

Fecha de recepción: 15/03/2023

Fecha de aprobación: 19/05/2023

## Caucho granulado y su influencia en la estabilidad, flujo y vacío de una mezcla asfáltica

Kevin Jonathan Mora Onofre<sup>1</sup>, Carlos Luis Valero Fajardo<sup>2</sup>

### Resumen

El presente artículo es resultado del Proyecto de Investigación titulado *Tecnologías Innovadoras de un Pavimento Flexible, Sustentable y Ecoeficiente código IC-ULVR-22-78*. La experimentación con mezcla asfáltica y caucho reciclado fue motivada por la necesidad de generar un pavimento flexible resistente y duradero que mitigue el estrés urbano generado por la disminución de los niveles de servicio e incidencia de las lluvias en la durabilidad de las vías urbanas. La investigación somete a prueba la mezcla asfáltica tradicional con la incorporación de caucho reciclado para experimentar el comportamiento físico-mecánico mediante el ensayo de laboratorio Marshall y supone la obtención de un producto técnico-ambiental mínimo viable, para el tráfico liviano urbano, todo esto con base en la innovación tecnológica. La metodología declara una investigación de tipo experimental con soporte técnico, teórico y científico. El método inductivo inició con la manipula-

ción de la variable caucho reciclado que posibilitó la medición de efectos en las variables estabilidad, flujo y vacío, con el enfoque cuantitativo. El análisis y discusión de resultados revela que, con la adición de uno por ciento de caucho reciclado, la mezcla presenta mejor estabilidad que la tradicional. Por otro lado, en cuanto a los parámetros flujo y vacío se distingue el no cumplimiento de rangos normados; sin embargo, el porcentaje de vacíos que se obtiene en la mezcla no tradicional, atribuye características porosas que motivan a distinguirla con propiedades impermeabilizantes, mismas que son relevantes considerando la requerida durabilidad de los pavimentos flexibles urbanos. El estudio es útil porque genera una contribución en la solución del problema identificado, así como también, motiva un balance de impactos ambientales generados con la construcción de vías urbanas.

**Palabras clave:** Asfalto, experimento, medio ambiente, carretera, desarrollo sostenible.

<sup>1</sup>Kevin Jonathan Mora Onofre. Prefectura de los Ríos. Babahoyo-Ecuador, <https://orcid.org/0009-0009-8896-4464>, [kevin.mora@losrios.gob.ec](mailto:kevin.mora@losrios.gob.ec)

<sup>2</sup>Carlos Luis Valero Fajardo. Universidad Laica VICENTE ROCAFUERTE de Guayaquil, <https://orcid.org/0000-0003-3292-93271>, [cvalerof@ulvr.edu.ec](mailto:cvalerof@ulvr.edu.ec)

## Abstract

This article is the result of the Research Project entitled *Innovative Technologies for a Flexible, Sustainable and Eco-efficient Pavement* code IC-ULVR-22-78. The experimentation with asphalt mix and recycled rubber was motivated by the need to generate a resistant and durable flexible pavement that mitigates the urban stress generated by the decrease in service levels and the incidence of rainfall on the durability of urban roads. The research tests the traditional asphalt mixture with the incorporation of recycled rubber, to experiment with the physical-mechanical behavior through the Marshall laboratory test and involves obtaining a minimum viable technical-environmental product for urban light traffic; All this based on technological innovation. The methodology declares experimental research with technical, theoretical and scientific support, the inductive method began with the manipulation of the recycled rubber variable that made it possible to measure effects on the stability, flow and vacuum variables, with the quantitative approach. The analysis and discussion of results reveals that with the addition of one percent recycled rubber, the mixture presents better stability than the traditional one, on the other hand, in terms of flow and vacuum parameters, non-compliance with normative ranges is distinguished; However, the percentage of voids obtained in the non-traditional mixture, attributes porous characteristics that motivate to distinguish it with waterproofing properties, which are relevant considering the required durability of flexible urban pavements. The study is useful because it generates a contribution in the solution of the identified problem, as well as motivates a balance of environmental impacts generated with the construction of urban roads.

**Keywords:** Asphalt, experiment, environment, road, sustainable development.

## Introducción

Los pavimentos flexibles presentan fallas superficiales que, de alguna manera, impactan desfavorablemente al entorno social, económico y medioambiental de una nación (Ríos et al., 2020), esto revela la necesidad de implementar acciones oportunas que disminuyan los costos de operación, la operatividad y la inseguridad de las vías de comunicación; en aras de promover el desarrollo sostenible del territorio urbano.

Gaertner et al. (2019) declaran que los daños que se presentan en la superficie de un pavimento flexible, son a causa de la fatiga producida por el tránsito vehicular, sin embargo; se sostiene la idea que con el paso de los años la tecnología automotriz ha avanzado a pasos agigantados, logrando tener vehículos con mayor capacidad

de cargar, lo que permiten alegar que estos producirían mayores esfuerzos en las carpetas de rodadura.

Los métodos mecanicistas tradicionales que regulan el diseño y construcción de una mezcla asfáltica, consideran una capa continua de soporte, al igual que, consideran características vehiculares diferentes a las actuales (Orduz & Pineda, 2017), a nivel de Latinoamérica según Martínez et al. (2018) más de una década se ha buscado la sostenibilidad en las mezclas asfálticas con la adición de caucho reciclado y distingue al Instituto de Desarrollo Urbano de Colombia, como un importante ente motivador de la implementación de esta tecnología, en las obras públicas de pavimentación flexible de Bogotá. Por otro lado, a nivel de Ecuador el pavimento flexible ha presentado pocos cambios en cuanto a su proceso de producción y en su régimen

normativo, pues no se distingue penalizaciones que motiven la generación de mejoras en la mezcla asfáltica.

Paredes et al. (2022) con soporte en la revisión documental que realizaron respecto a las innovaciones tecnológicas del pavimento flexible, permite reconocer que, en la última década la academia ha demostrado un gran interés por innovar con mejoras físicas y mecánicas frente al visible problema que presentan las carpetas asfálticas, es por lo expuesto que resulta importante abordar el tema “experimentación con mezcla asfáltica y caucho reciclado” y se justifica con la sustentada necesidad de mejora técnica y medioambiental.

El problema que identifica el presente artículo de investigación es la disminución de la calidad de los pavimentos flexibles, pero también se enfoca en la remediación ambiental, por lo que trasciende de la sostenibilidad a la sustentabilidad, con el objeto de buscar una solución integral, mediante la innovación tecnológica con soporte en la experimentación, teóricos y empíricos.

Ochoa et al. (2018), reconocen que “en la actualidad el cambio de paradigma en temas ambientales ha suscitado grandes innovaciones tecnológicas y cambios en algunos procesos productivos con objetivos sustentables” (p. 2), por lo que resulta muy atinado innovar en las mezclas asfálticas con residuos que al no ser usados representan una carga contaminante para el medio ambiente, en este sentido el uso del caucho reciclado como materiales de construcción representan un importante aporte en la conservación de la naturaleza asegurando de esta manera que las próximas generaciones también puedan disfrutar de sus beneficios.

La construcción de vías de comunicación y con mayor énfasis en las urbanas generan impactos ambientales negativos, en especial los pavimentos flexibles debido al uso del bitumen asfalto, que es un derivado del petróleo y es considerado como una sustancia con peligros graves para la salud y el medio ambiente (Fundación Laboral de la Construcción, s.f.), a pesar de esto y según es la opción más utilizada a nivel internacional Güereca et al. (2014) revelan que el 95% de las vías de comunicación de México son de carpeta asfáltica.

Los impactos ambientales que generan los pavimentos flexibles por el uso del asfalto, es más contaminante que el uso del hormigón en el pavimento rígido. La inclinación por el uso del pavimento flexible en los proyectos viales es incentivada por el costo inicial que es considerablemente menor al del pavimento rígido, sin embargo, el ahorro inicial se pierde con los mantenimientos, los cuales según León y Mejía (2020) producirían afectaciones en la calidad del aire y con esto en el ambiente.

Los perjuicios no solo son ambientales, el ahorro inicial que brinda esta opción de pavimento, no cubre los gastos que se presentan a causa de los precoces daños, que motivan los no planificados y prematuros mantenimientos; esto sin duda alguna genera un problema social urbano, debido a los inconvenientes de tránsito, como por ejemplo los congestionamientos, el aumento de los tiempos de viajes y los daños vehiculares, que se suscitan durante la ejecución de las necesarias y costosas reparaciones.

Los impactos económicos del engañoso pavimento flexible son relevantes, debido a que al considerar los mantenimientos del pavimento flexible su costo total superaría

al del pavimento rígido, es decir los proyectos viales tendrían un ahorro inicial que es pagado con intereses durante sus periodos de diseño. Por lo expuesto, se justifica la necesidad de un pavimento sustentable que brinde beneficios sociales, económicos y medioambientales.

La ecoeficiencia en los pavimentos flexibles, en los últimos 5 años ha sido un tema de interés para la comunidad científica, Adrianzen et al. (2022) realizaron una investigación documental con soporte en la revisión de 50 artículos publicados entre los años 2015 y 2022, en revistas científicas indexadas en la base de datos de impacto mundial Scopus y revela la necesidad de mejorar y atribuir ecoeficiencia el tradicional pavimento flexible. Los investigadores alegan que esta necesidad fue impulsada por los objetivos de desarrollo sostenibles.

Los prematuros daños que presenta el tradicional pavimento flexible generan malestar en la vida diaria del ciudadano urbano, debido a que, estos disminuyen la serviciabilidad de la vía, así como también, con el mantenimiento de esta se contribuye a la generación de congestionamiento, lo cual se considera afecta a la satisfacción en conjunta de las necesidades que responden a la calidad de vida del ser humano dentro de una sociedad. Las llantas desechadas forman parte de la lista de residuos contaminantes, León et al. (2020), usan estos polímeros como aditivo de la mezcla asfáltica y revelan mejoras en cuanto a las características mecánicas, basado en el aumento de la estabilidad y la reducción de pérdida al desgaste, lo cual sin duda motiva a indagar sobre dicho comportamiento, mediante la puesta de la investigación con los recursos propios de Ecuador, a fin de comprobar la aplicabilidad de la novedosa tecnología en aras de liberar de cargas

contaminante al medio ambiente, como también contribuir al desarrollo sostenible de la nación.

La contaminación ambiental es uno de los más grandes problemas de la sociedad, condición que requiere la propuesta de urgentes alternativas que brinden una efectiva solución, son muchos los desechos que se generan, como también, los que se reciclan y reutilizan, en demás medios o recursos que benefician a la sociedad y la humanidad, como ejemplo fehaciente se distinguen las botellas plásticas que son recicladas y transformadas en fibras para fabricar: bolsos, ropa, alfombras, tuberías, juguetes etc., que con el paso del tiempo se han propuesto y en la práctica aceptado, con la producción y uso masivo (Valero et al., 2022).

El objetivo de la investigación es experimentar los efectos físicos y mecánicos que se producen en una mezcla asfáltica, al incorporar caucho de llanta reciclada y la presunción del impacto ambiental que generaría el nuevo pavimento flexible, todo esto mediante ensayos de laboratorio, así como también la dosificación del innovador y sustentable material de construcción por medio de la evaluación comparativa de resultados obtenidos. El planteamiento hipotético supone comprobar que al incorporar caucho reciclado de forma granulada se tendría mejoras físicas y mecánicas en la mezcla asfáltica, de tal manera que se produzca una contribución en la generación de un pavimento flexible no tradicional por medio de un producto técnico-ambiental mínimo viable, que motive un balance de impactos ambientales generados con la construcción de vías urbanas, todo esto en aras de asegurar el bienestar de la humanidad en su presente y venideras generaciones.

El método Marshall es inductivo porque partió de primicias y particularidades reveladas al incorporar caucho reciclado en la tradicional mezcla asfáltica, lo cual posibilitó el logro de conclusiones argumentativas elaboradas en base a lo observado. La investigación es de tipo experimental correlacional, porque examina el comportamiento de la mezcla asfáltica por medio de la experimentación y manipulación de la variable independiente caucho reciclado y compara los resultados con parámetros tradicionales. Los efectos de la experimentación fueron medidos en las variables dependientes estabilidad, flujo y vacío, mediante un enfoque cuantitativo que figuró como el principal insumo de la comprobación de hipótesis, que supone que al incorporar caucho reciclado en la mezcla asfáltica se tendría mejoras físicas y mecánicas. La técnica fue el experimento y los instrumentos de investigación fueron los equipos y formatos que permitieron generar y recolectar la información durante el ensayo de laboratorio. El muestreo es de tipo no probabilístico porque delimita la muestra a conveniencia del método, tres briquetas por cada porcentaje de caucho reciclado experimentado. El estudio fue realizado desde el 7 de enero del 2022 hasta el 24 de marzo del 2023.

### Ensayos de laboratorio

El presente apartado tiene por objetivo explicar los procedimientos realizados durante la experimentación con el método Marshall en la obtención de las mezclas asfálticas. El experimento inició con caracterización de los agregados gruesos y finos, lo cual fue posible con el reconocimiento de los distintos diámetros de partículas que los conforman, esto permitió distinguir los requeridos ajustes granulométricos que se debían aplicar en aras de cumplir con los

parámetros normativos de una mezcla asfáltica tradicional.

Los agregados fueron sometidos al ensayo de la abrasión de los ángeles para medir su resistencia al desgaste, evento seguido se determinaron los pesos unitarios clasificándolos como: 1) Agregado grueso  $\frac{3}{4}$  de pulgada, 2) Agregado grueso  $\frac{3}{8}$  de pulgada y 3) Agregado fino las partículas, cuyo diámetro es menor a 2 milímetros y que representan las arenas, para luego determinar sus porcentajes de humedad y continuar con la verificación de degradación por medio de un proceso de tamizado, en cumplimiento con lo especificado en la Ley de Caminos de Ecuatoriana.

Se realiza el proceso de tamizado, para esto se consideró para la muestra  $\frac{3}{4}$ ,  $\frac{3}{8}$ , y arena los tamices normados por ASTM D-422:  $\frac{3}{4}$ ,  $\frac{1}{2}$ , 4, 8, 50, y 200. Este proceso consiste en la obtención de los volúmenes de partículas retenido en los distintos tamices, con los cuales se determina mediante cálculos los porcentajes pasantes por cada tamiz o tamaño de partícula para determinar los ajustes requeridos en aras de cumplir con las especificaciones normadas.

Se determinó el correspondiente peso del bitumen asfalto para lograr los porcentajes 5.5%, 6%, 6.5% y 7% que representaron las cantidades adherentes en la conformación de briquetas, que en función de lo especificado en el método Marshall, se tuvo que realizar tres unidades por cada porcentaje de asfalto. Los agregados fueron calentados a una temperatura de 160 °C y el asfalto a 140 °C, condiciones que permitieron realizar la mezcla asfáltica.

La mezcla asfáltica fue separada por partes, una para la realización del ensayo Rice y otra para la elaboración de las briquetas

que se colocaron por capas y en un recipiente de 87,3 mm de altura y 101,6 mm de diámetro; collarín de 69,8 mm de altura y 104,8 mm de diámetro. La mezcla al tiempo que se aplicó 25 golpes para la requerida compactación utilizando una espátula de borde redondeado.

Posterior al vertido de la mezcla, se usa un pistón de 4536 g por caída libre desde una altura de 457,2 mm, para compactar con 75 golpes por cada cara de la briqueta. Posterior a la compactación de las briquetas, estas se retiran del molde con la ayuda de un recipiente con agua, elaborando 3 briquetas por cada porcentaje de caucho reciclado. Elaboradas las briquetas, fueron pesadas en una balanza digital y luego depositadas en un recipiente con agua a temperatura 25°C para la saturación de las mismas, las briquetas debían estar identificadas con marcas de acuerdo al porcentaje de caucho reciclado que contenían.

En el proceso de compactado de una mezcla asfáltica el peso permanece constante mientras que la variable que presenta cambios es el volumen, pues este disminuye mientras se desarrolla la compactación; es reconocido como la disminución de vacíos que es expulsado durante el proceso de compactación, a consecuencia de mantener un peso constante y disminuir el volumen de la mezcla asfáltica, es el aumento de la densidad y la situación límite, donde la densidad de la mezcla es máxima cuando el volumen de vacíos es cero.

En el ensayo Rice, se procedió a desintegrar la mezcla asfáltica. Debido a su proceso de enfriamiento, la mezcla se cristalizó formando agregados frágiles. Para llevar a cabo el ensayo, se utilizó un recipiente de vacío de la marca HUMBOLDT. Este recipiente se llenó de agua y se pesó durante

todo el proceso, luego se cubrió con una placa de vidrio. Posteriormente, la mezcla asfáltica desintegrada se vertió en el recipiente de vacío y se llenó con agua.

Al cubrir el recipiente de vacíos con la placa de vidrio, se tuvo el debido cuidado a fin de que no quedaran burbujas en la superficie, se pesó el recipiente de vacío, pero esta vez con la mezcla asfáltica contenida en el mismo, se colocó el recipiente de vacío en la bomba de vacíos, la cual tuvo que ser capaz de sostener una presión residual de -al menos- 30 mm de mercurio o 21.8 toneladas. Luego de extraer el vacío, se pesó nuevamente el recipiente de vacío.

Para obtener el peso específico bulk de las briquetas se tuvo que pesar las briquetas al aire libre y sumergidas en agua, posteriormente se secaron superficialmente las briquetas y se obtuvieron sus pesos superficialmente secos. Todos los datos, peso al aire, peso sumergido y peso superficialmente seco de las briquetas, fueron registrados en una tabla, a fin de calcular el volumen de la briqueta de acuerdo con el correspondiente porcentaje de asfalto y caucho reciclado.

Se colocaron las briquetas en un baño de agua de 150 litros de capacidad y 150 mm de profundidad, provisto de un control termostático capaz de mantener una temperatura de ensayo de 60°C con una precisión de  $\pm 1$  °C, se retiraron las briquetas después de alrededor de 24 horas y se secaron superficialmente para evento seguido colocarlas una por una en dos mordazas circulares, se colocaron las briquetas sujeta en las mordazas circulares en el Anillo Humboldt, el cual debe ser calibrado anualmente; el Anillo Humboldt usado tiene una constante de calibración igual a 9.3738.

## Resultados y Discusión

Los agregados fueron sometidos al ensayo de la abrasión de los ángeles que resulta un desgaste promedio de 27.9% el cual estuvo dentro del rango máximo permitido 40% para agregados de hormigón asfáltico. Los pesos unitarios de los agregados 3/4", 3/8" y arena fueron en orden respectivo 1457 kg/m<sup>3</sup>, 1512 kg/m<sup>3</sup> y 1690 kg/m<sup>3</sup>. Por otro lado, el porcentaje de absorción de humedad y en mismo orden respectivo fue de 3.06%, 3.97% y 3.05%. La granulometría conjunta de los agregados estuvo dentro de los parámetros normados para una mezcla asfáltica tradicional, como se muestra en la tabla 1.

La mezcla asfáltica tradicional fue ensayada por medio del método Marshall del cual se obtienen resultados Tabla 2 para determinar el porcentaje de asfalto, que mejor comportamiento físico mecánico presenta, esto considerando el desgaste, densidades, porcentaje de absorción y granulometría de los agregados. Es importante resaltar

que el comportamiento de toda mezcla asfáltica es resultante de los parámetros antes descritos y que estos serán distintos y variarán en función de las características propias de los agregados y el bitumen asfalto que se utilice en cada situación.

La mezcla con 6.1% de asfalto figura 1 y 2, con soporte en la interpolación de los datos experimentados presenta: 1) Estabilidad de 2510.9 libras fuerzas, 2) Flujo de 10.2 pulgadas/100 y 3) Porcentaje de vacíos de 2.92%; estas condiciones físicas y mecánicas permitieron comparar los efectos producidos con la adición de 5%, 2%, 1%, de caucho reciclado granulado tabla 3, por medio del ensayo de 3 briquetas por cada porcentaje figura 3 y 4.

Al analizar los resultados de la tabla 4 y acorde al comportamiento de la variable estabilidad, se identifica que a medida que se adiciona caucho reciclado, la resistencia de la mezcla asfáltica disminuye, sin embargo, las deformaciones expresadas por la variable flujo son menores, este es un com-

**Tabla 1**

*Granulometría de los agregados*

Tamiz	% Pasante (experimentación)	% Pasante (especificación)
3/4"	98.4	100
1/2"	91.1	90-100
# 4	52.6	44-74
# 8	43.6	28-58
# 50	18.0	5-21
# 200	6.5	2-10

*Nota.* Las especificaciones fueron obtenidas de la Norma Ecuatoriana Vial (NEVI-12) (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013).

**Tabla 2**

*Determinación del porcentaje de asfalto*

Asfalto (%)	Estabilidad (libra fuerza)	Flujo (pulgada/100)	Vacíos (%)
3/4"	98.4	100	7,1
1/2"	91.1	90-100	3.1
# 4	52.6	44-74	2.3
# 8	43.6	28-58	2.3
# 50	18.0	5-21	5-21
# 200	6.5	2-10	2-10

*Nota.* Con los datos de la presente tabla se determina que el porcentaje de asfalto que brinda mejores condiciones físicas y mecánicas en la mezcla es 6.1%.

**Tabla 3**

*Dosificaciones de agregados en la mezcla con 6.1% de asfalto*

Asfalto (%)	Estabilidad (libra fuerza)	Flujo (pulgada/100)	Vacíos (%)
3/4"	98.4	100	7,1
1/2"	91.1	90-100	3.1
# 4	52.6	44-74	2.3
# 8	43.6	28-58	2.3
# 50	18.0	5-21	5-21
# 200	6.5	2-10	2-10

*Nota.* Con los datos de la presente tabla se determina que el porcentaje de asfalto que brinda mejores condiciones físicas y mecánicas en la mezcla es 6.1%.

**Figura 1**

*Mezcla de agregados y asfalto 6.1%.*



*Nota.* La mezcla de agregados y asfalto fue realizada a temperatura 160 °C.

**Tabla 4**

*Propiedades de mezcla modificada con caucho reciclado*

Caucho Reciclado (%)	Estabilidad (libra fuerza)	Flujo (pulgada/100)	Vacíos (%)
1	1819	7.4	0.55
2	1567	6.3	1.04
5	720	4.7	9.51

*Nota.* Considerando las especificaciones de la norma NEVI-12 MTOP (2013), la mezcla asfáltica con 1% de caucho reciclado tendría resultados que clasificarían al pavimento flexible como apto para tráfico medio y liviano.

**Figura 2**

*Mezcla asfáltica con adición de caucho reciclado.*



*Nota.* El caucho fue reciclado con la forma granulada.

**Figura 3***Briquetas con adición de caucho reciclado*

*Nota.* En la margen izquierda de la figura se muestran las briquetas y en la margen derecha las muestras para la determinación de porcentajes de vacíos.

portamiento que revela las características elastoplástico que se estarían atribuyendo en la mezcla con la adición de caucho reciclado.

Es interesante el comportamiento del porcentaje de vacíos frente a la incorporación de caucho reciclado. A juzgar por los resultados se observa la disminución de vacíos hasta 0.55% en la mezcla y considerando que en condiciones tradicionales la mezcla es regulada con un intervalo dado entre 3% y 5%, según la normativa local. Sin embargo, autores como Meléndez et al. (2022), Calva y Muñoz (2022) y Peñaloza et al. (2022), entre otros, coinciden que las mezclas asfálticas tradicionales en Latinoamérica, requieren de mejoras, por lo que un menor porcentaje de vacíos podría ser un indicador de durabilidad debido a las propiedades impermeabilizantes que se estaría atribuyendo a la mezcla asfáltica.

La evaluación de la mezcla asfáltica per-

**Figura 4***Ensayo Marshall, briqueta con caucho reciclado.*

*Nota.* En la presente figura se observa la medición de estabilidad y flujo al momento de aplicar esfuerzos en la briqueta.

mitió determinar la dosificación idónea, al tener los porcentajes de caucho reciclado 1, 2 y 5%; considerando los porcentajes de vacíos en los 3 porcentajes fue mayor obteniendo con la piedra 3/4 un 17%, piedra 3/8" un 30%, arena 52% y agregando el 1% de caucho reciclado, lo que atribuye características porosas permitiendo de esta manera conseguir los criterios necesarios y el soporte pertinente para declarar que el asfalto es resistente e impermeable.

Se determinó la dosificación de la mezcla para la elaboración del pavimento flexible con la incorporación del caucho reciclado, considerando que esto atribuye facultades ambientales que ayudarán a la mitigación de los impactos negativos y permitirá tener mejores resultados en la parte constructiva y mantenimientos viales, dando paso a la obtención de un producto técnico medioambiental mínimo viable, que brinda soporte y motiva la generación de un pavimento ecoeficiente.

El planteamiento hipotético es calificado con juicio de valor verdadero con el análisis de los resultados y discusión, se comprueba que al incorporar caucho reciclado de forma granulada se logran mejoras físicas y mecánicas en la mezcla asfáltica, a más del posible balance que se obtendría en los impactos ambientales generados con la construcción de vías urbanas, asegurando de esta manera el bienestar de la humanidad, la presente y venideras generaciones.

## Conclusiones

La experimentación de la mezcla asfáltica con la incorporación del uno por ciento de caucho reciclado presentó mejores resultados en cuanto al parámetro estabilidad que la mezcla tradicional, no de igual manera con el flujo y porcentaje de vacíos; sin embargo, este último atribuye características porosas que motivan a distinguir la mezcla con propiedades impermeabilizantes, mismas que son relevantes considerando el estrés urbano, generado por la disminución de los niveles de servicio e incidencia de las lluvias en la durabilidad de sus pavimentos flexibles.

Se logra obtener un producto técnico-ambiental mínimo viable para el tráfico liviano urbano, que aporta en las corrientes de conocimientos, así como también, a la promoción de la sostenibilidad, puesto que, con su producción en masa se tendría mejoras en las dimensiones social, económica y medioambiental. Esto, sin duda, trasciende en beneficios para la humanidad, debido a que, al utilizar el caucho reciclado como material de construcción, a más de la liberación de carga contaminante que tendría que asimilar el ambiente, se reduciría el uso de recursos naturales.

Los resultados de la presente investigación de tipo experimental desde una perspectiva técnica contribuyen en la solución del problema; disminución de la calidad de los pavimentos flexibles, pero también se enfoca en la remediación ambiental, por lo que trasciende de la sostenibilidad a la sustentabilidad con el objeto de buscar soluciones integrales, mediante la innovación tecnológica y el afianzamiento del reciente paradigma que se basa en la ecoeficiencia de las construcciones civiles, en aras de buscar un equilibrio entre sus impactos ambientales lo que supone la reducción de la huella de carbono.

Al término de la investigación se califica la hipótesis con juicio de valor verdadero, pues se presenta la propuesta de la mezcla asfáltica con incorporación del caucho reciclado y por medio de la experimentación realizada en laboratorio se comprueba que la mezcla asfáltica logra ser estable y presenta características impermeables. Además, se distingue que al tener mayor porcentaje de caucho reciclado se experimenta reducción en la resistencia, situación que restringe el uso de esta mezcla asfáltica no tradicional para tráfico pesado y extrapesado.

Se recomienda continuar la trazada línea de investigación con trabajos futuros que evalúen el comportamiento físico y mecánico de la mezcla asfáltica, con la adición de caucho reciclado granulada en proporciones menores a uno por ciento, así como también, se motiva la publicación de los próximos resultados sin ocultar los desfavores, puesto que todo lo que se experimenta durante la puesta de investigación, generará conocimiento de vital importancia en la mejora continua de los estándares técnicos y medioambientales.

## Agradecimiento

La investigación científica es símbolo de cooperación, se agradece la colaboración de: 1) La Prefectura de Los Ríos, por medio de sus laboratorios de resistencia de materiales; 2) La Universidad Laica VICENTE ROCAFUERTE de Guayaquil por medio de sus departamentos de Posgrado, Investigación Científica, Tecnológica e Innovación y el Proyecto de Investigación titulado: Tecnologías Innovadoras de un Pavimento Flexible, Sustentable y Ecoeficiente, con código IC-ULVR-22-78; 3) La Universidad de Guayaquil, por medio de su laboratorio de suelos; y 4) A los laboratorios BORLETI S.A. y DIGECONSA S.A. El estudio fue realizado desde el 7 de enero del 2022 hasta el 24 de marzo del 2023.

## Referencias

- Adrianzen, O., Azula, J., Pacherras, C., Rodríguez, E., & Muñoz, S. (2022, enero/diciembre). Uso de distintos tipos de fibras para mejorar las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica: Una revisión literaria. *Infraestructura Vial*, 24(43), 1-10. <https://t.ly/-YT3>
- Calva, L., & Muñoz, S. (2022, enero/diciembre). Estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente incorporando escorias de acero. *Infraestructura Vial*, 24(43), 1-10. <https://t.ly/iDcS1>
- Fundación Laboral de la Construcción. (s.f.). Ficha Completa Asfalto. Peligros. *Línea Prevención*. <https://shorturl.at/mCNW2>
- Gaertner, M., Staub de Melo, J., & Villena, J. (2019). Los efectos de la forma de la onda de carga en la estimación de la vida a la fatiga de la capa asfáltica en la estructura del pavimento. *Revista ingeniería de construcción*, 34(2), 136-145. <https://shorturl.at/hlYZ2>
- Güereca, L., Juárez, C., & Ossa, A. (2014). Evaluación comparativa de los impactos ambientales de dos tipos de pavimentos. *Gaceta Instituto de Ingeniería, UNAM*, 1(104), 18-20. <https://shorturl.at/lquLU>
- León, E., & Mejía, L. (2020). *Análisis de los Impactos Ambientales Asociados al Mantenimiento de Vías en Pavimento Flexible en Colombia* (Tesis de grado, Universidad Francisco de Paula Santander, Ocaña, Colombia). <https://shorturl.at/qrvxW>
- León, P., Maila, J., & Albuja, E. (2020, junio). Influencia de aditivos (polímeros y polialuminio) en las propiedades físico-mecánicas de mezclas asfálticas en caliente. *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, 9(1), 60-71. <https://shorturl.at/kqBJ9>
- Martínez, G., Caicedo, B., González, D., Celis, L., Fuentes, L., & Torres, V. (2018). Trece años de continuo desarrollo con mezclas asfálticas modificadas con Grano de Caucho Reciclado en Bogotá: Logrando sostenibilidad en pavimentos. *Revista ingeniería de construcción*, 33(1), 41-50. <https://shorturl.at/hGLVY>
- Meléndez, A., Peña, L., Vacca, H., & Alvarado, Y. (2022). Performance of a UHPFRC overlay in the rehabilitation of a typical asphalt pavement structure. *Revista ingeniería de construcción*, 37(3), 335-344. <https://shorturl.at/BDGV9>
- Ministerio de Transporte y Obras Públicas. (2013). Volumen No. 1. Procedimientos para proyectos viales. Norma Ecuatoriana Vial NEVI-12-MTO. <https://doi.org/10.17398/1695-288X.19.2.29>

- Ochoa, R., Grimaldo, G., Orjuela, M., & Muñoz, C. (2018). Análisis del uso de escoria granulada en la fabricación de mezclas asfálticas para pavimentos. *Espacios*, 39(37), 1-14. <https://shorturl.at/oCEKM>
- Orduz-Duarte, E., & Pineda-Jaimes, J. (2017). *Comportamiento de una estructura de pavimento reforzado con geoceldas mediante simulación numérica, considerando una subrasante discontinua* (Ponencia). Congreso Internacional de Innovación y Tendencias en Ingeniería, CONIITI 2017. Bogotá, Colombia, pp. 1-6. <https://shorturl.at/vHIKX>
- Paredes, D., Paredes, N., & Urteaga, M. (2022). *Comparación técnico-económica de un pavimento convencional y un pavimento modificado con incorporación de plástico reciclado pet en su capa de rodadura* (Ponencia). 20ª Multiconferencia Internacional de LACCEI para ingeniería, educación Conferencia del Caribe para ingeniería y tecnología, LACCEI 2022. 18-22, July, Boca Raton, Estados Unidos, pp. 1-10. <https://shorturl.at/mvyFS>
- Peñaloza, D., Vásquez, D., Valdivieso, V., Jaramillo, Y., Plata, W., & Moreno, P. (2022, July/September). Theoretical analysis of waste cooking oil rejuvenator in reclaimed asphalt for sustainable hot asphalt mix preparation at the Área Metropolitana de Bucaramanga. *DYNA*, 89(223), 79-87. <https://shorturl.at/blnuT>
- Ríos, N., Bacca, B., Caicedo, E., & Orobio, A. (2020, julio/diciembre). Revisión de métodos para la clasificación de fallas superficiales en pavimentos flexibles. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 30(2), 109-127. <https://shorturl.at/epxFK>
- Valero, C., Muñoz, G., & Reyes, M. (2022, julio). Adoquín vehicular de capacidad drenante con concha de manglar: un innovador material de construcción. *Polo del Conocimiento*, 7(7), 2128-2145. <https://shorturl.at/ICJ79>

Para referenciar este artículo utilice el siguiente formato:

Mora, K., & Valero, C. (2023, julio-diciembre). Caucho granulado y su influencia en la estabilidad, flujo y vacío de una mezcla asfáltica. *Yachana Revista Científica*, 12(2), 19-30.