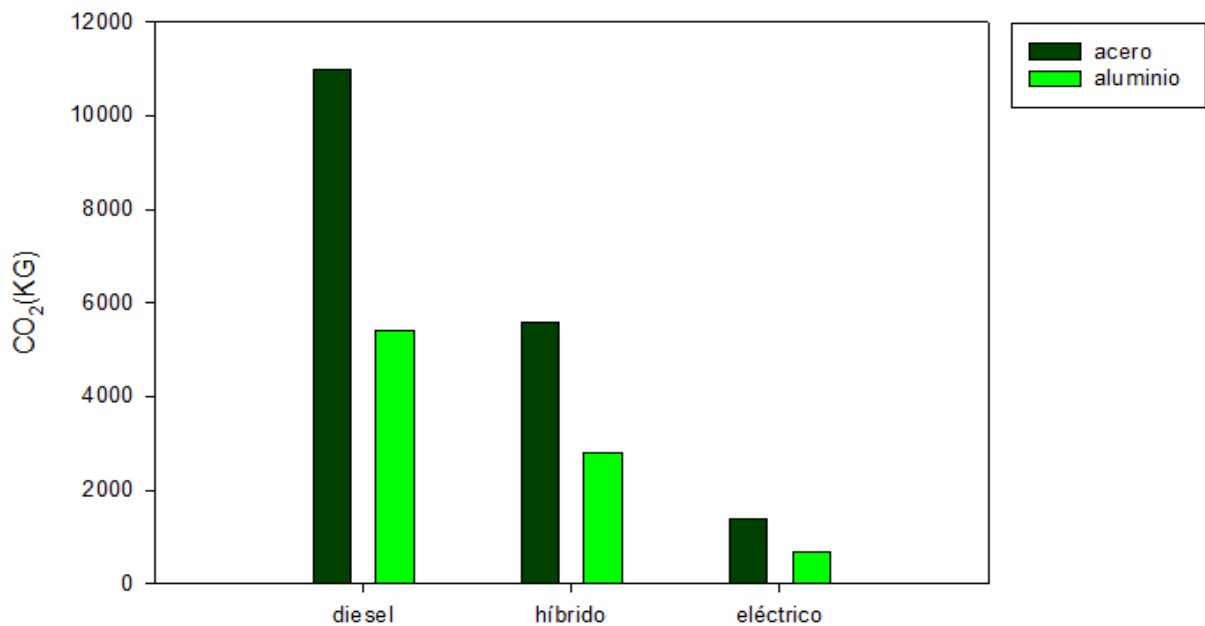


Figura 4-23. Huella de carbono emitida durante el uso del chasis como componente de un vehículo, CO<sub>2</sub> (kg)

Se observa una evolución global medioambientalmente favorable conforme nos acercamos al modelo eléctrico. Con esta escala puede apreciarse mejor las diferencias entre el chasis de aluminio y acero para el motor diésel, que, como ya se ha mencionado el peso más liviano del aluminio hace que el consumo sea menor. Esta relación tan dispar se iguala

conforme nos acercamos a un modelo 100% eléctrico, donde las diferencias energéticas y contaminantes entre acero y aluminio no son realmente significativas.

A priori, parece interesante optar por una propulsión híbrida o eléctrica en el mejor de los casos. Sin embargo, se puede ver que un modelo híbrido fabricado en acero de baja aleación **tiene una huella de carbono similar** a la del modelo diésel con la carrocería de aluminio (los niveles de energía consumida y de huella de carbono producida se mantienen inalterados). Por lo tanto, con perspectivas de negocio, la incorporación de un chasis de acero a un modelo híbrido, los cuales son más caros de fabricar, no sería una opción económica demasiado acertada. Cabe destacar que la herramienta Eco Audit de CES EduPack solo tiene en cuenta el CO<sub>2</sub> como emisión contaminante y no tiene en cuenta la formación de productos contaminantes derivados del nitrógeno, típicos de los motores diésel.

*Tabla 6. Valores de energía consumida y huella de carbono de los chasis de aluminio y acero para vehículos diésel, híbridos y eléctricos.*

Uso	Chasis de acero de baja aleación		Chasis de aluminio serie 2017	
	Energía (MJ)	CO <sub>2</sub> (kg)	Energía (MJ)	CO <sub>2</sub> (kg)
Diesel	150000	11000	76000	5400
Híbrido	79000	5600	40000	2800
Eléctrico	25000	1400	13000	690

En la *Tabla 6* se detallan las cantidades correspondientes a la energía consumida y a la huella de carbono emitida para ambos tipos de chasis y los tres modelos de vehículo. La contaminación disminuye conforme nos aproximamos al modelo eléctrico. La energía utilizada por el modelo híbrido se alterna entre las baterías eléctricas y el motor diésel que incorpora, el cual suele activarse al sobrepasar los 60 km/h en casi todos los coches con este

tipo de propulsión. Esa versatilidad permite reducir las emisiones de gases de efecto invernadero cuando circula dentro de ciudad a baja velocidad. Es una alternativa interesante para paliar problemas de contaminación intraurbanos como el smog o la concentración de óxidos de nitrógeno y azufre. En comparación con el vehículo diésel, utilizando un chasis de acero se reduce en un **47,3%** la energía consumida durante el uso y un **49,1%** las emisiones de CO<sub>2</sub>. Comparando los chasis de aluminio, las reducciones también suponen un **47,3%** de energía y un **48,1%** de reducción de huella de carbono.

El modelo menos contaminante es el propulsado mediante energía eléctrica. Su leve, pero existente contaminación se debe al origen de la energía eléctrica producida, que en España mayoritariamente proviene de la combustión del carbón. Este modelo resulta un **83,3%** más ecológico que el vehículo de motor diésel y alrededor de **65,38%** menos contaminante que el híbrido.

Por consiguiente, la sustitución del modo de propulsión del vehículo es medioambientalmente más favorable para el modelo 100% eléctrico. El peso del chasis debido al tipo de material sigue siendo relevante, aunque a este bajo nivel de contaminación no se aprecia tanto como en los otros dos modelos. La diferencia entre el acero y el aluminio para este modelo supone **12000 MJ** de energía ahorrada y **710 kg** de CO<sub>2</sub> que dejan de emitirse.

#### **4.2.2 Ecoauditoría de los componentes estructurales: parachoques.**

Para el análisis de ciclo de vida del parachoques se ha estudiado la posibilidad de fabricarlo con **acero de baja aleación, aluminio para forja de la serie 2017** y por último de **fibra de vidrio con matriz de polipropileno**, PPGF en adelante. El escenario planteado para su fabricación y transporte a montaje y concesionario es el mismo que para el chasis. Así, la comparación de los resultados de la fase de transporte se podrá comparar de forma más exacta. Solamente se han contrastado los resultados para el caso de un coche diésel, ya que,

la diferencia entre éste con el modelo híbrido y eléctrico reside exclusivamente en la etapa de uso en la que el mayor influyente es el tipo de motor; y ya se ha constatado un menor consumo de energía y generación de emisiones contaminantes conforme nos aproximamos al modelo totalmente eléctrico. El peso del componente resultaba muy influyente también en esta fase. Sin embargo, al tratarse el parachoques de una pieza relativamente ligera y con pesos muy similares independientemente del material escogido, el hecho de realizar el estudio para los tres modelos de vehículo no proporcionaría información demasiado relevante. El peso de los parachoques resulta de **14 kg** para el fabricado en acero, **10 kg** para el de aluminio y **8 kg** para el PPGF.

La herramienta ecoauditoría que ofrece CES EduPack resulta útil para identificar qué fase de la vida útil de un producto domina en términos de impacto medioambiental y discutir cómo afectan los cambios de diseño a dicho impacto. El análisis del ciclo de vida, como ya se ha expuesto anteriormente, también consta de las siguientes fases para el parachoques:

- **Materiales:**

Se ha empleado acero de baja aleación, aluminio para forja de la serie 2017 y por último PPGF. Al igual que con la carrocería, el acero empleado ha de ser uno con fines estructurales, que sea ligero en la medida de lo posible pero que sobre todo posea la resistencia mecánica suficiente como para soportar impactos de determinada magnitud, el cual, es el fin del para golpes como primer elemento de seguridad pasiva de un automóvil en caso de colisión frontal. Del mismo modo, el acero empleado se trata de un acero de baja aleación con fines estructurales típico, como podría ser el **AISI 3140**, equivalente al F1250 de la norma española. Es un acero con buena resistencia mecánica y buena capacidad de absorber impactos. Su composición es la siguiente: C 0.38-0.43 / Ni 1.1-1.4 / Mn 0.7-0.9 / Cr 0.55-0.75 / Si 0.15-0.35/ P<0.04, S<0.04. De igual forma que para el chasis, el acero del parachoques es tratado térmicamente con temple y un revenido con el fin de mejorar su dureza y propiedades mecánicas en general.



En cuanto al aluminio, se ha escogido también la **aleación de la serie 2017**, una aleación de aluminio con cobre (entre un 2% y un 6%) típica para componentes estructurales en general y que requieran de buenas prestaciones mecánicas. Aunque se podría haber escogido una aleación de la serie 2014 que, a pesar de tener unas propiedades mecánicas no tan buenas, también resultaría satisfactorio para este propósito. Se trata de una aleación para manufactura mediante forja trabajando en un intervalo de temperatura entre 380 y 460°C. Es endurecible mediante tratamiento térmico, como ya se ha expuesto en el caso del chasis en la *figura 4-13*. El aluminio se ha ido incorporando de forma progresiva a las carrocerías y otros componentes estructurales de vehículos debido a su ligereza con respecto a otros materiales como el acero. Un menor peso equivale a una reducción del consumo y, por consiguiente, una disminución de las emisiones contaminantes. A pesar de su mayor precio, cada vez se contempla más como sustituto del acero en el ámbito automovilístico. Resulta interesante incluir fracciones de ambos metales que ya han sido reciclados anteriormente debido a que sus procesos de reciclado son sencillos, medioambientalmente sostenibles y, además, no deterioran las propiedades del material que lo hacen apto para los servicios en cuestión.

- **Fabricación:**

La fabricación del parachoques para ambos metales consta de procesos de deformación plástica como el forjado y laminado. Cerca del 90% de los productos son manufacturados mediante estos procesos. Normalmente, el metal, ya sea acero o aluminio llega a la fábrica enrollado en bobinas de varias toneladas de peso. Estas bobinas se desenrollan, son cortadas en laminas y transportadas hasta la zona de moldeo donde se someten al proceso de forjado en frío. La pieza se genera por la compresión de dicha lamina entre dos piezas llamadas matrices, fabricadas con un acero muy duro con elevado contenido en carburos, que le confieren la forma deseada. Es un proceso rápido que permite la elaboración de lotes voluminosos en poco tiempo.

Si el parachoques está fabricado con PPGF, el proceso de manufactura es distinto. Se realiza en este caso un moldeo por compresión. El composite, elaborado a partir de una matriz de polipropileno al que se le agrega un refuerzo a base de fibras de vidrio, formando una premezcla que es colocado en un molde caliente de acero que posteriormente se cierra aplicando la presión necesaria (normalmente de 3.7 MPa) para que el polímero en estado viscoso rellene por completo la cavidad del molde. El material compuesto se enfría en su interior, para luego abrirlo y extraer la pieza. El moldeo por compresión se utiliza para dar forma a los compuestos BMC (Bulk Molding Compound) y SMC (hoja de compuestos de moldeo). Este último es el caso para el moldeo de parachoques, con un porcentaje de fibras de refuerzo mayor que el primero. El BMC, al poseer menor cantidad de refuerzo es idóneo para la fabricación de piezas 3D de geometrías complejas. Sin embargo, el SMC limita su aplicación a conformados laminares. Éste es uno de los procesos menos costosos para la producción de grandes volúmenes de componentes. Los paragolpes que formarán parte de vehículos con sensores incorporados serán troquelados posteriormente para realizar las cavidades donde se alojarán dichos sensores.

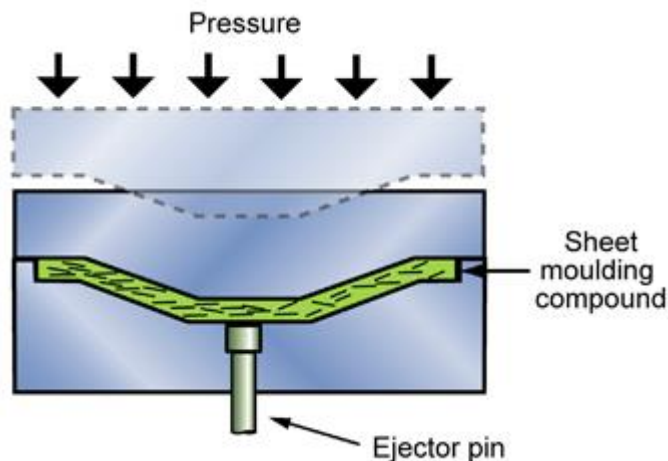


Figura 4-24. Moldeo por compresión de PPGF (SMC)



Figura 4-25. Maquinaria empleada para el moldeo de un parachoques de PPGF.

- **Transporte**

Los medios de transporte disponibles en el programa CES EduPack ya han sido comentados anteriormente en: *Ecoauditoría de los componentes estructurales: chasis*.

Para la situación expuesta, el coche ha de ser trasladado de fabrica a montaje en Francia y después ser llevado al concesionario de destino en Cartagena (España) mediante un tráiler de 32 toneladas por carretera durante 1700 km. Continua siendo interesante la opción del transporte en ferrocarril como medio de transporte terrestre menos contaminante.

- **Uso**

Al formar parte de un vehículo, la utilización de los componentes se verá estrictamente ligada al tipo automóvil en cuestión. El peso de cada componente y el tipo de motor influye directamente en el consumo energético y la contaminación producida por vehículo. El parachoques, al tratarse de un material relativamente ligero, independientemente de material del que esté fabricado, el valor de su peso no será una característica demasiado relevante para el consumo. Como ya se ha expuesto en los resultados anteriores sobre las diferencias entre el uso de motores eléctricos y los que funcionan con combustible fósil (*Figura 4-23*). Huella de carbono emitida durante el uso del chasis como componente de un vehículo, CO<sub>2</sub>

(kg)), el uso de motores híbridos o eléctricos son una buena alternativa para reducir el impacto medioambiental que los motores diésel o gasolina pudieran producir.

- **Fin de vida**

La reutilización y reciclado de materiales y componentes es una práctica muy interesante, a la vez que rentable, la cual permite ahorrar energía de forma significativa. Sin embargo, la fibra de vidrio es un material cuyo reciclado aun no es completamente viable y es por ello por lo que, para aprovechar su desecho se somete a una combustión con el fin de obtener energía eléctrica, permitiendo así reducir en cierta medida la huella de carbono. Es cierto que, aunque el reciclado de este composite no se esté llevando a cabo aun, hay estudios como el realizado en 2017 en la Universidad de Alicante en el cual documentan el desarrollo una tecnología pionera a nivel mundial para reciclar estructuras compuestas de fibra de vidrio. Según estima Befesa Medio Ambiente, compañía internacional especializada en la gestión integral de residuos, “**150.000 toneladas anuales** de distintos tipos de residuos de fibra de vidrio acaban en vertederos de la Unión Europea”. El aprovechamiento de estos residuos es nulo en este caso. El proceso de “reciclado” que sustenta este estudio consiste en separar completamente la resina del refuerzo mediante un proceso químico sin necesidad de unas condiciones de temperatura y presión severas, por lo que el material no se degrada y puede ser reutilizado para la fabricación de nuevos componentes. Además, es económicamente muy rentable ya que el coste energético del proceso químico es bajo y puede ser automatizado.

[24]

Las técnicas actuales de reciclado de composites son:

- Trituración del material y reutilización en nuevas matrices poliméricas. El producto final carece las mismas propiedades iniciales, por lo que sería un proceso de infrarreciclado.

- Pirólisis: Este proceso permite la eliminación de la resina y generar energía, ya que se usa como combustible. Aunque aumenta la huella de carbono y degrada las fibras de vidrio.
- Separar la resina de la fibra de vidrio. Existen dos métodos principales: la hidrólisis y el procesado químico a altas temperaturas, pero estos no son totalmente efectivos. Se consigue reciclar un 80% de todo el material.

En definitiva, los métodos actuales son agresivos con los materiales y no se consigue una separación total que permita su reutilización.

A continuación, se muestran las gráficas y los resultados obtenidos de las ecoauditorías realizadas para los tres tipos de parachoques fabricados:

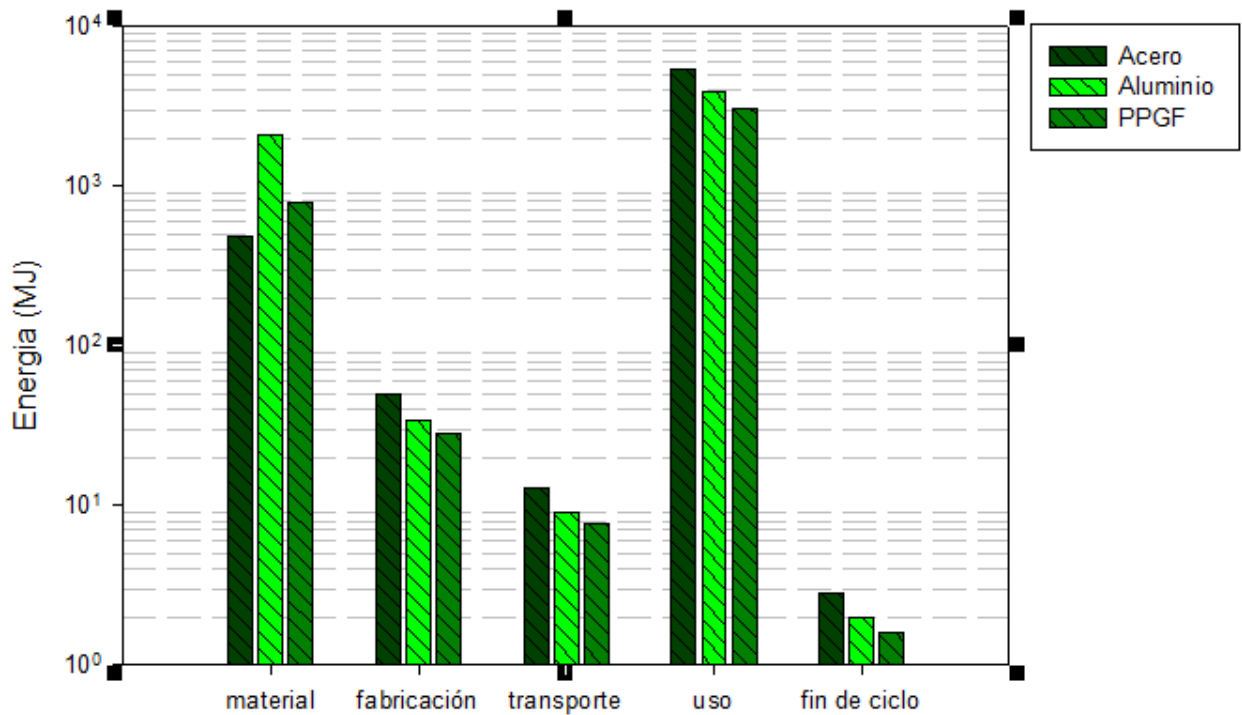


Figura 4-26. Energía consumida (MJ) en las distintas fases de vida de los parachoques fabricados en acero, aluminio y PPGF.

La gráficaFigura 4-26. Energía consumida (MJ) en las distintas fases de vida de los parachoques fabricados en acero, aluminio y PPGF. expone mediante un diagrama de barras

agrupado la energía consumida en MJ en escala logarítmica de las distintas etapas del análisis del ciclo de vida del producto, detalladas anteriormente. Compara el consumo energético de las opciones contempladas para la fabricación del parachoques (acero, aluminio y acero y aluminio reciclados) dentro de cada grupo, de forma que el contraste de los resultados resulta muy visual. Al igual que en el estudio del chasis, se aprecia un claro dominio en consumo energético por parte de las fases de uso y obtención del material.

Como se ya se ha expuesto, el aluminio sigue siendo el material más costoso en términos energéticos de obtener, incluso por encima de la fibra de vidrio. La captación de 10 kg de este material correspondientes al peso del paragolpes necesita alrededor de **2000 MJ** de energía, seguido de los 8 kg de material compuesto de polipropileno y fibra de vidrio con **800 MJ** y los 14 kg de acero de baja aleación con un coste de **488 MJ**. Es decir, la energía empleada para la obtención del aluminio es un poco más del doble que para el composite y casi cuatro veces mayor que para el acero, a pesar de que la masa de éste sea superior.

La fabricación es una fase en la que tampoco se puede descuidar el consumo energético y la contaminación producida. Se debe perseguir el concepto de desarrollo sostenible, junto a “lean and sustainable manufacturing “para optimizar todo lo posible los procesos. El hecho de que el conformado del acero requiera de mayor energía es debido a que su capacidad de deformación es más escasa que la del aluminio, como ya se ha mencionado. El moldeo por compresión para la elaboración del parachoques de fibra de vidrio es el proceso más barato y que por tanto tiene un menor consumo energético. Éste se reduce un **43.78%** con respecto al de aluminio y un **17.9%** con respecto al de acero. Además de suponer un coste energético menor, se necesita menos cantidad de material para hacer un parachoques de PPGF que para uno de metal con las mismas dimensiones. Esta reducción de la energía para el proceso de conformado deriva también en una disminución del precio total del producto final. Se ahorra energía y costes de producción, manteniendo una funcionalidad del producto competente.

El peso del producto es la característica que influye directamente en el consumo energético y en la contaminación durante su transporte. El traslado del acero tiene un consumo mayor que el de aluminio y éste a su vez al del material compuesto, siendo la energía consumida **12 MJ, 9 MJ y 7.67 MJ** respectivamente

La vida útil del parachoques como un componente que forma parte de un vehículo durante 12 años de vida útil resulta la fase más costosa con diferencia en términos energéticos. Supone unos **5400 MJ** para el fabricado en acero micro aleado, **3850 MJ** para el de aleación de aluminio y **3080 MJ** en el caso del fabricado con PPGF. Si comparamos los resultados con los del chasis, se observa que el paragolpes tiene un consumo energético bastante menor, indistintamente del material del que esté fabricado. Otra vez, el peso vuelve a jugar un papel importante en el consumo.

Ya se han expuesto en el apartado anterior las ventajas que supone el reciclado del chasis fabricado en acero y aluminio. En este caso, el fin de ciclo de los materiales ha sido el vertedero (chatarrería), es decir, no se ha hecho un aprovechamiento de los desechos. De este modo, se pueden comparar los niveles de contaminación que produce deshacerse de dichos materiales. Todos ellos suponen alrededor de 2 MJ de consumo energético, siendo el menos exigente en este sentido la fibra de vidrio. Es interesante a nivel ecológico reciclar los componentes tanto de acero como de aluminio. Como ya se ha mencionado anteriormente, estos metales poseen una tasa de reciclabilidad total y no pierden sus propiedades al hacerlo. La fibra de vidrio puede “reciclarse” mediante un proceso de combustión en el que los desechos son incinerados. De esta forma, es imposible volver a aprovechar las fibras para nuevos materiales, aunque la combustión permite aprovecharlo para generar energía eléctrica.

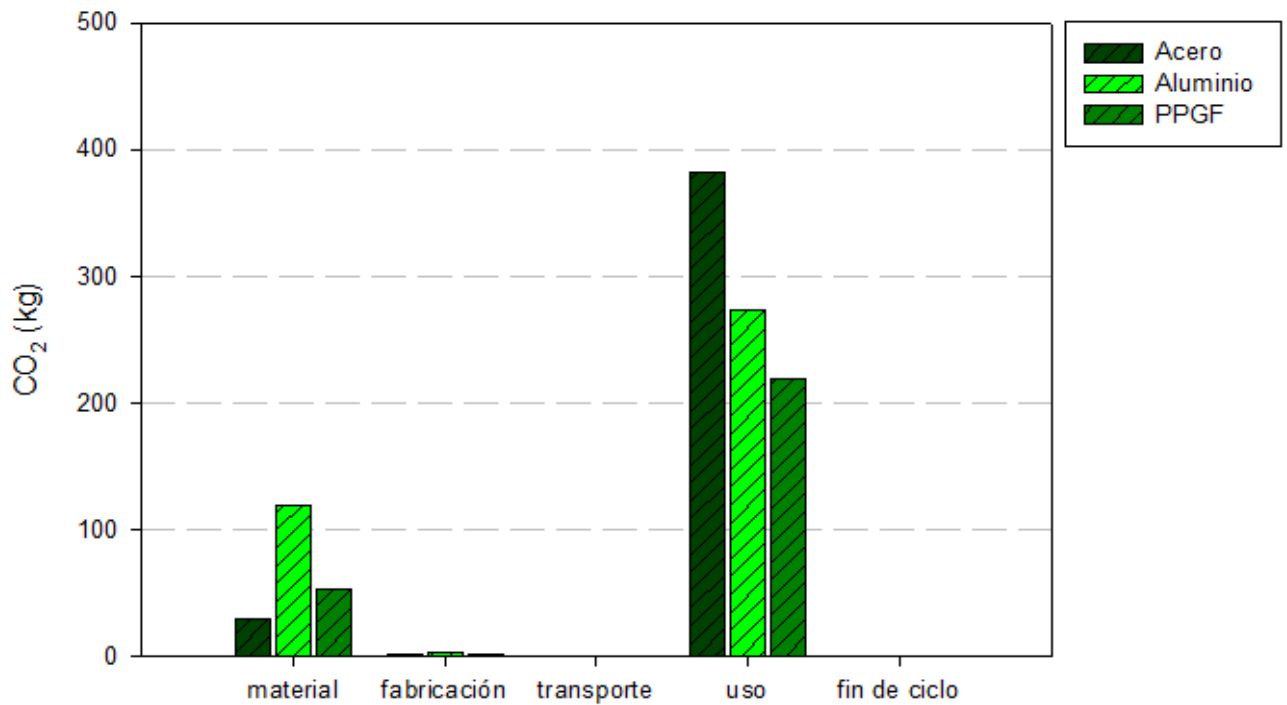


Figura 4-27. Huella de carbono emitida CO<sub>2</sub> (kg) en las distintas fases de vida de los parachoques fabricados en acero, aluminio y PPGF

Los resultados de la huella de carbono emitida en kg de CO<sub>2</sub> siguen una tendencia parecida a los de la energía consumida para las distintas fases del ciclo de vida. Se comparan las emisiones contaminantes de las distintas fases del análisis de ciclo de vida agrupados por tipos de materiales en un gráfico de barras con una escala lineal. Continúan predominando las etapas de obtención del material y sobre todo la fase de uso. El resto no ofrece valores de contaminación significativos. El aluminio tiene una tasa de contaminación mayor en su proceso de obtención con 120 kg de CO<sub>2</sub>, 90.4 kg más que el de acero de baja aleación y 66 kg más que la fibra de vidrio.

En la etapa de vida dominante en términos de contaminación, el uso del parachoques como parte integrante de un vehículo supone una **media del 80.3% de la contaminación total**. La huella de carbono emitida es superior para el parachoques de acero con 383 kg de CO<sub>2</sub>, seguido del fabricado en aluminio con 274 kg y por último el de PPGF con 219 kg de CO<sub>2</sub>. El factor que influye directamente en la contaminación es el peso del componente, ya que, siendo redundantes, un peso mayor implica un consumo mayor. La reducción de la huella



de carbono al reemplazar el acero un componente hecho de aluminio supone un **28.46%** y un **42.82%** al emplear la fibra de vidrio.

Tabla 7. Valores de energía consumida y huella de carbono de los parachoques de acero, aluminio y PPGF

Fases	Parachoques de acero		Parachoques de aluminio		Parachoques de PPGF	
	Energía (MJ)	CO <sub>2</sub> (kg)	Energía (MJ)	CO <sub>2</sub> (kg)	Energía (MJ)	CO <sub>2</sub> (kg)
Material	488	29,6	2070	120	799	53,9
fabricación	49,8	1	34,1	2,72	28	2,24
Transporte	12,7	0,9	9,05	0,643	7,67	0,545
Uso	5400	383	3850	274	3080	219
Fin de vida	2,8	0,168	2	0,12	1,6	0,096
<b>Total</b>	<b>5950</b>	<b>414</b>	<b>5970</b>	<b>397</b>	<b>3916,27</b>	<b>276</b>

Por lo tanto, en base a los resultados obtenidos, parece razonable descartar el acero como material para la manufactura del parachoques. Su conformado es más costoso y es el más contaminante durante su uso debido a su mayor peso. La diferencia entre la contaminación producida por el componente de aleación de aluminio y de material compuesto reforzado con fibras de vidrio no es demasiado significativa, por lo que se valora el total de emisiones contaminantes durante todas las fases de vida, siendo 397 kg de CO<sub>2</sub> para la pieza de metal y 276 kg para el de PPGF. **La diferencia es de más de 100 kg de huella de carbono** que ha sido vertida a la atmosfera. Es cierto que no supone una cantidad tan elevada, aunque toda huella de carbono que se pueda eliminar hoy en día es poca. Siguiendo esta lógica, medioambientalmente sería más viable escoger la fibra de vidrio como claro material del parachoques. Sin embargo, la posibilidad de reciclar y reutilizar completamente y de forma barata y eficiente la pieza de aluminio provoca que éste no sea descartado como material “ideal”.

El programa Ces EduPack ofrece la siguiente información en su base de datos de materiales con eco propiedades, donde se observa que el reciclaje del aluminio permite un ahorro de 1.15 kg de CO<sub>2</sub> por cada kilogramo de material. Mientras que, el aprovechamiento de la energía por combustión de la fibra de vidrio supone una reducción de aproximadamente 1.31 kg de huella de carbono. Sería interesante comparar en este caso los costes de los procesos de reciclaje para comprobar si existe alguna mejoría que decantase la elección hacia una de las opciones. A pesar de todo y, basándonos en el dato anterior sobre la eliminación de unos 100 kg de dióxido de carbono y que las propiedades mecánicas de ambos materiales son competentes para la función que deben desempeñar, se puede asumir por consiguiente que la elección de la fibra de vidrio con matriz termoplástica es una interesante opción como material sustituyente del aluminio para el parachoques de un automóvil.

#### Reciclado del material: energía, CO<sub>2</sub> y fracción reciclable

Reciclaje	✓			
Contenido en energía, reciclado	18	-	19.6	MJ/kg
Huella de CO <sub>2</sub> , reciclado	1.02	-	1.15	kg/kg
Fracción reciclable en suministro habitual	33	-	55	%
Reciclado inferior	✓			
Combustión para recuperar energía	✗			
Vertedero	✓			
Biodegradable	✗			
Ratio de toxicidad	No toxico			
Fuente renovable	✗			

Figura 4-28. Reciclado de la aleación de aluminio. Base de datos: CES EduPack.

#### Reciclado del material: energía, CO<sub>2</sub> y fracción reciclable

Reciclaje	✗			
Fracción reciclable en suministro habitual	0.5	-	1	%
Reciclado inferior	✓			
Combustión para recuperar energía	✓			
Calor neto de combustión	* 14	-	14.7	MJ/kg
Combustión CO <sub>2</sub>	* 1.24	-	1.31	kg/kg
Vertedero	✓			
Biodegradable	✗			
Ratio de toxicidad	No toxico			
Fuente renovable	✗			

Figura 4-29. Reciclado de la fibra de vidrio SMC. Base de datos: CES EduPack.

### **4.2.3 Ecoauditoría de los componentes estructurales: bloque motor.**

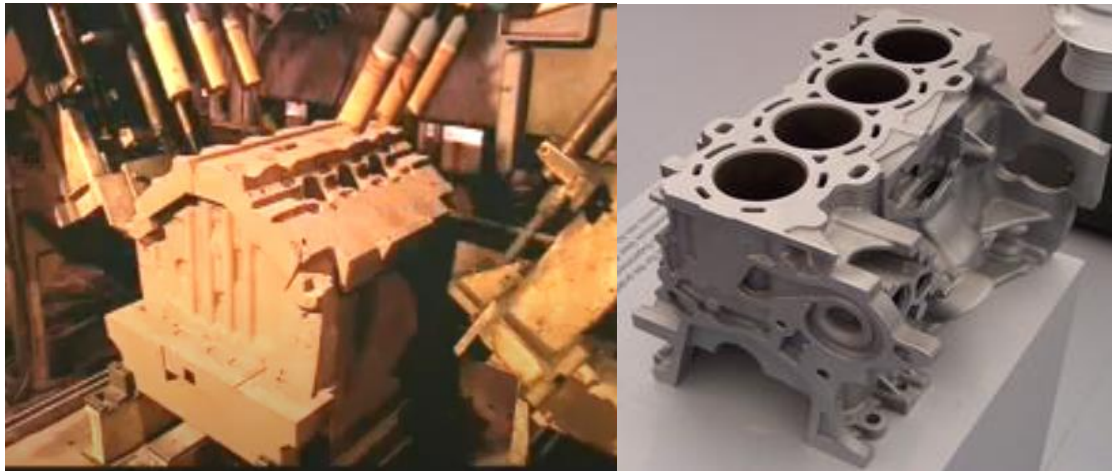
El bloque motor es uno de los componentes de metal más pesados del vehículo, que contiene todos los elementos del motor. El motor de combustión interna alternativo es el corazón de la máquina. En el interior de los cilindros se produce la combustión de la mezcla de oxígeno y combustible que transforma esa energía química contenida en la mezcla en energía mecánica que es transmitida por los pistones a los componentes de transmisión. Para el análisis de ciclo de vida del bloque motor se han empleado los materiales utilizados por excelencia en la industria automovilística para este fin: fundición de hierro gris y fundición de aluminio. El escenario planteado para su manufactura (mediante moldeo por fundición para ambos metales) y transporte a montaje y concesionario es el mismo que para los anteriores componentes. El peso del componente volverá a ser clave en lo que a la fase de uso se refiere, puesto que más peso implica directamente mayor consumo. El de fundición gris posee una masa de 150 kg y el de aluminio, más ligero, de 90 kg.

La composición de la fundición de hierro es: Fe/3.2-4.1%C/1.8-2.8%Si/<0.8%Mn/<0.1%P/<0.03%S. Éste es el material que hizo posible la revolución industrial. Sin embargo, hoy en día destaca por ser el metal más barato utilizado en ingeniería. Las aleaciones de aluminio para fundición contienen entre un 5 y un 22% de silicio, el cual les confiere una excelente fluidez para rellenar el molde, aunque la geometría de éste sea muy compleja. Suele contener cobre o magnesio para conseguir un endurecimiento por envejecimiento. Posee un alto grado de conductividad térmica, lo cual permite disipar mejor el calor del motor en comparación con la fundición de hierro.

Los bloques están hechos a partir de una sola pieza elaborada mediante fundición en arena. Cada molde está formado por núcleos que encajan entre sí y tienen la geometría requerida para darle forma al motor. El metal fundido se vierte desde abajo mediante una ligera presión. De esta forma se evita que entre en contacto con el aire pudiendo formar óxidos. Tras el vaciado, el molde con el metal solidificado se expone a altas temperaturas en

un horno durante horas con el fin de descomponer la cola para que la arena se desprenda. Además, esta exposición prolongada al calor refuerza el metal.

Ambos materiales son reciclables y pueden reutilizarse posteriormente en otras aplicaciones ya que siguen una economía de vida circular, por lo que estos metales pueden ser reciclados de forma continua sin que sus propiedades se vean afectadas. Siempre es interesante procurar reducir la huella de carbono.



*Figura 4-30. Fundición en molde de arena de un bloque motor.*

A continuación, se muestran las gráficas con los resultados obtenidos de la energía consumida (MJ) y la huella de carbono emitida (kg de CO<sub>2</sub>) durante las fases de vida del bloque motor para ambos materiales:

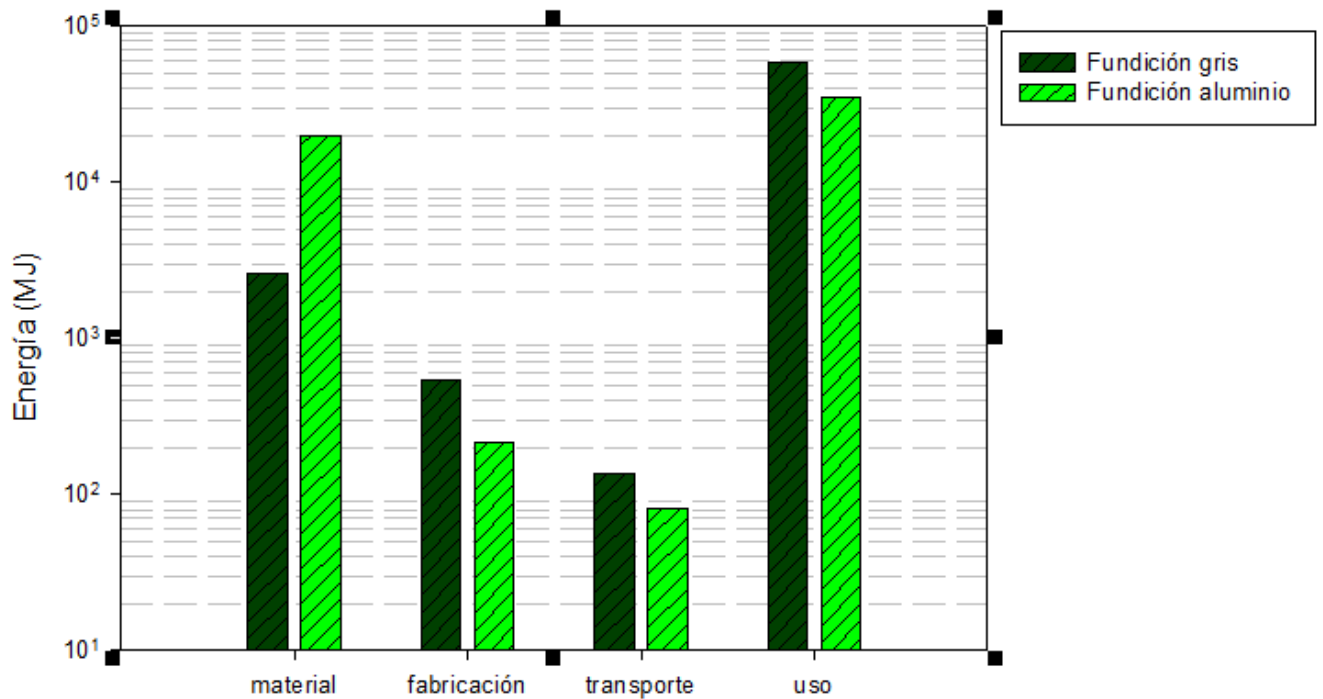


Figura 4-31. Energía consumida (MJ) en las distintas fases de vida del bloque motor de fundición gris y aluminio.

Al igual que en los casos anteriores, las fases predominantes en el consumo de energía y contaminación son las de uso y obtención de material. La obtención para la fabricación del bloque motor es energéticamente mucho más demandante que la del hierro con **17210 MJ** más de consumo, a pesar de que se necesita menor cantidad de aluminio para su elaboración. Como ya se ha constatado, el mineral de aluminio es muy abundante, pero se necesita mucha energía para extraerlo. La fase de manufactura del hierro es casi un **60%** más demandante energéticamente que la fundición de aluminio. Esto se debe a que, además de que para la colada del bloque de fundición gris son necesarios alrededor de 60 kg más de material, es un proceso que requiere de mayores temperaturas para llevar al metal a su punto de fusión (1400°C para el hierro y 800°C para licuar el aluminio).

En la etapa de traslado, el peso del componente vuelve a ser el único factor influyente en el gasto energético y la contaminación. El transporte del bloque motor de fundición de hierro necesita **136 MJ** y el de aluminio **81.5 MJ**. De idéntica forma sucede en la fase de uso, en la que el bloque de hierro es más contaminante por su mayor peso. Supone un consumo de **57800 MJ** frente a los **34700 MJ** del de aluminio.

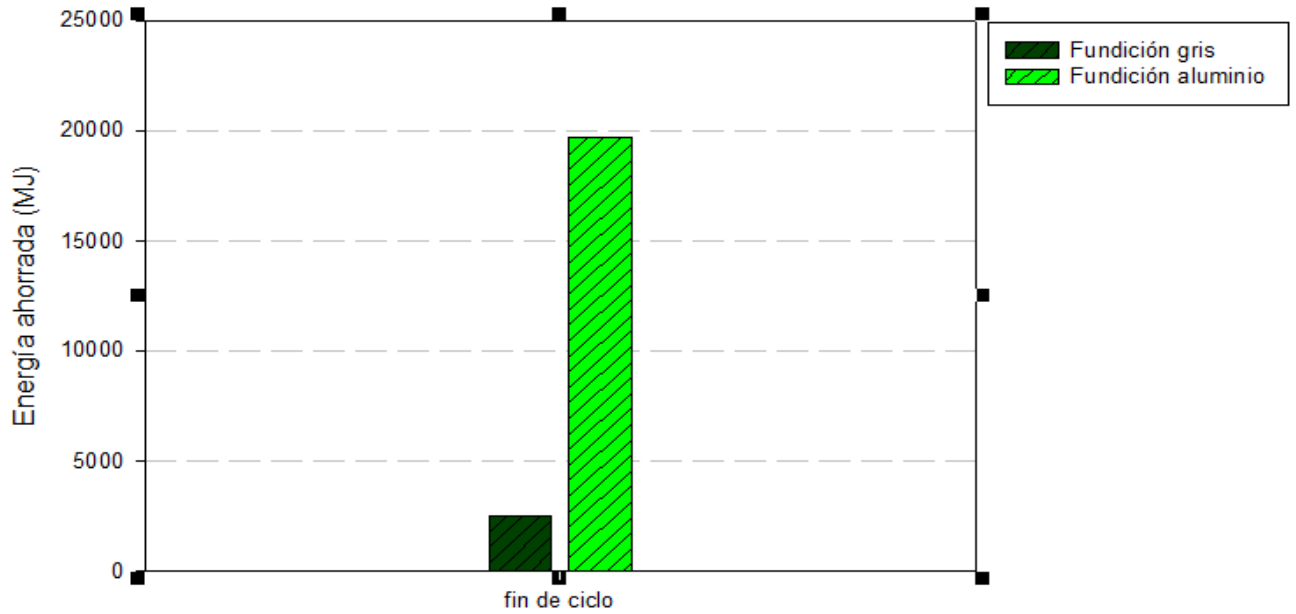


Figura 4-32. Energía consumida (MJ) en escala lineal en la fase de fin de vida del bloque motor de fundición gris y aluminio. Nótese que los valores serían negativos, pero están expresados en valor absoluto, en términos de energía ahorrada.

El reciclado de los motores permite un ahorro de energía de **2500 MJ** para el de fundición gris y **19700 MJ** para el de aluminio. Se observa que el reciclado del segundo es mucho más eficiente, permitiendo un ahorro del **56.28%** del total de energía gastada durante las fases del ciclo de vida del bloque motor de aluminio.

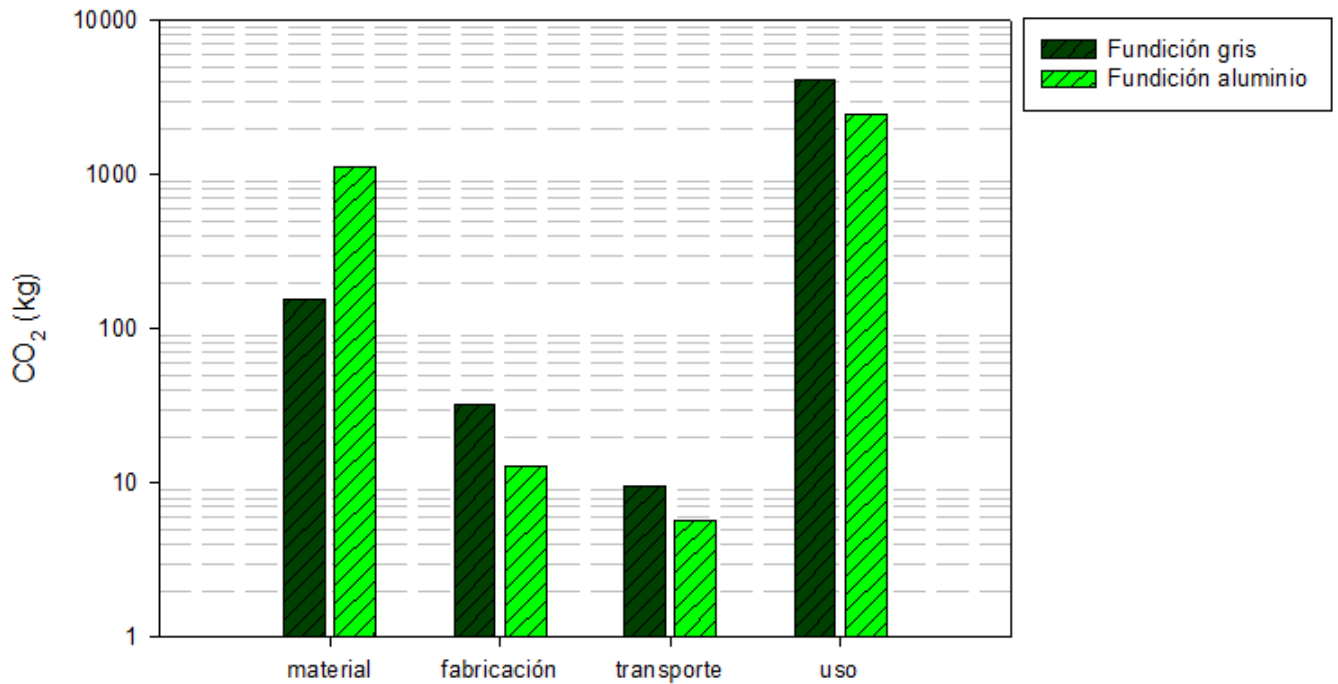
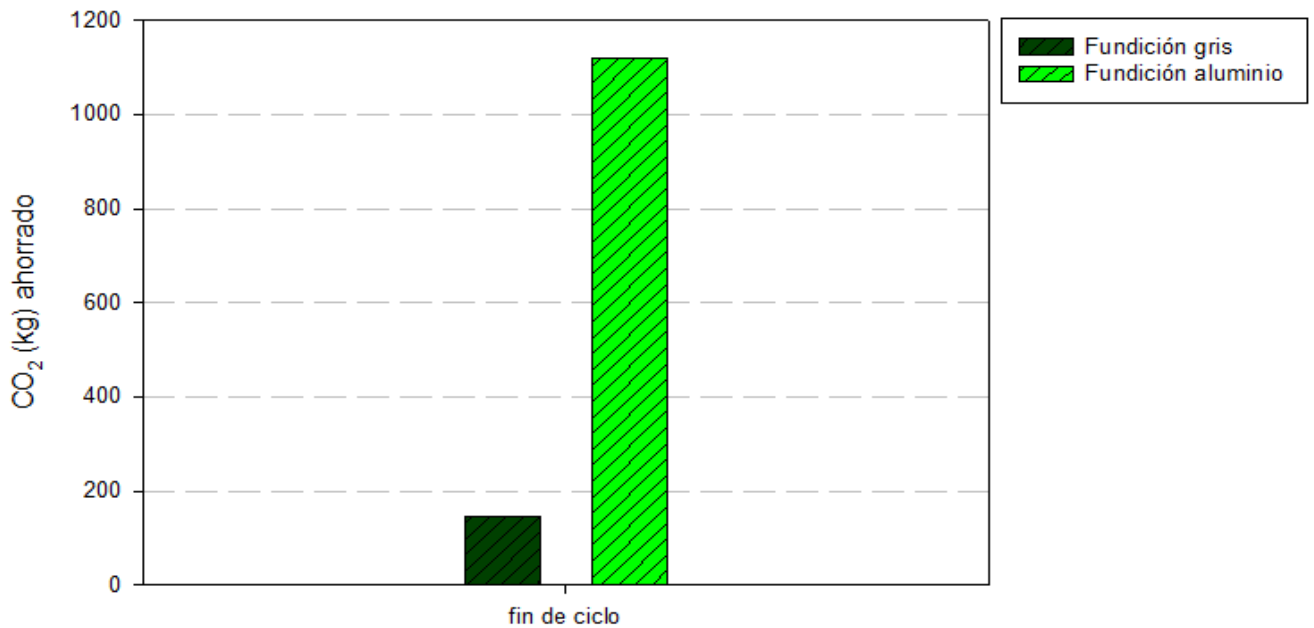


Figura 4-33. Huella de carbono emitida CO<sub>2</sub> (kg) en las distintas fases de vida del bloque motor de fundición gris y de aluminio.

La cantidad de dióxido de carbono vertido a la atmósfera durante todo el ciclo de vida sigue la misma tendencia que la energía consumida. Por un lado, la obtención del aluminio es un 86.46% más contaminante que la del hierro. Por otro lado, en la etapa más contaminante, el uso del bloque motor como componente de un vehículo supone unas emisiones bastante elevadas de CO<sub>2</sub>. Se obtiene una huella de carbono de 4100 y 2460 kg de CO<sub>2</sub> para los bloques de hierro y aluminio, respectivamente. El uso de la fundición de aluminio para la elaboración de este componente está cada vez más arraigado en la industria del automovilismo. Aligerar el peso de los vehículos es un factor muy importante para reducir el consumo y, por tanto, las emisiones de gases de efecto invernadero. Se aprecia una reducción del **40%** de la huella de carbono al utilizar una fundición de aluminio en vez de una de hierro. Inclusive sin tener en cuenta la fase de reciclado, ya se puede afirmar que la aplicación del aluminio para este fin es más eficiente y medioambientalmente más sostenible que el uso de

la fundición gris. Por este motivo, la fabricación de motores a partir de este metal se está quedando obsoleta.



*Figura 4-34.. Huella de carbono eliminada, CO<sub>2</sub> (kg) en la fase de fin de vida del bloque motor de fundición y de aluminio. Nótese que los valores serían negativos, pero están representados en valor absoluto, en términos de huella de carbono reducida.*

Como era de esperar, el reciclado del componente de aluminio es mucho más eficiente. La reducción de la huella de carbono es de 1120 y 147 kg de CO<sub>2</sub> para el bloque de fundición de aluminio y de hierro, respectivamente. Evidentemente, el reciclado es un proceso beneficioso para el medioambiente, siempre y cuando resulte económica y productivamente viable. El reciclado más sencillo y eficiente del aluminio frente al hierro supone un punto más a favor para la elección de este metal como base para la fabricación de un bloque motor, indistintamente de si formará parte éste de un vehículo utilitario o deportivo.



Tabla 8. Valores de energía consumida y huella de carbono de los

Fases	Bloque motor de fundición gris		Bloque motor de fundición de aluminio	
	Energía (MJ)	CO <sub>2</sub> (kg)	Energía (MJ)	CO <sub>2</sub> (kg)
Material	2590	153	19800	1130
Fabricación	533	32	215	12.9
Transporte	136	9.64	81.5	5.78
Uso	57800	4100	34700	2460
Fin de vida: reciclado	-2490	-147	-19700	-1120
<b>Total</b>	<b>58600</b>	<b>4150</b>	<b>35000</b>	<b>2490</b>

### 4.3 Evaluación económica de los componentes

Una vez que se ha realizado la evaluación ambiental de los diferentes componentes, pasamos a estudiar la viabilidad económica de los mismos. La *Tabla 9*. Precio de los materiales de los componentes del vehículo. muestra un desglose del precio en euros correspondiente de cada uno de los materiales seleccionados para la confección de los componentes por kilogramo de peso de peso. A raíz de estos datos proporcionados por Ces EduPack y con la masa de cada elemento, se obtiene el precio total de cada pieza en euros. Este precio final es una estimación ya que no tiene en cuenta factores como la mano de obra o la comercialización del producto.

Tabla 9. Precio de los materiales de los componentes del vehículo.

Materiales y componentes	Precio (€/kg)	Peso del componente (kg)	Precio total (€)
Acero de baja aleación AISI 3140: chasis / parachoques	0.626	300 / 14	187.8 / 8.764
Aleación de aluminio 2017: chasis / parachoques	1.45	150 / 10	217.5 / 14.5
Fibra de vidrio (SMC): parachoques	4.74	8	37.92
Fundición de hierro gris: bloque motor	0.464	150	69.6
Fundición de aluminio: bloque motor	1.41	90	126.9

#### Chasis:

El acero microaleado tiene un precio unitario de 0.626 €. Para un peso de 300 kg, se obtiene un precio final del componente de **187.8 €**. Al emplear la aleación de aluminio de 2017 con un precio unitario de 1.45 €/kg para 150 kg de material necesario, se obtiene un precio final de **217.5 €**.

Es cierto que el acero resulta un poco más económico. Sin embargo, la fabricación en aluminio supone una menor cantidad de material que aporta mayor ligereza al vehículo y un reciclado más eficiente, lo que conlleva una reducción del impacto medioambiental como se ha constatado con anterioridad. Por lo tanto, el precio total del vehículo aumentará; pero supondrá un ahorro destacable para el consumidor debido a la reducción del consumo que supone la fabricación de la carrocería con este material.

#### Parachoques:

A la fabricación del parachoques con acero de baja aleación se le atribuye a un peso de 14 kg que, con un precio unitario de 0.626 €, supondrá un precio final de **8.764 €**; mientras

que, para la fabricación de dicho componente, el precio por es de 1.45 €/kg de aleación de aluminio, con un peso de 10 kg, el coste final será de **14.5 €**. Por otra parte, la aplicación de la fibra de vidrio para un parachoques de 8 kg con un precio de 4.74 €/kg supone un coste total de **37.92 €**. Como se puede observar, el precio total del composite es más del doble que el del aluminio y más de cuatro veces el del acero. Esta diferencia de precio puede verse subsanada por el menor coste que supone el proceso de conformado mediante moldeo por compresión utilizado para manufacturar el parachoques con PPGF. Además, la ligereza que aporta el uso de la fibra de vidrio en componentes del turismo favorece la tan buscada reducción del consumo, favorable para el consumidor al disminuir el gasto de combustible y también para el medio ambiente al reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>.

#### **Bloque motor:**

Para la fabricación de este componente, se considera interesante la utilización, o bien de fundición de hierro gris o de fundición de aluminio. En cuanto al primer elemento, se emplean 150 kg para su elaboración a 0.464 €/kg de fundición de hierro gris, con un precio final de **69.6 €**. Por otro lado, para segundo elemento se necesitan 90 kg de fundición de aluminio a 1.41 €/kg, cuyo precio final es de **126.9 €**. Se aprecia el alto precio de la fundición de aluminio en comparación con la de hierro. En concreto, la adquisición de dicho material es 1.82 veces mayor, lo cual encarece el precio de venta del vehículo. A pesar del mayor precio, las numerosas ventajas que se han expuesto en el apartado *Ecoauditoría de los componentes estructurales: bloque motor*. hacen que el aluminio sea el material por excelencia para esta aplicación.

## 5. Resumen y conclusiones

El objeto de este Trabajo de Fin de Grado ha consistido en realizar una selección de materiales para la fabricación de determinados componentes estructurales de automóviles de uso convencional: chasis y carrocería, parachoques y bloque motor. Esta selección se ha realizado en base a la obtención, procesabilidad y principalmente, al impacto ambiental producido por el elemento en cuestión a lo largo de su ciclo de vida, teniendo en cuenta las propiedades mecánicas exigidas para tales aplicaciones; puesto que las piezas de automóviles estudiadas han de ser capaces de soportar esfuerzos, impactos, elevadas temperaturas o una combinación de ellas. Para tales fines, se ha hecho uso de la herramienta **ecoauditoría** del programa CES EduPack para el análisis del ciclo de vida. De forma que ha sido posible la cuantificación del consumo energético y de la huella de carbono emitida durante cada una de las diferentes fases del LCA, haciendo posible la comparación de varios materiales para cada una de las aplicaciones propuestas. Los conceptos de sostenibilidad y reducción del impacto ambiental se han contemplado como factores principales de la selección.

Finalmente, se ha realizado una evaluación económica con el fin de determinar la viabilidad económica de los diferentes componentes mediante la comparación de precios. Sin descuidar el objetivo principal de conseguir un componente funcional y que sea medioambientalmente sostenible.

En España se alcanzó la tasa de motorización más abrupta de la historia en el año 2019. Se dató que por cada 1000 españoles se contaba con un total de 500 automóviles. Es uno de los países de Europa con mayor número de vehículos por habitante. El problema de la contaminación está cada vez más presente como algo que forma parte de nuestras vidas. El sector del transporte es el causante del 30% de las emisiones de gases de efecto

invernadero de la UE, de las que cerca del 72% son producidas por el transporte por carretera. [25]

El cambio climático es una realidad que ya afecta de forma considerable al mundo entero. En concreto, las actividades llevadas a cabo por el ser humano han emitido unas cincuenta mil millones de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente (se tiene en cuenta las emisiones de CO<sub>2</sub> y la equivalencia de las emisiones de metano y otros gases de efecto invernadero como los óxidos de nitrógeno). De forma equitativa, esto supone una media de seis toneladas de huella de carbono por habitante. El cambio climático es un factor que posiblemente no vaya a desaparecer, por lo que las soluciones planteadas para intentar subsanar este problema solo conseguirán que el impacto medioambiental sea grave, en lugar de muy grave. Según la Organización Mundial Meteorológica, la temperatura global del planeta ha aumentado en 1°C desde el año 1800 y resulta inevitable que en los próximos años aumente hasta los 1.5°C. El acuerdo de París tiene como objetivo establecer que esta subida de la temperatura global no supere el umbral de los 1.5°C, para que las consecuencias del cambio climático no resulten más graves de lo que ya van a ser. [26]

Conceptos como el reciclaje, la economía circular de los materiales, la explotación de recursos de forma eficiente sin ser invasiva, el lean and sustainable manufacturing que persigue una fabricación sostenible, o el diseño de materiales con ecopropiedades; son algunas de las praxis acertadas para conseguir el objetivo de reducir la huella de carbono a medio/largo plazo. El diálogo entre países es necesario para llegar a unos acuerdos favorables para todo el mundo. Un problema a nivel global implica una solución a nivel global. A pesar de todo, el ciudadano de a pie no puede descuidar sus labores contra la contaminación y todos debemos de procurar reducir nuestra propia huella de carbono.

Tras cuantificar la energía consumida y el CO<sub>2</sub> emitido mediante el LCA de los diferentes componentes estructurales de vehículos, se ha llegado a las siguientes conclusiones:

- I. El programa CES EduPack es de utilidad para hacer diseños basados en la selección de materiales y también ecodiseño.
- II. A través de los datos de contaminación y consumo de energía cuantificados mediante el LCA, se obtiene información útil para la elaboración de Declaraciones de Impacto Ambiental (DIA) gestionado a través de las normas ISO 14040 y 14044.
- III. La fase predominante en términos de consumo y contaminación del análisis del ciclo de vida de los componentes estudiados es la de uso. El factor más influyente en esta etapa es el peso del componente. Un peso más liviano implica una reducción del consumo y por tanto una disminución de las emisiones de CO<sub>2</sub>.
- IV. La utilización de una carrocería de aluminio deriva en una reducción del **38,26%** de la huella de carbono con respecto a un acero.
- V. De forma general, vehículos eléctricos son un **83,3%** más ecológicos que los vehículos de motor diésel y alrededor de **65,38%** menos contaminante que los híbridos.
- VI. Se aprecia una reducción del **40%** de la huella de carbono al utilizar una fundición de aluminio en vez de una de hierro para la fabricación del bloque motor.
- VII. El uso de la fibra de vidrio es un buen sustituto del acero y del aluminio por ser un material más ligero y que compite en propiedades mecánicas con ambos metales. El parachoques de fibra de vidrio produce 100 kg menos de CO<sub>2</sub> que el de aluminio.
- VIII. El reciclado y la gestión de residuos de la fibra de vidrio es un área aún por desarrollar. Por el momento, se emplean técnicas como la combustión para la generación de energía eléctrica a raíz de estos residuos. Este proceso degrada el material y e inhibe su utilización en aplicaciones futuras.
- IX. El precio de materiales ligeros como el aluminio o la fibra de vidrio frente al acero es más elevado. Esto implica un aumento del precio total del turismo. Aunque su ligereza los hace medioambientalmente más sostenibles al reducir el consumo.

## 6. Bibliografía

- [1] M. F. ASHBY, MATERIALS SELECTION IN MECHANICAL DESIGN, Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP: Butterworth-Heinemann, 1999 .
- [2] J. F. Shackelford, Introducción a la ciencia de materiales para ingenieros, Madrid: Pearson, 2005.
- [3] V. Y. Piqueras, «victoryepes.blogs,» 29 07 2016. [En línea]. Available: victoryepes.blogs.upv.es.
- [4] V. Pallardo, «trimcomposites,» 15 marzo 2019. [En línea]. Available: <https://www.trimcomposites.com/post/materiales-compuestos-en-la-automoci%C3%B3n>. [Último acceso: noviemre 2020].
- [5] T. M. Dell’Olmo, «Análisis del impacto ambiental del reciclaje,» Barcelona, 2019.
- [6] M. F. Ashby, Materials and the Environment 2ª Edición, Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP: Butterworth-Heinemann, 2013.
- [7] Noticias Parlamento Europeo, «Economía circular: definición, importancia y beneficios,» 2018.
- [8] U. P. d. M. E. José Ygnacio Pastor, «grantadesign.com,» 2008. [En línea]. Available: [https://www.grantadesign.com/download/pdf/edupack2018/overview\\_spa.pdf](https://www.grantadesign.com/download/pdf/edupack2018/overview_spa.pdf). [Último acceso: noviembre 2020].

- [9] P. M. A. a. G. Design, «grantadesign.com,» 2013. [En línea]. Available: [https://www.grantadesign.com/download/pdf/edupack2013/GettingStarted-Spanish\\_2013.pdf](https://www.grantadesign.com/download/pdf/edupack2013/GettingStarted-Spanish_2013.pdf). [Último acceso: octubre 2020].
- [10] B. Smith, A. Spulber, S. Modi y T. Fiorelli, «Technology Roadmaps: Intelligent Mobility Technology; Materials and Manufacturing Processes; and Light Duty Vehicle Propulsion,» Center for Automotive Research, Ann Arbor, MI, 2017.
- [11] R. P. Ferrrando, S. S. Caballero, M. Á. S. Cantó y J. E. C. Amorós, «NUEVOS ACEROS TWIP/TRIP EN LOS,» *3cTecnología*, vol. I, 2012.
- [12] N. C. B. Aguilar, «Tendencia de los aceros y su aplicación en la industria automotriz,» *CienciAcierta*, nº 48, 2016.
- [13] M. Davenport, «Surge el acero avanzado de alta resistencia de tercera generación,» *The FABRICATOR*, 2017.
- [14] Cámara de Industriales de la República Argentina, «Industria Automotriz: efectos sobre la producción,» *Indargen*, pp. 36-43, 2011.
- [15] Centra Recambio Original, «recambiooriginal.com,» 19 diciembre 2017. [En línea]. Available: <http://www.recambiooriginal.com/blog/recambios-originales/carroceria/porque-se-usa-aluminio-en-carroceria-coches/>. [Último acceso: noviembre 2020].
- [16] L. Casajús, «El aluminio en la fabricación,» <http://www.centro-zaragoza.com/>, nº 52, 2012.
- [17] G. M. G. Orozco, «pruebaderuta.com,» pruebaderuta, [En línea]. Available: <https://www.pruebaderuta.com/>.



- [18] Ruta 401, «Plásticos utilizados en el automóvil,» Loctite Teroson, 2020. [En línea]. [Último acceso: noviembre 2020].
- [19] H. Aleksiev, «Los diferentes usos de la fibra de vidrio en la industria del automóvil,» Ennomotive, 2019. [En línea]. [Último acceso: noviembre 2020].
- [20] ALACER MAS, «<https://www.alacermas.com/>,» 2020. [En línea]. Available: [https://www.alacermas.com/img/galeria/files/aluminio/chapa\\_2017\\_aluminio.pdf](https://www.alacermas.com/img/galeria/files/aluminio/chapa_2017_aluminio.pdf). [Último acceso: noviembre 2020].
- [21] Alu-Stock, «Alu-Stock.es,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.alu-stock.es/multimedia/descargas/13/Cap10-el-aluminio.pdf>. [Último acceso: noviembre 2020].
- [22] D. W. a. P. Cyplik, «Operational Excellence within Sustainable Development Concept-Systematic Literature Review,» *Sustainability*, 2020.
- [23] leanmanufacturing10, «leanmanufacturing10,» [En línea]. Available: <https://leanmanufacturing10.com/como-optimizar-el-proceso-de-produccion-de-una-empresa>. [Último acceso: noviembre 2020].
- [24] A. Bueno, «TECNOLOGÍA PIONERA PARA RECICLAR ESTRUCTURAS DE FIBRA DE VIDRIO,» Universidad de Alicante, 2017. [En línea]. Available: <http://innoua.ua.es/Web/FichaOferta?pIdOferta=1682&language=es>. [Último acceso: diciembre 2020].
- [25] Noticias Parlamento Europeo, «Emisiones de CO2 de los coches: hechos y cifras,» 2019. [En línea]. [Último acceso: diciembre 2020].

- [26] J. L. Crespo, «QuantumFracture/Youtube,» junio 2019. [En línea]. Available: [https://www.youtube.com/watch?v=wNQ5wvGmnEk&ab\\_channel=QuantumFracture](https://www.youtube.com/watch?v=wNQ5wvGmnEk&ab_channel=QuantumFracture). [Último acceso: diciembre 2020].