

Desarrollo de un proceso metodológico para la sostenibilidad en carreteras: Incorporación de residuos plásticos en pavimentos

Development of a Methodological Process for Sustainability on Roads: Incorporation of Plastic Waste into Pavements

David Alonso Sepúlveda Valdez¹ , Julio Alberto Calderón Ramírez¹ , Itzel Núñez López¹ , Ricardo Cota Ramírez¹ 

¹Civil Engineering Laboratory, Department of Civil Engineering, Engineering Faculty, Autonomous University of Baja California, 21360 Mexicali, México

Cómo citar

D. A. Sepúlveda Valdez, J. A. Calderón Ramírez, I. Núñez López, and R. Cota Ramírez. "Desarrollo de un proceso metodológico para la sostenibilidad en carreteras: Incorporación de residuos plásticos en pavimentos," Ingeniería: ciencia, tecnología e innovación, vol. 12, 2025.

<https://doi.org/10.26495/q0q4s564>

Información del artículo

Recibido: 06/05/2025

Aceptado: 14/11/2025

Publicado: 01/12/2025

Autor correspondencia

David Alonso Sepúlveda Valdez
sepulveda.david@uabc.edu.mx

Este artículo es de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la Licencia Creative Commons Attribution (CC BY)



RESUMEN: La acumulación de residuos plásticos representa un reto ambiental que afecta a la industria de la construcción, especialmente en la pavimentación de carreteras. En este contexto, se exploró la incorporación de plásticos reciclados, como el polietileno de alta densidad (HDPE), para desarrollar pavimentos más sostenibles. El **objetivo** de esta investigación fue diseñar y evaluar una **metodología** replicable para comparar mezclas asfálticas tradicionales con mezclas modificadas con HDPE. Para ello, se elaboraron mezclas mediante el método seco y se sometieron a pruebas de desempeño, incluyendo gravedad específica bruta (GMB), gravedad específica teórica máxima (GMM), porcentaje de vacíos y prueba de la rueda cargada de Hamburg. Los **resultados** mostraron que las mezclas con HDPE presentaron menor deformación y mantuvieron niveles de porosidad similares a las mezclas convencionales, aunque con ligera disminución en la densidad. Se **concluye** que la metodología propuesta facilita la integración de plásticos reciclados en pavimentos, contribuyendo a la reducción de residuos y a la mejora de la durabilidad de la infraestructura vial.

Palabras clave: mezclas asfálticas modificadas, metodología de diseño de pavimentos, pavimentos flexibles sostenibles, resistencia a la deformación, gestión de residuos plásticos.

ABSTRACT: The accumulation of plastic waste represents an environmental challenge that affects the construction industry, especially in road paving. In this context, the incorporation of recycled plastics, such as high-density polyethylene (HDPE), was explored to develop more sustainable pavements. The **aim** of this research was to design and evaluate a replicable **methodology** to compare traditional asphalt mixtures with mixtures modified with HDPE. To this end, mixtures were prepared using the dry method and subjected to performance tests, including bulk specific gravity (GMB), maximum theoretical specific gravity (GMM), air void content, and the Hamburg wheel tracking test. The **results** showed that mixtures with HDPE exhibited less deformation and maintained porosity levels similar to conventional mixtures, although with a slight decrease in density. It is concluded that the proposed methodology facilitates the integration of recycled plastics into pavements, contributing to waste reduction and improved durability of road infrastructure.

Keywords: Modified asphalt mixture, pavement design methodology, sustainable flexible pavements, deformation resistance, plastic waste management.

1. INTRODUCCIÓN

Con el paso del tiempo la industria de la construcción ha llegado a enfrentar desafíos significativos relacionados con la sostenibilidad y la gestión de residuos, en este caso los plásticos. La creciente acumulación de residuos plásticos ha generado una preocupación global esto debido a su creciente impacto negativo en el medio ambiente, como la contaminación de océanos y su estancia en la naturaleza durante siglos. Esta clase de problemáticas, combinadas con las necesidades de mejorar la calidad y durabilidad de los pavimentos, ha llevado a la exploración de nuevas áreas y soluciones sostenibles en la construcción y la ingeniería de pavimentos [1], [2]. El uso de ciertos residuos plásticos reciclados, tales como el polietileno de alta densidad (HDPE) o el Tereftalato de polietileno (PET), ha emergido como una alternativa interesante para modificar las propiedades de las mezclas asfálticas con la finalidad de reducir el impacto ambiental de estos residuos [2].

Existen diferentes tipos de plásticos que pueden llegar a ser reciclados tal como se muestra en la Tabla 1, estos pueden ser utilizados en la incorporación de mezclas asfálticas. Uno de los plásticos más comunes en investigaciones son el polietileno tereftalato (PET), esto debido a la gran cantidad de este material. Cada tipo de plástico tiene características distintas que pueden influir en las propiedades de la mezcla asfáltica, como la resistencia al desgaste y la durabilidad [3], [4].

Tabla 1. Tipos de plásticos. Fuente: elaboración propia.

TIPO DE PLÁSTICO	Polietileno tereftalato (PET o PETE)	Polietileno de alta densidad (HDPE)	Polivinilo cloruro (PVC)	Polietileno de baja densidad (LDPE)	Polipropileno (PP)	Poliestireno (PS)
SÍMBOLO						

La idea del uso de plásticos reciclados en la creación de pavimentos no es un concepto nuevo, estudios previos han demostrado que la incorporación de materiales plásticos reciclados en mezclas asfálticas puede mejorar la resistencia y durabilidad de los pavimentos, además de contribuir a la reducción de residuos plásticos. Ciertas investigaciones como las de [5], han señalado mejoras significativas en la estabilidad térmica y resistencia al desgaste de las mezclas asfálticas modificadas con plásticos. Sin embargo, la investigación sobre la optimización de concentraciones y la compatibilidad de los plásticos reciclados con otros componentes de las mezclas aún es limitada, lo que plantea desafíos técnicos y prácticos en su implementación a gran escala [2], [6].

Diversos estudios han abordado la incorporación de plásticos reciclados en mezclas asfálticas, con enfoques variados en cuanto a metodologías y materiales utilizados. En este sentido, encontraron que la utilización de plásticos reciclados podría llegar a mejorar la resistencia a la deformación permanente y la durabilidad de las mezclas, aunque esto dependerá de distintos factores como el tipo de plástico o la proporción utilizada. Por su parte [5], destacaron que el uso de plásticos reciclados como HDPE en mezclas asfálticas puede ser eficaz para reducir la viscosidad del asfalto, lo que facilita la compactación. Además [6], señalan que el reciclaje de plásticos en asfaltos mejora la sostenibilidad del pavimento, mientras que [7], concluyen que el reciclaje de plásticos en mezclas asfálticas no solo reduce la demanda de recursos naturales, sino que también ayuda a optimizar las propiedades mecánicas del pavimento.

Esta clase de estudios se basan en teorías sobre la sostenibilidad en la construcción, especialmente en la integración de materiales reciclados en el proceso constructivo. Según la teoría de la economía circular, promovida por la [8], el reciclaje de plásticos puede llegar a contribuir a la reducción de la demanda de recursos naturales y promueve la reutilización de materiales en este sector constructivo.

Actualmente, no existe una metodología estandarizada y ampliamente aceptada para la comparación directa de mezclas asfálticas tradicionales con aquellas que incorporan materiales reciclados, especialmente cuando se consideran las condiciones y características específicas de cada región. Aunque existen estudios que evalúan el desempeño de pavimentos modificados con plásticos reciclados, estos generalmente se enfocan en escenarios muy particulares o no incluyen una evaluación exhaustiva que permita establecer comparaciones claras con las mezclas convencionales [9]. Además, la variabilidad en las condiciones climáticas, el tipo de tráfico y las propiedades locales de los agregados hace que la implementación de metodologías de comparación universalmente aplicables sea un desafío. Esta clase de falta de un enfoque comparativo adecuado llega a limitar la capacidad de los ingenieros y gestores de infraestructura

para adoptar prácticas sostenibles basadas en estos recursos, ya que no se cuenta con un método específico que te indique si llega a suceder una integración efectiva de las mezclas.

Además, estudios recientes han demostrado que el uso de residuos plásticos como botellas PET en mezclas asfálticas de tipo warm-mix asphalt puede mejorar sus propiedades mecánicas, incluso a temperaturas de mezcla reducidas, sin comprometer su durabilidad [10]. Asimismo, investigaciones experimentales que incorporan polietileno de baja densidad (LDPE) y aditivos como Sasobit indican mejoras en la estabilidad Marshall, lo cual fortalece la resistencia a deformaciones permanentes [11]. También se ha comprobado que el uso de polímeros y nano-sílice en mezclas cálidas (warm-mix) incrementa la resistencia al agrietamiento por fatiga y al ahuellamiento [12], aportando un respaldo técnico adicional a la viabilidad de integrar plásticos reciclados en pavimentos.

El objetivo de este estudio fue desarrollar y evaluar una metodología comparativa para el diseño sostenible de pavimentos, mediante la incorporación de residuos plásticos reciclados en mezclas asfálticas. La propuesta se centra en generar una solución replicable que pueda ser aplicada en proyectos de infraestructura vial, buscando mejorar la resistencia de pavimentos y aborda el desafío de la contaminación por plásticos.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El propósito de este estudio se centró en evaluar una metodología replicable para el análisis de la viabilidad de incorporar materiales plásticos reciclados en diseños de pavimentos sostenibles tal como se muestra en la Figura 1. La metodología propuesta se centra en la comparación de 2 tipos de enfoques para el diseño de mezclas asfálticas: una mezcla tradicional sin la incorporación de plásticos reciclados y una mezcla modificada con plásticos reciclados, que puede incluir cualquier tipo de residuo plástico para su integración en pavimentos. Este enfoque se centra en la evaluación del desempeño de ambas mezclas, evaluando su comportamiento a través de distintas pruebas técnicas, con o sin la adición de los residuos. Esta metodología replicable busca ofrecer una solución a diferentes contextos, permitiendo su replicabilidad en diversas zonas, dependiendo de los plásticos disponibles para su integración.

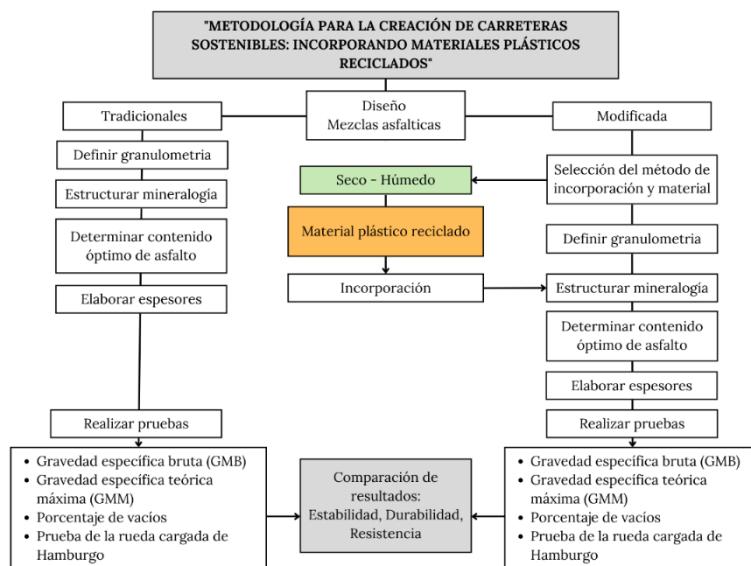


Figura 1. Metodología. Fuente: elaboración propia.

2.1 Métodos de mezcla asfáltica

Existen dos métodos principales para la creación de mezclas asfálticas: el método Marshall y el método Superpave. El método Marshall con el paso del tiempo ha sido utilizado tradicionalmente en el diseño de pavimentos y se centra en la determinación de la estabilidad y fluidez de la mezcla, siendo más adecuado para pavimentos convencionales sin modificaciones significativas en sus propiedades. Sin embargo, este método tiene limitaciones cuando se trata de incorporar aditivos o materiales reciclados, lo que dificulta su aplicación en la creación de pavimentos más sostenibles y

adaptados a nuevas tecnologías. En contraste, el método Superpave conlleva a un enfoque más avanzado y flexible, que nos permite la incorporación de diversos materiales reciclados, incluidos plásticos en las mezclas asfálticas sin comprometer la calidad del pavimento [13]. Este método se basa en una fórmula de gradación continua y realiza un análisis de la resistencia y durabilidad de las mezclas, incluyendo la evaluación de la deformación, el agrietamiento y la fatiga. Debido a su capacidad para integrar diferentes tipos de aditivos, como plásticos reciclados, el método Superpave es especialmente adecuado para la creación de pavimentos sostenibles, y es el enfoque utilizado en este estudio para comparar mezclas con y sin plásticos reciclados.

Como se muestra en la Tabla 2, se detallan las diferencias clave entre ambos métodos, lo que resalta la mayor flexibilidad y capacidad de adaptación del método Superpave para incorporar materiales reciclados en comparación con el método Marshall.

Tabla 2. Comparación entre métodos de creación de mezclas asfálticas. Fuente: elaboración propia.

CARACTERÍSTICAS	MÉTODO DE MEZCLA ASFÁLTICA SUPERPAVE	MÉTODO DE MEZCLA ASFÁLTICA MARSHALL
Selección del ligante.	Basada en el grado de desempeño, (PG).	Basada en el grado de penetración o viscosidad, (PEN, AC).
Diseño de la mezcla.	Fórmula de graduación continua.	Mezcla de tamaño máximo específico.
Pruebas del desempeño.	Evaluación de resistencias a la deformación, agrietamiento y fatiga.	Estabilidad y flujo.
Flexibilidad para los modificadores.	Alta, se permite incorporación de materiales reciclados y modificados.	Baja, menos adaptable a materiales modificados.

2.2 Métodos de incorporación de plásticos en mezclas asfálticas

Actualmente, los métodos más comunes y sencillos para la incorporación de plásticos reciclados en mezclas asfálticas son el proceso seco y el proceso húmedo. La diferencia entre estos radica en la forma en que se mezcla el plástico con el asfalto y los agregados. En el proceso seco, el plástico reciclado se puede incorporar de forma directa al agregado mineral antes de ser mezclado con el ligante asfáltico. Este proceso es más simple y económico, aunque puede resultar en una distribución menos homogénea del plástico en la mezcla. Por otro lado, el proceso húmedo implica fundir el plástico reciclado y mezclarlo con el ligante asfáltico antes de ser combinado con los agregados. Este método asegura una distribución más uniforme del plástico, pero puede involucrar un mayor costo energético y de equipamiento tal como se muestra en la Figura 2.

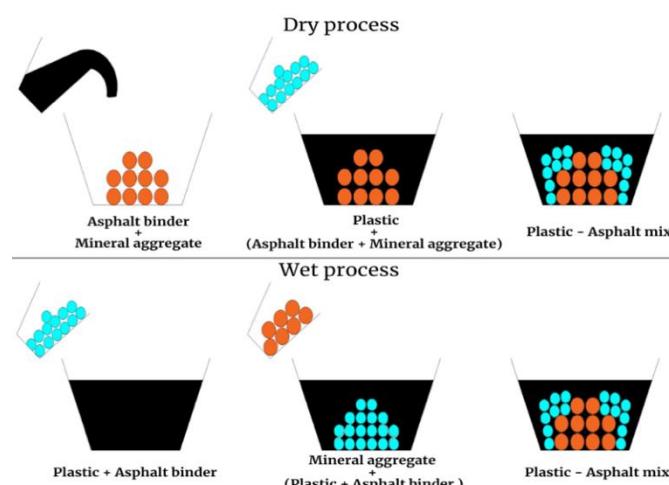


Figura 2. Proceso de incorporación de Plástico en Mezclas asfálticas. Fuente: elaboración propia.

2.3 Pruebas de desempeño

Para evaluar la viabilidad de esta metodología se trabajará con distintas pruebas de desempeño. Estas pruebas son fundamentales para comparar las propiedades de las mezclas con plásticos y sin plásticos, proporcionando datos cruciales para determinar si la adición de plástico mejora o

deteriora el comportamiento del pavimento. Las pruebas incluyen la Gravedad Específica Bruta (GMB), que mide la densidad de la mezcla asfáltica y su capacidad de compactación, y la Gravedad Específica Teórica Máxima (GMM), que nos ayuda a determinar la densidad máxima teórica de la mezcla, lo que es esencial para evaluar el rendimiento en condiciones extremas. También se realiza la prueba del Porcentaje de Vacíos, que evalúa la cantidad de aire en la mezcla, un factor clave para garantizar su durabilidad, y la Prueba de la Rueda Cargada de Hamburgo, que mide la resistencia de la mezcla a la deformación plástica bajo condiciones de tráfico pesado tal como se describen en la Tabla 3.

Tabla 3. Pruebas de desempeño para mezclas asfálticas.

PRUEBA	DESCRIPCIÓN	MÉTODO DE OBTENCIÓN DE RESULTADOS	EQUIPO NECESARIO
Gravedad Específica Bruta (GMB)	Mide la densidad de la mezcla asfáltica y su capacidad de compactación.	Se mide la densidad de la mezcla asfáltica y su capacidad de compactación, evaluando cuánto material hay en un determinado volumen de muestra compactada. Para esto, se pesa la muestra y se mide su volumen una vez que ha sido compactada en laboratorio.	Equipo de cilindro de desplazamiento y balanza de precisión.
Gravedad Específica Teórica Máxima (GMM)	Determina la densidad máxima teórica de la mezcla, útil para evaluar el rendimiento.	Se determina la densidad máxima teórica de la mezcla, lo cual es útil para evaluar su rendimiento. En este caso, se analiza la mezcla sin compactar, midiendo su masa y volumen para conocer cuán densamente se podrían empacar los materiales si no hubiera aire.	Equipos de medida de volumen , como el picnómetro.
Porcentaje de Vacíos (%Va)	Evalúa la cantidad de aire en la mezcla, crucial para la durabilidad.	Se evalúa la cantidad de aire presente en la mezcla, lo que es crucial para su durabilidad. Este valor se obtiene comparando la densidad real de la mezcla compactada con la densidad teórica máxima, permitiendo saber cuántos vacíos de aire hay en la estructura.	Equipo de compactación y medidor de volumen de vacío.
Prueba de la Rueda Cargada de Hamburgo	Mide la resistencia de la mezcla a la deformación plástica bajo condiciones de tráfico pesado.	Se mide la resistencia de la mezcla a la deformación plástica bajo condiciones similares al tráfico real, usando un equipo con una rueda cargada (rueda de Hamburgo). La muestra es sometida a cargas repetidas, y se observa cuánto se deforma permanentemente con el paso del tiempo.	Equipo de rueda cargada de Hamburgo (dispositivo específico para esta prueba).

Fuente: elaboración propia.

La realización de estas pruebas es crucial para asegurar que las mezclas asfálticas modificadas con plásticos reciclados sean viables y seguras para su uso en pavimentación. Estas pruebas no solo permiten comparar las mezclas tradicionales con las modificadas, sino que también ofrecen una forma estandarizada de evaluar el desempeño de las mezclas en cualquier lugar o zona. Esto hace que la metodología propuesta sea replicable, siempre que se realicen estas pruebas de manera estándar, garantizando que los resultados sean consistentes y comparables en diferentes condiciones locales. La comparación de los resultados obtenidos de las mezclas modificadas y no modificadas facilita la toma de decisiones sobre la viabilidad de los plásticos reciclados en pavimentos, contribuyendo al desarrollo de una infraestructura vial más sostenible y resiliente.

3. RESULTADOS

Para poner en práctica esta metodología, se elaboraron dos tipos de mezclas específicas: una con plástico HDPE y otra sin plástico, utilizando mezclas tradicionales. A continuación, se presentan los resultados obtenidos a partir de las pruebas realizadas sobre las mezclas asfálticas tradicionales y aquellas modificadas con plásticos reciclados, específicamente con diferentes concentraciones de polietileno de alta densidad (HDPE). Estas mezclas se prepararon siguiendo el método seco, tal como se detalla en la metodología propuesta, con el objetivo de determinar la viabilidad de utilizar

este tipo de plástico en las mezclas asfálticas. Como se observa en las gráficas siguientes, los resultados se enfocan en cuatro parámetros clave: el porcentaje de vacíos (%Va), la gravedad específica teórica máxima (GMM), la gravedad específica bruta (GMB) y la deformación bajo la prueba de la rueda cargada de Hamburgo.

3.1 Gravedad específica bruta (GMB)

La Figura 3, presenta la comparación de la gravedad específica bruta (GMB) entre las distintas mezclas. Al igual que con la gravedad específica teórica máxima (GMM), se observa que la mezcla tradicional presenta un valor más alto que las mezclas modificadas con HDPE. Esta diferencia refuerza la hipótesis de que el uso de plástico reciclado puede influir en la densidad de la mezcla asfáltica, aunque la variación no es significativa. La gravedad específica bruta es un parámetro crucial en el diseño de mezclas asfálticas, ya que proporciona información sobre la compactación y la densidad de la mezcla. Conocer este valor es fundamental para garantizar la durabilidad y la estabilidad de los pavimentos, ya que una mayor densidad generalmente está asociada con una mayor resistencia a la deformación y una mejor vida útil del pavimento.

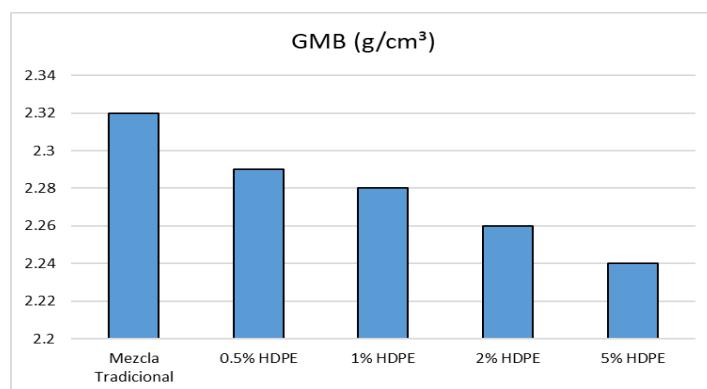


Figura 3. Resultados GMB. Fuente: elaboración propia.

3.2 Gravedad Específica Teórica Máxima (GMM)

La Figura 4, muestra los valores de la gravedad específica teórica máxima (GMM) para las distintas mezclas, observándose que la mezcla tradicional tiene un valor más alto que las modificadas con HDPE. A medida que aumenta la concentración de HDPE, la GMM disminuye, lo que sugiere una reducción en la densidad de la mezcla debido a la incorporación de plásticos reciclados. Esta prueba es fundamental para evaluar la calidad de las mezclas asfálticas, ya que proporciona una medida de la densidad y la compactación de la mezcla, lo que influye directamente en su resistencia y durabilidad. Una GMM más baja generalmente está asociada con menor resistencia al desgaste y mayor porosidad, lo que es importante considerar para asegurar el desempeño óptimo de los pavimentos.

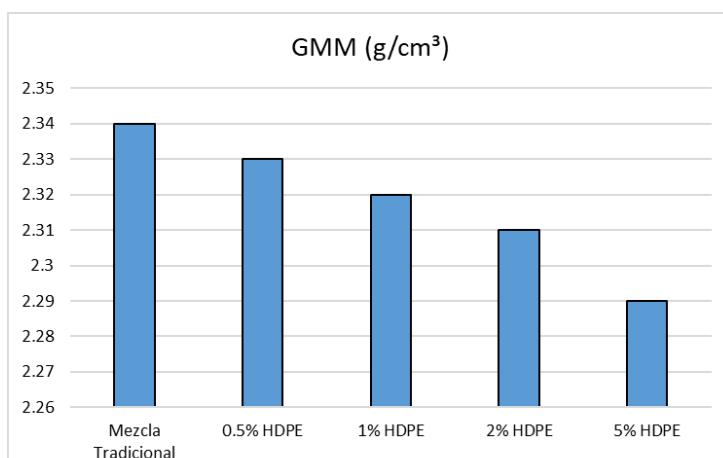


Figura 4. Resultados GMM. Fuente: elaboración propia.

3.3 Porcentaje de Vacíos (%Va)

La Figura 5 muestra la comparación del porcentaje de vacíos (%Va) entre las mezclas tradicionales y las modificadas con diferentes concentraciones de HDPE (0.5 %, 1 %, 2 % y 5 %). Se observa que las mezclas modificadas con plásticos reciclados presentan un comportamiento similar al de la mezcla tradicional, con un ligero aumento en los vacíos a medida que la concentración de HDPE aumenta. Esto indica que el uso de plásticos reciclados no tiene un impacto negativo significativo en la porosidad de la mezcla asfáltica. El porcentaje de vacíos es un parámetro clave en el diseño de pavimentos, ya que influye en la compactación y en la resistencia de la mezcla. Un porcentaje adecuado de vacíos es necesario para evitar deformaciones prematuras y garantizar la durabilidad del pavimento.

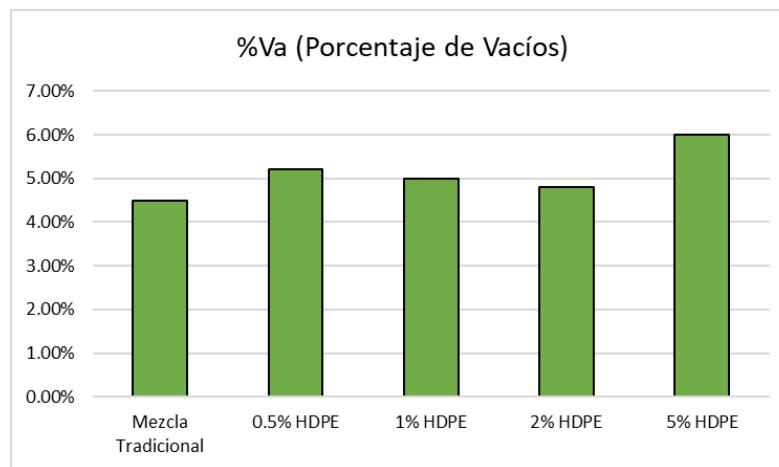


Figura 5. Resultados %Va. Fuente: elaboración propia.

3.4 Deformación

La Figura 6 muestra los resultados de la deformación de las mezclas bajo pruebas de carga. Las mezclas modificadas con HDPE presentan una menor deformación en comparación con la mezcla tradicional, especialmente cuando la concentración de HDPE aumenta. Este comportamiento sugiere que la incorporación de plásticos reciclados mejora la resistencia de la mezcla a la deformación, lo que podría ser beneficioso para pavimentos sometidos a cargas pesadas y condiciones de tráfico intenso. La prueba de deformación es esencial para evaluar la capacidad de la mezcla para resistir la compresión y el desgaste, lo que influye directamente en la durabilidad y el rendimiento del pavimento a largo plazo.

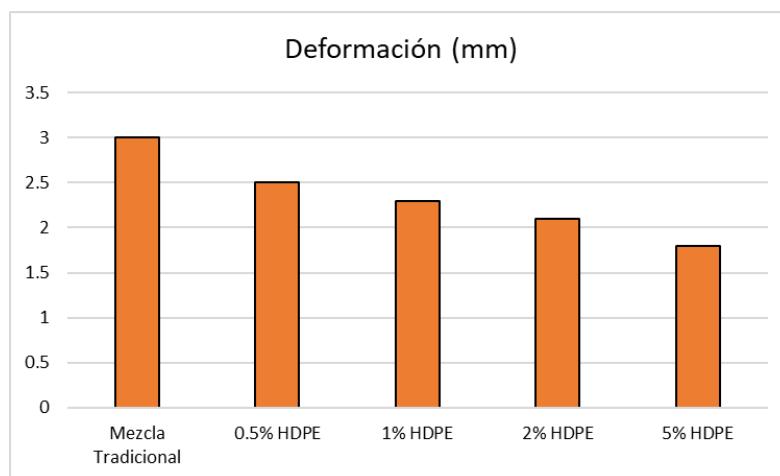


Figura 5. Resultados de la Deformación. Fuente: elaboración propia.

sobre la viabilidad de los plásticos reciclados en pavimentos, contribuyendo al desarrollo de una infraestructura vial más sostenible y resiliente.

4. DISCUSIONES

Los resultados obtenidos demuestran que la incorporación de plásticos reciclados, específicamente HDPE, mejora la resistencia de las mezclas asfálticas, evidenciado por la reducción de deformación bajo carga Figura 5. Este comportamiento coincide con estudios previos que reportan mejoras en estabilidad y durabilidad al incorporar plásticos reciclados; sin embargo, a diferencia de lo reportado por [5], en regiones húmedas, en este estudio, realizado en un clima semiárido, no se detectó un deterioro significativo en la porosidad ni en la resistencia. Este hallazgo sugiere que las condiciones ambientales pueden influir notablemente en el desempeño final de las mezclas, aportando evidencia nueva para contextos poco documentados.

La disminución observada en la gravedad específica bruta y teórica máxima Figura 3 y 4 indica que el HDPE modifica la densidad de la mezcla. [7], señalaron que una menor densidad podría comprometer la resistencia, pero en este trabajo se comprobó que, pese a la reducción de densidad, la resistencia a la deformación aumentó. Esto podría atribuirse a una mejor distribución de las partículas plásticas en la matriz asfáltica, lo que refuerza la idea de que una menor densidad no siempre implica menor desempeño estructural. No obstante, concentraciones elevadas de HDPE deben manejarse con cuidado para evitar aumentos excesivos de porosidad que afecten la durabilidad.

En comparación con valores históricos de mezclas tradicionales en la misma región, las mezclas con HDPE mostraron un comportamiento más favorable frente a cargas repetidas, lo que refuerza su potencial en vías de alto tránsito. Desde un punto de vista práctico, estos resultados podrían traducirse en menor frecuencia de mantenimiento y en una contribución directa a la gestión de residuos plásticos, alineándose con los principios de sostenibilidad en infraestructura vial. La metodología propuesta, al ser replicable, ofrece a los ingenieros una herramienta para integrar residuos plásticos en pavimentos de forma controlada y estandarizada.

Como limitación, se destaca que las pruebas se realizaron en laboratorio, utilizando un solo tipo de plástico y un método de incorporación. Futuros estudios deberían considerar evaluaciones en campo, bajo diferentes condiciones climáticas y de tráfico, así como la comparación con otros polímeros reciclados y técnicas de integración. Esto permitirá validar la durabilidad de las mezclas y optimizar las concentraciones de material reciclado para distintos contextos regionales.

5. CONCLUSIONES

Este artículo ha presentado una metodología replicable para el diseño de pavimentos sostenibles mediante la incorporación de residuos plásticos reciclados en mezclas asfálticas. La comparación entre diferentes concentraciones de plásticos reciclados y las mezclas tradicionales utilizadas en regiones semiáridas ha demostrado que el uso de plásticos, en particular el HDPE, puede mejorar la resistencia y durabilidad de los pavimentos. A través de las pruebas realizadas, se ha evidenciado que la metodología no solo facilita la incorporación de plásticos reciclados en las mezclas, sino que también promueve la sostenibilidad al reducir la cantidad de residuos plásticos, contribuyendo a mitigar el impacto ambiental de estos materiales.

La propuesta de este modelo metodológico ofrece una solución viable y replicable para la gestión sostenible de residuos en la industria de la construcción de carreteras. Su aplicabilidad en proyectos de infraestructura vial podría tener un papel en futuros proyectos de pavimentación, abriendo nuevas líneas de investigación para optimizar las concentraciones de plásticos reciclados y adaptarlas a diversas condiciones regionales y climáticas. Así, este estudio no solo aborda el desafío de la contaminación plástica, sino que también establece un marco para el desarrollo de pavimentos más resistentes, duraderos y sostenibles, avanzando hacia una infraestructura vial más respetuosa con el medio ambiente.

6. ACERCA DEL ARTÍCULO

Financiamiento: Este trabajo no contó con financiación externa o patrocinio institucional.

Agradecimientos: Los autores agradecen a las instituciones académicas y a los laboratorios que brindaron apoyo técnico para el desarrollo de esta investigación.

Contribuciones de autoría:

Todos los autores contribuyeron de manera equitativa al desarrollo de la investigación, redacción y revisión del manuscrito.

Declaración del investigador principal: Declaro que asumo la responsabilidad total por el contenido, la integridad académica y los resultados presentados en este trabajo, garantizando su rigor científico y cumplimiento ético.

Conflictos de interés: Los autores declaran que no existen conflictos de interés de tipo personal, académico, comercial o financiero que puedan haber influido en los resultados o interpretación de los datos presentados en este artículo.

REFERENCIAS

- [1] J. K. Contreras Huaylla, and J. M. Ríos Mariños, "Uso de materiales reciclables en el asfalto para pavimento rurales: una revisión sistemática entre 2009-2019," Tesis de grado, Universidad Privada del Norte, Trujillo, Perú, 2021. <https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/27452>
- [2] G. Hao *et al.*, "Long-term performance of porous asphalt pavement incorporating recycled plastics," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 212, p. 107979, Jan. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107979>
- [3] J. Zhu, M. Saberian, J. Li, E. Yaghoubi, and M. T. Rahman, "Sustainable use of COVID-19 discarded face masks to improve the performance of stone mastic asphalt," *Constr. Build. Mater.*, vol. 398, p. 132524, Sep. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132524>
- [4] F. Saberi.K, M. Fakhri, and A. Azami, "Evaluation of warm mix asphalt mixtures containing reclaimed asphalt pavement and crumb rubber," *J. Clean. Prod.*, vol. 165, pp. 1125–1132, Nov. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.079>
- [5] A. J. Rodrigues da Silva, A. E. de Figueiredo Lopes, O. de Medeiros Melo, A. M. Gonçalves Duarte, D. B. Costa, and R. K. Batista de Lima, "Effects of using waste high-density polyethylene on the rheological, mechanical, and thermal performance of asphalt materials," *Environ. Dev. Sustain.*, vol. 26, no. 7, pp. 16683–16710, 2023. <https://doi.org/10.1007/s10668-023-03306-w>
- [6] J. Wang, Q. Li, K. Huang, D. Ge, and F. Gong, "Sustainable recycling techniques of pavement materials", *Materials (Basel)*, vol. 15, no. 24, p. 8710, Dec. 2022. <https://doi.org/10.3390/ma15248710>
- [7] L. You *et al.*, "Review of recycling waste plastics in asphalt paving materials," *J. Traffic Transp. Eng. (Engl. Ed.)*, vol. 9, no. 5, pp. 742–764, Oct. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2022.07.002>
- [8] Ellen MacArthur Foundation, "The Circular Economy: A new paradigm for sustainable growth," ellenmacarthurfoundation.org. Accessed: Sep. 14, 2022. [Online.] Available: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org>
- [9] M. Mottaghi, "Performance Properties of Recycled Plastic Modified (RPM) Asphalt Mixtures Added via the Dry Method," Ph.D. dissertation, Civil and Environmental Engineering, Auburn University, Auburn, United States, 2024. <https://etd.auburn.edu/handle/10415/9488>
- [10] A. M. Mosa, I. T. Jawad, and L. A. Salem "Modification of the Properties of Warm Mix Asphalt Using Recycled Plastic Bottles," *Int. J. Eng.*, vol. 31, no. 9, pp. 1514-1520, Sep. 2018. https://www.ije.ir/article_73287.html
- [11] G. D. Singh, V. K. Sharma, B. Sangma, R. Kumar, K. Senthil, and A. P. Singh, "Experimental study on bituminous concrete pavement using low density polyethylene and sasobit," *Mater. Today*, vol. 52, no. Part 3, pp. 2109–2114, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.387>
- [12] H. A. Obaid, "Characteristics of warm mixed asphalt modified by waste polymer and nano-silica," *Int. J. Pavement Res. Technol.*, vol. 14, no. 3, pp. 397–401, May. 2021. <https://doi.org/10.1007/s42947-020-0061-9>
- [13] I. M. Asi, "Performance evaluation of SUPERPAVE and Marshall asphalt mix designs to suite Jordan climatic and traffic conditions," *Constr. Build. Mater.*, vol. 21, no. 8, pp. 1732–1740, Aug. 2007. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.05.036>