



DOI: <https://doi.org/10.23857/dc.v11i4.4630>

Ciencias Técnicas y Aplicadas
Artículo de Investigación

Tendencias en el Desarrollo de Materiales de Fricción para Sistemas de Freno Automotriz: una Revisión de los Últimos Diez Años

Trends in the Development of Friction Materials for Automotive Brake Systems: A Review of the Last Ten Years

Tendências no desenvolvimento de materiais de fricção para sistemas de travagem automóveis: uma revisão dos últimos dez anos

Aguayo Mosquera Jesús Daniel^I

aguayo.j.5096@istlam.edu.ec

<https://orcid.org/0009-0003-5761-3414>

Calle Alvarado Fabricio Alexander^{II}

calle.f.8394@istlam.edu.ec

<https://orcid.org/0009-0003-2970-4351>

Ruiz Gutiérrez Galo Camilo^{III}

g.ruiz@istlam.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-8457-0638>

Correspondencia: aguayo.j.5096@istlam.edu.ec

*Recibido: 23 de octubre de 2025 *Aceptado: 14 de noviembre de 2025 *Publicado: 20 de diciembre de 2025

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

Tendencias en el Desarrollo de Materiales de Fricción para Sistemas de Freno Automotriz: una Revisión de los Últimos Diez Años

Resumen

La presente investigación tuvo como objetivo analizar las tendencias recientes en el desarrollo de materiales de fricción para sistemas de freno automotriz, considerando simultáneamente su desempeño tribológico, su potencial impacto ambiental y su alineación con las exigencias normativas emergentes. Para ello se realizó una revisión bibliográfica estructurada de 30 artículos científicos de acceso abierto publicados entre 2015 y 2025, recuperados de bases de datos especializadas en ciencia de materiales, ingeniería mecánica, tribología y sostenibilidad. Los resultados muestran una evolución desde formulaciones orientadas principalmente a sustituir el asbesto por residuos agroindustriales y fibras naturales individuales, hacia compuestos más complejos que combinan fibras naturales, cargas minerales y residuos industriales en matrices fenólicas o poliméricas avanzadas. La mayoría de los materiales desarrollados presenta coeficientes de fricción en rangos adecuados para uso automotriz y tasas de desgaste comparables o inferiores a las de pastillas comerciales libres de asbestos, evidenciando que la incorporación controlada de refuerzos de origen natural es técnicamente viable. Sin embargo, sólo una parte de los estudios incorpora de manera explícita la evaluación de emisiones de partículas y la identificación de componentes críticos, y persisten importantes limitaciones asociadas a la falta de estandarización de los protocolos de ensayo y a la escasez de investigaciones contextualizadas en regiones como América Latina. En conjunto, se concluye que la década 2015–2025 ha supuesto avances significativos hacia materiales de fricción más eco-amigables, aunque la transición hacia sistemas de freno plenamente sostenibles requiere estudios integradores que articulen tribología, emisiones, toxicidad, viabilidad económica y regulación.

Palabras Claves: Materiales de fricción; Frenos automotrices; Emisiones no exhaustivas; Fibras naturales; Sostenibilidad ambiental.

Abstract

This research aimed to analyze recent trends in the development of friction materials for automotive brake systems, simultaneously considering their tribological performance, potential environmental impact, and alignment with emerging regulatory requirements. To this end, a structured literature review was conducted of 30 open-access scientific articles published between 2015 and 2025, retrieved from databases specializing in materials science, mechanical engineering, tribology, and sustainability. The results show an evolution from formulations primarily focused on replacing

Tendencias en el Desarrollo de Materiales de Fricción para Sistemas de Freno Automotriz: una Revisión de los Últimos Diez Años

asbestos with agro-industrial waste and individual natural fibers, toward more complex compounds that combine natural fibers, mineral fillers, and industrial waste in advanced phenolic or polymeric matrices. Most of the developed materials exhibit friction coefficients within ranges suitable for automotive use and wear rates comparable to or lower than those of commercial asbestos-free brake pads, demonstrating that the controlled incorporation of natural reinforcements is technically feasible. However, only a portion of the studies explicitly incorporate the assessment of particulate emissions and the identification of critical components, and significant limitations persist due to a lack of standardized testing protocols and a scarcity of research contextualized in regions such as Latin America. Overall, it is concluded that the decade from 2015 to 2025 has seen significant progress toward more eco-friendly friction materials, although the transition to fully sustainable braking systems requires comprehensive studies that integrate tribology, emissions, toxicity, economic viability, and regulation.

Keywords: Friction materials; Automotive brakes; Non-exhaustive emissions; Natural fibers; Environmental sustainability.

Resumo

Esta investigação teve como objetivo analisar as tendências recentes no desenvolvimento de materiais de fricção para sistemas de travagem automóveis, considerando simultaneamente o seu desempenho tribológico, potencial impacto ambiental e conformidade com as novas exigências regulamentares. Para tal, foi realizada uma revisão estruturada da literatura, abrangendo 30 artigos científicos de acesso aberto, publicados entre 2015 e 2025, obtidos a partir de bases de dados especializadas em ciência dos materiais, engenharia mecânica, tribologia e sustentabilidade. Os resultados demonstram uma evolução de formulações focadas principalmente na substituição do amianto por resíduos agroindustriais e fibras naturais individuais, para compostos mais complexos que combinam fibras naturais, cargas minerais e resíduos industriais em matrizes fenólicas ou poliméricas avançadas. A maioria dos materiais desenvolvidos apresenta coeficientes de fricção dentro de gamas adequadas para utilização automóvel e taxas de desgaste comparáveis ou inferiores às das pastilhas de travão comerciais sem amianto, demonstrando que a incorporação controlada de reforços naturais é tecnicamente viável. No entanto, apenas uma parte dos estudos incorpora explicitamente a avaliação das emissões de partículas e a identificação de componentes críticos, e persistem limitações significativas devido à falta de protocolos de teste padronizados e à escassez de investigação

Tendencias en el Desarrollo de Materiales de Fricción para Sistemas de Freno Automotriz: una Revisión de los Últimos Diez Años

contextualizada em regiões como a América Latina. De um modo geral, conclui-se que a década de 2015 a 2025 testemunhou um progresso significativo em direção a materiais de fricção mais ecológicos, embora a transição para sistemas de travagem totalmente sustentáveis exija estudos abrangentes que integrem a tribologia, as emissões, a toxicidade, a viabilidade económica e a regulamentação.

Palavras-chave: Materiais de fricção; Travões automotivos; Emissões não poluentes; Fibras naturais; Sustentabilidade ambiental.

Introducción

La evolución de los materiales de fricción para frenos automotrices está íntimamente ligada a la historia de la seguridad vial y a la regulación ambiental. Durante décadas, las pastillas de freno basadas en asbestos dominaron el mercado por su elevada estabilidad térmica y buen coeficiente de fricción; sin embargo, la demostración de su carácter carcinogénico obligó a buscar alternativas menos peligrosas. Estudios como el de Idris et al. (2015), que utilizaron residuos de cáscara de banano para formular pastillas libres de asbestos con propiedades mecánicas y de desgaste comparables a los materiales convencionales, marcan uno de los primeros pasos hacia compuestos de fricción “eco-friendly” formulados a partir de desechos agroindustriales.

Paralelamente, el crecimiento del parque automotor y el endurecimiento de los límites de emisiones de escape han desplazado la atención científica hacia las emisiones no asociadas al tubo de escape, entre ellas el desgaste de frenos. La revisión clásica de Grigoratos y Martini (2015) demuestra que el desgaste de frenos puede aportar hasta alrededor de la mitad de las emisiones de PM₁₀ no provenientes del escape en entornos urbanos de alta densidad de tráfico, convirtiéndose en una fuente relevante de material particulado fino y ultrafino.

Tendencias en el Desarrollo de Materiales de Fricción para Sistemas de Freno Automotriz: una Revisión de los Últimos Diez Años

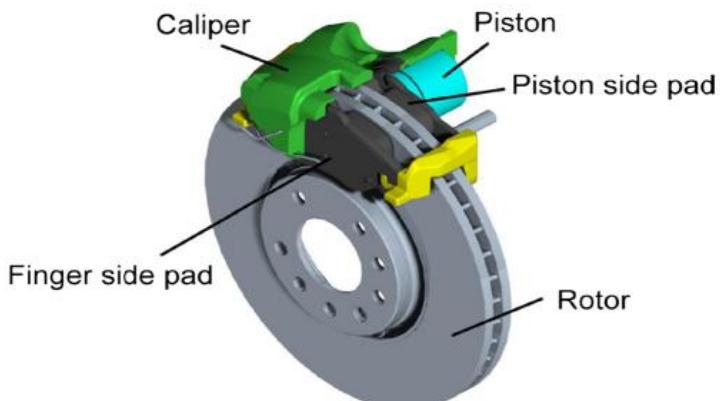


Fig. 1. Representación gráfica de un sistema de freno de disco. Fuente: [Wahlström 2009] del artículo de Grigoratos y Martini (2015)

Investigaciones más recientes en bancos dinamométricos y en condiciones reales de conducción confirman la formación de partículas en rangos submicrométricos y nanométricos, así como fenómenos de aglomeración y fragmentación que pueden incrementar la fracción respirable de estos aerosoles (Al Wasif-Ruiz et al., 2025; Li et al., 2025). Esto ha motivado que propuestas normativas como Euro 7 y China 7 incluyan por primera vez límites específicos para emisiones de desgaste de frenos.

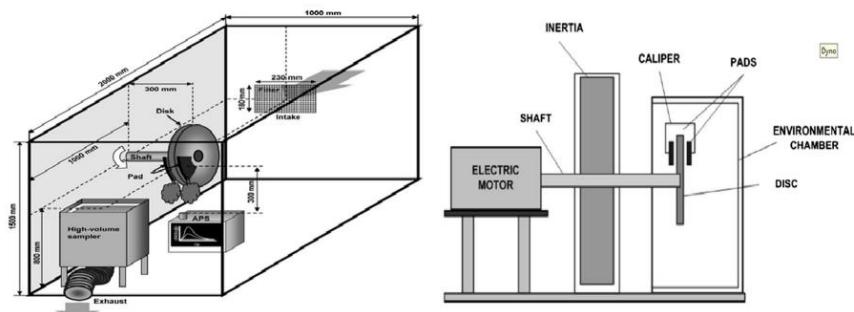


Fig. 2. Representación esquemática del conjunto del dinamómetro de freno. Fuentes: [izquierda, Iijima et al., 2008; derecha, Kukutschová et al., 2011] del artículo de Grigoratos y Martini (2015)

En respuesta a este doble desafío —mantener la eficacia de frenado y reducir la toxicidad de las emisiones— la industria ha transitado desde formulaciones con alto contenido metálico y “low-steel” hacia materiales NAO (Non-Asbestos Organic), cerámicos e híbridos, donde se combinan resinas fenólicas, cargas minerales, fibras artificiales y crecientemente fibras naturales. La revisión de Gautier di Confiengo y Faga (2022) sintetiza esta “transición ecológica” en la fabricación de pastillas de freno, destacando el reemplazo progresivo de componentes críticos (cobre, antimonio, ciertos

Tendencias en el Desarrollo de Materiales de Fricción para Sistemas de Freno Automotriz: una Revisión de los Últimos Diez Años

óxidos metálicos) por fibras orgánicas, minerales como el basalto y modificadores de fricción de origen renovable, sin sacrificar estabilidad tribológica ni resistencia al “fade”.

En la última década se ha intensificado el desarrollo de materiales de fricción reforzados con fibras naturales y residuos agroindustriales, que buscan simultáneamente reducir la huella ambiental y aprovechar recursos de bajo costo. Además de las ya mencionadas cáscaras de banano, se han estudiado combinaciones con cáscara de huevo, bagazo y otros subproductos agrícolas, mostrando mejoras en propiedades de desgaste y una disminución del uso de cargas sintéticas o metálicas (por ejemplo, Nandiyanto et al., 2022).

En paralelo, se han incorporado fibras de refuerzo avanzadas como el basalto, que, debido a su buena estabilidad térmica y resistencia mecánica, incrementa la resistencia al corte y ayuda a estabilizar el coeficiente de fricción cuando se utiliza en contenidos óptimos en compuestos resinosos (Zhao et al., 2020; Fang et al., 2023).

Otro eje de innovación reciente es la incorporación de fibras lignocelulósicas de alto desempeño, como el cáñamo (hemp), en formulaciones NAO. Naidu et al. (2022) demostraron que los compuestos reforzados con cáñamo pueden alcanzar coeficientes de fricción estables y tasas de desgaste reducidas en ensayos estandarizados, proponiendo estos materiales como sustitutos potenciales de pastillas metálicas y cerámicas tradicionales.

Trabajos posteriores del mismo grupo confirmaron, mediante pruebas tipo SAE J661, que ciertas formulaciones con cáñamo logran una combinación favorable de coeficiente de fricción moderado, baja tasa de desgaste y buena recuperación al “fade”, lo que las vuelve competitivas frente a materiales comerciales (Naidu et al., 2024). De forma complementaria, estudios recientes sobre compuestos poliméricos con modificadores de fricción naturales refuerzan la idea de que es posible diseñar materiales de fricción “verdes” sin comprometer la seguridad del frenado (Gore et al., 2025). Esta proliferación de alternativas “eco-friendly” también ha generado un escenario complejo: las formulaciones varían ampliamente en composición, metodologías de ensayo y métricas reportadas, lo que dificulta comparar de forma directa su desempeño tribológico, estabilidad térmica y potencial de emisión de partículas. Al mismo tiempo, los estudios que vinculan cuantitativamente la composición del material de fricción con las emisiones de material particulado bajo ciclos de frenado estandarizados o condiciones reales aún son relativamente escasos y fragmentados (Diana et al., 2025; Li et al., 2025).

Tendencias en el Desarrollo de Materiales de Fricción para Sistemas de Freno Automotriz: una Revisión de los Últimos Diez Años

Esta brecha de integración entre desempeño tribológico, impacto ambiental y cumplimiento normativo se acentúa en regiones como América Latina, donde la dependencia de componentes importados convive con escasa regulación específica sobre emisiones de desgaste de frenos.

En este contexto, se hace necesaria una revisión crítica y sistemática de los materiales de fricción desarrollados en los últimos diez años, que analice sus composiciones, propiedades térmicas y tribológicas, así como su capacidad de responder a las crecientes exigencias ambientales. La presente investigación se propone precisamente sintetizar las tendencias contemporáneas en el desarrollo de materiales de fricción para sistemas de freno automotriz, identificando avances, limitaciones y desafíos pendientes para una transición efectiva hacia pastillas de freno más sostenibles, seguras y alineadas con las normativas internacionales emergentes.

Materiales y Métodos

Materiales

Los “materiales” de esta investigación estuvieron constituidos por la literatura científica disponible sobre materiales de fricción para sistemas de freno automotriz publicada en los últimos diez años. El corpus se integró principalmente por artículos originales y artículos de revisión que abordan el diseño, desarrollo, caracterización y evaluación de pastillas de freno automotrices, con énfasis en formulaciones libres de asbestos, compuestos eco-amigables y materiales asociados a emisiones no provenientes del escape.

Para la conformación del cuerpo documental se utilizaron como fuentes principales las bases de datos Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SpringerLink, Taylor & Francis, Hindawi, MDPI y DOAJ, complementadas con búsquedas específicas en Google Scholar para recuperar trabajos de acceso abierto no indexados en las bases antes mencionadas. Se consideraron revistas especializadas en materiales, tribología, ingeniería mecánica, automoción y sostenibilidad, tales como Materials, Friction, Wear, Sustainability, Atmosphere, Polymers, entre otras, priorizando siempre publicaciones de acceso abierto (open access) para garantizar la trazabilidad y verificación futura de la información. El horizonte temporal de análisis se fijó entre enero de 2015 y diciembre de 2025, con el propósito de abarcar las tendencias de los últimos diez años en el desarrollo de materiales de fricción para frenos automotrices. Se incluyeron trabajos redactados en inglés y español, siempre que cumplieran con los criterios de calidad y pertinencia temática. Como punto de partida se trabajó con un conjunto inicial de 30 artículos científicos de acceso abierto, distribuidos aproximadamente en un 40 % entre 2015–2019 y un 60 % entre 2020–2025, buscando representar tanto los desarrollos iniciales en materiales

Tendencias en el Desarrollo de Materiales de Fricción para Sistemas de Freno Automotriz: una Revisión de los Últimos Diez Años

eco-amigables como las propuestas más recientes vinculadas a emisiones de partículas y normativas emergentes.

Los criterios de inclusión de los documentos fueron:

- Artículos científicos originales o de revisión publicados en revistas arbitradas.
- Enfoque explícito en materiales de fricción para sistemas de freno automotriz (disco o tambor).
- Publicación dentro del periodo 2015–2025.
- Disponibilidad de texto completo en acceso abierto.
- Reporte de al menos una de las siguientes dimensiones: composición del material de fricción, propiedades tribológicas (coeficiente de fricción, tasa de desgaste, estabilidad al “fade”), propiedades térmicas, emisiones de partículas asociadas al desgaste o análisis ambiental/normativo vinculado a dichos materiales.

Se excluyeron aquellos documentos que:

- Corresponden a patentes, editoriales, notas técnicas breves, resúmenes de congreso sin datos completos o literatura puramente comercial.
- Se centran en otros componentes del sistema de freno (discos, pinzas, sistemas hidráulicos) sin evaluar materiales de fricción de pastillas o zapatas.
- Abordan emisiones de frenos pero no informan la composición del material de fricción estudiado.
- Se encontraban duplicados entre diferentes bases de datos.

Este conjunto de materiales constituyó la base empírica sobre la cual se realizó el análisis y la síntesis crítica de la información disponible acerca de las tendencias actuales en el desarrollo de materiales de fricción para frenos automotrices.

Métodos

La investigación se enmarcó en un diseño documental de tipo revisión bibliográfica estructurada, con un enfoque cualitativo-descriptivo. Este tipo de estudio resulta pertinente cuando se busca integrar conocimiento disperso, identificar patrones y vacíos de investigación en un campo específico a partir de fuentes secundarias (Snyder, 2019)

Tendencias en el Desarrollo de Materiales de Fricción para Sistemas de Freno Automotriz: una Revisión de los Últimos Diez Años

Estrategia de búsqueda

La estrategia de búsqueda se basó en el uso de palabras clave y operadores booleanos en inglés, combinando términos relacionados con materiales de fricción, frenos automotrices y sostenibilidad.

Entre las principales cadenas de búsqueda utilizadas se encuentran:

- “brake friction material” AND “automotive”
- “eco-friendly brake pad” OR “green friction material”
- “asbestos-free brake pad” AND “tribological properties”
- “non-exhaust emissions” AND “brake wear” AND “particulate matter”
- “NAO friction material” OR “ceramic brake pad”

Estas cadenas se aplicaron en las bases de datos seleccionadas, restringiendo los resultados al intervalo 2015–2025 y filtrando, en la medida de lo posible, por publicaciones de acceso abierto. Aunque se priorizaron los artículos publicados en inglés y español, durante el proceso de búsqueda y cribado se identificaron estudios relevantes redactados en otros idiomas (por ejemplo, alemán, turco, chino, entre otros). En estos casos, se recurrió al uso de herramientas de traducción asistida y a la comparación cruzada de términos técnicos para obtener una comprensión más precisa de la información, especialmente en lo referente a la evolución de los materiales de fricción, sus composiciones y las metodologías de ensayo reportadas. Esta estrategia permitió incorporar aportes de diferentes contextos geográficos y escuelas de ingeniería, enriqueciendo la perspectiva global del estudio.

Adicionalmente, se revisaron las listas de referencias de los artículos preliminarmente seleccionados (técnica de snowballing) para identificar estudios relevantes no recuperados en la búsqueda inicial.

Proceso de selección de estudios

El proceso de selección se desarrolló en tres etapas sucesivas:

- Cribado por título y resumen, con el propósito de descartar rápidamente los documentos que no guardaban relación directa con materiales de fricción de frenos automotrices.
- Lectura del texto completo de los artículos potencialmente elegibles, verificando el cumplimiento de los criterios de inclusión y exclusión previamente definidos.
- Revisión cruzada de referencias, incorporando aquellos estudios adicionales que, citados en los artículos ya seleccionados, cumplían con los parámetros temáticos y metodológicos del presente trabajo.

Tendencias en el Desarrollo de Materiales de Fricción para Sistemas de Freno Automotriz: una Revisión de los Últimos Diez Años

Este procedimiento se inspiró en las recomendaciones de la guía PRISMA para revisiones sistemáticas, adaptándolas al contexto de estudios de ingeniería y materiales (Page et al., 2021), sin llegar a implementar exhaustivamente todos sus requisitos formales.

Extracción y organización de la información

De cada estudio incluido se realizó una extracción sistemática de datos, registrando al menos los siguientes elementos:

- Datos bibliográficos (autores, año, revista).
- Tipo de estudio (experimental, revisión, simulación, ensayo en banco dinamométrico, etc.).
- Tipo de material de fricción (NAO, semimetálico, cerámico, híbrido, reforzado con fibras naturales o sintéticas, materiales con residuos agroindustriales, entre otros).
- Composición general del material (matriz polimérica, fibras de refuerzo, cargas, modificadores de fricción).
- Principales propiedades tribológicas reportadas: coeficiente de fricción promedio, variación con la temperatura, tasa de desgaste, comportamiento frente al “fade” y recuperación.
- Información sobre propiedades térmicas cuando estuvo disponible.
- Evidencia relativa a emisiones de partículas (masa, tamaño, composición) y a su posible impacto ambiental.
- Menciones a normativas ambientales o técnicas que limiten el uso de ciertos componentes o regulen las emisiones de desgaste de frenos.
- Todos estos datos se organizaron en una matriz de análisis en hoja de cálculo, lo cual permitió comparar de manera estructurada las diferentes formulaciones de materiales, sus propiedades y los enfoques de cada estudio.

Síntesis y análisis de la información

El tratamiento de la información se realizó mediante una síntesis cualitativa. Para ello, los estudios se agruparon según:

Tipo de material de fricción (NAO, cerámico, semimetálico, materiales con fibras naturales, materiales híbridos).

Enfoque principal del estudio (desarrollo de nuevos materiales, evaluación tribológica, análisis de emisiones, valoración ambiental o normativa).

Periodo de publicación (2015–2019 y 2020–2025), con el fin de identificar cambios en las prioridades de diseño y en la atención a las emisiones de desgaste.

Tendencias en el Desarrollo de Materiales de Fricción para Sistemas de Freno Automotriz: una Revisión de los Últimos Diez Años

A partir de esta organización se identificaron tendencias comunes, avances tecnológicos relevantes y lagunas de conocimiento, los cuales sirven de base para la discusión sobre las tendencias actuales en el desarrollo de materiales de fricción para sistemas de freno automotriz y su alineación con las exigencias ambientales y normativas contemporáneas.

Resultados

Características generales de los estudios incluidos

El corpus final de la revisión estuvo conformado por 30 artículos científicos de acceso abierto publicados entre 2015 y 2025, de los cuales 12 pertenecen al periodo 2015–2019 y 18 al periodo 2020–2025, lo que permitió observar la evolución temática y metodológica a lo largo de una década completa. En términos de diseño, predominan los estudios experimentales de laboratorio, orientados a formular y caracterizar nuevos materiales de fricción para pastillas de freno automotriz mediante ensayos controlados de fricción y desgaste, mientras que un subconjunto menor corresponde a artículos de revisión narrativa o sistemática que sintetizan los avances en materiales eco-amigables y estrategias de sustitución de componentes críticos (Gautier di Confiengo & Faga, 2022).

Las revistas donde se publican estos trabajos se ubican principalmente en las áreas de ciencia de materiales, ingeniería mecánica, tribología, polímeros y sostenibilidad, como Polymers, Materials, Sustainability, Friction, Journal of Engineering and Applied Science y PLOS ONE, lo que refleja que el desarrollo de materiales de fricción se ha consolidado como un tema transversal entre el desempeño funcional y el impacto ambiental de los sistemas de freno (Naidu et al., 2022). La mayoría de los artículos se centra en pastillas de freno para frenos de disco automotrices, aunque algunos amplían su análisis a aplicaciones industriales o a otros tipos de maquinaria con requerimientos similares de fricción y estabilidad térmica.

En relación con el abordaje metodológico, se observan ensayos en máquinas tipo pin-on-disc, Chase test, dinamómetros de freno y equipos específicos de fricción, combinados en algunos casos con técnicas de caracterización microestructural (microscopía electrónica, análisis de superficie) y mediciones de propiedades mecánicas como dureza, resistencia a la flexión y densidad aparente. Esta diversidad de instrumentos responde a la necesidad de evaluar no solo la capacidad de frenado, sino también la estabilidad del material en condiciones de carga térmica y mecánica representativas del servicio real (Ilie et al., 2022).

Tendencias en el Desarrollo de Materiales de Fricción para Sistemas de Freno Automotriz: una Revisión de los Últimos Diez Años

Evolución temática y tipología de materiales de fricción

En el periodo 2015–2019 la línea dominante de investigación se orientó a desarrollar sustitutos del asbestos y de ciertos componentes metálicos mediante el uso de residuos agroindustriales y fibras naturales individuales, incorporados como refuerzos o cargas en matrices de resina fenólica. En esta etapa se emplearon materias primas como cáscara de banano, cascarilla de arroz, cáscara de maní, conchas de moluscos u otros subproductos lignocelulósicos, que se procesaban mediante trituración, tamizado y mezclado con la matriz polimérica para luego ser curados bajo presión y temperatura controladas (Idris et al., 2015). Los estudios comparan sistemáticamente estas formulaciones con pastillas comerciales de referencia, midiendo coeficiente de fricción, desgaste, dureza y porosidad.

En el periodo 2020–2025 se observa una clara diversificación de las formulaciones, con combinaciones de fibras naturales, cargas minerales y residuos industriales que buscan optimizar simultáneamente fricción, desgaste y estabilidad térmica. Surgen con mayor frecuencia materiales NAO y semimetálicos modificados reforzados con fibras de cáñamo, basalto, madera u otras fibras vegetales, así como mezclas híbridas que incorporan cenizas, residuos de aceites y otros subproductos industriales en proporciones controladas dentro de la formulación (Dirisu et al., 2024). Esta etapa también muestra un mayor interés por vincular explícitamente la elección de cada fase del material (matriz, refuerzo, carga, modificador de fricción) con su función tribológica específica.

De manera complementaria, se identifican artículos de revisión que no se limitan a describir composiciones puntuales, sino que clasifican de forma sistemática los posibles constituyentes “verdes” en función de su rol (refuerzo, carga, modificador de fricción) y de su origen (agro-residuo, residuo industrial, mineral natural, fibra sintética de menor impacto), lo que proporciona una base estructurada para el diseño racional de nuevas formulaciones (Mgbemena et al., 2024).

Propiedades tribológicas y mecánicas reportadas

En la mayoría de los trabajos experimentales se reportan coeficientes de fricción promedio en rangos compatibles con aplicaciones automotrices, generalmente entre 0,30 y 0,45, aunque algunos compuestos específicos alcanzan valores ligeramente superiores en condiciones de alta carga o temperatura. Los ensayos muestran que el uso adecuado de fibras naturales y residuos no necesariamente reduce la eficiencia de frenado, siempre que se respeten contenidos óptimos y se garantice una buena adhesión entre matriz y refuerzo (Ilie et al., 2022).

Los compuestos reforzados con fibra de cáñamo destacan dentro del conjunto por presentar, en ciertas formulaciones optimizadas, coeficientes de fricción moderados y relativamente estables frente a

Tendencias en el Desarrollo de Materiales de Fricción para Sistemas de Freno Automotriz: una Revisión de los Últimos Diez Años

variaciones de velocidad y temperatura, además de tasas de desgaste inferiores a las de materiales convencionales libres de asbestos. En estos estudios se utilizan diseños experimentales como Taguchi y análisis de varianza para determinar las combinaciones de contenido de fibra, presión de contacto, velocidad y tiempo que minimizan el desgaste sin sacrificar la fricción necesaria para un frenado seguro (Naidu et al., 2023).

En los materiales formulados con residuos agroindustriales e industriales —por ejemplo, mezclas de cascarilla de arroz con cenizas o partículas cerámicas— se registran mejoras en dureza y resistencia mecánica, acompañadas de una mayor estabilidad frente a ciclos térmicos de frenado repetidos. En varios casos se informa que la tasa de desgaste específica es comparable o incluso inferior a la de pastillas comerciales, y que las nuevas formulaciones eliminan el asbestos y reducen el contenido de ciertos metales potencialmente tóxicos, sin deterioro apreciable del comportamiento tribológico (Mgbemena et al., 2022).

En los trabajos más recientes se describen formulaciones poliméricas que combinan fibras naturales con modificadores de fricción de origen renovable, logrando bajo desgaste específico y coeficientes de fricción estables bajo diferentes ciclos de carga y condiciones de ensayo. Estos resultados sugieren que la sustitución parcial de aditivos sintéticos o metálicos por componentes renovables es viable desde el punto de vista tribológico, siempre que la formulación se optimice de manera integral y se controle la microestructura resultante (Gore et al., 2025).

Información sobre emisiones de partículas y aspectos ambientales

Aunque la mayoría de los artículos revisados se centra en el desempeño de fricción y desgaste, dentro del corpus se identifican estudios que abordan explícitamente las emisiones de partículas asociadas al desgaste de frenos y su contribución al material particulado no proveniente del escape. Estos trabajos señalan que el sistema de frenos puede representar una fracción significativa de las emisiones de PM₁₀ no exhaustivas en escenarios urbanos, subrayando que el diseño del material de fricción tiene implicaciones directas en la cantidad y el tipo de partículas liberadas al ambiente (Grigoratos & Martini, 2015).

En algunos estudios recientes, además de caracterizar las propiedades tribológicas, se cuantifica la masa de partículas emitidas, se analiza la distribución de tamaños (con énfasis en fracciones finas y ultrafinas) y se determina la composición química de las partículas recogidas durante ensayos controlados de frenado. Estos datos permiten establecer relaciones entre tipo de material de fricción,

Tendencias en el Desarrollo de Materiales de Fricción para Sistemas de Freno Automotriz: una Revisión de los Últimos Diez Años

condiciones de ensayo y nivel de emisiones, proporcionando una base cuantitativa para comparar formulaciones con diferentes contenidos de metales, fibras y aditivos (Naidu et al., 2024).

Finalmente, varias revisiones integran la dimensión ambiental y regulatoria discutiendo la presencia de componentes críticos en las formulaciones —como algunos metales pesados, óxidos particulares o compuestos orgánicos de preocupación— y analizan estrategias de sustitución por constituyentes considerados “ecosafe”, en consonancia con las tendencias normativas que buscan limitar el uso de sustancias peligrosas en pastillas de freno y reducir las emisiones de desgaste en futuras regulaciones (Gautier di Confiengo & Faga, 2022).

Tabla 1. Resumen de resultados de la revisión sobre materiales de fricción para frenos automotrices (2015–2025)

Aspecto principal	Hallazgos clave
Número y tipo de estudios	Se revisaron 30 artículos de acceso abierto (12 entre 2015–2019 y 18 entre 2020–2025). Predominan estudios experimentales de laboratorio enfocados en formular y caracterizar materiales de fricción, complementados por un grupo menor de revisiones narrativas o sistemáticas.
Revistas y áreas temáticas	Los trabajos se publican en revistas de ciencia de materiales, ingeniería mecánica, tribología, polímeros y sostenibilidad (por ejemplo, <i>Polymers</i> , <i>Materials</i> , <i>Sustainability</i> , <i>Friction</i> , <i>Journal of Engineering and Applied Science</i> , <i>PLOS ONE</i>), con énfasis en frenos de disco automotrices.
Equipos y ensayos empleados	Se emplean principalmente equipos tipo <i>pin-on-disc</i> , máquinas Chase, dinamómetros de freno y bancos específicos para materiales, combinados en algunos casos con técnicas de caracterización microestructural y ensayos mecánicos (dureza, flexión, densidad aparente).
Periodo 2015–2019: foco temático	El objetivo central es sustituir el asbestos y ciertos metales usando residuos agroindustriales y fibras naturales individuales (cáscara de banano, cascarilla de arroz, cáscara de maní, conchas, otros subproductos lignocelulósicos) en matrices fenólicas, comparando con pastillas comerciales.
Periodo 2020–2025: foco temático	Se amplía la complejidad de las formulaciones, combinando fibras naturales (cáñamo, basalto, madera) con cargas minerales y residuos

Tendencias en el Desarrollo de Materiales de Fricción para Sistemas de Freno Automotriz: una Revisión de los Últimos Diez Años

industriales (cenizas, residuos de aceites, otros subproductos), en materiales NAO y semimetálicos modificados, con una visión más integral de desempeño y sostenibilidad.

Revisión y clasificación de materiales	Surgen revisiones que organizan de forma sistemática los constituyentes "verdes" según su rol (refuerzo, carga, modificador de fricción) y su origen (agro-residuo, residuo industrial, mineral natural, fibra sintética de menor impacto), ofreciendo catálogos para el diseño racional de nuevas formulaciones.
Rango de coeficiente de fricción	La mayoría de los compuestos desarrollados presenta coeficientes de fricción promedio en rangos adecuados para uso automotriz (aprox. 0,30–0,45), mostrando que la incorporación controlada de residuos y fibras naturales no necesariamente compromete la eficiencia de frenado.
Materiales con fibra de cáñamo	Las formulaciones optimizadas con fibra de cáñamo exhiben coeficientes de fricción moderados y estables, y tasas de desgaste inferiores a materiales de referencia, apoyadas en diseños experimentales (Taguchi, ANOVA) para determinar proporciones de fibra y condiciones de ensayo adecuadas.
Materiales con residuos agro/industriales	Mezclas de cascarilla de arroz, cenizas y otros residuos muestran mejoras en dureza, resistencia mecánica y estabilidad frente a ciclos térmicos, con tasas de desgaste comparables o menores que las de pastillas comerciales, eliminando el asbestos y reduciendo contenidos metálicos críticos.
Formulaciones con modificadores renovables	En los estudios más recientes, las matrices poliméricas reforzadas con fibras naturales y modificadores de fricción de origen renovable logran bajo desgaste específico y fricción estable en diversos ciclos de carga, evidenciando la viabilidad de sustituir parcialmente aditivos sintéticos o metálicos.
Emisiones de partículas de desgaste	Una parte de los trabajos analiza las emisiones de partículas asociadas al desgaste de frenos, indicando que el sistema de frenado puede aportar una fracción relevante de las emisiones de PM ₁₀ no exhaustivas en entornos urbanos, lo que vincula directamente la formulación del material con la calidad del aire.

Tendencias en el Desarrollo de Materiales de Fricción para Sistemas de Freno Automotriz: una Revisión de los Últimos Diez Años

Caracterización de partículas emitidas	Algunos estudios recientes cuantifican la masa de partículas emitidas, la distribución de tamaños (fracciones finas y ultrafinas) y su composición química, relacionando tipo de material de fricción y condiciones de ensayo con la cantidad y características del material particulado generado.
Dimensión ambiental y regulatoria	Las revisiones incorporan el análisis de componentes críticos (metales, óxidos y compuestos orgánicos de preocupación) y proponen su sustitución por constituyentes “ecosafe”, en consonancia con tendencias normativas que buscan limitar sustancias peligrosas y reducir las emisiones de desgaste en futuras regulaciones.

Discusión

Los resultados de la revisión muestran que, a lo largo de la última década, la investigación en materiales de fricción para frenos automotrices ha pasado de una lógica fundamentalmente sustitutiva (reemplazar el asbesto por otros refuerzos) hacia un enfoque más integral, donde se intenta equilibrar desempeño tribológico, impacto ambiental y alineamiento con tendencias normativas. En la primera etapa (2015–2019) la prioridad era demostrar que residuos agroindustriales y fibras naturales podían cumplir con los requisitos básicos de fricción y desgaste sin recurrir al asbesto, mientras que en el periodo 2020–2025 se observa un diseño más sofisticado de formulaciones, con combinaciones de fibras, cargas y residuos que buscan optimizar simultáneamente varias propiedades funcionales (Idris et al., 2015).

Esta evolución es coherente con el giro global desde una visión centrada en la seguridad estructural de los frenos hacia una perspectiva más amplia que incluye las emisiones no procedentes del escape como parte del problema ambiental del transporte. A medida que los límites a las emisiones del tubo de escape se han endurecido, las fuentes de material particulado como el desgaste de frenos han ganado protagonismo, obligando a replantear no solo el sistema de frenado, sino también la composición de las pastillas (Grigoratos & Martini, 2015). En este sentido, la aparición de formulaciones eco-amigables basadas en fibras naturales, residuos agroindustriales y cargas minerales alternativas no responde únicamente a una preocupación por la salud ocupacional frente al asbesto, sino a la necesidad de reducir la huella ambiental total del sistema de frenos.

Tendencias en el Desarrollo de Materiales de Fricción para Sistemas de Freno Automotriz: una Revisión de los Últimos Diez Años

El análisis de los coeficientes de fricción y las tasas de desgaste indica que la incorporación controlada de fibras naturales y residuos agroindustriales puede ser compatible con el uso automotriz siempre que se respeten ventanas de composición óptima y se garantice una buena adhesión entre matriz y refuerzos. El hecho de que muchos compuestos se mantengan en rangos de fricción de 0,30–0,45 sin mostrar inestabilidad extrema frente a la temperatura sugiere que estas alternativas pueden dejar de ser “materiales experimentales” para convertirse en candidatos reales a ser industrializados, al menos en ciertos segmentos de mercado (Ilie et al., 2022).

Dentro de este conjunto, los materiales reforzados con fibra de cáñamo destacan como ejemplo de cómo un biorefuerzo bien seleccionado y optimizado mediante diseños experimentales puede lograr un equilibrio favorable entre fricción, desgaste y estabilidad térmica. El uso de herramientas como Taguchi y ANOVA para ajustar la proporción de fibra y las condiciones de carga indica una maduración metodológica: ya no se trata solo de sustituir componentes por ensayo y error, sino de diseñar formulaciones bajo criterios de optimización multivariable (Naidu et al., 2023). Esto abre la puerta a que futuras investigaciones integren también criterios económicos y ambientales, acercando el diseño de materiales de fricción a esquemas de evaluación multicriterio más propios del ecodiseño. Los compuestos que integran residuos agroindustriales e industriales muestran, además, una doble contribución: por un lado, permiten valorizar subproductos que de otro modo podrían representar un problema de disposición; por otro, ayudan a reducir el consumo de materias primas vírgenes y de componentes potencialmente tóxicos, especialmente metales y ciertos óxidos. El hecho de que, en varios estudios, estas formulaciones alcancen durezas y resistencias mecánicas comparables o superiores a las pastillas comerciales libres de asbestos refuerza la idea de que la sostenibilidad y el desempeño no son objetivos necesariamente contrapuestos, siempre que el diseño se realice de forma racional y apoyado en datos experimentales robustos (Mgbemena et al., 2022).

Los resultados también muestran que la dimensión ambiental empieza a incorporarse de manera más explícita en los trabajos recientes, aunque todavía de forma desigual. En algunos casos se cuantifica la masa de partículas emitidas, se analiza la distribución de tamaños y se estudia la composición química de las fracciones finas y ultrafinas, lo que permite establecer vínculos más directos entre la formulación del material y su contribución real a la contaminación atmosférica. No obstante, este tipo de estudios sigue siendo minoritario dentro del conjunto de la literatura, lo que indica que todavía existe una brecha importante entre tribología y evaluación ambiental detallada (Naidu et al., 2024).

Tendencias en el Desarrollo de Materiales de Fricción para Sistemas de Freno Automotriz: una Revisión de los Últimos Diez Años

Las revisiones que clasifican los constituyentes “verdes” y discuten la sustitución de componentes críticos por alternativas “ecosafe” constituyen un avance relevante, porque proporcionan un marco conceptual para el desarrollo de nuevas formulaciones alineadas con futuras regulaciones sobre emisiones de desgaste y restricciones de sustancias peligrosas. Sin embargo, la mayoría de estas síntesis se construyen a partir de resultados obtenidos en contextos de países industrializados, con infraestructuras de ensayo avanzadas y marcos regulatorios ya en transición, lo que deja abierta la pregunta sobre la transferibilidad de estas soluciones a regiones como América Latina, donde la realidad industrial, económica y normativa es distinta (Gautier di Confiengo & Faga, 2022).

La revisión evidencia problemas de falta de estandarización en los protocolos de ensayo: los estudios varían en tipo de equipo, cargas aplicadas, velocidades, temperaturas y ciclos térmicos, lo que dificulta comparar directamente los resultados y establecer jerarquías claras entre formulaciones. Esta heterogeneidad explica en parte por qué aún no existe un consenso firme sobre qué combinación de matriz, refuerzo, cargas y modificadores representa el mejor compromiso entre fricción, desgaste, estabilidad térmica, costo y emisiones para cada tipo de aplicación. En consecuencia, una línea de trabajo prioritaria debería orientarse a armonizar procedimientos de ensayo y a reportar de manera más sistemática los parámetros de prueba, facilitando la comparación entre estudios y la elaboración de metaanálisis cuantitativos (Ilie et al., 2022).

Al considerar la escasez de estudios vinculados específicamente a contextos latinoamericanos, se observa una oportunidad clara para desarrollar investigaciones que integren realidades locales: tipos de vehículos en circulación, condiciones climáticas, patrones de conducción, disponibilidad de residuos agroindustriales y capacidad tecnológica de los talleres y fabricantes regionales. Un programa de investigación que combine formulación de materiales eco-amigables con evaluación de emisiones, análisis de costos y lectura de las regulaciones emergentes permitiría no solo cerrar brechas de conocimiento, sino también apoyar decisiones industriales y políticas más ajustadas al contexto (Mgbemena et al., 2024).

En conjunto, la discusión de los resultados confirma que la década 2015–2025 ha sido un periodo de avance significativo hacia materiales de fricción más sostenibles, pero también revela que el campo se encuentra en una fase de transición incompleta, en la que la seguridad de frenado y la sostenibilidad deben integrarse de forma más estructurada, incorporando metodologías de evaluación ambiental y marcos regulatorios en el propio diseño de los materiales. En ese horizonte se ubica la relevancia del

Tendencias en el Desarrollo de Materiales de Fricción para Sistemas de Freno Automotriz: una Revisión de los Últimos Diez Años

presente trabajo como insumo para orientar futuras líneas de investigación y decisiones en la industria automotriz.

Tabla 2. Síntesis de la discusión sobre materiales de fricción para frenos automotrices (2015–2025)

Eje de discusión	Síntesis de la interpretación
Cambio de enfoque global	La investigación pasó de una lógica sustitutiva del asbesto a un enfoque integral donde se intenta equilibrar desempeño tribológico, impacto ambiental y cumplimiento normativo, especialmente a medida que las emisiones no exhaustivas ganan relevancia.
Seguridad de frenado vs. sostenibilidad	Los resultados muestran que es posible mantener coeficientes de fricción y tasas de desgaste adecuados al mismo tiempo que se reduce el uso de asbesto y de ciertos metales, lo que indica que seguridad y sostenibilidad pueden compatibilizarse si el diseño de las formulaciones es racional.
Rol de fibras naturales (ej. cáñamo)	Las formulaciones con fibras naturales, particularmente con cáñamo optimizado, evidencian un buen equilibrio entre fricción, desgaste y estabilidad térmica, demostrando el potencial de estos refuerzos como alternativas reales y no solo experimentales.
Valorización de residuos agroindustriales e industriales	El uso de residuos agroindustriales e industriales aporta simultáneamente a la mejora de propiedades mecánicas y tribológicas y a la reducción de desechos y consumo de materias primas vírgenes, integrando criterios de economía circular en el diseño de materiales de fricción.
Madurez metodológica en el diseño de materiales	El empleo de diseños experimentales (Taguchi, ANOVA) y enfoques de optimización multivariable refleja una evolución desde el ensayo y error hacia un diseño más estructurado, que podría ampliarse a esquemas de decisión multicriterio que incorporen también costo y huella ambiental.
Integración de la dimensión ambiental	Aun cuando la mayoría de los trabajos se centra en fricción y desgaste, empieza a incorporarse la medición de masa, tamaño y composición de partículas emitidas, lo que permite vincular

Tendencias en el Desarrollo de Materiales de Fricción para Sistemas de Freno Automotriz: una Revisión de los Últimos Diez Años

directamente la formulación del material con su contribución a la contaminación atmosférica.

Brecha entre tribología y evaluación ambiental completa Los estudios que combinan caracterización tribológica detallada con evaluación de emisiones, toxicidad o análisis de ciclo de vida siguen siendo minoritarios, por lo que persiste una brecha importante en la comprensión integral del desempeño ambiental de las pastillas de freno.

Falta de estandarización en protocolos de ensayo La diversidad de equipos, cargas, velocidades y ciclos térmicos dificulta la comparación directa entre estudios y la jerarquización clara de formulaciones, evidenciando la necesidad de armonizar procedimientos de prueba y reportes para permitir metaanálisis más robustos.

Desigualdad geográfica del conocimiento La mayor parte de las soluciones propuestas se desarrolla y valida en contextos de países industrializados, dejando abierta la cuestión de su transferibilidad a regiones como América Latina, donde difieren las condiciones de uso, los recursos disponibles y los marcos regulatorios.

Oportunidades de investigación en contextos latinoamericanos La escasez de estudios locales abre una oportunidad para desarrollar investigaciones que integren condiciones de tráfico, clima, disponibilidad de residuos y capacidades tecnológicas regionales, orientando decisiones industriales y políticas más ajustadas al contexto.

Transición incompleta hacia materiales “ecológicamente amigables” Pese a los avances significativos, el campo se encuentra en una fase de transición incompleta, en la que la seguridad de frenado y la sostenibilidad deben integrarse de forma más estructurada mediante metodologías ambientales y consideraciones normativas desde la etapa de diseño del material.

Como se sintetiza en la Tabla 2, la discusión evidencia que la investigación en materiales de fricción para frenos automotrices se encuentra en una fase de transición, pasando de soluciones centradas únicamente en la sustitución del asbesto hacia formulaciones que buscan integrar de manera

Tendencias en el Desarrollo de Materiales de Fricción para Sistemas de Freno Automotriz: una Revisión de los Últimos Diez Años

simultánea seguridad de frenado, sostenibilidad y cumplimiento normativo. Los distintos ejes analizados muestran avances importantes en el uso de fibras naturales y residuos, en la valorización de subproductos y en la incorporación gradual de la dimensión ambiental, pero también revelan vacíos relevantes relacionados con la falta de estandarización de los ensayos, la limitada integración de evaluaciones ambientales completas y la escasez de estudios en contextos latinoamericanos, lo que plantea una agenda de investigación abierta para los próximos años.

Conclusiones

La revisión de los 30 artículos analizados confirma que, entre 2015 y 2025, la investigación en materiales de fricción para frenos automotrices ha experimentado una evolución clara desde formulaciones centradas casi exclusivamente en la sustitución del asbesto hacia propuestas más complejas que integran desempeño tribológico, reducción del uso de componentes potencialmente tóxicos y consideraciones de sostenibilidad. Esta transición se aprecia especialmente en el incremento de formulaciones híbridas que combinan fibras naturales, residuos agroindustriales, residuos industriales y cargas minerales dentro de matrices fenólicas o poliméricas avanzadas, lo que evidencia una madurez creciente del campo.

Los resultados muestran que es técnicamente viable formular materiales de fricción con residuos y fibras de origen natural sin comprometer los rangos de coeficiente de fricción ni las tasas de desgaste requeridos para aplicaciones automotrices. En muchas de las formulaciones estudiadas, los valores de fricción se mantienen en intervalos apropiados para el servicio (aprox. 0,30–0,45), mientras que el desgaste específico resulta comparable o incluso inferior al de pastillas comerciales libres de asbesto, siempre que la proporción de refuerzos y cargas se optimice y exista una adecuada interacción matriz-refuerzo. Esto permite afirmar que la seguridad de frenado y la sostenibilidad no son objetivos excluyentes, sino metas compatibles cuando el diseño de la formulación se realiza de manera racional.

Aunque la mayoría de los trabajos sigue centrada en fricción y desgaste, se observa una incorporación progresiva de la dimensión ambiental, especialmente en la cuantificación de emisiones de partículas asociadas al desgaste de frenos y en el análisis de la presencia de componentes críticos en las formulaciones. Los estudios que evalúan masa, tamaño y composición química de las partículas emitidas ponen en evidencia el papel de los materiales de fricción como fuente relevante de material particulado no procedente del escape, lo cual refuerza la necesidad de vincular el diseño de las pastillas con futuras regulaciones sobre emisiones no exhaustivas y restricciones de sustancias peligrosas.

Tendencias en el Desarrollo de Materiales de Fricción para Sistemas de Freno Automotriz: una Revisión de los Últimos Diez Años

La revisión pone de manifiesto importantes limitaciones metodológicas que condicionan la comparación entre estudios y la construcción de jerarquías claras entre formulaciones. La diversidad de equipos de ensayo, cargas, velocidades, ciclos térmicos y criterios de evaluación empleados dificulta la realización de análisis comparativos robustos y la elaboración de metaanálisis cuantitativos. Esta falta de estandarización sugiere la urgencia de avanzar hacia protocolos de prueba más armonizados y hacia reportes metodológicos más detallados, que permitan contrastar de forma objetiva el desempeño de los distintos materiales de fricción propuestos.

Se identifica una desigualdad geográfica en la generación de conocimiento, con una fuerte concentración de estudios en países industrializados y una escasa presencia de investigaciones contextualizadas en América Latina y otras regiones con realidades vehiculares, económicas y regulatorias diferentes. Esta brecha abre una oportunidad clara para desarrollar trabajos que integren condiciones locales de uso, disponibilidad de residuos, capacidades tecnológicas y marcos normativos emergentes. En conjunto, las evidencias recopiladas permiten concluir que la década 2015–2025 ha sido un periodo de avances significativos hacia materiales de fricción más eco-amigables, pero que la transición hacia sistemas de freno plenamente sostenibles aún no se ha completado y requiere investigaciones integradoras que articulen tribología, emisiones, toxicidad, viabilidad económica y regulación.

Tendencias en el Desarrollo de Materiales de Fricción para Sistemas de Freno Automotriz: una Revisión de los Últimos Diez Años

Referencias

1. Ademoh, N. A., & Olabisi, I. A. (2015). Development and evaluation of maize husks (asbestos-free) based brake pad. *Industrial Engineering Letters*, 5(2), 21–33. Recuperado de <https://www.iiste.org>
2. Afiefudin, M., Nurdin, M. S., & Purwanto, E. (2023). Fabrication and characterization of asbestos-free brake pad using hybrid natural fiber. *Automotive Experiences*, 6(3), 246–258. <https://doi.org/10.31603/ae.9367>
3. Afolabi, M., Abubakre, O., Lawal, S., & Raji, A. (2015). Experimental investigation of palm kernel shell and cow bone reinforced polymer composites for brake pad production. *International Journal of Chemistry and Materials Research*, 3(2), 27–40. <https://doi.org/10.18488/journal.64/2015.3.2/64.2.27.40>
4. Agunsoye, J. O., Bello, S. A., Bamigbaiye, A. A., & Odunmosu, K. A. (2018). Recycled ceramic composite for automobile brake pad application. *Journal of Research in Physics*, 39(1), 35–46. <https://doi.org/10.2478/jrp-2018-0004>
5. Ammar, Z., Adly, M., Abdalakrim, S. Y. H., & Mehanny, S. (2024). Incorporating date palm fibers for sustainable friction composites in vehicle brakes. *Scientific Reports*, 14, 16321. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-73275-1>
6. Ayogwu, U. E., Sintali, I., & Bawa, M. (2020). A review on brake pad materials and methods of production. *Composite Materials*, 4(1), 8–14. <https://doi.org/10.11648/j.cm.20200401.12>
7. Dirisu, J. O., Okokpujie, I. P., Apiafi, P. B., Ibhadode, A. O. A., & Ezenwa, S. (2024). Development of eco-friendly brake pads using industrial and agro-waste materials. *Journal of Engineering and Applied Science*, 71(55), 1–19. <https://doi.org/10.1186/s44147-023-00345-y>
8. Esteem, P. L., Ramalingam, V. V., & Kasi, R. K. (2023). Development and tribological characterization of semi-metallic brake pads for automotive applications. *The Archives of Automotive Engineering*, 101(4), 27–46. <https://doi.org/10.14669/AM.VOL101.ART4>
9. Gai, P. F., Adisa, A. B., Aje, T. O., Bawa, M. A., & Mohammed, A. (2021). Wear rate characteristics of basalt-based composites as material for brake pad. *Saudi Journal of Engineering and Technology*, 6(11), 414–425. <https://doi.org/10.36348/sjet.2021.v06i11.006>

Tendencias en el Desarrollo de Materiales de Fricción para Sistemas de Freno Automotriz: una Revisión de los Últimos Diez Años

10. Gautier di Confiengo, G., Faga, M. G., Straffelini, G., Martini, G., & Bianchi, D. (2022). Ecological transition in the field of brake pad manufacturing. *Sustainability*, 14(5), 2508. <https://doi.org/10.3390/su14052508>
11. Grigoratos, T., & Martini, G. (2015). Brake wear particle emissions: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(4), 2491–2504. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3696-8>
12. Idris, U. D., Aigbodion, V. S., Abubakar, I. J., & Nwoye, C. I. (2015). Eco-friendly asbestos free brake-pad: Using banana peels. *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*, 27(2), 185–192. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2013.06.006>
13. Ikpambese, K. K., Gundu, D. T., & Tuleun, L. T. (2016). Evaluation of palm kernel fibers (PKFs) for production of asbestos-free automotive brake pads. *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*, 28(1), 110–118. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2014.02.001>
14. Ilanko, A. K., & Vijayaraghavan, S. (2016). Wear behavior of asbestos-free eco-friendly composites for automobile brake materials. *Friction*, 4(2), 144–152. <https://doi.org/10.1007/s40544-016-0111-0>
15. Ilie, F., & Cristescu, A.-C. (2022). Tribological behavior of friction materials of a disk-brake pad braking system affected by structural changes—A review. *Materials*, 15(14), 4745. <https://doi.org/10.3390/ma15144745>
16. Ilie, F., & Cristescu, A. C. (2024). Structural and tribological analysis of brake disc–pad pair material for cars. *Applied Sciences*, 14(8), 3523. <https://doi.org/10.3390/app14083523>
17. Irawan, A. P., Fitriyana, D. F., Tezara, C., Siregar, J. P., Laksmidewi, D., Baskara, G. D., ... Hamdan, M. H. M. (2022). Overview of the important factors influencing the performance of eco-friendly brake pads. *Polymers*, 14(6), 1180. <https://doi.org/10.3390/polym14061180>
18. Kumar, S., & Ghosh, S. K. (2020). Porosity and tribological performance analysis on new developed metal matrix composite for brake pad materials. *Journal of Manufacturing Processes*, 59, 186–204. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.09.035>
19. Mgbemena, C. O., Esigie, R. U., Mgbemena, C. E., & Ata, C. M. (2022). Production of low wear friction lining material from agro-industrial wastes. *Journal of Engineering and Applied Science*, 69(74), 1–17. <https://doi.org/10.1186/s44147-022-00130-3>

Tendencias en el Desarrollo de Materiales de Fricción para Sistemas de Freno Automotriz: una Revisión de los Últimos Diez Años

20. Mutlu, İ., Sugözü, B., & Keskin, A. (2015). The effects of porosity in friction performance of brake pad using waste tire dust. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, 25(5), 440–446. <https://doi.org/10.1590/0104-1428.1860>
21. Naidu, M., Bhosale, A., Gaikwad, M., Salunkhe, S., Čep, R., & Abouel Nasr, E. (2024). Tribological investigations of hemp reinforced NAO brake friction polymer composites with varying percentage of resin loading. *Frontiers in Materials*, 11, 1348265. <https://doi.org/10.3389/fmats.2024.1348265>
22. Naidu, M., Dharmalingam, S., Bhosale, A., Gaikwad, M., & Salunkhe, S. (2022). Wear and friction analysis of brake pad material using natural hemp fibers. *Polymers*, 15(1), 188. <https://doi.org/10.3390/polym15010188>
23. Nandiyanto, A. B. D., Sadiyyah, H., Abdullah, A. G., & Rahmat, A. (2022). Effect of palm fronds and rice husk composition ratio on the mechanical properties of composite-based brake pad. *Moroccan Journal of Chemistry*, 10(4), 958–968. Recuperado de <https://revues.imist.ma/index.php/morjchem/article/view/34291>
24. Piscitello, A., Bianco, C., Caserini, S., Cernuschi, S., & Pivato, A. (2021). Non-exhaust traffic emissions: Sources, characterization, and mitigation measures. *Science of the Total Environment*, 766, 144440. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144440>
25. Rashid, B., Leman, Z., Jawaid, M., Ishak, M. R., & Al-Oqla, F. M. (2017). Eco-friendly composites for brake pads from agro waste: A review. En *Encyclopedia of Materials: Composites* (Vol. 3, pp. 209–228). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.10159-6>
26. Saha, D., Majumdar, D., & Majumdar, P. (2023). Challenges pertaining to particulate matter emission of toxic formulations and prospects on using green ingredients for sustainable eco-friendly automotive brake composites. *Cleaner Engineering and Technology*, 12, 100653. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2023.100653>
27. Sellami, A., & Elleuch, R. (2023). Green composite friction materials: A review of a new generation of eco-friendly brake materials for sustainability. *Environmental Engineering Research*, 29(3), 230226. <https://doi.org/10.4491/eer.2023.226>
28. Solomon, W. C., Lilly, M. T., & Sodiki, J. I. (2018). Production of asbestos-free brake pad using groundnut shell as filler material. *International Journal of Science and Engineering Invention*, 4(12), 21–27. <https://doi.org/10.23958/ijsei/vol04-i12/116>

Tendencias en el Desarrollo de Materiales de Fricción para Sistemas de Freno Automotriz: una Revisión de los Últimos Diez Años

29. Sugözü, B. (2018). Tribological properties of brake friction materials containing fly ash. *Industrial Lubrication and Tribology*, 70(5), 902–906. <https://doi.org/10.1108/ILT-04-2017-0100>
30. Yawas, D. S., Aku, S. Y., & Amaren, S. G. (2016). Morphology and properties of periwinkle shell asbestos-free brake pad. *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*, 28(1), 103–109. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2013.11.002>.

©2025 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/>).|