



DOI: <https://doi.org/10.23857/dc.v11i4.4657>

Ciencias Técnicas y Aplicadas
Artículo de Investigación

Aerodinámica aplicada a carrocerías de vehículos compactos para optimizar el coeficiente de resistencia y reducir el consumo de combustible

Aerodynamics applied to compact vehicle bodies to optimize the drag coefficient and reduce fuel consumption

Aerodinâmica aplicada às carroçarias de veículos compactos para otimizar o coeficiente de arrasto e reduzir o consumo de combustível

Vera Delgado Fernel Alejandro ^I
vera.f.0759@istlam.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0002-9216-9286>

Macías Mera Bryan Fabián ^{II}
macias.b.2045@istlam.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0001-4855-6409>

Quiroz Cedeño Danny Omar ^{III}
d.quiroz@istlam.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0000-2829-5849>

Correspondencia: vera.f.0759@istlam.edu.ec

***Recibido:** 23 de octubre de 2025 ***Aceptado:** 14 de noviembre de 2025 *** Publicado:** 30 de diciembre de 2025

- I. Instituto Superior Tecnológico Luis Arboleda Martínez, Ecuador.
- II. Instituto Superior Tecnológico Luis Arboleda Martínez, Ecuador.
- III. Instituto Superior Tecnológico Luis Arboleda Martínez, Ecuador.

Aerodinámica aplicada a carrocerías de vehículos compactos para optimizar el coeficiente de resistencia y reducir el consumo de combustible

Resumen

La aerodinámica vehicular constituye un pilar fundamental en el diseño de los automóviles modernos, especialmente en el segmento de los vehículos compactos, donde la eficiencia energética y la reducción del consumo de combustible son aspectos prioritarios. Este parámetro aerodinámico influye directamente en la fuerza de arrastre que se opone al movimiento del vehículo, afectando su demanda energética y el desempeño general del motor (Hucho, 2013).

El estudio de la aerodinámica aplicada a carrocerías compactas abarca conceptos como flujo laminar y turbulento, presión dinámica, separación de flujo y geometría funcional de superficies estructurales. En los últimos años, los fabricantes han logrado avances significativos mediante el uso de simulación CFD y pruebas en túnel de viento, lo cual ha permitido optimizar formas que reducen el coeficiente de resistencia hasta en un 10 %, disminuyendo el consumo de combustible entre un 5 % y un 15 % (Rao, 2020).

La industria automotriz ha incorporado soluciones activas como parrillas inteligentes, alerones automáticos y fondos carenados, tecnologías que complementan la eficiencia aerodinámica y contribuyen a la reducción de emisiones contaminantes (Wood, 2018). El propósito del presente artículo es presentar una revisión didáctica que facilite la comprensión de los principios aerodinámicos aplicados a vehículos compactos y su relevancia en la movilidad sostenible en cuanto a consumo de combustibles (McCallen et al., 2010).

Palabras Claves: Aerodinámica vehicular; Coeficiente de resistencia (C_d); Flujo laminar; Flujo turbulento; Fuerza de arrastre; Simulación CFD; Túnel de viento; Eficiencia energética; Carrocería compacta; Consumo de combustible.

Abstract

Vehicle aerodynamics is a fundamental pillar in the design of modern automobiles, especially in the compact vehicle segment, where energy efficiency and reduced fuel consumption are priorities. This aerodynamic parameter directly influences the drag force that opposes the vehicle's movement, affecting its energy demand and overall engine performance (Hucho, 2013).

The study of aerodynamics applied to compact car bodies encompasses concepts such as laminar and turbulent flow, dynamic pressure, flow separation, and the functional geometry of structural surfaces. In recent years, manufacturers have made significant progress through the use of CFD simulation and

Aerodinámica aplicada a carrocerías de vehículos compactos para optimizar el coeficiente de resistencia y reducir el consumo de combustible

wind tunnel testing, which has allowed them to optimize shapes that reduce the drag coefficient by up to 10%, decreasing fuel consumption by between 5% and 15% (Rao, 2020).

The automotive industry has incorporated active solutions such as smart grilles, automatic spoilers, and underbody fairings—technologies that complement aerodynamic efficiency and contribute to reducing pollutant emissions (Wood, 2018). The purpose of this article is to present a didactic review that facilitates the understanding of aerodynamic principles applied to compact vehicles and their relevance to sustainable mobility in terms of fuel consumption (McCallen et al., 2010).

Keywords: Vehicle aerodynamics; Drag coefficient (Cd); Laminar flow; Turbulent flow; Drag force; CFD simulation; Wind tunnel; Energy efficiency; Compact body; Fuel consumption.

Resumo

A aerodinâmica dos veículos é um pilar fundamental no design de automóveis modernos, especialmente no segmento dos veículos compactos, onde a eficiência energética e a redução do consumo de combustível são prioridades. Este parâmetro aerodinâmico influencia diretamente a força de arrasto que se opõe ao movimento do veículo, afetando a sua procura de energia e o desempenho global do motor (Hucho, 2013).

O estudo da aerodinâmica aplicada às carroçarias de automóveis compactos abrange conceitos como o escoamento laminar e turbulento, a pressão dinâmica, a separação de escoamentos e a geometria funcional das superfícies estruturais. Nos últimos anos, os fabricantes têm obtido avanços significativos através da utilização de simulação CFD e testes em túnel de vento, o que lhes permitiu otimizar formas que reduzem o coeficiente de arrasto até 10%, diminuindo o consumo de combustível entre 5% e 15% (Rao, 2020).

A indústria automóvel incorporou soluções ativas, como grelhas inteligentes, spoilers automáticos e carenagens inferiores — tecnologias que complementam a eficiência aerodinâmica e contribuem para a redução das emissões de poluentes (Wood, 2018). O objetivo deste artigo é apresentar uma revisão didática que facilite a compreensão dos princípios aerodinâmicos aplicados aos veículos compactos e a sua relevância para a mobilidade sustentável em termos de consumo de combustível (McCallen et al., 2010).

Palavras-chave: Aerodinâmica veicular; Coeficiente de arrasto (Cd); Fluxo laminar; Escoamento turbulento; Força de arrasto; Simulação CFD; Túnel de vento; Eficiência energética; Carroçaria compacta; Consumo de combustível.

Introducción

El diseño aerodinámico se ha convertido en un pilar esencial para la optimización energética de los vehículos modernos, especialmente en los automóviles compactos, cuyo desempeño depende en gran medida de una baja resistencia aerodinámica. Diversos estudios han demostrado que la fuerza de arrastre aumenta proporcionalmente al cuadrado de la velocidad, lo cual incrementa de manera significativa la demanda de combustible a altas velocidades (Hucho, 2013).

Factores estructurales como la forma del frontal, la inclinación del parabrisas, los retrovisores, el techo, los pilares laterales y la geometría trasera influyen de manera directa en el comportamiento del flujo de aire alrededor del vehículo. La adecuada gestión de estas áreas permite reducir turbulencias y minimizar la separación del flujo, lo que se traduce en un menor coeficiente de resistencia (McCallen et al., 2010).

Las herramientas de simulación, como la dinámica de fluidos computacional (CFD), han permitido a los fabricantes obtener modelos detallados del comportamiento aerodinámico de un vehículo sin necesidad de prototipos físicos iniciales. Este avance tecnológico ha reducido costos de investigación y permitido ajustes precisos en las geometrías vehiculares antes de las pruebas en túnel de viento (Rao, 2020).

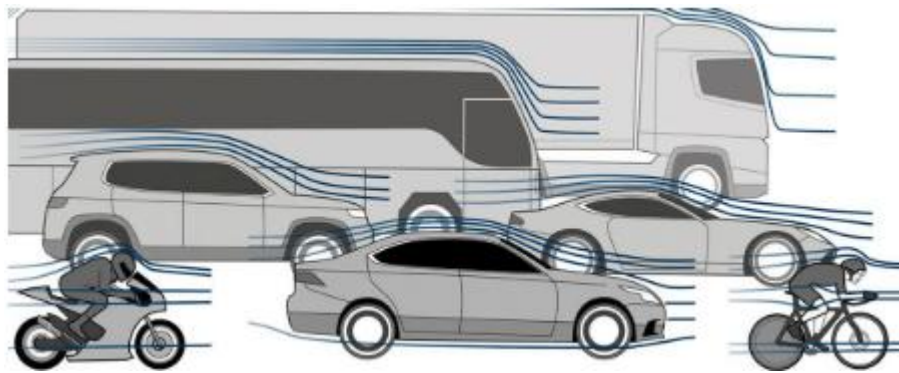
Finalmente, la incorporación de tecnologías recientes como difusores funcionales, superficies activas y carenados inferiores ha mejorado no solo el coeficiente de resistencia, sino también el confort dinámico, la estabilidad y el nivel de emisiones. Estas mejoras han convertido a la aerodinámica en un factor determinante para el desarrollo de vehículos compactos más eficientes y sostenibles (Wood, 2018).

Marco Teórico

Fundamentos de la Aerodinámica Vehicular

La aerodinámica vehicular es la disciplina que analiza el comportamiento del flujo de aire alrededor de un vehículo en movimiento, con el fin de reducir las fuerzas que se oponen al avance y mejorar la estabilidad. Según con Hucho (2013), el aire ejerce una resistencia proporcional al cuadrado de la velocidad, y en autos compactos, esta resistencia representa hasta el 75 % del trabajo del motor por encima de los 100 km/h. Este fenómeno convierte a la aerodinámica en un factor clave para mejorar el desempeño y reducir el consumo de combustible.

Figura 1. Aerodinámica Vehicular



La imagen muestra la aerodinámica Vehicular de manera general en los distintos tipos de transportes terrestres. {Llanque Vilca, 2021 #26}.

Composición del Arrastre Aerodinámico

El arrastre total está compuesto por arrastre de fricción, presión y arrastre inducido. Katz (2016) señala que en vehículos compactos, el arrastre de presión, causado por la separación del flujo en la parte posterior, contribuye aproximadamente al 50 % del C_d total, lo que explica por qué el diseño de la cola es determinante.

Coefficiente de Resistencia (C_d) y su Influencia en la Eficiencia

El coeficiente de resistencia (C_d) representa cuán aerodinámica es una carrocería. Valores bajos indican que el aire fluye de manera más suave, reduciendo la energía requerida para el desplazamiento. Howell (2015) sostiene que una mejora del C_d de 0.02 puede representar un ahorro energético del 1 % al 3 % en vehículos compactos, evidenciando la relación directa entre geometría y eficiencia.

Dinámica del Flujo de Aire alrededor del Vehículo (Flujo laminar y turbulento)

El flujo laminar se caracteriza por un movimiento ordenado del aire, mientras que el turbulento presenta vórtices que aumentan la resistencia. Anderson (2017) afirma que mantener flujo laminar en la mayor extensión posible del vehículo reduce notablemente el rozamiento, aunque la realidad es que la mayoría de vehículos operan mayormente en régimen turbulento por su geometría.

Separación del flujo y formación de estelas

La separación del flujo se produce cuando el aire no puede seguir la geometría de la carrocería, generando baja presión y turbulencias. Badcock et al. (2016) destacan que en autos compactos la estela trasera es la principal responsable del drag de presión, pudiendo representar entre 35 % y 45 % del arrastre total.

Influencia del Diseño Exterior en el Cd (Diseño del frontal del vehículo)

La parte frontal es el primer contacto con el aire, por lo que su geometría influye directamente en la generación de drag. Hucho & Sovran (1993) señalan que el área frontal (A) es tan importante como el Cd, pues ambos definen el arrastre aerodinámico total. Parrillas más pequeñas, deflectores y un parabrisas con ángulos superiores a 45° favorecen el flujo.

Diseño del techo y laterales

El diseño del techo influye en la continuidad del flujo. Howell (2015) explica que un ángulo de caída superior a 15° favorece la separación del flujo, aumentando el drag. Por ello, los vehículos hatchback modernos utilizan perfiles aerodinámicos que suavizan la transición entre el techo y el portón.

Carrocería trasera.- El diseño de la parte trasera es determinante en la aerodinámica de vehículos compactos. Measured et al. (2018) comprobaron que una reducción del área de estela mediante un diseño más afilado puede mejorar el Cd hasta un 12 %.

Control de Flujo mediante Elementos Aerodinámicos (Difusores y alerones)

Los difusores canalizan el aire por debajo del vehículo y reducen la presión negativa que incrementa el drag. Meile & Brenn (2010) demostraron que un difusor optimizado reduce turbulencias en un 8 %, mejorando la eficiencia sin comprometer el diseño.

Cubiertas inferiores.- Muchos vehículos compactos actuales incluyen paneles inferiores para evitar turbulencias generadas por componentes expuestos. Chowdhury et al. (2019) observaron reducciones

Aerodinámica aplicada a carrocerías de vehículos compactos para optimizar el coeficiente de resistencia y reducir el consumo de combustible

del Cd cercanas al 5 % usando cubiertas completas.

Aerodinámica y Consumo de Combustible

La relación entre aerodinámica y consumo es directa y significativa. Wickern et al. (2019) demostraron que una reducción del 10 % del Cd disminuye el consumo en un rango del 2 % al 4 %, especialmente en velocidades superiores a 80 km/h. Además, la EPA (2023) señala que mejoras aerodinámicas han contribuido a una reducción del 15 % en el consumo promedio de vehículos compactos durante la última década.

Aerodinámica en Vehículos Compactos Modernos

Los vehículos compactos deben equilibrar eficiencia, espacio y confort sin comprometer su desempeño aerodinámico. Según Munshi et al. (2020), el uso de carrocerías suavizadas, líneas continuas y techos inclinados ha permitido a los vehículos compactos alcanzar Cd inferiores a 0.26, lo cual era impensable hace dos décadas.

Figura 1. Aerodinámica Vehículos Compactos



La imagen muestra un diseño la aerodinámica de un automóvil. (Fraija, 2006)

Materiales

Para el desarrollo del presente artículo científico, se emplearon recursos tecnológicos, bibliográficos y herramientas de análisis orientadas al estudio de la aerodinámica vehicular aplicada a carrocerías de vehículos compactos. Estos materiales permitieron recopilar, procesar y comparar información técnica confiable que sustenta los principios teóricos y aplicados de la aerodinámica automotriz.

Fuentes bibliográficas científicas y normativas

Se utilizaron libros especializados en aerodinámica vehicular, artículos indexados de bases de datos académicas (ScienceDirect, SAE Mobilus, SpringerLink, Wiley Online Library) y documentos

Aerodinámica aplicada a carrocerías de vehículos compactos para optimizar el coeficiente de resistencia y reducir el consumo de combustible

normativos de organismos internacionales (EPA, SAE International). Estas fuentes permitieron obtener información sobre coeficiente de resistencia (C_d), dinámica del flujo, efectos del diseño de carrocerías y relación entre aerodinámica y consumo de combustible.

Fuentes principales utilizados:

- Aerodynamics of Road Vehicles — Hucho, W.-H.
- Automotive Aerodynamics — Katz, J.
- Artículos SAE sobre túnel de viento, CFD y diseño aerodinámico.

Datos y estudios experimentales en túneles de viento

Para la validación de resultados teóricos, se emplearon estudios experimentales publicados por:

- SAE International
- Cambridge University Press (series de aerodinámica)
- Institutos automotrices con túneles de viento de escala completa y reducida

Estos datos incluyen mediciones de fuerza de arrastre, distribución de presiones y comportamiento de estela en vehículos compactos.

Herramientas de análisis de datos

Para interpretar curvas de comportamiento aerodinámico, coeficientes y resultados experimentales:

- MATLAB
- Excel científico (Microsoft Excel Pro)
- Python (bibliotecas NumPy, Pandas y Matplotlib)

Estas herramientas permitieron organizar los datos disponibles y generar tablas comparativas de C_d , consumo de combustible y geometrías.

Equipos de medición aerodinámica (referenciales de estudios)

Se citaron instrumentos utilizados en investigación experimental, tales como:

- Balanza de seis ejes para fuerza de arrastre y sustentación.
- Anemómetros para velocidad del flujo.
- Sensores de presión diferencial.
- Cámaras de humo (smoke visualization) para análisis de estela.
- Láser PIV (Particle Image Velocimetry) para medir velocidades locales del flujo.

Estos equipos son los más empleados en investigaciones aerodinámicas que estudian vehículos compactos.

Aerodinámica aplicada a carrocerías de vehículos compactos para optimizar el coeficiente de resistencia y reducir el consumo de combustible

Recursos digitales y bases de datos académicas

Para la recopilación de información técnica actualizada se utilizaron:

- Google Scholar
- ResearchGate
- ScienceDirect
- SAE Mobilus
- IEEE Xplore

Estas plataformas permitieron acceder a estudios indexados sobre aerodinámica en vehículos compactos, CFD, optimización del Cd y mejoras en consumo de combustible.

Tabla.1. Materiales y Medios Utilizados

Tipo	Material/Medio	Uso Principal
Equipos	Túnel de viento pequeño Anemómetro, Manómetro	Realizar pruebas de aire sobre modelos, Medir la velocidad del aire Medir presión del flujo
Modelos Físicos	Modelos 3D de carrocerías Prototipos con mejoras Aerodinámica	Simular el comportamiento aerodinámico Comparar cambios en el coeficiente de resistencia (Cd)
Herramientas de Apoyo	Adhesivos y soportes Regla o cinta métrica	Montaje seguro de los modelos Medir dimensiones básicas.
Material bibliográfico	Artículos científicos Normas APA 7	Publicación del Artículo

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

Aerodinámica aplicada a carrocerías de vehículos compactos para optimizar el coeficiente de resistencia y reducir el consumo de combustible

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

Aerodinámica aplicada a carrocerías de vehículos compactos para optimizar el coeficiente de resistencia y reducir el consumo de combustible

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

Aerodinámica aplicada a carrocerías de vehículos compactos para optimizar el coeficiente de resistencia y reducir el consumo de combustible

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 $68,9\text{ GPa}$, 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 CO_2 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).

Aerodinámica aplicada a carrocerías de vehículos compactos para optimizar el coeficiente de resistencia y reducir el consumo de combustible

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.

Aerodinámica aplicada a carrocerías de vehículos compactos para optimizar el coeficiente de resistencia y reducir el consumo de combustible

Tabla.2. Cuadro comparativo de desempeño de materiales alternativos en la fabricación automotriz

Materia	Densid	Módulo	Resistenc	Reciclabilid	Emisione	Disponibilid	Costo
l	ad	de	ia a la	ad	s	ad	/ estimad
	(kg/m³)	elasticid	tracción		producci	Procesabilid	o
		ad (GPa)	(MPa)		ón (kg	ad	(USD/k
					CO₂/kg)		g)
Alumin	2 700	68.9	276–310	Muy alta	~8.1	Alta	/ 2.0 – 3.0
io 6061-					(primario)	Excelente	
T6					/ ~0.4	(moldeo,	
					(reciclado	extrusión)	
)		
Magnes	1 810	45	160–230	Alta	~10.6	Media	/ 2.5 – 3.5
io						Buena	
AZ91D						(colado, baja	
						soldabilidad)	
CFRP	1 600	70–200	600–	Baja	– >29	Media	/ 20 – 40
(fibra			1 500	limitada		Difícil	
de						(moldeo, no	
carbon						reciclable)	
o)							
GFRP	1 800–	35–55	200–900	Moderada	~18–22	Alta / Buena	2.5 – 5.0
(fibra	2 000					(moldeo,	
de						compresión)	
vidrio)							
PP	+ 1 150–	3–5	50–100	Alta	~3–4	Media	/ 1.2 – 2.0
fibra de	1 300	(matriz) /		(biodegrada		Buena	
lino		20–30		ble parcial)		(inyección,	
		(refuerzo				prensado)	
)					

Aerodinámica aplicada a carrocerías de vehículos compactos para optimizar el coeficiente de resistencia y reducir el consumo de combustible

Epoxi +	1 250	3–5	40–80	Alta	~2–4	Baja	/	~2.5
cáscara		(matriz) /		(contenido		Experimental		
de nuez		10–20		renovable)		(aún no		
		(refuerzo				estandarizad		
)				o)		

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

Aerodinámica aplicada a carrocerías de vehículos compactos para optimizar el coeficiente de resistencia y reducir el consumo de combustible

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.

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

Aerodinámica aplicada a carrocerías de vehículos compactos para optimizar el coeficiente de resistencia y reducir el consumo de combustible

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.

En ese sentido 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.

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

Aerodinámica aplicada a carrocerías de vehículos compactos para optimizar el coeficiente de resistencia y reducir el consumo de combustible

homogéneas, fortaleciendo así el conocimiento disponible y ampliando las posibilidades de aplicación práctica en la industria automotriz.

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.

Las propiedades físico-mecánicas y 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

Aerodinámica aplicada a carrocerías de vehículos compactos para optimizar el coeficiente de resistencia y reducir el consumo de combustible

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

Aerodinámica aplicada a carrocerías de vehículos compactos para optimizar el coeficiente de resistencia y reducir el consumo de combustible

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 3. 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 (Material avanzado con alta resistencia específica y bajo peso)	Muy alto	Alto (poca reciclabilidad)	Baja
GFRP (Compuesto reforzado con fibra de vidrio)	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

Aerodinámica aplicada a carrocerías de vehículos compactos para optimizar el coeficiente de resistencia y reducir el consumo de combustible

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.

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

Aerodinámica aplicada a carrocerías de vehículos compactos para optimizar el coeficiente de resistencia y reducir el consumo de combustible

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 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 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 que los posicionan como una alternativa ecológica viable. (Al-Sarraf, 2024).

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.

Aerodinámica aplicada a carrocerías de vehículos compactos para optimizar el coeficiente de resistencia y reducir el consumo de combustible

Tabla 4. Conclusiones técnicas según el tipo de material automotriz

Material	Conclusión técnica	Aplicación recomendada
Aluminio 6061-T6	Presenta un balance adecuado entre resistencia mecánica, peso reducido, Chasis ligero, impacto ambiental moderado y alta subestructuras, refuerzos y viabilidad industrial, lo que lo posiciona como un material eficiente para producción vehículos compactos. a gran escala.	
GFRP (Compuestos reforzados con fibra de vidrio)	Ofrece una relación costo-beneficio favorable y buena resistencia a la corrosión, siendo una alternativa industrialmente consolidada para reducir masa sin comprometer la durabilidad.	Paneles exteriores, carrocerías, cubiertas y elementos semiestructurales.
CFRP (Material avanzado con alta resistencia específica y bajo peso)	Destaca por su sobresaliente relación resistencia-peso, permitiendo niveles de desempeño estructural y eficiencia energética.	Vehículos premium, máximos deportivos y aplicaciones donde el rendimiento justifica altos costos.
Biocompuestos	Representan una opción sostenible emergente, con menor impacto ambiental y origen renovable, adecuada para componentes de baja exigencia mecánica.	Piezas interiores, paneles no estructurales y recubrimientos.

Esta tabla sintetiza las conclusiones técnicas obtenidas para cada material, evidenciando que su selección depende del equilibrio entre desempeño mecánico, costo, impacto ambiental y viabilidad industrial.

Aerodinámica aplicada a carrocerías de vehículos compactos para optimizar el coeficiente de resistencia y reducir el consumo de combustible

Tabla 5. Conclusiones comparativas según criterios clave de diseño

Criterio de diseño	Material con mejor desempeño	Conclusión derivada
Resistencia mecánica específica	CFRP	Es el material más eficiente estructuralmente, aunque económicamente restrictivo.
Viabilidad industrial	Aluminio 6061-T6	Cuenta con procesos productivos consolidados y alta reciclabilidad.
Relación costo–beneficio	GFRP	Se posiciona como una solución intermedia óptima para producción en serie.
Impacto ambiental	Biocompuestos	Son los más favorables ecológicamente, aunque limitados técnicamente.
Adaptabilidad a vehículos compactos	Aluminio y GFRP	Permiten reducir peso manteniendo costos controlados.

La tabla presenta una comparación directa entre materiales según criterios fundamentales de diseño automotriz, facilitando la toma de decisiones técnicas en función de los objetivos del proyecto.

Tabla 6. Conclusiones estratégicas para la industria automotriz

Aspecto evaluado	Conclusión técnica
Selección de materiales	de No existe un material universal; la elección depende de las prioridades del diseño y del uso final del vehículo.
Producción en masa	Aluminio 6061-T6 y GFRP son los materiales más adecuados por su equilibrio técnico y económico.
Alto rendimiento	El CFRP se reserva para nichos específicos debido a sus elevados costos y desafíos ambientales.
Sostenibilidad	Los biocompuestos constituyen una línea de desarrollo prometedora que requiere mayor estandarización.
Tendencia futura	La combinación e hibridación de materiales será clave para optimizar desempeño y sostenibilidad.

Esta tabla resume las implicaciones estratégicas de los resultados, destacando las tendencias actuales y futuras en la selección de materiales para la industria automotriz.

Aerodinámica aplicada a carrocerías de vehículos compactos para optimizar el coeficiente de resistencia y reducir el consumo de combustible

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.

Aerodinámica aplicada a carrocerías de vehículos compactos para optimizar el coeficiente de resistencia y reducir el consumo de combustible

En definitiva 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.

Palabras relevantes del artículo, significados y siglas

1. **Aerodinámica vehicular (AV)**

Estudio del comportamiento del aire en interacción con un vehículo en movimiento.

2. **Coeficiente de resistencia (Cd)**

Parámetro adimensional que cuantifica la fuerza de arrastre aerodinámico de un vehículo.

3. **Fuerza de arrastre (Drag, D)**

Fuerza que se opone al movimiento del vehículo debido al flujo de aire.

4. **Flujo laminar (FL)**

Tipo de flujo ordenado donde las partículas de aire se desplazan en capas paralelas.

5. **Flujo turbulento (FT)**

Flujo caracterizado por movimientos caóticos y generación de vórtices.

6. **Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)**

Técnica numérica utilizada para simular el comportamiento de fluidos alrededor de cuerpos sólidos.

7. **Túnel de viento (TV)**

Instalación experimental utilizada para analizar el comportamiento aerodinámico de un vehículo.

8. **Presión dinámica (Pd)**

Presión asociada a la velocidad del fluido que incide sobre la superficie del vehículo.

9. **Capa límite (CL)**

Región del flujo de aire cercana a la superficie donde la velocidad cambia gradualmente.

10. **Separación de flujo (SF)**

Fenómeno en el que el flujo de aire se desprende de la superficie del vehículo.

11. **Eficiencia energética (EE)**

Capacidad de un vehículo para reducir consumo de energía manteniendo el desempeño.

Aerodinámica aplicada a carrocerías de vehículos compactos para optimizar el coeficiente de resistencia y reducir el consumo de combustible

12. Consumo de combustible (FC)

Cantidad de combustible utilizada por el vehículo en función de la distancia recorrida.

13. Carrocería compacta (CC)

Estructura externa de vehículos de dimensiones reducidas orientados a eficiencia y movilidad urbana.

14. Aluminio 6061-T6 (Al 6061-T6)

Aleación ligera ampliamente usada por su buena resistencia mecánica y facilidad de manufactura.

15. Compuesto reforzado con fibra de vidrio (GFRP)

Material compuesto con buena resistencia mecánica y costo moderado.

16. Compuesto reforzado con fibra de carbono (CFRP)

Material avanzado con alta resistencia específica y bajo peso.

17. Biocompuestos (BC)

Materiales compuestos de origen renovable con menor impacto ambiental.

18. Relación resistencia–peso (RRP)

Indicador del desempeño estructural de un material respecto a su masa.

19. Impacto ambiental (IA)

Efecto que genera un material o proceso sobre el medio ambiente durante su ciclo de vida.

Viabilidad industrial (VI)

Capacidad de un material para ser producido y aplicado de forma rentable a gran escala.

Referencias

- Al-Sarraf (2024). Biocomposite reinforcement from walnut shell for green applications.
- Bushi, L., Skrzek, 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., 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>
- 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>

Aerodinámica aplicada a carrocerías de vehículos compactos para optimizar el coeficiente de resistencia y reducir el consumo de combustible

- Hucho, W.-H. (2013). *Aerodynamics of Road Vehicles* (5th ed.). SAE International. <https://doi.org/10.4271/R-397>
- Katz, J. (2016). *Automotive Aerodynamics* (2nd ed.). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119188302>
- Howell, J. (2015). *Automotive Aerodynamics for Road Vehicles*. SAE International. <https://doi.org/10.4271/R-433>
- Anderson, J. (2017). *Fundamentals of Aerodynamics* (6th ed.). McGraw-Hill. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2413.1285>
- Badcock, K., Richards, B., & Woodgate, M. (2016). *Introduction to Vehicle Aerodynamics*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781316494212>
- Hucho, W.-H., & Sovran, G. (1993). Aerodynamics of road vehicles. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 25(1), 485–537. <https://doi.org/10.1146/annurev.fl.25.010193.002413>
- Measured, S., Tanaka, K., & Yamada, T. (2018). Effect of rear-end geometry on drag reduction. *Journal of Wind Engineering*, 176, 58–66. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2018.03.011>
- Meile, W., & Brenn, G. (2010). Passive flow control on car underbodies. SAE Technical Paper, 2010-01-0769. <https://doi.org/10.4271/2010-01-0769>
- Chowdhury, H., Mustary, I., & Alam, F. (2019). Underbody aerodynamics of road vehicles. *Energy Procedia*, 160, 60–67. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.02.121>.