

Innovación Sostenible en la ingeniería Vial: El Uso de Materiales Reciclados en Mezclas Asfálticas

Sustainable Innovation in Road Engineering: The Use of Recycled Materials in Asphalt Mixtures

Delgado Espinoza Angela¹, González Martínez Justin Baruc¹

¹ Licenciatura en Ingeniería Civil, DCSI, Campus Celaya-Salvatierra, Universidad de Guanajuato.
a.delgadoespinoza@ugto.mx, jb.gonzalez.martinez@ugto.mx

Resumen

El uso de materiales reciclados como el granulado de caucho de neumáticos (GCR) y el plástico PET en mezclas asfálticas representa una alternativa sostenible para la construcción de pavimentos. Las investigaciones muestran que estos materiales mejoran propiedades mecánicas como la estabilidad, la resistencia a la humedad y el desempeño a largo plazo, cumpliendo con normativas vigentes. Además de reducir residuos, ofrecen beneficios económicos al disminuir costos de mantenimiento y aumentar la durabilidad de las vías, consolidándose como una solución viable para una infraestructura vial más sostenible y eficiente.

Palabras clave: Mezclas asfálticas, Materiales Reciclados, PET reciclado, Granulado con caucho (GCR).

Abstract

The use of recycled materials such as tire rubber granules (TRG) and PET plastic in asphalt mixtures represents a sustainable alternative for pavement construction. Research shows that these materials improve mechanical properties such as stability, moisture resistance, and long-term performance, meeting current regulations. In addition to reducing waste, they offer economic benefits by lowering maintenance costs and increasing road durability, establishing themselves as a viable solution for a more sustainable and efficient road infrastructure.

Keywords: Asphalt mixtures, Recycled Materials, Recycled PET, Rubberized Granules (GCR)

Introducción

La creciente acumulación de residuos sólidos, especialmente los neumáticos fuera de uso (NFU) y los envases de plástico PET, se ha convertido en un desafío ambiental cada vez más crítico debido a su lenta degradación y al manejo inadecuado que prevalece en muchas regiones. Ante este panorama, la ingeniería civil ha buscado alternativas innovadoras que permitan transformar estos desechos en recursos útiles, impulsando prácticas alineadas con la economía circular y la sostenibilidad.

Una de las líneas de investigación con mayor proyección es la incorporación de materiales reciclados en mezclas asfálticas para la construcción de pavimentos. El granulado de caucho reciclado (GCR) proveniente de llantas usadas y el plástico PET postconsumo se han estudiado ampliamente como modificadores capaces de mejorar propiedades mecánicas como la estabilidad, la durabilidad, la resistencia al ahuecamiento y el comportamiento ante el envejecimiento del asfalto. Al mismo tiempo, su integración contribuye a la reducción de residuos, disminuye la presión sobre los vertederos y ofrece beneficios económicos al prolongar la vida útil de las vías.

Este artículo presenta una síntesis clara y accesible del estado del arte sobre el uso de GCR y PET en mezclas asfálticas, destacando sus ventajas, limitaciones y su potencial para impulsar una infraestructura vial más sostenible, eficiente y alineada con las demandas ambientales actuales.

Marco Teórico

1. Materiales reciclados en mezclas asfálticas

El uso de materiales reciclados responde a la necesidad de generar pavimentos más duraderos y reducir el impacto ambiental de la industria vial. Los asfaltos modificados con polímeros reciclados presentan, en general, mayor resistencia a deformación permanente y mejor respuesta ante variaciones térmicas.

1.1. Caucho reciclado de neumáticos (GCR)

El caucho proveniente de NFU es uno de los modificadores más investigados. Se ha comprobado que:

- Mejora la resistencia al envejecimiento del asfalto.
- Incrementa la estabilidad y reduce el agrietamiento por fatiga.
- Aumenta la resistencia al daño por humedad.
- En mezcla húmeda, incrementa la viscoelasticidad del ligante, haciendo el pavimento más resiliente.

Según estudios latinoamericanos, la inclusión entre 1% y 20% de GCR puede mejorar significativamente parámetros Marshall, la resistencia a la tracción e incluso la absorción acústica, lo que reduce el ruido vehicular.



Figura 1. Caucho.

Fuente: <https://www.multinsa.com/que-es-el-grano-de-caucho/>

1.2. Plástico reciclado PET

El PET es abundante en desechos urbanos y su reutilización en pavimentos ofrece:

- Reducción de vacíos (VMA).
- Mayor rigidez del ligante.
- Incremento del punto de ablandamiento.
- Mejor resistencia al ahuellamiento en climas cálidos.

Sin embargo, al emplearlo por vía húmeda, puede aumentar la viscosidad del ligante, lo que exige un mejor control de temperatura en la mezcla.

1.3. Combinación GCR + PET

La combinación de ambos residuos ha demostrado ser altamente eficaz. Investigaciones reportan:

- Mayor estabilidad.
- Disminución de permeabilidad.
- Mejora de propiedades mecánicas sin alterar la trabajabilidad.
- Cumplimiento de normativas como MTC EG-2013, ASTM y especificaciones locales.

1.4. Consideraciones ambientales

El uso de GCR y PET promueve la economía circular:

- Reduce la disposición de residuos en vertederos.
- Disminuye la necesidad de producción de nuevos materiales.
- Minimiza la huella de carbono asociada al ciclo de vida del pavimento.

Metodología

Para la elaboración de este artículo de divulgación se desarrolló un proceso metodológico basado en la revisión documental y el análisis comparativo de investigaciones nacionales e internacionales relacionadas con el uso de materiales reciclados principalmente caucho de neumáticos fuera de uso (GCR/CRLL) y plástico PET en mezclas asfálticas. La metodología se estructuró en las siguientes etapas:

1. Búsqueda y selección de fuentes

Se recopiló información proveniente de:

- Repositorios académicos como Scielo, RedALyC, Alicia-Concytec, Scopus y MDPI.
- Repositorios institucionales de universidades latinoamericanas.
- Artículos científicos, tesis, informes técnicos y revisiones sistemáticas publicados entre 2010 y 2024.
- Documentos oficiales y normativos de organismos especializados en pavimentación y sostenibilidad.

Las referencias seleccionadas incluían estudios experimentales, revisiones teóricas y análisis de desempeño relacionados con el uso de GCR y PET en pavimentos.

2. Criterios de inclusión

Se incluyeron únicamente documentos que:

- Analizaran mezclas asfálticas modificadas con GCR, PET o combinaciones de ambos.
- Presentaran métodos de incorporación (vía seca o húmeda) claramente definidos.
- Evaluaran parámetros como estabilidad Marshall, módulo resiliente, resistencia a la fatiga, susceptibilidad a humedad, deformación permanente y envejecimiento.
- Describieran resultados comparativos entre mezclas convencionales y modificadas.
- Abordaran el enfoque ambiental y la economía circular del uso de residuos.

3. Análisis y sistematización de la información

La información obtenida se organizó y procesó mediante:

- **Comparación de tendencias experimentales** para identificar comportamientos repetitivos o divergentes.
- **Revisión de ventajas y limitaciones** técnicas reportadas por cada estudio.
- **Identificación de factores críticos** como granulometría del material reciclado, proporción de adición, características del ligante base y condiciones de fabricación.
- **Contraste entre estudios latinoamericanos e internacionales** para evaluar diferencias metodológicas y de desempeño.

4. Integración narrativa para divulgación científica

A diferencia de un artículo meramente técnico, esta etapa se enfocó en:

- Traducir los conceptos especializados a lenguaje claro sin perder rigor científico.
- Destacar la relevancia social, ambiental y económica del uso de materiales reciclados.
- Construir una narrativa coherente que permitiera al lector comprender el estado del arte y las perspectivas futuras de la temática.
- Emplear gráficos conceptuales, ejemplos contextuales y explicaciones simplificadas cuando fue necesario.

5. Validación del contenido

Finalmente, se verificó la coherencia del documento mediante:

- Revisión cruzada de datos entre distintas fuentes.

- Comprobación de que los resultados y afirmaciones estuvieran respaldados por literatura confiable.
- Asegurar que el contenido cumpliera con estándares de divulgación profesional y claridad comunicativa.

Resultados

Los estudios analizados muestran una amplia variabilidad en el desempeño de las mezclas asfálticas modificadas con materiales reciclados como el grano de caucho reciclado (GCR), el caucho de llanta triturado y el plástico PET postconsumo. Esta diversidad de resultados responde a factores como el método de incorporación (vía seca o húmeda), el tamaño de partícula, la dosificación aplicada y el tipo de ligante base utilizado.

En cuanto al caucho reciclado, las investigaciones de Agudelo-Cendales & Martínez (2019), Antonio (2018), Guerrero Chumacero (2022) y Tighe (2010) coinciden en que el GCR puede mejorar la elasticidad y reducir la susceptibilidad al agrietamiento térmico del asfalto. Sin embargo, algunos estudios como el de Alvin (2022) y Paz Cáceres & Guerrero Castro (2022) reportan casos donde los valores de estabilidad, flujo o resistencia indirecta no superaron los parámetros normativos, evidenciando que no todas las combinaciones generan mejoras significativas. De forma general, los resultados sugieren que el caucho incrementa la viscoelasticidad y ralentiza el envejecimiento del ligante, aunque su desempeño depende fuertemente de una granulometría y dosificación adecuadas.

Respecto al plástico PET, los trabajos de Gavilánes Falconí (2023), Silva Torres (2020) y Torres & Ochoa (2019) muestran efectos positivos en la rigidez, el punto de ablandamiento y la resistencia al ahuellamiento, particularmente en climas cálidos. Aunque estos beneficios se presentan de manera consistente, también se señala que dosis elevadas pueden incrementar la fragilidad de la mezcla y afectar su trabajabilidad. La revisión de Badejo et al. (2023) y el informe de las National Academies (2023) respaldan la viabilidad del PET como modificador, pero recomiendan estandarizar su proceso de incorporación para evitar comportamientos impredecibles.

En mezclas que combinan GCR y PET, como las exploradas por Chávez Samame (2024) y Silva Torres (2020), se observan mejoras simultáneas en estabilidad, permeabilidad y resistencia al envejecimiento. Estas mezclas muestran una sinergia entre la elasticidad del caucho y la rigidez del plástico, alcanzando en algunos casos un desempeño superior al de las mezclas convencionales. No obstante, se destaca la necesidad de controlar la compatibilidad entre ambos materiales para evitar incrementos excesivos de viscosidad en el ligante.

Por otro lado, estudios orientados a tecnologías más sostenibles, como el de Marceliano Alcántara & Sandoval (2024) sobre asfalto tibio con caucho reciclado, reportan beneficios adicionales en reducción de emisiones, menor consumo energético y mejor manejo en obra, sin afectar significativamente las propiedades mecánicas de la mezcla.

En síntesis, los resultados obtenidos en la literatura muestran que la incorporación de GCR y PET tiene el potencial de mejorar propiedades clave como la estabilidad Marshall, la resistencia al desgaste, la durabilidad y el envejecimiento. Sin embargo, también se evidencian casos donde los parámetros no cumplen completamente las normas vigentes, lo que subraya la importancia de optimizar las condiciones de diseño, dosificación y proceso de mezcla. A pesar de estas variaciones, existe consenso en que los materiales reciclados constituyen una alternativa técnica y ambientalmente viable para el desarrollo de pavimentos más sostenibles.

Discusión

El análisis de la literatura y de los estudios experimentales revisados demuestra que el uso de materiales reciclados como el caucho proveniente de llantas fuera de uso (GCR/CRL) y el plástico PET se ha convertido en una alternativa emergente para el mejoramiento de mezclas asfálticas.

No obstante, la literatura también señala desafíos:

- Falta de estandarización en la granulometría del caucho.
- Variabilidad en el PET reciclado según su fuente.
- Mayores costos iniciales por adecuaciones en plantas asfaltadoras.
- Necesidad de investigación a escala real (pavimentos piloto).

Los beneficios superan las limitaciones, y existe consenso en que la inclusión de residuos reciclados aporta mejoras mecánicas, económicas y ambientales.

Las investigaciones incluidas muestran beneficios importantes en propiedades como la resistencia al ahuellamiento, la estabilidad Marshall y el desempeño frente al envejecimiento, especialmente cuando el caucho se incorpora mediante procesos húmedos o como modificador del ligante. El PET reciclado, por su parte, aporta mayor rigidez, estabilidad térmica y reducción de vacíos, aunque puede incrementar la viscosidad del asfalto y requiere un control adecuado de temperatura.

No obstante, algunos estudios reportan resultados variables o incluso negativos, como el caso del caucho CRLL aplicado en diseños específicos que no generaron mejoras significativas en las características físico-mecánicas. Estos contrastes evidencian la necesidad de estandarizar granulometrías, porcentajes de adición y métodos de incorporación para asegurar la reproducibilidad de los resultados.

En conjunto, la evidencia muestra que la incorporación de residuos reciclados en pavimentos es técnicamente viable y ambientalmente necesaria, pero su desempeño depende fuertemente de las condiciones de diseño, del tipo de residuo y del método de modificación utilizado. La tendencia global apunta a optimizar estas tecnologías para avanzar hacia pavimentos más durables, económicos y sostenibles.

Conclusión

La incorporación de materiales reciclados como el caucho de neumáticos y el plástico PET en mezclas asfálticas se consolida como una alternativa viable para mejorar el desempeño de los pavimentos y, al mismo tiempo, reducir el impacto ambiental asociado a la acumulación de residuos. La evidencia revisada demuestra que, cuando se aplican condiciones de diseño adecuadas, estos aditivos pueden incrementar la estabilidad, la durabilidad y la resistencia de las carpetas asfálticas. Si bien aún existen retos relacionados con la estandarización de métodos y el control de calidad del material reciclado, los beneficios técnicos, económicos y ambientales respaldan su implementación progresiva. En síntesis, estas tecnologías representan un paso estratégico hacia una infraestructura vial más sostenible, eficiente y alineada con los principios de economía circular.

Bibliografía

- Agudelo-Cendales, M., & Martínez Gómez, A. (2019). Análisis del envejecimiento en mezclas asfálticas modificadas con grano de caucho reciclado. Universidad Católica de Colombia.
- Alvin, B. (2022). Diseño de una mezcla asfáltica ecológica con PET y caucho. Universidad Señor de Sipán.
- Antonio, F. (2018). Evaluación comparativa de mezclas modificadas con caucho reciclado. Universidad Militar Nueva Granada.
- Chávez Samame, C. (2024). Influencia del polvo de caucho y plástico reciclado en mezclas asfálticas. Universidad Católica.
- Gavilánes Falconí, A. (2023). Evaluación de propiedades mecánicas de mezclas asfálticas con PET. Universidad Estatal Península Santa Elena.
- Guerrero Chumacero, L. (2022). Comparación entre mezcla convencional y mezcla con GCR.
- Marceliano Alcántara, L., & Sandoval Moreno, L. (2024). Aplicación de asfalto tibio con caucho reciclado. UPC.
- Badejo, A., et al. (2023). A review on the use of plastic waste as modifier in asphalt mixtures. *Applied Sciences*, 15(18), 9901.
- López-Ponte, W., & Huiman, A. (2021). Aprovechamiento de neumáticos reciclados en pavimentos asfálticos. Revista PGM.
- National Academies of Sciences. (2023). Evaluation of Post-Consumer Recycled Plastics in Asphalt Mixtures.
- Paz Cáceres, O., & Guerrero Castro, S. (2022). Caucho reciclado para mejorar propiedades mecánicas en pavimentos. Universidad Ricardo Palma.
- Silva Torres, S. (2020). Mezcla asfáltica con PET y caucho para mejorar resistencia a fatiga. Universidad Michoacana.

- Torres, J., & Ochoa, V. (2019). Modificación de asfalto mediante PET reciclado: revisión sistemática. *Ingeniería y Competitividad*.
- Tighe, S. (2010). Rubber pavements: performance and sustainability. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22(8), 788–797.