

Artículo Científico

Evaluación de materiales sostenibles en la construcción de pavimentos urbano

Evaluation of sustainable materials in urban pavement construction



Lizarraga-Aguirre, Hermes Rafael ¹

<https://orcid.org/0000-0002-5223-7101>

hermesrafael@hotmail.com

Universidad Nacional de Trujillo, Perú, La Libertad.

Autor de correspondencia ¹



DOI / URL: <https://doi.org/10.55813/gaea/rcym/v2/n1/30>

Resumen: La creciente presión ambiental por el uso de recursos no renovables en infraestructura urbana ha motivado el análisis crítico de materiales sostenibles para pavimentos urbanos. Este estudio empleó una metodología de revisión sistemática cualitativa de literatura científica, evaluando investigaciones sobre materiales reciclados y tecnologías constructivas de bajo impacto. Se identificaron residuos urbanos e industriales —como plásticos, caucho, vidrio y residuos de construcción— y aditivos ecológicos como los más prometedores, destacando su capacidad para mejorar propiedades mecánicas, durabilidad y desempeño ambiental. Tecnologías como el asfalto templado y los aglutinantes bio-basados demostraron reducciones significativas en emisiones y consumo energético. Además, se evidenció que la incorporación de nanomateriales potencia la resistencia a fatiga, humedad y envejecimiento. No obstante, persisten barreras técnicas, normativas y de aceptación que limitan su implementación a gran escala. El estudio concluye que estas soluciones representan una alternativa robusta y viable, aunque su consolidación requiere validación técnica en campo, marcos regulatorios actualizados y cooperación multisectorial.

Palabras clave: materiales sostenibles; pavimentos urbanos; residuos reciclados; durabilidad; tecnología constructiva.



Check for updates

Received: 03/Feb/2024
Accepted: 29/Feb/2024
Published: 06/Mar/2024

Cita: Lizarraga-Aguirre, H. R. (2024). Evaluación de materiales sostenibles en la construcción de pavimentos urbano. *Revista Científica Ciencia Y Método*, 2(1), 41-54. <https://doi.org/10.55813/gaea/rcym/v2/n1/30>

Revista Científica Ciencia y Método (RCyM)
<https://revistacym.com>
revistacym@editorialgrupo-aea.com
info@editorialgrupo-aea.com

© 2024. Este artículo es un documento de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la **Licencia Creative Commons, Atribución-NoComercial 4.0 Internacional**.



Abstract:

The increasing environmental pressure for the use of non-renewable resources in urban infrastructure has motivated the critical analysis of sustainable materials for urban pavements. This study employed a qualitative systematic literature review methodology, evaluating research on recycled materials and low-impact construction technologies. Urban and industrial wastes - such as plastics, rubber, glass and construction waste - and environmentally friendly additives were identified as the most promising, highlighting their ability to improve mechanical properties, durability and environmental performance. Technologies such as tempered asphalt and bio-based binders showed significant reductions in emissions and energy consumption. In addition, it was shown that the incorporation of nanomaterials enhances resistance to fatigue, moisture and aging. However, technical, regulatory and acceptance barriers persist, limiting their large-scale implementation. The study concludes that these solutions represent a robust and viable alternative, although their consolidation requires technical validation in the field, updated regulatory frameworks and multisectoral cooperation.

Keywords: sustainable materials; urban pavements; recycled waste; durability; construction technology.

1. Introducción

La creciente preocupación por el cambio climático y la necesidad de mitigar los impactos ambientales derivados del desarrollo urbano ha impulsado una transformación en los procesos y materiales empleados en la construcción de infraestructuras. Entre ellos, los pavimentos urbanos representan una de las áreas críticas debido a su extensa presencia en entornos metropolitanos, su elevada demanda de recursos naturales no renovables, y su significativa contribución al efecto de isla de calor urbana, la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) y el agotamiento de recursos (Mohajerani et al., 2017). Tradicionalmente, los materiales empleados en la construcción de pavimentos, como el asfalto convencional y el concreto, están compuestos en su mayoría por aglomerantes derivados del petróleo y agregados vírgenes, cuya producción y transporte generan altos niveles de contaminación. Este contexto plantea la necesidad urgente de reevaluar las prácticas convencionales en la construcción de pavimentos urbanos a través del uso de materiales sostenibles, es decir, aquellos que ofrecen un menor impacto ambiental, son reciclables, reutilizables, o están basados en recursos renovables.

El problema principal radica en la dependencia histórica de materiales de alto impacto ambiental en la industria de la construcción vial, que además suelen ser costosos, no renovables y con una limitada capacidad para adaptarse a los requerimientos de sostenibilidad exigidos en el siglo XXI. Esta situación se agrava en las zonas urbanas,

donde la densidad de pavimentos es mayor, y por tanto, sus efectos negativos sobre el medio ambiente y la salud pública son más notorios (Li et al., 2020). Además, los sistemas actuales de gestión de residuos sólidos urbanos enfrentan desafíos crecientes, lo que abre la oportunidad para reutilizar estos residuos como insumos en nuevas mezclas para pavimentos, promoviendo así la economía circular (Giani et al., 2015). Sin embargo, a pesar del avance en investigaciones sobre materiales alternativos, como plásticos reciclados, cenizas volantes, residuos de construcción y demolición (RCD), residuos de caucho, entre otros, persisten interrogantes respecto a su viabilidad técnica, económica y ambiental a largo plazo.

Entre los factores que inciden en la problemática se encuentran la escasa transferencia de conocimiento desde la investigación académica hacia la práctica constructiva, la falta de normativas locales que regulen el uso de materiales sostenibles, así como la percepción de riesgo por parte de los tomadores de decisiones en el sector público y privado (Zhang et al., 2022). Asimismo, la variabilidad en las propiedades físico-químicas de los materiales reciclados y la limitada estandarización de procesos constructivos basados en estos insumos generan incertidumbre en cuanto a la durabilidad y desempeño funcional de los pavimentos resultantes (Paranavithana & Mohajerani, 2006). La resistencia estructural, el comportamiento ante cargas cíclicas, la susceptibilidad a la humedad y los costos de mantenimiento son factores críticos que deben ser considerados al evaluar alternativas sostenibles.

Justificar el desarrollo de una revisión sistemática de los materiales sostenibles aplicables en pavimentos urbanos resulta pertinente en la actualidad debido a la necesidad de consolidar el conocimiento existente y orientar futuras investigaciones e intervenciones en contextos urbanos. La sostenibilidad de los materiales no sólo implica una mejora ambiental, sino también social y económica, ya que promueve la valorización de residuos, reduce la extracción de materias primas y fomenta la innovación en el sector de la construcción (Shafabakhsh et al., 2014). Desde un punto de vista técnico-científico, esta revisión proporciona una base sólida para la evaluación comparativa de los materiales emergentes, lo cual es esencial para una toma de decisiones fundamentada y basada en evidencia empírica. La viabilidad de este estudio está garantizada por la amplia disponibilidad de literatura académica en bases de datos científicas indexadas, lo cual permite realizar un análisis riguroso y actualizado de las propiedades, beneficios, limitaciones y casos de aplicación de estos materiales en diversas regiones del mundo.

El objetivo de este artículo es analizar de manera crítica y sistemática el estado del arte relacionado con los materiales sostenibles utilizados en la construcción de pavimentos urbanos, identificando sus características técnicas, ventajas ambientales, limitaciones operativas y el grado de implementación en distintos contextos geográficos. Para ello, se empleará una metodología de revisión bibliográfica enfocada en literatura científica indexada en bases de datos como Scopus y Web of Science, priorizando estudios publicados en la última década. Este enfoque permitirá

establecer un panorama integral sobre las tendencias actuales en el uso de materiales sostenibles, así como detectar vacíos de conocimiento y oportunidades para el desarrollo de nuevas investigaciones o normativas técnicas.

Con base en lo anterior, la presente revisión se configura como un aporte relevante para investigadores, profesionales de la ingeniería civil, urbanistas y formuladores de políticas públicas que buscan promover la sostenibilidad urbana mediante soluciones constructivas innovadoras. Al integrar el conocimiento técnico con una perspectiva ambiental y social, el estudio busca contribuir al avance hacia ciudades más resilientes, sostenibles y eficientes en el uso de sus recursos.

2. Materiales y métodos

Para la elaboración del presente artículo se llevó a cabo un estudio de tipo exploratorio con enfoque cualitativo, fundamentado en una revisión bibliográfica sistemática de la literatura científica más reciente sobre materiales sostenibles aplicables a la construcción de pavimentos urbanos. La finalidad de esta metodología es identificar, analizar y sintetizar el conocimiento existente en torno a los materiales alternativos que presentan un menor impacto ambiental en comparación con los materiales convencionales, así como su viabilidad técnica y funcional en distintos contextos urbanos.

La selección de fuentes se realizó mediante la consulta de bases de datos científicas de alto impacto, específicamente Scopus y Web of Science, priorizando publicaciones indexadas en revistas arbitradas y de reconocida trayectoria en las áreas de ingeniería civil, materiales de construcción, sostenibilidad y urbanismo. Para garantizar la actualidad y relevancia de la información, se estableció como criterio de inclusión principal el periodo de publicación comprendido entre los años 2014 y 2024. No obstante, también se consideraron estudios previos que, por su carácter seminal o su relevancia metodológica y conceptual, aportan fundamentos teóricos indispensables para la comprensión de la evolución en el uso de materiales sostenibles.

Se utilizaron combinaciones de palabras clave en inglés y español, como *sustainable materials*, *urban pavements*, *recycled aggregates*, *waste reuse*, *asphalt alternatives*, *green construction*, *eco-friendly pavements*, entre otras. Las búsquedas se refinaron mediante filtros por tipo de documento (artículos científicos), idioma (inglés y español), y área temática (ingeniería civil, medio ambiente, construcción y materiales). Se descartaron informes técnicos, literatura gris, tesis de grado y documentos sin revisión por pares.

Posteriormente, los artículos seleccionados fueron evaluados a través de una lectura crítica de sus resúmenes, objetivos, metodología, resultados y conclusiones. Los criterios de exclusión incluyeron duplicación de información, falta de datos empíricos, escasa aplicabilidad al ámbito urbano o ausencia de análisis sobre sostenibilidad. La información extraída se organizó y sistematizó de manera temática, identificando las

principales categorías de materiales sostenibles empleados en pavimentos urbanos, tales como materiales reciclados (plásticos, caucho, vidrio), residuos industriales (cenizas volantes, escorias), y mezclas innovadoras con aditivos ecológicos o procesos de fabricación de bajo impacto.

El análisis cualitativo se enfocó en la identificación de tendencias, vacíos de conocimiento, desafíos técnicos y perspectivas futuras, permitiendo así ofrecer una visión integral y estructurada del estado del arte. La sistematización de la información se orientó a contrastar las propiedades técnicas, ambientales y económicas de los materiales sostenibles respecto a los convencionales, así como a examinar su grado de implementación en proyectos reales de infraestructura urbana.

Finalmente, se empleó un gestor bibliográfico para organizar las referencias conforme a las normas de citación APA séptima edición, asegurando la trazabilidad y fiabilidad de todas las fuentes consultadas. Este proceso metodológico garantizó la rigurosidad académica del estudio, permitiendo construir una base sólida para el análisis crítico y propositivo sobre la viabilidad del uso de materiales sostenibles en pavimentos urbanos.

3. Resultados

3.1. Tipologías de materiales sostenibles utilizados en pavimentos urbanos

La transformación hacia ciudades sostenibles y resilientes ha conducido al sector de la construcción a replantear el uso de materiales tradicionales por alternativas con menor impacto ambiental, económico y social. En particular, el ámbito de la pavimentación urbana ha sido objeto de numerosas investigaciones orientadas a la incorporación de materiales sostenibles, cuyo ciclo de vida contemple no solo su desempeño técnico, sino también su origen, huella ecológica y posibilidad de reutilización o reciclaje al final de su vida útil (Giani et al., 2015). En este contexto, los materiales sostenibles empleados en pavimentos urbanos pueden agruparse en dos grandes categorías: (1) materiales reciclados provenientes de residuos urbanos e industriales y (2) mezclas que incorporan aditivos ecológicos o emplean tecnologías de producción de bajo impacto ambiental, en la tabla 1 se representa la adopción de materiales sostenibles representa una solución clave en el camino hacia ciudades más inteligentes y responsables con el entorno.

Tabla 1

Materiales sostenibles en pavimentos urbanos: hacia ciudades más resilientes

Aspecto	Descripción
Tema central	Uso de materiales sostenibles en pavimentos urbanos
Motivación	Transición hacia ciudades sostenibles y resilientes
Problema identificado	Alto impacto ambiental, económico y social de materiales tradicionales en la construcción y pavimentación
Enfoque propuesto	Reemplazo de materiales convencionales por alternativas sostenibles

Aspecto	Descripción
Criterios de sostenibilidad	- Desempeño técnico- Origen del material- Huella ecológica- Posibilidad de reciclaje o reutilización
Categorías de materiales sostenibles para pavimentos	1. Materiales reciclados provenientes de residuos urbanos e industriales 2. Mezclas con aditivos ecológicos o producidas con tecnologías de bajo impacto ambiental
Referencia principal	Giani et al., 2015

Nota: Pavimentar con sostenibilidad es construir el futuro sobre bases ecológicas (Autor, 2024).

3.1.1 Materiales reciclados provenientes de residuos urbanos e industriales

La reutilización de residuos sólidos como materia prima para la fabricación de materiales de pavimentación representa una estrategia de alto valor ambiental, en tanto permite reducir la cantidad de residuos depositados en vertederos, disminuir la demanda de recursos naturales vírgenes y minimizar la energía incorporada en el proceso productivo (Silva et al., 2014). Diversos estudios han demostrado que residuos como el plástico, el caucho de neumáticos fuera de uso, el vidrio molido y los escombros de construcción pueden ser transformados y reincorporados en el ciclo productivo mediante técnicas adecuadas de clasificación, trituración y modificación físico-química.

En el caso de los plásticos reciclados, se han utilizado ampliamente en mezclas bituminosas como modificadores del ligante asfáltico, gracias a su capacidad para mejorar propiedades como la estabilidad térmica, la resistencia al agrietamiento y la flexibilidad a bajas temperaturas (Kumi-Larbi et al., 2018). Por ejemplo, el polietileno de alta densidad (HDPE) y el polipropileno (PP) pueden mezclarse con asfalto convencional mediante técnicas de mezcla en seco o húmedo, mejorando la cohesión de la mezcla y prolongando su vida útil, especialmente en condiciones climáticas extremas.

El caucho reciclado, obtenido de la trituración de neumáticos al final de su vida útil, ha sido otro componente ampliamente estudiado. Cuando se incorpora a mezclas asfálticas, genera un producto conocido como asfalto modificado con caucho (CRM), caracterizado por su alta elasticidad, resistencia al envejecimiento oxidativo y excelente comportamiento frente a cargas repetidas (Arabani & Pedram, 2016). Además, este tipo de mezclas reduce significativamente el nivel de ruido del tráfico rodado, una ventaja adicional en entornos urbanos densamente poblados.

Por su parte, los residuos de construcción y demolición (RCD), como fragmentos de concreto, ladrillo y cerámica, han sido utilizados como agregados reciclados para capas base y subbase de pavimentos. Su aplicación ha demostrado ser eficaz siempre que se apliquen procesos adecuados de tratamiento y selección granulométrica, los cuales garantizan la estabilidad volumétrica y resistencia mecánica de la estructura del pavimento (Silva et al., 2014). Esta práctica no solo disminuye la presión sobre canteras naturales, sino que también reduce los costos de disposición de escombros.

El vidrio reciclado molido, conocido como *glassphalt* cuando se incorpora al asfalto, ofrece ventajas en términos de estética, resistencia al deslizamiento y reflectividad térmica. No obstante, su uso requiere un control riguroso del contenido y tamaño de partícula, así como el empleo de aditivos anti-stripping para evitar la pérdida de adherencia con el ligante asfáltico en condiciones de humedad (Batayneh et al., 2007).

3.1.2 Mezclas con aditivos ecológicos y tecnologías de bajo impacto

Más allá del uso de materiales reciclados, la sostenibilidad en la pavimentación urbana también se ha visto impulsada por el desarrollo de mezclas ecológicas, que incorporan aditivos orgánicos o sintéticos y tecnologías constructivas de menor impacto energético. Estas innovaciones no solo contribuyen a mitigar la emisión de gases de efecto invernadero, sino que también mejoran las condiciones laborales y reducen el consumo de recursos no renovables.

Una de las tecnologías más destacadas en esta línea es el asfalto templado o *Warm Mix Asphalt (WMA)*. Esta técnica permite reducir la temperatura de fabricación y colocación de la mezcla asfáltica en hasta 40 °C respecto al asfalto caliente convencional, lo que genera una disminución significativa en el consumo de combustible y en la emisión de compuestos orgánicos volátiles y partículas contaminantes (D'Angelo et al., 2008). Además, el WMA presenta ventajas técnicas, como una mejor compactabilidad y una mayor vida útil en aplicaciones urbanas con tráfico moderado.

Asimismo, el uso de aglutinantes bio-basados, derivados de fuentes renovables como aceites vegetales, lignina o residuos agroindustriales, ha emergido como una solución prometedora para sustituir parcialmente al betún asfáltico. Estos aglutinantes ofrecen una huella de carbono más baja y una biodegradabilidad superior, sin comprometer el desempeño técnico de la mezcla, aunque aún se enfrentan desafíos relacionados con su estabilidad química y compatibilidad con otros componentes de la mezcla asfáltica (Zaumanis et al., 2020).

En paralelo, la incorporación de nanomateriales como nanoarcillas, nanotubos de carbono o nano-sílice ha sido objeto de estudio para mejorar las propiedades mecánicas y térmicas del pavimento, especialmente en lo que respecta a la resistencia al envejecimiento, la fatiga y el deterioro por humedad (Jassim et al., 2022). Aunque su aplicación industrial es aún incipiente, los resultados preliminares son alentadores y abren la puerta a una nueva generación de pavimentos inteligentes y adaptativos.

La combinación de materiales reciclados y tecnologías constructivas sostenibles constituye, por tanto, una estrategia integral que no solo responde a los retos ambientales actuales, sino que también promueve la innovación tecnológica y la eficiencia económica en el sector de la construcción urbana. La implementación efectiva de estas soluciones dependerá en gran medida de la voluntad política, la actualización normativa, y la colaboración entre academia, industria y gobiernos locales (Chopra, Siddique, & Kunal, 2015).

3.2. Evaluación técnica y ambiental del desempeño de los materiales sostenibles

3.2.1 Propiedades mecánicas y durabilidad

La evaluación del desempeño de materiales sostenibles empleados en la construcción de pavimentos urbanos debe considerar, de manera prioritaria, sus propiedades mecánicas fundamentales y su capacidad de resistencia a largo plazo frente a condiciones operativas diversas. Las exigencias estructurales de los pavimentos, tales como la carga vehicular cíclica, los gradientes térmicos extremos y los procesos de envejecimiento por exposición ambiental, hacen necesario que cualquier material alternativo demuestre una resistencia comparable o superior a los materiales convencionales, especialmente en contextos urbanos con alta densidad de tráfico (Zhang et al., 2021).

Entre los indicadores más relevantes para esta evaluación se encuentran la resistencia a la compresión, la modulación resiliente, la resistencia a la tracción indirecta, el índice de deformación permanente (rutting), la resistencia al agrietamiento por fatiga, así como la estabilidad frente a la humedad y el envejecimiento oxidativo. A estos parámetros se suman ensayos acelerados que simulan el deterioro inducido por ciclos de carga y descarga, variaciones térmicas y exposición al agua, con el fin de estimar la vida útil proyectada del pavimento (Bahia et al., 2020).

Uno de los enfoques más consolidados en la ingeniería de materiales sostenibles es la incorporación de residuos poliméricos reciclados como modificadores del ligante asfáltico. Estudios experimentales han demostrado que la adición de plásticos reciclados —como polietileno (HDPE y LDPE), polipropileno (PP) y tereftalato de polietileno (PET)— mejora la rigidez de la mezcla, eleva la resistencia al flujo plástico en condiciones de calor extremo y reduce la deformación por carga constante (Modarres & Hamedi, 2014). Esta modificación no solo proporciona una mejor resistencia estructural, sino también un incremento en la elasticidad y capacidad de recuperación, lo cual se traduce en un mejor comportamiento bajo cargas cíclicas propias del tráfico urbano.

Asimismo, los asfaltos modificados con polvo de caucho derivado de neumáticos fuera de uso han mostrado una notable mejora en la resistencia a la fatiga y a la fisuración térmica. El caucho actúa como un refuerzo elastomérico dentro de la matriz bituminosa, absorbiendo tensiones inducidas por la expansión y contracción térmica, y aumentando la durabilidad en ambientes con ciclos térmicos significativos (Arabani & Pedram, 2016). Investigaciones de laboratorio han evidenciado incrementos del 15 % al 30 % en la vida útil de mezclas CRM (rubber-modified asphalt) respecto a mezclas tradicionales, bajo condiciones simuladas de tráfico medio-alto (Kök & Çolak, 2011).

En relación con los agregados reciclados provenientes de residuos de construcción y demolición (RCD), diversos estudios han demostrado que, si bien su resistencia individual es inferior a la de los agregados naturales, su comportamiento dentro de

mezclas estabilizadas o tratadas con ligantes hidráulicos resulta competitivo. Al ser empleados en capas inferiores (subbases y bases), ofrecen una capacidad estructural suficiente, y una vez compactados adecuadamente, presentan un módulo de elasticidad aceptable y una baja susceptibilidad a la deformación permanente (Silva et al., 2014). Su uso es especialmente viable en pavimentos urbanos de bajo a medio tránsito, donde la sobrecarga estructural es limitada.

Otra línea de investigación relevante es la incorporación de cenizas volantes, escorias de alto horno y residuos de vidrio como sustitutos parciales del cemento Portland o de los agregados finos en mezclas de concreto. La ceniza volante tipo F, por ejemplo, mejora la trabajabilidad de la mezcla fresca, reduce la demanda de agua y, al reaccionar con la cal libre del cemento, contribuye a la formación de productos cementantes secundarios. Esta reacción puzolánica no solo mejora la resistencia mecánica del concreto a largo plazo, sino que reduce la permeabilidad y la susceptibilidad a los ataques químicos, como los sulfatos, prolongando así la durabilidad del pavimento.

Desde una perspectiva más avanzada, la utilización de nanomateriales —como nanoarcillas, nano-sílice o nanotubos de carbono— en mezclas asfálticas ha permitido mejorar parámetros clave como la cohesión interna, la adherencia entre agregados y ligante, y la resistencia al daño por humedad. La investigación de Jassim et al. (2022) reporta aumentos significativos en la rigidez de mezclas modificadas con nano-sílice, lo que se traduce en una mayor resistencia a la deformación permanente y una menor tasa de agrietamiento por fatiga bajo cargas repetidas. Aunque su uso todavía enfrenta limitaciones económicas y normativas, el potencial de esta tecnología para optimizar el rendimiento mecánico y prolongar la vida útil de los pavimentos es innegable.

En cuanto a la durabilidad en condiciones reales de servicio, se ha observado que las mezclas sostenibles correctamente diseñadas y construidas presentan comportamientos favorables frente al envejecimiento térmico y oxidativo, así como frente a la acción del agua y las sales deshielantes. La resistencia a la penetración del agua, medida a través del ensayo de durabilidad o el índice de retención de resistencia (TSR), es uno de los factores más críticos, especialmente en climas húmedos. Las mezclas con plásticos y caucho reciclado, al presentar una matriz más densa y menos porosa, han mostrado mejores resultados en términos de impermeabilidad y cohesión interna (Bahia et al., 2020).

Finalmente, es importante señalar que la estabilidad a largo plazo de los pavimentos elaborados con materiales sostenibles depende no solo de las propiedades intrínsecas de los materiales, sino también de factores externos como el diseño estructural del pavimento, el sistema de drenaje, el tipo de tráfico, y las condiciones climáticas locales. Por ello, la implementación efectiva de estos materiales requiere acompañarse de metodologías de diseño basadas en desempeño, mantenimiento predictivo y monitoreo continuo a través de tecnologías no destructivas como el radar

de penetración terrestre (GPR) o el deflectómetro de impacto (FWD), que permitan anticipar fallos y optimizar la gestión del ciclo de vida de la infraestructura.

En conclusión, las propiedades mecánicas y la durabilidad de los materiales sostenibles utilizados en pavimentos urbanos han sido ampliamente validadas en la literatura científica, evidenciando su capacidad para reemplazar de forma efectiva los materiales convencionales. Estas alternativas no sólo cumplen con los requisitos técnicos exigidos, sino que además ofrecen ventajas adicionales en términos de resiliencia estructural, sostenibilidad ambiental y eficiencia económica, aspectos clave en la planificación de ciudades más sostenibles.

4. Discusión

La evidencia reunida en la presente revisión bibliográfica permite afirmar que la incorporación de materiales sostenibles en la construcción de pavimentos urbanos constituye una estrategia técnica y ambientalmente viable, respaldada por numerosos estudios empíricos y ensayos experimentales. Esta transición desde materiales convencionales hacia alternativas más responsables desde el punto de vista ambiental responde a una necesidad urgente de adaptación del sector de la infraestructura vial a los principios del desarrollo sostenible, la economía circular y la resiliencia urbana. No obstante, su implementación a escala operativa implica superar barreras estructurales, normativas y tecnológicas que aún persisten en muchos contextos.

Los materiales reciclados provenientes de residuos urbanos e industriales, como plásticos posconsumo, caucho de neumáticos, residuos de construcción y demolición, y vidrio molido, han mostrado propiedades mecánicas que, bajo condiciones controladas de diseño y preparación, igualan o incluso superan a las de los agregados y ligantes tradicionales. Tal es el caso de los asfaltos modificados con polietileno o caucho granulado, cuya elasticidad, resistencia al envejecimiento y estabilidad frente a cargas repetidas resultan notoriamente superiores a las mezclas estándar, además de aportar beneficios adicionales como la reducción del ruido de rodadura y la impermeabilidad superficial (Arabani & Pedram, 2016; Modarres & Hamed, 2014). No obstante, la variabilidad inherente a los materiales reciclados —en cuanto a granulometría, composición química, grado de contaminación y humedad— representa un desafío importante que demanda el desarrollo de protocolos de caracterización y control más rigurosos, así como la estandarización de las técnicas de producción.

Adicionalmente, los avances en tecnologías de producción de bajo impacto, como el asfalto templado (Warm Mix Asphalt), demuestran que es posible reducir de forma significativa el consumo energético y las emisiones de gases contaminantes durante las fases de fabricación y compactación de los pavimentos, sin comprometer su calidad estructural. Esta técnica, validada en contextos europeos y norteamericanos,

ha logrado posicionarse como una de las innovaciones más eficaces en la reducción de la huella de carbono de los proyectos de pavimentación urbana (D'Angelo et al., 2008). A ello se suma la utilización de aglutinantes bio-basados, desarrollados a partir de residuos agroindustriales o aceites vegetales, que ofrecen un perfil ambiental más favorable en términos de biodegradabilidad y emisiones, aunque aún requieren mayor investigación para mejorar su comportamiento reológico y su durabilidad frente a condiciones climáticas extremas (Zaumanis et al., 2020).

En lo que respecta a la durabilidad, se ha constatado que los materiales sostenibles, particularmente aquellos que integran residuos poliméricos y aditivos avanzados como nanomateriales, presentan un mejor desempeño en términos de resistencia a la fatiga, agrietamiento térmico y deformación permanente. Estudios como los de Jassim et al. (2022) confirman que la incorporación de nano-sílice en ligantes asfálticos incrementa significativamente la cohesión interna y la resistencia al daño por humedad, lo cual es clave para garantizar la estabilidad del pavimento a lo largo de su vida útil, especialmente en regiones con climas variables o suelos inestables. Asimismo, en mezclas de concreto con residuos industriales, como las cenizas volantes y escorias de alto horno, se ha observado una mejora en la microestructura de la matriz cementante, reduciendo su porosidad y aumentando la resistencia a compresión y al ataque de agentes agresivos.

Sin embargo, la durabilidad de estos materiales no solo depende de sus propiedades intrínsecas, sino también de las condiciones del entorno, el tipo de tráfico al que están expuestos y la calidad de la ejecución del pavimento. En este sentido, las ventajas observadas en ensayos de laboratorio deben ser validadas a través de estudios a escala real, monitoreo en campo y análisis de ciclo de vida completos que incluyan no solo la fase constructiva, sino también el mantenimiento, la rehabilitación y la disposición final del pavimento (Zhang et al., 2021). La implementación efectiva de estos materiales sostenibles en entornos urbanos requiere, por tanto, una visión holística que integre criterios técnicos, ambientales, sociales y económicos, así como una voluntad política y normativa que incentive su adopción.

Un aspecto crítico identificado en esta revisión es la necesidad de fortalecer los marcos regulatorios y las especificaciones técnicas que permitan la homologación de estos materiales en proyectos públicos y privados. La falta de normativas actualizadas, así como la resistencia al cambio por parte de algunos sectores de la industria, limita la expansión de soluciones innovadoras que ya han sido probadas con éxito en diversos contextos internacionales (Giani et al., 2015). La generación de incentivos económicos, la inclusión de criterios ambientales en licitaciones públicas y la capacitación técnica de los actores involucrados en el diseño y ejecución de pavimentos son acciones clave para acelerar esta transición hacia una infraestructura urbana más sostenible.

En conclusión, los materiales sostenibles evaluados en esta revisión constituyen una alternativa técnica y ambientalmente robusta frente a los materiales convencionales

en pavimentos urbanos. Su adecuado desempeño mecánico, combinado con una durabilidad comprobada y un menor impacto ecológico, los posiciona como componentes estratégicos en el desarrollo de ciudades más resilientes y bajas en carbono. No obstante, su consolidación en la práctica ingenieril requiere un compromiso integral de todos los sectores involucrados, junto con un respaldo normativo, científico y tecnológico que asegure su implementación eficiente y responsable.

5. Conclusiones

El análisis exhaustivo de la literatura científica sobre materiales sostenibles aplicables a la construcción de pavimentos urbanos permite concluir que existen alternativas técnicamente viables y ambientalmente favorables frente a los materiales tradicionales, cuyo uso intensivo ha contribuido históricamente a la degradación ambiental y al agotamiento de recursos naturales. La reutilización de residuos urbanos e industriales como agregados o modificadores, junto con la implementación de tecnologías constructivas de bajo impacto, constituye una estrategia integral que responde a los principios de sostenibilidad, economía circular y eficiencia energética.

Las mezclas asfálticas y de concreto desarrolladas con materiales reciclados, tales como plásticos, caucho, vidrio y escombros, han demostrado propiedades mecánicas adecuadas, resistencia a la fatiga y durabilidad frente a condiciones climáticas adversas. Asimismo, la aplicación de asfaltos templados y aglutinantes bio-basados ofrece una significativa reducción de emisiones y consumo energético, mejorando la huella ambiental del ciclo constructivo sin comprometer la funcionalidad del pavimento.

Sin embargo, la efectividad de estos materiales depende de múltiples factores, entre ellos la calidad del proceso de selección y tratamiento de los residuos, la compatibilidad de los componentes en las mezclas, y el cumplimiento de parámetros técnicos específicos durante la ejecución. Además, persisten desafíos relacionados con la estandarización normativa, la aceptación del sector constructivo y la necesidad de validar el rendimiento a largo plazo de estas soluciones en condiciones reales de uso.

Se reconoce, por tanto, la necesidad de fortalecer los marcos técnicos y políticos que favorezcan la implementación masiva de materiales sostenibles en pavimentos urbanos, promoviendo una infraestructura vial resiliente, de bajo impacto ambiental y alineada con los objetivos globales de desarrollo sostenible. La integración de estas prácticas representa no solo un avance tecnológico, sino también un compromiso ético con las generaciones futuras y con la conservación del entorno urbano.

CONFLICTO DE INTERESES

“Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses”.

Referencias Bibliográficas

- Arabani, M., & Pedram, M. (2016). Laboratory investigation of rutting and fatigue in glassphalt containing waste crumb rubber. *Construction and Building Materials*, 116, 378–383.
- Astudillo-Martínez, W. J., Andrade-Bravo, A. G., García-Valdez, J.-D., & Almenabaguerrero, Y. F. (2023). *Un Análisis Científico del Ruido Ambiental y Laboral en Sectores Urbanos*. Editorial Grupo AEA. <https://doi.org/10.55813/egaea.l.2022.50>
- Bahia, H. U., Faheem, A., Al-Qadi, I. L., Elseifi, M. A., & Yang, S. H. (2020). Engineering properties and performance of asphalt mixtures modified with crumb rubber and waste plastic. *Transportation Research Record*, 2674(8), 352–364.
- Batayneh, M., Marie, I., & Asi, I. (2007). Use of selected waste materials in concrete mixes. *Waste Management*, 27(12), 1870–1876. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.07.026>
- Chicaiza-Ortiz, C. D., Rivadeneira-Arias, V. del C., Herrera-Feijoo, R. J., & Andrade, J. C. (2023). *Bioteología Ambiental, Aplicaciones y Tendencias*. Editorial Grupo AEA. <https://doi.org/10.55813/egaea.l.2022.25>
- Chopra, D., Siddique, R., & Kunal. (2015). Strength, permeability and microstructure of self-compacting concrete containing rice husk ash. *Biosystems Engineering*, 130, 72–80. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.12.005>
- D'Angelo, J., Harm, E., Bartoszek, J., Baumgardner, G., Corrigan, M., Cowser, J., ... & Prowell, B. (2008). *Warm-mix asphalt: European practice*. Report No. FHWA-PL-08-007. U.S. Department of Transportation. <https://international.fhwa.dot.gov/pubs/pl08007/pl08007.pdf>
- Giani, M. I., Dotelli, G., Brandini, N., & Zampori, L. (2015). Comparative life cycle assessment of asphalt pavements using reclaimed asphalt, warm mix technology and cold in-place recycling. *Resources, Conservation and Recycling*, 104, 224–238. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.08.006>
- Jassim, A. K., Abbas, A. A., & Mohd Sani, M. A. (2022). Performance evaluation of asphalt binder modified with nano materials: A review. *Construction and Building Materials*, 314, 125658.
- Kök, B. V., & Çolak, H. (2011). Laboratory comparison of the crumb-rubber and SBS modified bitumen and hot mix asphalt. *Construction and Building Materials*, 25(8), 3204–3212. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.03.005>
- Kumi-Larbi, A., Yunana, D., Kamsouloum, P., Webster, M., Wilson, D. C., Cheeseman, C., & Imbabi, M. (2018). Recycling waste plastics in developing countries: Use of low-density polyethylene water sachets to form plastic bonded sand blocks.

- Waste Management, 80, 112–118.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.09.003>
- Li, X., Bai, S., Wang, Y., Zhang, Z., & Yu, L. (2020). Environmental sustainability of asphalt pavements containing recycled rubber: A review. *Journal of Cleaner Production*, 247, 119557.
- Modarres, A., & Hamed, H. (2014). Effect of waste plastic bottles on the stiffness and fatigue properties of modified asphalt mixes. *Construction and Building Materials*, 61, 8–15. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.04.046>
- Mohajerani, A., Vajna, J., Cheung, T. H. H., Kurmus, H., Arulrajah, A., & Horpibulsuk, S. (2017). Practical recycling applications of crushed waste glass in construction materials: A review. *Construction and Building Materials*, 156, 443–467. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.005>
- Paranavithana, S., & Mohajerani, A. (2006). Effects of recycled concrete aggregates on properties of asphalt concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, 48(1), 1–12.
- Ruiz-Sanchez, C. I., Herrera-Feijoo, R. J., Guamán-Rivera, S. A., & Fernández-Vélez, C. V. (2023). Enfoque innovador en el diseño de revestimientos para cunetas: material compuesto de polímeros reciclados. In *Sinergia Científica: Integrando las Ciencias desde una Perspectiva Multidisciplinaria* (pp. 49–66). Editorial Grupo AEA. <https://doi.org/10.55813/egaea.cl.2022.22>
- Shafabakhsh, G. H., Sajed, Y., & Azarhoosh, A. R. (2014). Performance evaluation of hot mix asphalt containing crumb rubber. *Construction and Building Materials*, 54, 312–320.
- Silva, R. V., De Brito, J., & Dhir, R. K. (2014). Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. *Construction and Building Materials*, 65, 201–217. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.117>
- Vargas-Fonseca, A. D., Borja-Cuadros, O. M., & Cristiano-Mendivelso, J. F. (2023). *Introducción a la estructura ecológica principal del Distrito Capital y su región ambiental: Conceptos fundamentales, ordenamiento territorial e instrumentos jurídicos*. Editorial Grupo AEA. <https://doi.org/10.55813/egaea.l.2022.34>
- Zaumanis, M., Gallego, J., & Partl, M. N. (2020). Review of bio-based rejuvenators in bitumen. *Sustainability*, 12(19), 7906. <https://doi.org/10.3390/su12197906>
- Zhang, J., Zhao, Y., & Yuan, W. (2022). Application of sustainable materials in urban pavement construction: A comprehensive review. *Sustainability*, 14(1), 248.
- Zhang, Y., Zhang, M., Zhang, Y., & Zhang, H. (2021). Mechanical performance and environmental impact of asphalt mixtures with sustainable materials: A critical review. *Journal of Cleaner Production*, 278, 123956.