



Evaluación del Desempeño de Materiales Alternativos en la Fabricación de Componentes Automotrices

Performance Evaluation of Alternative Materials in Automotive Component Manufacturing

Avaliação de desempenho de materiais alternativos no fabrico de componentes automóveis

Tenorio Loor Byron David ^I

tenorio.b9109@istlam.edu.ec

<https://orcid.org/0009-0004-7632-2337>

Caiza Cedeño Lorena María ^{II}

caiza.l.4699@istlam.edu.ec

<https://orcid.org/0009-0006-1119-990X>

Quiroz Cedeño Danny Omar ^{III}

d.quiroz@istlam.edu.ec

<https://orcid.org/0009-0002-3537-3408>

Correspondencia: tenorio.b9109@istlam.edu.ec

Ciencias Técnicas y Aplicadas

Artículo de Investigación

* **Recibido:** 26 de mayo de 2025 * **Aceptado:** 24 de junio de 2025 * **Publicado:** 13 de julio de 2025

- I. Instituto Superior Tecnológico Luis Arboleda Martínez, Ecuador.
- II. Instituto Superior Tecnológico Luis Arboleda Martínez, Ecuador.
- III. Ing. Mecánico, Docente Tutor de la carrera de Mecánica Automotriz del Instituto Superior Tecnológico Luis Arboleda Martínez, Ecuador.

Resumen

El presente estudio analiza el desempeño de materiales alternativos empleados en la fabricación de componentes automotrices, evaluando sus propiedades físico-mecánicas, su impacto ambiental y su viabilidad industrial, a través de un enfoque documental, cualitativo y comparativo basado en literatura científica y técnica reciente, lo que permitió revisar seis materiales representativos distribuidos en tres categorías principales que son las aleaciones ligeras (aluminio 6061-T6 y magnesio AZ91D), los compuestos poliméricos reforzados (CFRP y GFRP) y los biocompuestos (polipropileno con fibra de lino y resina epoxi con cáscara de nuez), todos ellos seleccionados por su relevancia actual o potencial para aplicaciones en la industria automotriz.

Los resultados evidencian que no existe un material único capaz de satisfacer por completo todos los criterios evaluados, ya que cada uno muestra ventajas y limitaciones según el contexto en que se lo aplique, siendo el aluminio 6061-T6 y los GFRP los que logran un equilibrio notable entre resistencia, sostenibilidad y viabilidad industrial (por eso ampliamente utilizados en bastidores, paneles y subestructuras), mientras que los CFRP destacan por su excelente rendimiento mecánico aunque limitados por su alto costo y baja reciclabilidad, lo que restringe su uso a vehículos de alto rendimiento o de lujo, y finalmente los biocompuestos surgen como opciones prometedoras desde el punto de vista ambiental, ideales para componentes no estructurales e interiores (como recubrimientos o elementos decorativos), aunque todavía con limitaciones mecánicas y falta de estandarización que deberán resolverse para permitir su adopción masiva.

En conclusión, la selección de materiales en la industria automotriz requiere siempre encontrar un equilibrio entre desempeño técnico, impacto ambiental y viabilidad económica, y se sugiere continuar con investigaciones experimentales que permitan validar y optimizar el uso de biocompuestos y compuestos reciclables, consolidando así alternativas más sostenibles y responsables con el entorno.

Palabras Clave: materiales alternativos; industria automotriz; aleaciones ligeras; compuestos reforzados; biocompuestos.

Abstract

This study analyzes the performance of alternative materials used in the manufacture of automotive components, evaluating their physical and mechanical properties, environmental impact, and industrial viability through a documentary, qualitative, and comparative approach based on recent

scientific and technical literature. This allowed for the review of six representative materials distributed into three main categories: lightweight alloys (aluminum 6061-T6 and magnesium AZ91D), reinforced polymer composites (CFRP and GFRP), and biocomposites (polypropylene with flax fiber and epoxy resin with walnut shell), all selected for their current or potential relevance to applications in the automotive industry. The results show that no single material can fully satisfy all the evaluated criteria, as each exhibits advantages and limitations depending on the context in which it is applied. 6061-T6 aluminum and GFRP achieve a remarkable balance between strength, sustainability, and industrial viability (hence their widespread use in frames, panels, and substructures). CFRP stands out for its excellent mechanical performance, although it is limited by its high cost and low recyclability, which restricts its use to high-performance or luxury vehicles. Finally, biocomposites emerge as promising options from an environmental perspective, ideal for non-structural and interior components (such as coatings or decorative elements), although they still have mechanical limitations and a lack of standardization that must be resolved to allow for widespread adoption. In conclusion, the selection of materials in the automotive industry always requires finding a balance between technical performance, environmental impact and economic viability, and it is suggested to continue with experimental research that allows validating and optimizing the use of biocomposites and recyclable compounds, thus consolidating more sustainable and environmentally responsible alternatives.

Keywords: alternative materials; automotive industry; lightweight alloys; reinforced composites; biocomposites.

Resumo

Este estudo analisa o desempenho de materiais alternativos utilizados no fabrico de componentes automóveis, avaliando as suas propriedades físicas e mecânicas, impacto ambiental e viabilidade industrial através de uma abordagem documental, qualitativa e comparativa, baseada na literatura científica e técnica recente. Isto permitiu a revisão de seis materiais representativos distribuídos por três categorias principais: ligas leves (alumínio 6061-T6 e magnésio AZ91D), compósitos poliméricos reforçados (CFRP e GFRP) e biocompósitos (polipropileno com fibra de linho e resina epóxi com casca de noz), todos seleccionados pela sua relevância atual ou potencial para aplicações na indústria automóvel. Os resultados mostram que nenhum material consegue satisfazer completamente todos os critérios avaliados, pois cada um apresenta vantagens e limitações

dependendo do contexto em que é aplicado. O alumínio 6061-T6 e o GFRP conseguem um equilíbrio notável entre resistência, sustentabilidade e viabilidade industrial (daí a sua ampla utilização em quadros, painéis e subestruturas). O CFRP destaca-se pelo seu excelente desempenho mecânico, embora seja limitado pelo seu elevado custo e baixa reciclabilidade, o que restringe a sua utilização a veículos de alto desempenho ou de luxo. Finalmente, os biocompósitos surgem como opções promissoras do ponto de vista ambiental, ideais para componentes não estruturais e de interiores (como revestimentos ou elementos decorativos), embora ainda apresentem limitações mecânicas e uma falta de padronização que deve ser resolvida para permitir a sua ampla adoção. Em conclusão, a seleção de materiais na indústria automóvel exige sempre encontrar um equilíbrio entre o desempenho técnico, o impacto ambiental e a viabilidade económica, e sugere-se continuar com a investigação experimental que permita validar e otimizar a utilização de biocompósitos e compostos recicláveis, consolidando assim alternativas mais sustentáveis e ambientalmente responsáveis.

Palavras-chave: materiais alternativos; indústria automóvel; ligas leves; compósitos reforçados; biocompósitos.

Introducción

La búsqueda de materiales alternativos en la fabricación de componentes automotrices ha cobrado gran relevancia en las últimas décadas, esta necesidad surge principalmente por la reducción del peso de los vehículos, mejorando el rendimiento energético y disminuyendo las emisiones contaminantes, estos factores han motivado a que distintos investigadores propongan soluciones desde diversos enfoques como el uso de aleaciones ligeras, compuestos reforzados y biocompuestos con fibras naturales. Según el Department of Energy (2017) una reducción del 10 % en el peso de un automóvil puede generar una mejora del 6 al 8 % en la eficiencia del combustible, este dato se vuelve más relevante considerando el auge de los vehículos eléctricos, en donde el peso influye directamente en la autonomía y rendimiento del sistema de baterías (Taub et al., 2019). Los materiales tradicionales como el acero, aunque presentan buena resistencia mecánica y bajo costo, representan aproximadamente el 55 % del peso total de un vehículo (Fan et al., 2024), este hecho ha impulsado a que la industria automotriz busque alternativas que logren un equilibrio entre bajo peso, resistencia mecánica adecuada y sostenibilidad ambiental. Por tal motivo se han desarrollado estudios sobre aleaciones de aluminio y magnesio, compuestos poliméricos reforzados

y biocompuestos, sin embargo el reto más importante radica en identificar materiales que, además de ser livianos, presenten buena resistencia mecánica, bajo costo de producción, facilidad de procesamiento industrial y menor impacto ambiental durante su ciclo de vida (Kandiya & Jadav, 2025).

En investigaciones recientes se han abordado diferentes aspectos de estos materiales, por ejemplo Fan et al. (2024) realizaron una revisión sobre aleaciones ligeras para la industria automotriz, Al-Sarraf (2024) estudió biocompuestos reforzados con cáscara de nuez como una alternativa sostenible y Kandiya y Jadav (2025) efectuaron un análisis comparativo considerando criterios técnicos y ambientales, sin embargo estos estudios no han sido integrados en un marco comparativo que permita seleccionar de manera eficiente los materiales más adecuados para su implementación en la producción masiva.

Este trabajo tiene como objetivo principal evaluar el desempeño de materiales alternativos en la fabricación de componentes automotrices mediante la comparación de sus propiedades físicas, su impacto ambiental y la viabilidad de su producción a nivel industrial, para ello se considerarán materiales con aplicaciones industriales comprobadas o en fases avanzadas de validación, incluyendo aleaciones de aluminio y magnesio, compuestos poliméricos reforzados y biocompuestos con fibras naturales, dejando de lado materiales exclusivos para nichos de lujo o experimentales sin validación previa.

Entre las limitaciones de este estudio se encuentran la disponibilidad parcial de datos sobre costos actualizados en el sector industrial y la dependencia de los resultados de ensayos de laboratorio que no siempre reflejan el comportamiento real de los materiales en condiciones de servicio, sin embargo estas limitaciones no impiden que se pueda tener una visión general y concreta de las ventajas y desventajas de los materiales analizados para una implementación futura en la industria automotriz.

1 Marco Teórico

La evolución de la industria automotriz hacia modelos más eficientes y sostenibles ha motivado en los últimos años la investigación y aplicación de materiales alternativos en la fabricación de componentes estructurales y funcionales, estos materiales se definen como aquellos que en comparación con los convencionales como el acero ofrecen ventajas importantes como menor peso, mejor rendimiento mecánico y menor impacto ambiental a lo largo de su ciclo de vida (Sivertsen,

Haagensen & Albright, 2003), en la actualidad estos materiales ya se utilizan en muchas partes del mundo sobre todo en vehículos de alto rendimiento y cada vez más en modelos comerciales gracias a la reducción de costos y avances en procesos industriales.

Los materiales alternativos aplicables en este contexto se agrupan principalmente en tres categorías que son las aleaciones ligeras como las de magnesio y aluminio, los compuestos poliméricos reforzados como los CFRP y GFRP y los biocompuestos obtenidos de fibras naturales, cada uno con características físicas y mecánicas distintas y con retos propios en cuanto a su viabilidad técnica e industrial, sin embargo todos con el mismo objetivo de reducir el peso del vehículo y hacerlo más eficiente y menos contaminante.

Las aleaciones ligeras como las de magnesio y aluminio han sido ampliamente usadas por su baja densidad y buena relación entre resistencia y peso, por ejemplo el magnesio es el metal estructural más liviano usado en la industria automotriz con una densidad aproximada de $1\ 800\ \text{kg/m}^3$ mientras que el aluminio tiene una densidad de $2\ 700\ \text{kg/m}^3$ y el acero supera los $7\ 800\ \text{kg/m}^3$ (Sivertsen et al., 2003), esta diferencia en densidades permite reducir considerablemente el peso del vehículo lo que mejora el consumo de combustible y disminuye las emisiones contaminantes, además el aluminio en la aleación 6061-T6 alcanza un módulo de elasticidad de 69 GPa y resistencia a la tracción de hasta 290 MPa con buena resistencia a la corrosión (Das, 2014), mientras que las aleaciones de magnesio como AZ91D y AM60 aunque menos resistentes tienen excelente ductilidad y colabilidad siendo usadas en cajas de transmisión, soportes de motor y columnas de dirección (Reppe et al., 1998).

Los compuestos poliméricos reforzados con fibra de carbono (CFRP) y fibra de vidrio (GFRP) también destacan por su alta rigidez y capacidad de absorber impactos, al principio se usaron principalmente en autos deportivos y de lujo pero actualmente gracias a la mejora en sus procesos y reducción de costos ya se emplean también en modelos comerciales (ScienceDirect, 2022), siendo comunes en carrocerías y piezas interiores.

En los últimos años los biocompuestos hechos con fibras naturales como lino, kenaf o cáscara de nuez han ganado importancia por ser renovables, ligeros y biodegradables, se los usa especialmente en paneles interiores y cubiertas ayudando así a que la industria sea más sostenible y cumpla las normas ambientales (Al-Sarraf, 2024; Dubreuil et al., 2012), además permiten incorporar a comunidades productoras de fibras naturales en las cadenas de valor lo que también es positivo socialmente.

El análisis de ciclo de vida (LCA) es fundamental para evaluar el impacto ambiental de estos materiales, ya que aunque la reducción del 10 % en el peso del vehículo puede mejorar entre un 6 % y 8 % la eficiencia del combustible (Sivertsen et al., 2003), hay procesos como la producción de magnesio que cuando usa gases como el SF₆ genera un impacto mayor incluso que el del aluminio o acero (Dubreuil et al., 2012), por eso se necesita implementar procesos más limpios y fomentar el reciclaje, en este aspecto el aluminio es especialmente ventajoso por su alta reciclabilidad y bajo consumo energético en comparación con su producción primaria (Lemos & Castro, 2018).

En la industria ya existen antecedentes de uso exitoso de estos materiales, por ejemplo Volkswagen y Audi usan aleaciones de magnesio AZ91D en cajas de transmisión logrando una reducción de peso del 20 % al 25 % comparado con el aluminio (Reppe et al., 1998), también el proyecto MFERD probó estructuras frontales de magnesio en vehículos Cadillac evaluando aspectos estructurales y ambientales con enfoque en ciclo de vida (Dubreuil et al., 2012), demostrando que además de cumplir con normativas de emisiones y objetivos corporativos de sostenibilidad estos materiales ofrecen ventajas competitivas.

Sin embargo a pesar de los avances conseguidos todavía existen desafíos como el alto costo de producción, la corrosión especialmente en el magnesio y la necesidad de adaptar los procesos industriales actuales para que puedan integrarse estos materiales a gran escala, estas dificultades sin embargo representan también una oportunidad para investigadores y estudiantes que pueden aportar con estudios de factibilidad y diseño para que las industrias se beneficien de estos avances y al mismo tiempo se reduzca el impacto ambiental de la producción de vehículos.

2 Materiales

La presente investigación, de carácter documental y comparativo, se fundamenta en el análisis de información técnica extraída de fuentes bibliográficas confiables, sin recurrir a procedimientos experimentales, lo que permite realizar una revisión completa y ordenada de las propiedades y posibilidades de distintos materiales que ya se usan o podrían usarse en la industria automotriz, permitiendo también a estudiantes y profesionales contar con una base para futuras implementaciones o estudios, en este sentido se han seleccionado seis materiales distribuidos en tres grandes grupos que son las aleaciones ligeras, los compuestos poliméricos reforzados y los biocompuestos, esta selección obedece tanto a su aplicabilidad actual o potencial en la industria automotriz como a la disponibilidad de datos técnicos y ambientales en la literatura científica

reciente, garantizando así que se aborde una muestra representativa y pertinente para el contexto actual.

Dentro del grupo de las aleaciones ligeras destacan materiales como el aluminio 6061-T6 que es una aleación templada compuesta principalmente por aluminio, magnesio y silicio, ampliamente utilizada en la fabricación de bastidores, sistemas de suspensión y componentes estructurales de vehículos por su buena relación resistencia-peso, su alta resistencia a la corrosión y su facilidad de mecanizado (Das, 2014), con un módulo de elasticidad cercano a los 69 GPa y una resistencia a la tracción que puede alcanzar los 290 MPa lo cual lo convierte en una opción muy versátil en la industria automotriz para diversas aplicaciones. También en este grupo se encuentra la aleación AZ91D compuesta por magnesio con adiciones de aluminio y zinc que es una de las más utilizadas en componentes como carcasas de transmisión y soportes de dirección debido a su bajo peso específico de aproximadamente 1 800 kg/m³ y su buena colabilidad (Reppe et al., 1998), aunque presenta una resistencia mecánica algo menor que la del aluminio sigue siendo una opción muy útil para reducir peso en los vehículos, sin embargo requiere tratamientos de superficie para mejorar su resistencia a la corrosión (Peng & Wang, 2024), por lo que aún existen retos en cuanto a su aplicación masiva especialmente en ambientes agresivos.

En cuanto a los compuestos poliméricos reforzados se encuentran materiales como el CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) que combina una matriz polimérica normalmente de resina epoxi con fibras de carbono logrando una excelente rigidez específica y alta resistencia a la tracción con una densidad mucho menor que la de los metales tradicionales, por este motivo su uso ha sido priorizado en vehículos de alto rendimiento y aplicaciones estructurales críticas aunque su elevado costo y la complejidad de su reciclaje han limitado su empleo a gran escala (ScienceDirect, 2022), siendo todavía un material de nicho. Otro ejemplo dentro de este grupo es el GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer) que utiliza fibras de vidrio como refuerzo en vez de carbono, lo que lo hace más económico aunque con menor rigidez, sin embargo ofrece buen desempeño estructural, resistencia a la corrosión y facilidad de procesamiento, por ello ha sido empleado en paneles, carcasas, paragolpes y piezas secundarias (Dubreuil et al., 2012), además, aunque su reciclabilidad es moderada, existen numerosos estudios recientes encaminados a mejorar su sostenibilidad y ampliar su uso en más componentes.

Finalmente en el grupo de los biocompuestos se encuentran opciones muy interesantes como el polipropileno con fibra de lino que combina una matriz termoplástica con fibras naturales como el

lino, estas fibras se caracterizan por su bajo peso, su origen renovable y su buena capacidad para absorber impactos, este material ha sido validado y utilizado por fabricantes como BMW y Mercedes-Benz en componentes interiores como paneles de puertas y tableros logrando no solo reducciones de peso sino también contribuyendo a la sostenibilidad ambiental (Ehrenberger & Friedrich, 2013), lo que demuestra que la industria puede integrar soluciones más ecológicas sin comprometer el rendimiento. También se ha analizado la resina epoxi con cáscara de nuez que está en una etapa avanzada de validación, este biocompuesto utiliza una matriz epóxica combinada con partículas o fibras de cáscara de nuez (Al-Sarraf, 2024), presentando buena rigidez, bajo impacto ambiental y un alto contenido renovable por lo que resulta adecuado para aplicaciones no estructurales o decorativas, sin embargo todavía presenta ciertas limitaciones en cuanto a su resistencia térmica y su durabilidad cuando se expone a condiciones extremas, lo que indica que aún queda margen para su mejora.

Este análisis permite entender que los materiales seleccionados son opciones prometedoras para la industria automotriz y que cada uno de ellos presenta ventajas y también desafíos que deben ser evaluados cuidadosamente antes de su implementación, recordando siempre que las dificultades técnicas como la resistencia a la corrosión, la reciclabilidad y los costos de producción representan no solo un obstáculo sino también una oportunidad para innovar, investigar y adaptar las tecnologías actuales a las exigencias de una industria más sostenible, más ligera y más eficiente, abriendo un campo de acción amplio tanto para fabricantes como para investigadores que deseen seguir aportando al desarrollo de soluciones más responsables con el ambiente y más competitivas para el mercado.

3 Metodología

La metodología utilizada en este estudio responde a un enfoque documental, cualitativo y comparativo, sustentado en la revisión sistemática y el análisis crítico de fuentes bibliográficas secundarias, lo que permite evaluar y comparar el desempeño de materiales alternativos empleados en la fabricación de componentes automotrices, recurriendo a datos técnicos, ambientales y económicos que han sido previamente reportados y validados en investigaciones académicas, artículos científicos, informes técnicos y documentos especializados, de modo que no es necesario realizar una experimentación directa sino más bien aprovechar el conocimiento ya existente para consolidar conclusiones que sean pertinentes y aplicables a la realidad industrial actual. Este enfoque metodológico resulta particularmente adecuado cuando se trata de sintetizar información

relevante y actualizada de diferentes contextos, ayudando a establecer una visión completa y detallada sobre la viabilidad técnica, económica y ambiental de los materiales analizados, además su carácter comparativo permite identificar claramente las fortalezas, limitaciones y posibles oportunidades de aplicación para cada uno de los materiales, lo que contribuye de manera directa a orientar futuras investigaciones, decisiones industriales y políticas de sostenibilidad en el sector automotriz.

Para la elaboración de este estudio documental y comparativo se seleccionaron seis materiales considerados representativos de tres grandes categorías que son las aleaciones ligeras, los compuestos poliméricos reforzados y los biocompuestos, esta selección no fue arbitraria sino que se fundamentó en criterios clave como la aplicabilidad industrial comprobada o al menos en una fase avanzada de validación, la disponibilidad y confiabilidad de datos técnicos y ambientales en la literatura especializada y su potencial de contribuir significativamente a la sostenibilidad y a la reducción del peso en los procesos de fabricación automotriz, factores todos ellos esenciales para que los resultados sean pertinentes y útiles tanto en el presente como en escenarios futuros. En el grupo de las aleaciones ligeras se eligieron el aluminio 6061-T6 y el magnesio AZ91D que son materiales ya ampliamente empleados en componentes estructurales y funcionales de vehículos comerciales (por ejemplo en bastidores, sistemas de suspensión, soportes de dirección y cajas de transmisión), esto gracias a su favorable relación resistencia-peso y su influencia directa en la reducción de emisiones por la disminución de la masa vehicular.

En cuanto a los compuestos poliméricos reforzados se consideraron dos materiales que en los últimos años han ganado protagonismo en la industria automotriz como son los compuestos reforzados con fibra de carbono (CFRP) y con fibra de vidrio (GFRP), ambos reconocidos por su elevada rigidez y resistencia, con la ventaja adicional de que han ido creciendo en aceptación especialmente en aplicaciones que exigen alta performance y reducciones notables de peso, aunque cada uno con sus particularidades en cuanto a costos y reciclabilidad, lo que también se analiza en el desarrollo del estudio. Finalmente, se incluyeron en el análisis los biocompuestos fabricados a partir de matrices poliméricas combinadas con fibras naturales, concretamente el polipropileno con fibra de lino y la resina epoxi con cáscara de nuez, materiales emergentes que han despertado gran interés no solo por su bajo impacto ambiental sino también por su capacidad de integrarse a esquemas de economía circular y ofrecer una alternativa sostenible para la fabricación de piezas

no estructurales y componentes interiores, siendo ya utilizados o probados en paneles de puertas, tableros, cubiertas y elementos decorativos en modelos de reconocidas marcas automotrices.

Esta selección integral de materiales permite construir una comparación equilibrada entre opciones metálicas, sintéticas y naturales, ofreciendo así una visión más completa y holística sobre las oportunidades y limitaciones que presenta cada uno para su implementación efectiva en la industria automotriz, considerando no solo sus propiedades técnicas sino también los retos ambientales y económicos que supone su uso.

Para poder evaluar de manera rigurosa los materiales seleccionados se definieron tres dimensiones fundamentales de comparación que son las propiedades físico-mecánicas, el impacto ambiental y la viabilidad industrial, estas dimensiones permiten analizar el comportamiento y rendimiento de cada material de forma integral, tomando en cuenta tanto su desempeño técnico en condiciones de uso como su sostenibilidad a lo largo de su ciclo de vida y su aplicabilidad práctica en los procesos reales de producción automotriz, lo que garantiza que los resultados del análisis sean útiles y relevantes para quienes buscan innovar en el diseño y fabricación de vehículos más eficientes, sostenibles y competitivos.

Las propiedades físico-mecánicas son uno de los factores más determinantes a la hora de seleccionar los materiales que se utilizan en los componentes automotrices, ya que influyen de manera directa en la seguridad, la eficiencia estructural y la durabilidad del vehículo, siendo por tanto un aspecto fundamental que no puede pasarse por alto cuando se busca mejorar tanto el rendimiento como la sostenibilidad de los diseños actuales, en este sentido se evaluaron parámetros como la densidad, el módulo de elasticidad, la resistencia a la tracción, el límite elástico y la resistencia a la corrosión e impacto, los cuales se explican a continuación para comprender mejor su importancia. La densidad, expresada en kilogramos por metro cúbico (kg/m^3), influye directamente en la masa total del vehículo y por consiguiente en su consumo energético, de tal manera que materiales más livianos permiten una reducción notable del peso del vehículo y, con ello, una disminución en las emisiones y en el consumo de combustible, por ejemplo el aluminio 6061-T6 tiene una densidad aproximada de $2\,700\text{ kg/m}^3$ mientras que el magnesio AZ91D alcanza apenas los $1\,800\text{ kg/m}^3$, lo cual representa una ventaja importante en términos de aligeramiento del conjunto (Aluminum Alloy Data Sheet, 2023), de hecho esta característica es la que más se destaca cuando se comparan con materiales tradicionales como el acero que supera los $7\,800\text{ kg/m}^3$. Otro parámetro clave es el módulo de elasticidad que refleja la rigidez del material frente a esfuerzos y

deformaciones, en el caso del aluminio 6061-T6 su valor promedio es de 68,9 GPa, lo que lo hace adecuado para componentes estructurales que requieren resistencia sin comprometer la flexibilidad (Grasp Engineering, 2023). También resulta crucial la resistencia a la tracción y el límite elástico que determinan la capacidad del material para soportar esfuerzos sin deformaciones permanentes, en este sentido el aluminio 6061-T6 alcanza valores de hasta 310 MPa en resistencia última y 276 MPa en su límite elástico, lo que explica por qué es tan utilizado en la industria automotriz para aplicaciones donde la integridad estructural es prioritaria (MFGProto, 2023). Finalmente, no puede dejar de mencionarse la resistencia a la corrosión y al impacto que resulta especialmente relevante para aplicaciones que estarán expuestas a condiciones ambientales agresivas o a cargas dinámicas constantes, aspectos que se abordarán con mayor detalle más adelante en el análisis individual de cada material pero que ya desde este punto deben considerarse para tener una visión completa de su comportamiento en servicio.

En lo que respecta al impacto ambiental, esta dimensión se analizó mediante el enfoque del Análisis de Ciclo de Vida (LCA, por sus siglas en inglés), el cual permite evaluar de manera integral la huella que deja cada material desde su extracción hasta su disposición final, considerando variables como el consumo energético asociado a su producción, las emisiones de gases de efecto invernadero y su capacidad de reciclaje, todas ellas fundamentales en un contexto donde las exigencias ambientales son cada vez más estrictas. El consumo energético se expresa en kilovatios hora por kilogramo (kWh/kg) y permite comparar de forma objetiva la energía necesaria para producir un kilogramo de material, diferenciando así la huella energética entre los metales tradicionales y los compuestos modernos; las emisiones de gases de efecto invernadero, especialmente las de CO₂ equivalente, se derivan de los procesos de extracción, fundición, refinamiento o síntesis y reflejan el impacto climático de cada opción; finalmente la reciclabilidad es un aspecto decisivo para cerrar el ciclo de vida de los materiales con el menor impacto posible, en este sentido el aluminio destaca porque puede reciclarse con una reducción de hasta el 95 % en el consumo energético respecto a su producción primaria, lo que lo convierte en un material muy ventajoso frente a otros como los compuestos poliméricos que todavía presentan dificultades significativas para ser separados y reprocesados (Dubreuil et al., 2012).

Por último, la viabilidad industrial constituye la tercera dimensión del análisis y resulta esencial para determinar si un material es realmente aplicable a gran escala en las condiciones actuales de la industria, para ello se consideraron aspectos como la disponibilidad comercial, la procesabilidad

y los costos de producción y transformación, ya que no basta con que un material tenga buenas propiedades y bajo impacto ambiental si no puede ser fabricado y manipulado de manera eficiente con la infraestructura existente. La disponibilidad comercial garantiza que el material pueda ser adquirido sin mayores complicaciones y en volúmenes adecuados para la producción en serie; la procesabilidad hace referencia a la facilidad con que puede ser trabajado mediante tecnologías conocidas como fundición, moldeo, extrusión o laminado, sin requerir inversiones prohibitivas en nuevas técnicas; finalmente, el costo de producción y transformación, estimado por kilogramo o por unidad funcional, permite comparar las opciones no solo en términos técnicos sino también económicos, lo cual es decisivo para que la industria adopte o descarte un material en función de su competitividad.

Esta clasificación y definición de criterios permite elaborar una comparación objetiva y multidimensional entre materiales de muy distinta naturaleza y origen, ofreciendo así una base metodológica sólida que no solo sirve para sustentar el análisis posterior de los resultados sino también para orientar la innovación sostenible en el sector automotriz, marcando un camino claro hacia la adopción de soluciones más ligeras, eficientes y respetuosas con el medio ambiente sin perder de vista la realidad económica y productiva de la industria.

Cuadro comparativo de desempeño de materiales alternativos en la fabricación automotriz

Materia	Densidad (kg/m ³)	Módulo de elasticidad (GPa)	Resistencia a la tracción (MPa)	Reciclabilidad	Emisiones producción (kg CO ₂ /kg)	Disponibilidad Procesabilidad	Costo / estimado (USD/kg)
Aluminio 6061-T6	2 700	68.9	276–310	Muy alta	~8.1 (primario) / ~0.4 (reciclado)	Alta Excelente (moldeo, extrusión)	2.0 – 3.0

Magnesio AZ91D	1 810	45	160–230	Alta	~10.6	Media Buena (colado, baja soldabilidad)	/ 2.5 – 3.5	–
CFRP (fibra de carbono)	1 600	70–200	600–1 500	Baja limitada	– >29	Media Dificil (moldeo, no reciclable)	/ 20 – 40	–
GFRP (fibra de vidrio)	1 800–2 000	35–55	200–900	Moderada	~18–22	Alta / Buena (moldeo, compresión)	2.5 5.0	–
PP + fibra de lino	1 150–1 300	3–5 (matriz)/ 20–30 (refuerzo)	50–100	Alta (biodegradable parcial)	~3–4	Media Buena (inyección, prensado)	/ 1.2 2.0	–
Epoxi + cáscara de nuez	1 250	3–5 (matriz)/ 10–20 (refuerzo)	40–80	Alta (contenido renovable)	~2–4	Baja Experimental (aún no estandarizado)	/ ~2.5	–

4 Procedimiento a la recolección de datos

El procedimiento para la recolección de datos en esta investigación se fundamentó en una revisión documental sistemática, centrada exclusivamente en fuentes científicas, técnicas e industriales de alta confiabilidad, lo que asegura que la información recopilada sea pertinente, actualizada y válida para los fines de este estudio, además este enfoque permite aprovechar la gran cantidad de resultados ya existentes en la literatura sin necesidad de recurrir a experimentación directa, lo cual también representa una ventaja cuando se trata de evaluar materiales ya probados en diferentes

contextos. La selección de los datos técnicos, ambientales y económicos de los materiales analizados se realizó mediante una consulta exhaustiva de bases de datos académicas y repositorios especializados, asegurando en todo momento que la calidad y la vigencia de la información utilizada cumplieran con los estándares requeridos por una investigación de este tipo, además de facilitar que los resultados pudieran ser comparados entre sí sin mayores inconsistencias.

Para este proceso se emplearon principalmente plataformas reconocidas y confiables como ScienceDirect, que fue utilizada para acceder a artículos revisados por pares relacionados con propiedades físico-mecánicas, ciclos de vida (LCA) y aplicaciones industriales de materiales alternativos en la industria automotriz (incluyendo estudios específicos sobre aleaciones, compuestos y biocompuestos), también se recurrió a SAE MOBILUS de la Society of Automotive Engineers que constituye una fuente primaria en literatura técnica automotriz y que resultó especialmente útil para consultar documentos sobre especificaciones de materiales, casos reales de uso en la industria y estudios comparativos de desempeño, asimismo se utilizó el repositorio arXiv.org que por ser un portal de acceso abierto permitió consultar investigaciones recientes sobre materiales compuestos y biocompuestos emergentes que aún no han sido completamente difundidas en medios tradicionales, por otro lado se incluyó información procedente del DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt) que es el portal técnico del Centro Aeroespacial Alemán y donde se encuentran informes detallados sobre análisis de ciclo de vida en aleaciones ligeras, finalmente se complementó la búsqueda con Google Scholar como herramienta adicional para rastrear citas, comparar resultados entre distintos autores y validar la disponibilidad de información técnica en diferentes idiomas y contextos, asegurando así un panorama más completo. En cuanto a los criterios de búsqueda empleados, estos incluyeron combinaciones de términos clave como “automotive materials”, “lightweight alloys”, “LCA magnesium aluminum”, “carbon fiber composites automotive”, “biocomposites applications automotive”, “sustainability in vehicle materials”, entre otros similares que se fueron ajustando conforme avanzaba la búsqueda para obtener resultados cada vez más específicos, además se filtraron los documentos según el año de publicación priorizando trabajos entre 2010 y 2024 para asegurar la actualidad de la información, también por tipo de documento como artículos científicos, informes técnicos y tesis de posgrado, así como por el nivel de citación para garantizar que los datos provengan de fuentes reconocidas y ampliamente discutidas en la comunidad académica y técnica.

Los tipos de documentos finalmente seleccionados abarcaron una gama diversa que incluyó artículos científicos revisados por pares con información experimental y validada (es decir, datos obtenidos directamente de pruebas de laboratorio o campo), informes técnicos emitidos por asociaciones automotrices o instituciones de investigación aplicada con resultados relevantes para la industria, tesis de maestría y doctorado con revisión institucional especialmente en el área de ingeniería de materiales y finalmente fichas técnicas de fabricantes que se usaron únicamente para corroborar valores estándar como densidad, módulo de elasticidad o resistencia mecánica cuando estos provenían de catálogos oficiales, asegurando siempre que incluso estos datos estuvieran respaldados por documentos técnicos adicionales para evitar discrepancias o errores.

De esta manera, el procedimiento para la recolección de datos no solo permitió compilar información técnica de alta calidad y fiabilidad, sino también construir una base metodológica robusta para el análisis posterior, ofreciendo así resultados coherentes y aplicables a la realidad industrial y académica en el campo de los materiales automotrices, contribuyendo con ello a fortalecer el conocimiento disponible sobre alternativas sostenibles, eficientes y económicamente viables para la fabricación de componentes vehiculares.

5 Las limitaciones de la investigación

Las limitaciones del presente estudio se derivan principalmente de su carácter documental y comparativo, ya que al tratarse de una investigación basada únicamente en la revisión y análisis de literatura técnica especializada no se realizaron pruebas experimentales directas sobre los materiales analizados, lo cual implica que todas las propiedades físico-mecánicas, ambientales y económicas consideradas en este trabajo provienen de estudios previos, informes técnicos y literatura científica confiable y actualizada, sin embargo es importante señalar que a pesar de haberse seleccionado fuentes de alta calidad y relevancia pueden existir variaciones metodológicas entre los distintos estudios consultados (por ejemplo en las condiciones de ensayo, los estándares empleados o las escalas de validación) lo cual podría dar lugar a cierta dispersión o inconsistencia en los valores reportados y que debe tenerse en cuenta al momento de interpretar los resultados. Del mismo modo se decidió excluir de los análisis materiales que aún se encuentran en fases muy tempranas de desarrollo, que no cuentan con validación suficiente para su implementación masiva o que son utilizados únicamente en sectores de alta gama o vehículos de lujo, como ocurre con las cerámicas técnicas avanzadas, los nanocompuestos o las superaleaciones (materiales que aunque interesantes todavía no disponen de evidencia robusta sobre su factibilidad industrial a gran escala),

de tal manera que el enfoque del estudio se centró únicamente en materiales que ya presentan un nivel de validación técnica aceptable o que se encuentran en etapas avanzadas de prueba en entornos industriales, buscando siempre mantener la pertinencia y aplicabilidad práctica de los resultados.

Otra limitación relevante a considerar es la disponibilidad parcial de datos económicos consolidados, sobre todo en el caso de biocompuestos emergentes o de materiales compuestos cuya producción aún no está completamente estandarizada, ya que en estos casos los costos de fabricación pueden variar considerablemente en función del contexto geográfico, la escala de producción, las tecnologías de procesamiento utilizadas e incluso las políticas locales de sostenibilidad (por ejemplo incentivos o aranceles), factores todos ellos que dificultan establecer estimaciones económicas universales y obligan a considerar los resultados económicos como referenciales más que definitivos.

Finalmente, aunque se incluyeron variables ambientales como el consumo energético y las emisiones de CO₂ mediante la revisión de estudios basados en Análisis de Ciclo de Vida (LCA), no todos los materiales contaron con datos homogéneos ni fueron evaluados bajo un mismo marco metodológico, por lo que es posible que las comparaciones realizadas en esta dimensión presenten limitaciones en cuanto a su precisión absoluta, lo cual refuerza la idea de que estos resultados deben interpretarse siempre dentro del contexto metodológico que les dio origen.

Estas limitaciones no invalidan en ningún caso los hallazgos alcanzados en el estudio, sino que más bien deben ser consideradas como advertencias metodológicas que permiten contextualizar y matizar las conclusiones, además representan también una oportunidad para que investigaciones futuras profundicen en la validación empírica de estos materiales bajo condiciones controladas y homogéneas, fortaleciendo así el conocimiento disponible y ampliando las posibilidades de aplicación práctica en la industria automotriz.

6 Resultados

Los resultados obtenidos en este estudio y el análisis comparativo de los materiales seleccionados se realizaron tomando como base los criterios definidos en la metodología, es decir, las propiedades físico-mecánicas, el impacto ambiental y la viabilidad industrial, aspectos que permiten evaluar cada material no solo desde su comportamiento técnico sino también desde su sostenibilidad y aplicabilidad práctica en la industria automotriz. Para organizar la comparación se elaboró una matriz de evaluación que permitió identificar patrones de comportamiento, ventajas y limitaciones

entre las distintas categorías consideradas —aleaciones metálicas, materiales compuestos y biocompuestos—, destacando así los principales atributos de cada grupo y las oportunidades que ofrecen cuando se busca innovar en la fabricación de vehículos más ligeros y sostenibles.

Desde el punto de vista de las propiedades físico-mecánicas, los materiales metálicos presentan una combinación equilibrada entre densidad y resistencia que los hace especialmente adecuados para aplicaciones estructurales donde se requiere soportar cargas importantes, en este sentido el aluminio 6061-T6 destaca por su elevada resistencia a la tracción que puede alcanzar hasta los 310 MPa y un módulo de elasticidad de 68,9 GPa, características que explican por qué es tan ampliamente utilizado en la fabricación de chasis, subestructuras y componentes expuestos a cargas mecánicas significativas (MFGProto, 2023; Grasp Engineering, 2023), además de ofrecer buena resistencia a la corrosión y facilidad de mecanizado. El magnesio AZ91D, por su parte, presenta una densidad mucho menor (alrededor de 1 810 kg/m³) lo que lo hace ventajoso cuando la prioridad es la reducción de peso del vehículo, aunque su resistencia y rigidez son algo menores en comparación con el aluminio (Ehrenberger & Friedrich, 2013), por ello su uso se concentra en piezas donde las exigencias mecánicas son moderadas como carcasas de transmisión, soportes o componentes secundarios.

En el caso de los compuestos poliméricos reforzados, los CFRP (compuestos con fibra de carbono) y los GFRP (compuestos con fibra de vidrio) muestran propiedades mecánicas que dependen mucho de la orientación de las fibras y del tipo de matriz polimérica empleada, los CFRP alcanzan resistencias superiores a los 1 000 MPa lo cual es notable, aunque su ductilidad es baja y su costo considerablemente alto, lo que restringe su uso principalmente a vehículos deportivos o aplicaciones de alto rendimiento; los GFRP, en cambio, ofrecen una alternativa más económica con propiedades mecánicas intermedias, suficientes para muchas aplicaciones estructurales y con mejor procesabilidad. Finalmente, los biocompuestos como el polipropileno con fibra de lino y la resina epoxi con cáscara de nuez presentan propiedades mecánicas más limitadas, pero resultan adecuadas para componentes interiores, paneles decorativos o recubrimientos no estructurales, donde la prioridad está más en la sostenibilidad que en la resistencia.

En términos de impacto ambiental, los materiales reciclables como el aluminio ofrecen ventajas muy significativas, ya que su reciclaje puede reducir hasta un 95 % del consumo energético respecto a su producción primaria (Dubreuil et al., 2012), disminuyendo de forma considerable las emisiones de CO₂, aunque esto depende también de que existan cadenas de reciclaje eficientes y

políticas regulatorias que incentiven su reutilización. El magnesio, a pesar de ser un metal ligero, implica procesos de extracción y refinamiento con mayor huella ambiental, lo cual reduce en parte sus beneficios ecológicos cuando se aplica de manera generalizada (Reppe et al., 1998), por lo que es un aspecto que debe evaluarse cuidadosamente. En el caso de los materiales compuestos, los CFRP presentan un impacto ambiental elevado debido a la producción intensiva de fibras de carbono y a las dificultades de reciclaje, mientras que los biocompuestos ofrecen un perfil ambiental más favorable gracias a que emplean fibras naturales renovables y matrices parcialmente biodegradables, aunque todavía enfrentan barreras para su integración a gran escala en procesos industriales estandarizados, sobre todo por su limitada durabilidad y por la falta de normativas claras para su gestión al final de la vida útil.

Respecto a la viabilidad industrial, el aluminio y los GFRP se posicionan como materiales con alta disponibilidad comercial y excelente compatibilidad con tecnologías industriales ya consolidadas como la extrusión, el moldeo y la fundición, lo que facilita su incorporación en líneas de producción a gran escala, además presentan costos accesibles y un rendimiento suficientemente alto para la mayoría de las aplicaciones vehiculares, lo que los hace especialmente atractivos. El magnesio AZ91D, aunque también es comercialmente disponible, todavía enfrenta desafíos técnicos relacionados con su soldabilidad, su susceptibilidad a la corrosión y la necesidad de tratamientos adicionales para mejorar su comportamiento en servicio, lo que encarece y complica su adopción. Los CFRP, a pesar de sus destacadas propiedades mecánicas, son materiales de alto costo (en rangos de 20 a 40 USD por kilogramo) y de difícil procesamiento, lo que limita su uso a sectores premium o de nicho, donde los presupuestos y la justificación técnica permiten asumir estos sobrecostos. Por último, los biocompuestos, aunque prometedores desde el punto de vista ecológico y cada vez más estudiados, aún presentan limitaciones en cuanto a su resistencia térmica, su durabilidad y la falta de estandarización de sus procesos, lo que restringe su aplicación a piezas de bajo esfuerzo mecánico, interiores o accesorios decorativos donde sus ventajas ambientales se pueden aprovechar sin comprometer la integridad estructural del vehículo.

En conjunto, este análisis evidencia que cada uno de los materiales evaluados presenta ventajas específicas y también limitaciones que deben ser consideradas cuidadosamente al momento de decidir su implementación en el sector automotriz, y que si bien algunos como el aluminio y los GFRP ya están plenamente integrados en la industria, otros como los biocompuestos o los CFRP

representan oportunidades de mejora y desarrollo tecnológico para los próximos años, siempre con la perspectiva de avanzar hacia vehículos más ligeros, sostenibles y competitivos.

Tabla 1. Desempeño de materiales alternativos en la fabricación automotriz.

Material	Desempeño mecánico	Impacto ambiental	Viabilidad industrial
Aluminio 6061-T6	Alto	Medio-Bajo (reciclado)	Alta
Magnesio AZ91D	Medio	Alto	Media
CFRP	Muy alto	Alto (poca reciclabilidad)	Baja
GFRP	Medio-Alto	Medio	Alta
PP + fibra de lino	Bajo-Medio	Bajo (renovable/biodegradable)	Media
Epoxi + cáscara de nuez	Bajo	Muy bajo	Baja

Los resultados alcanzados dejan claro que no existe un solo material que pueda considerarse óptimo para responder a todas las exigencias de la industria automotriz, ya que cada uno presenta ventajas y limitaciones que dependen del uso que se le quiera dar y de las prioridades de diseño, en este sentido materiales como el aluminio 6061-T6 y los compuestos reforzados con fibra de vidrio (GFRP) logran un equilibrio interesante entre resistencia, impacto ambiental y viabilidad industrial (por eso son tan comunes en chasis, subestructuras y paneles), mientras que los compuestos con fibra de carbono (CFRP) destacan por su extraordinario rendimiento mecánico aunque con costos muy elevados y dificultades ambientales que limitan su adopción a vehículos premium o deportivos. Por otro lado los biocompuestos surgen como una alternativa ecológica prometedora para piezas de baja exigencia estructural, gracias a su origen renovable y menor impacto ambiental, aunque todavía enfrentan barreras técnicas y falta de estandarización que deberán resolverse para que puedan usarse de manera masiva en la industria.

7 Discusión

El presente estudio permitió establecer principios generales y patrones de comportamiento sobre el desempeño de materiales alternativos en la fabricación de componentes automotrices, evidenciando que la elección de un material no puede depender de un solo factor sino que resulta siempre del equilibrio entre sus propiedades físico-mecánicas, su impacto ambiental y su viabilidad industrial, siendo estas dimensiones inseparables cuando se busca optimizar tanto la eficiencia

como la sostenibilidad. En este sentido, el aluminio 6061-T6 y los compuestos reforzados con fibra de vidrio (GFRP) se confirmaron como opciones con buen rendimiento estructural y alta disponibilidad comercial (por eso son tan frecuentes en bastidores, subestructuras y paneles), mientras que los biocompuestos destacaron por su menor impacto ambiental gracias a su origen renovable y parcialmente biodegradable, aunque con limitaciones técnicas que por ahora restringen su uso a componentes de baja exigencia estructural.

Se identificaron también excepciones importantes y aspectos todavía no resueltos que merecen atención, por ejemplo el magnesio AZ91D aunque presenta la menor densidad de todos los materiales evaluados y una buena colabilidad (características atractivas para aligerar vehículos) muestra también problemas de resistencia a la corrosión y un impacto ambiental relativamente elevado debido a sus procesos de extracción y refinamiento, lo que limita su adopción masiva en condiciones estándar; asimismo los compuestos con fibra de carbono (CFRP), a pesar de su sobresaliente desempeño mecánico y de soportar cargas muy superiores a las de los metales tradicionales, siguen enfrentando barreras importantes por su baja reciclabilidad y su alto costo de producción, lo que reduce su implementación a nichos muy específicos como autos de lujo o de competencia. Todo esto confirma que no existe una correlación directa ni lineal entre alta resistencia mecánica y sostenibilidad ambiental o económica, de modo que cada caso debe evaluarse de manera integral.

Los hallazgos de esta investigación son coherentes con los reportes de estudios previos como los de Das (2014) y Dubreuil et al. (2012), que ya habían señalado al aluminio reciclado como uno de los materiales más equilibrados para la industria automotriz por su ligereza, su alta reciclabilidad y su accesibilidad económica, características que lo convierten en un estándar para muchas aplicaciones; de igual forma las limitaciones observadas en los CFRP y las ventajas ambientales de los biocompuestos coinciden con reportes recientes (ScienceDirect, 2022; Al-Sarraf, 2024), reforzando así la validez de las conclusiones aquí presentadas.

Las consecuencias teóricas de estos resultados confirman que la evaluación de materiales automotrices debe abordarse desde un enfoque multidimensional que contemple simultáneamente el rendimiento mecánico, la sostenibilidad ambiental y la viabilidad económica, ya que priorizar solo uno de estos aspectos termina generando desventajas en los otros. En términos prácticos, estos hallazgos pueden orientar la selección de materiales según el tipo de componente y las prioridades de cada fabricante, promoviendo por ejemplo la integración gradual de biocompuestos en piezas

interiores (como paneles de puertas o recubrimientos) y la priorización del aluminio reciclado y los GFRP en aplicaciones estructurales intermedias, allí donde se busca mantener resistencia y ligereza sin comprometer la sostenibilidad ni los costos.

Las conclusiones que se desprenden de este estudio se apoyan sólidamente en las pruebas documentales presentadas en la literatura revisada, por ejemplo los datos de densidad y resistencia del aluminio (MFGProto, 2023) respaldan su idoneidad para estructuras ligeras, mientras que los análisis de ciclo de vida (Dubreuil et al., 2012) justifican su ventaja ambiental frente al magnesio o los CFRP; asimismo las propiedades renovables y biodegradables de los biocompuestos se sustentan en estudios recientes sobre biopolímeros reforzados (Al-Sarraf, 2024) que los posicionan como una alternativa ecológica viable.

8 Conclusión

El análisis comparativo de materiales alternativos para la fabricación de componentes automotrices permitió comprobar que no existe un solo material capaz de cumplir de manera óptima con todos los requisitos estructurales, ambientales e industriales, ya que cada uno presenta ventajas y limitaciones propias que dependen de las prioridades de diseño, las condiciones de uso y los objetivos de sostenibilidad definidos por cada fabricante, de modo que la elección adecuada siempre requiere encontrar un equilibrio entre estos factores para responder a las necesidades específicas de cada aplicación.

El aluminio 6061-T6 se consolida como una de las opciones más balanceadas para aplicaciones estructurales, gracias a su alta resistencia mecánica, su amplia disponibilidad comercial y su excelente reciclabilidad (que reduce considerablemente su impacto ambiental), cualidades que explican por qué sigue siendo uno de los materiales más utilizados en la industria automotriz contemporánea en bastidores, subestructuras y paneles principales. Por su parte el magnesio AZ91D destaca sobre todo por su baja densidad, lo que lo hace atractivo para la reducción de peso en vehículos (por ejemplo en carcasas de transmisión y soportes), aunque sus limitaciones en resistencia a la corrosión y su mayor huella ambiental restringen su uso a piezas específicas que además suelen requerir tratamientos superficiales adicionales para asegurar su durabilidad.

En cuanto a los compuestos poliméricos reforzados, los resultados mostraron comportamientos diferenciados entre los CFRP y los GFRP, ya que los primeros demostraron ser los materiales con mayor resistencia específica y desempeño mecánico sobresaliente, aunque con un costo económico muy elevado y una escasa reciclabilidad que limitan su empleo a nichos muy específicos como

autos deportivos o de lujo; en cambio los GFRP ofrecieron una alternativa más asequible con propiedades intermedias y mayor compatibilidad con los procesos industriales convencionales como moldeo y laminado, lo que facilita su adopción en aplicaciones más amplias.

Los biocompuestos, como el polipropileno con fibra de lino y la resina epoxi con cáscara de nuez, emergen como una alternativa interesante por su bajo impacto ambiental y su potencial para integrarse a una economía circular (gracias a su origen renovable y parcialmente biodegradable), aunque su resistencia mecánica todavía es limitada y la falta de estandarización tecnológica restringe su uso a componentes no estructurales y elementos interiores (como paneles decorativos, recubrimientos o cubiertas).

Este estudio confirma la necesidad de evaluar los materiales desde una perspectiva multidimensional que contemple no sólo su rendimiento físico, sino también su viabilidad económica y su sostenibilidad ambiental, ya que centrarse en un solo aspecto conduce inevitablemente a comprometer los otros. Los resultados coinciden con hallazgos previos reportados en la literatura especializada (como los de Das, 2014; Dubreuil et al., 2012), reafirmando que el aluminio reciclado y los GFRP constituyen opciones equilibradas y consolidadas para las aplicaciones industriales actuales, mientras que los biocompuestos representan una oportunidad prometedora a mediano y largo plazo siempre y cuando se logren superar las barreras técnicas y normativas que todavía los limitan.

Finalmente se destaca la importancia de continuar desarrollando investigaciones complementarias, especialmente de carácter experimental, que permitan validar el comportamiento real de los biocompuestos y de las nuevas generaciones de aleaciones ligeras en condiciones de servicio, con el objetivo de consolidar su implementación en la industria automotriz y seguir avanzando hacia soluciones más ligeras, eficientes y sostenibles para el sector.

Referencias

- Al-Sarraf (2024). Biocomposite reinforcement from walnut shell for green applications.
- Bushi, L., Skszek, T., & Wagner, D. (2015). MMLV: Life cycle assessment of multi-material lightweight vehicles (SAE Technical Paper 2015-01-1616). SAE International. <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2015-01-1616>
- Das, S. (2014). Life cycle energy and environmental assessment of aluminum-intensive vehicle design (SAE Technical Paper 2014-01-1004). SAE International. <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2014-01-1004>
- Dubreuil, A. et al. (2012). LCA of lightweight materials in automotive applications.
- Dubreuil, A., Bushi, L., Das, S., Tharumarajah, A., & Gong, X. (2012). A comparative life cycle assessment of magnesium front end autoparts: A revision to 2010 01 0275 (SAE Technical Paper 2012 01 2325). SAE International. <https://doi.org/10.4271/2012-01-2325>
- Ehrenberger, S., & Friedrich, H. E. (2013). Life cycle assessment of the recycling of magnesium vehicle components. *JOM*, 65, 1303–1309. <https://doi.org/10.1007/s11837-013-0703-3>
- Ehrenberger, S., & Friedrich, H. E. (2013). Life cycle assessment of magnesium components in vehicle construction. DLR German Aerospace Center. https://elib.dlr.de/87332/1/2013-12_IMA_LCA-Study_Report_Part-I-and-II_incl-summary.pdf
- Grasp Engineering. <https://www.graspengineering.com/material-properties-aluminum-6061-t6-6061-t651>
- Lemos, R., & Castro, M. (2018). Environmental performance of recycled aluminum: A comparative LCA. *Resources, Conservation & Recycling*, 131, 85–94. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.12.018>
- MFGProto (2023). <https://www.mfgproto.com/aluminum-6061-t6-data-sheet>
- Peng, T., & Wang, L. (2024). Wear and corrosion properties of Mg(OH)₂ compound layer formed on magnesium alloy in superheated water vapor. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2412.20959>
- Reppe, P., Keoleian, G., Messick, R., & Costic, M. (1998). Life cycle assessment of a transmission case: Magnesium vs. aluminum (SAE Technical Paper 980470). SAE International. <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/980470>

- ScienceDirect. (2022). Life cycle assessment studies on lightweight materials for automotive applications – An overview. *Energy Reports*, 8(Suppl 3), 338–345. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235248472200006X>
- Sivertsen, L. K., Haagenen, J. Ö., & Albright, D. (2003). A review of the life cycle environmental performance of automotive magnesium (SAE Technical Paper 2003 01 0641). SAE International. <https://doi.org/10.4271/2003-01-0641>.

© 2024 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).