

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/372704600>

# Estrategias de circularidad para la reducción de impactos: diseño de una mezcla asfáltica caliente con caucho reciclado en la provincia del Azuay

Article in *Green World Journal* · July 2023

DOI: 10.53313/gwj62076

CITATIONS

0

READS

199

2 authors, including:



**Beatriz Rivela**

inViable Life Cycle Thinking, Scientific-Creative Agency

67 PUBLICATIONS 1,121 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

# Estrategias de circularidad para la reducción de impactos: diseño de una mezcla asfáltica caliente con caucho reciclado en la provincia del Azuay

Juan Diego Moscoso–Saquicela <sup>1</sup>  Beatriz Rivela Carballal <sup>1,2</sup> 

<sup>1</sup> Universidad Católica de Cuenca. Unidad de Postgrados. Maestría en Construcciones con mención en Administración de la Construcción Sustentable. Cuenca, Ecuador.

<sup>2</sup> InViable Life Cycle Thinking. Madrid, España.

✉ Correspondencia: [uan.moscoso.28@ucacue.edu.ec](mailto:uan.moscoso.28@ucacue.edu.ec) ☎ + 593 99 926 8154

DOI/URL: <https://doi.org/10.53313/gwj62076>

**Resumen:** En Ecuador se desechan anualmente más de 2.400.000 neumáticos, muchos de ellos terminan en terrenos baldíos, orillas de carreteras, o cuerpos de agua, por consiguiente, se genera contaminación; esta cantidad va en aumento cada año. Este tipo de cauchos de neumáticos requiere mucho tiempo para degradarse naturalmente, por lo que permanecen durante largos lapsos en el medio ambiente debido a su compleja composición reticulada, y a los aditivos utilizados durante la fabricación. Para realizar mezclas asfálticas en caliente, los áridos ocupan al menos tres cuartas partes de su volumen y deben regirse a ciertas especificaciones de calidad. Actualmente, los que cumplen con estas características en la provincia del Azuay son escasos y, por ende, su costo ha aumentado; además, el parque automotor en los últimos tres años en Cuenca ha crecido en un 13% y cada año continúa en aumento, ocasionando que pavimentos de asfalto se deterioren en tiempos cortos. Por lo anteriormente expuesto, se ha realizado una investigación experimental con el objetivo de efectuar la combinación de áridos que forman parte fundamental en la realización de mezcla asfáltica en caliente, con polvo de caucho en distintas dosificaciones, mismo que se obtendrá del reciclado de llantas que han cumplido su vida útil; de estas combinaciones se han identificado aquellas en las que se mejora la calidad de mezcla asfáltica sin aditivo, disminuyendo su costo de producción y aumentando la vida útil, de manera que se reduzca la contaminación del medio ambiente y se mejore el rendimiento de pavimentos en la provincia del Azuay. Con esta investigación se obtuvo que, al añadir el polvo de caucho en la mezcla asfáltica, el peso específico “bulk” es levemente inferior al del asfalto patrón, que está ligado con el aumento del volumen de vacíos. La estabilidad de las mezclas asfálticas modificadas con polvo de caucho es inferior en todas las dosificaciones de dicho material. El polvo de caucho reciclado se incorporó fácilmente en la granulometría de la fórmula patrón obteniendo una mezcla homogénea y trabajable.

**Palabras claves:** Mezcla Asfáltica, Marshall, Estabilidad, Flujo, Caucho



Check for updates

**Cita:** Moscoso–Saquicela, J.-D., & Rivela Carballal, B. (2022). Estrategias de circularidad para la reducción de impactos: diseño de una mezcla asfáltica caliente con caucho reciclado en la provincia del Azuay. Green World Journal, 06(02), 076.

<https://doi.org/10.53313/gwj62076>

Received: 02/junio /2023

Accepted: 20/julio /2023

Published: 27/julio /2023

Prof. Carlos Mestanza–Ramón, PhD.  
Editor-in-Chief / CaMeRa Editorial  
[editor@greenworldjournal.com](mailto:editor@greenworldjournal.com)

**Editor's note:** CaMeRa remains neutral with respect to legal claims resulting from published content. The responsibility for published information rests entirely with the authors.



© 2023 CaMeRa license, Green World Journal. This article is an open access document distributed under the terms and conditions of the license.

Creative Commons Attribution (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

## Circularity strategies for the reduction of impacts: design of an asphalt mix with recycled rubber in the province of Azuay.

**Abstract:** In Ecuador, more than 2,400,000 tires are discarded annually, many of them end up on roadsides, vacant lots or bodies of water, therefore pollution is generated; This amount is increasing every year. This type of tire rubber requires a long time to degrade naturally, so it remains for long periods of time in the environment due to its complex cross-linked composition, and the additives used during manufacturing. To carry out hot mix asphalt, the aggregates occupy at least three quarters of its volume and must comply with certain quality specifications. Currently, those that meet these characteristics in the province of Azuay are scarce and, therefore, their cost has increased; In addition, the vehicle park in the last three years in Cuenca has grown by 13% and each year it continues to increase, causing asphalt pavements to deteriorate in a short time. Due to the above, an experimental investigation has been carried out with the objective of carrying out the combination of aggregates that form a fundamental part in the realization of hot asphalt mix, with rubber powder in different dosages, which will be obtained from the recycling of tires that they have completed their useful life; Of these combinations, those have been identified in which the quality of the asphalt mix without additives is improved, reducing its production cost and increasing its useful life, so as to reduce environmental contamination and improve the performance of pavements in the Azuay province. With this investigation it was obtained that, when adding the rubber dust in the asphalt mixture, the specific weight "bulk" is slightly lower than that of the standard asphalt, which is linked to the increase in the volume of voids. The stability of asphalt mixtures modified with rubber dust is lower in all dosages of said material. The recycled rubber powder was easily incorporated into the granulometry of the standard formula, obtaining a homogeneous and workable mixture.

**Keywords:** Asphalt Mixing, Marshall, Stability, Flow, Rubber

### 1. Introducción

En Ecuador se desechan anualmente más de dos millones de neumáticos aproximadamente, muchos de ellos terminan en terrenos baldíos, orillas de carreteras, o cuerpos de agua [1] ocasionando una gran contaminación al medio ambiente; la cantidad de estos elementos desechados aumenta cada año, pero la degradación del material que los compone requiere de mucho más tiempo para su degradación de forma natural, por lo que su permanencia es indefinida en nuestro medio natural [2], debido a su compleja composición reticulada y a los aditivos utilizados durante su fabricación [3]. Para disminuir el almacenaje o la acumulación de neumáticos en lugares inaccesibles o en botaderos de basura, cierta parte de la población procede a incinerar los mismos, como tratamiento convencional, y, dichas actividades producen la liberación de humos tóxicos a la atmósfera [4].

Asimismo, las mezclas asfálticas en caliente, en el campo de la construcción civil, entregan su aporte dañino al medio ambiente, pues para su ejecución deben sujetarse a normas de calidad estándares; y los áridos, al ocupar al menos tres cuartas partes del volumen de su confección [5,6], deben cumplir con ciertas especificaciones técnicas óptimas de eficacia. Es decir, para obtener una mezcla asfáltica de calidad se requiere la extracción de áridos en excelente condición, lo que se obtendría con extracción minera de materiales pétreos y consecuentemente generaría contaminación en ríos y sus afluentes.

Otro parámetro de contaminación que se registra es el que origina el parque automotor, mismo que ha incrementado un 13% en los últimos tres años en la cabecera cantonal de Cuenca [7]. Asimismo, cada año crece este porcentaje, ocasionando que los pavimentos confeccionados con asfalto se deterioren gradualmente por varios factores como son la excesiva utilización, el peso de vehículos, ambiente exterior, altas temperaturas, entre otros, lo que origina que se produzca principalmente el agrietamiento térmico a bajas temperaturas como modos principales de falla [8].

Con estos antecedentes, como tema de investigación se estudia la combinación de áridos de calidad media, que forman parte principal en la elaboración de mezcla asfáltica en caliente, mediante un proceso seco, con polvo de caucho en distintas dosificaciones, que se consigue del reciclado de neumáticos que han terminado con su vida útil; es así que de las combinaciones propuestas se obtiene el resultado de pruebas Marshall y se realiza el respectivo análisis.

Para conseguir el polvo de caucho se reciclan neumáticos usados o deteriorados, los que se someten a procesos de trituración primaria hasta obtener trozos uniformes de 5 cm y trituración secundaria que corresponde al rallado, con la finalidad de conseguir piezas menores a dos centímetros, denominadas polvo de caucho [9].

Como aglomerados se les define también a las mezclas asfálticas, que resultan de la combinación de un ligante hidrocarbonado con agregados pétreos, de modo que estos terminen cubiertos por una película continua. La fabricación se realiza en plantas fijas o móviles, después se transportan a la obra para extenderse y compactarse [10]. Para esta investigación se utilizan áridos de la provincia del Azuay, sector El Descanso del cantón Cuenca, que se obtienen mediante un proceso de trituración o pulverización. Se utilizan agregados de tamaños de 3/4, 3/8, polvo de trituración, arenas finas, y adicional, como ligante principal se utiliza cemento asfáltico AC-20.

Una vez obtenida la fórmula maestra para la mezcla asfáltica en caliente, se incorpora a ella polvo de caucho en distintas dosificaciones mediante proceso seco, con el fin de obtener la cantidad óptima, y, así mejorar los resultados de prueba Marshall; un dato importante es que la fuerza Marshall aumenta al incrementar el porcentaje de polvo de caucho y luego disminuye [11], información que nos ayuda a determinar cuál será la dosificación óptima o en su punto máximo al que se puede llegar.

Con estos resultados se lleva a cabo la comparación de resultados Marshall obtenidos de la mezcla sin polvo de caucho y con ella, para evidenciar las diferencias entre ambas y que tan conveniente es su utilización. Además, del aumento progresivo de la prueba se espera que la mezcla asfáltica sea económicamente eficiente, que este asfalto con polvo de caucho reduzca el ruido [12] y, ayude a mejorar su rendimiento a largo plazo [13].

## 2. Materiales y métodos

El análisis La investigación es de carácter experimental aplicada, que se efectúa en la ciudad de Cuenca, provincia de Azuay.

El método Marshall para esta finalidad es la determinación del contenido óptimo de asfalto (ligante) para una combinación específica de agregados. Este cálculo permite calificar la mezcla asfáltica, por cuanto se analizan los parámetros que deben cumplir especificaciones, que son:

- Peso específico de agregados: es la relación del peso de los agregados con respecto al peso del volumen igual de agua
- Rice: máxima densidad teórica determinada en el laboratorio (mezcla sin vacíos).
- Estabilidad: capacidad que tiene para resistir desplazamientos y deformaciones bajo cargas del tránsito.
- Flujo: representa la deformación de la briqueta por la carga.
- Vacíos en la mezcla: espacios pequeños o bolsas de aire, que están presentes entre los agregados revestidos en la mezcla final compactada.

- Vacíos en el agregado mineral (VAM): espacios de aire que existen entre las partículas del agregado en una mezcla compactada.
- Vacíos llenos de asfaltos (VFA): porcentaje de vacío intergranular entre las partículas del agregado, que es ocupado por asfalto.

Los parámetros anteriormente mencionados se deben cumplir durante la elaboración de la mezcla asfáltica [14]. Un punto inicial para el diseño es seleccionar el porcentaje de asfalto para el promedio de límites de vacíos de aire: 4%; los cálculos, propiedades y medidas con este porcentaje de asfalto se deben analizar de acuerdo a criterios para el diseño de la mezcla asfáltica (Tabla 1) que indica la Norma Ecuatoriana Vial NEVI-12 para vehículos de carga pesada utilizada en la presente investigación. Al cumplirse con estas propiedades, se obtiene el diseño de la mezcla asfáltica con porcentaje óptimo de asfalto.

Tabla 1. Criterio de Diseño de Mezclas Marshall.

TIPO DE TRAFICO	Muy Pesado		Pesado		Medio Liviano		Liviano	
	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
<b>CRITERIOS MARSHALL</b>								
No. De Golpes/Cara	75		75		50		50	
Estabilidad (libras)	2200	---	1800	---	1200	---	1000	2400
Flujo (pulgadas/100)	8	14	8	14	8	16	8	16
% de vacíos en Mezcla	3	5	3	5	3	5	3	5
% Vacíos agregados (VAM)	14		14		16		16	
% Vacíos rellenos de asfalto (VFA)	65	75	65	75	65	78	70	80

Al realizarse varios ensayos en seco con distintos porcentajes de polvo caucho, se determina que agregar un 5% de dicho material a la mezcla asfáltica es económicamente eficiente y justificable en la práctica [11]. El caucho se lo puede obtener de dos formas, una es de forma natural que es el jugo de un árbol tropical llamado árbol de caucho o su nombre científico *Havea Brasiliensis*, la segunda forma de obtener es mediante productos químicos, dando como resultado una sustancia fuerte que se estira. Por esta razón es que a los neumáticos de vehículos de transporte se los llama cauchos o llantas, debido a su composición principal [15]

El método aplicado en la presente investigación se desarrolla en cuatro etapas: obtención de agregados, elaboración de fórmula maestra para la mezcla asfáltica, dosificación de polvo de caucho en diferentes porcentajes y ejecución de ensayos de laboratorio.

## 2.1. Materiales

Como primera etapa se obtienen materiales a utilizar para la producción de la mezcla asfáltica en caliente, objeto de esta investigación, que son áridos triturados denominados de “3/4”, “3/8”, “polvo de trituración”, además de “arenas finas”. En la provincia de Azuay, existe gran variedad de este tipo de áridos, pero pocos son los que cumplen con las especificaciones que demandan los parámetros de calidad exigidos por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas en el Manual de Especificaciones para la Construcción de Caminos y Puentes (MOP-001-F 2020), Capítulo 400-Estructura del Pavimento, Sección 405-Capa de Rodadura de Hormigón Asfáltico en Caliente. En la presente investigación se utilizan los de la Cantera ubicada en el sector del Descanso del Cantón Cuenca, llamada VIPESA; cabe mencionar que estos áridos son utilizados por entidades públicas que poseen planta para la elaboración de asfaltos en caliente, se trata del Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón Cuenca y la Empresa Pública de Áridos y Asfaltos ASFALTAR EP, que pertenece al Gobierno Autónomo Descentralizado Provincial del Azuay.

Otro material es el caucho, el utilizado para este estudio proviene de la empresa “SEGINUS”, primer sistema colectivo sin fines de lucro que articula la cadena de reciclaje de neumáticos usados, comprometidos para que el ciclo de las llantas no termine, transformándolas en energía, pisos, material para artesanos, entre otros.

La finalidad de utilizar el polvo de caucho, es mejorar las propiedades del cemento asfáltico y ésta debe cumplir ciertas especificaciones que se encuentran establecidas en la norma NTE INEN 2680:2013:

- El caucho reciclado debe contener menos del 0,75 % de humedad en peso y libre de flujo. La gravedad específica de este caucho debe ser de  $1,15 \pm 0,05$ .
- El caucho reciclado no debe contener partículas visibles de metales no ferrosos y no más de 0,01 % en peso de partículas de metales ferrosos.
- Se recomienda que todas las partículas de caucho tengan un tamaño capaz de pasar por el tamiz de 2,36 mm (No. 8).

Por último, se usa cemento asfáltico tipo AC-20, manejado como ligante de la mezcla asfáltica en caliente, utilizado por la Empresa Pública de Áridos y Asfaltos ASFALTAR EP, que cumple con parámetros de calidad exigidos por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas en el Manual de Especificaciones para la Construcción de Caminos y Puentes (MOP-001-F 2020), Capítulo 800-Materiales, Sección 810-Asfaltos y productos asfálticos, y, proviene de la Refinería Estatal de Esmeraldas (Petroproducción).

## 2.2. Métodos

Las pruebas y ensayos de laboratorio objeto de este estudio se efectuaron en “Titanium Road”, laboratorio experto en suelos, concretos y asfaltos, con una trayectoria de 10 años caracterizada por ofrecer resultados precisos y confiables; además, es utilizado por las Empresa Pública de Áridos y Asfaltos ASFALTAR EP, para el control de calidad de las mezclas asfálticas en caliente.

Como segunda etapa de este estudio se realizó la fórmula maestra de la mezcla asfáltica mediante el método Marshall, con áridos que se puede observar en la Figura 1 y cemento asfáltico antes mencionados. A continuación, se detallan los porcentajes óptimos de cemento asfáltico y agregados obtenidos (Tabla 2):

Tabla 2. Porcentajes de materiales de formula maestra de Mezcla Asfáltica.

Material	Porcentaje (%)
$\frac{3}{4}$	14,00
3/8	25,00
Polvo de trituración	35,00
Arena	25,00
Cemento asfáltico	6,00



(a)



(b)



(c)



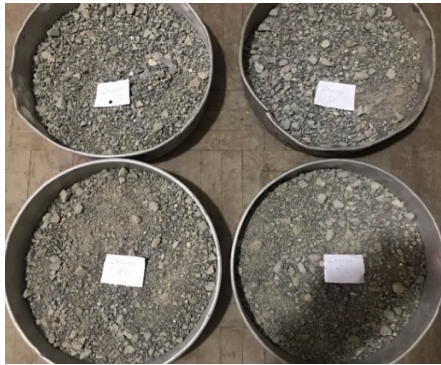
(d)

**Figura 1.** Materiales utilizados: (a)  $\frac{3}{4}$  triturado, (b)  $\frac{3}{8}$  triturado, (c) Polvo triturado y (d) arena.

Con esta cantidad de materiales, se procede a realizar las briquetas de mezcla asfáltica para ensayarlos en el laboratorio, y obtener sus características referentes a estabilidad, flujo, densidad, % de vacíos, VFA y VMA.

Como tercera etapa, se realizan las briquetas de mezcla asfáltica modificada con caucho, en las que a los agregados y cemento asfáltico se incorpora el polvo de caucho en porcentajes

de 2%, 3%, 4% y 5% como se observa en la Figura 2, en relación al peso de agregados. Para obtener estas briquetas, se mezclan los distintos agregados en las cantidades antes mencionadas, además se incorpora el polvo de caucho en variados porcentajes, posterior se lleva al horno durante 24 horas a una temperatura de 110 °C.



(a)



(b)

**Figura 2.** Materiales con polvo de caucho: (a) materiales con los 4 porcentajes de polvo de caucho; (b) introducción de materiales en el horno por 24 horas.

Transcurridas las 24 horas de las materias con el polvo de caucho en el horno, se realizan tres briquetas por cada porcentaje de polvo de caucho, para esto es necesario subir la temperatura de los materiales con el polvo de caucho hasta los 140 °C, el cemento asfáltico también se debe encontrar a esta temperatura para realizar la mezcla y obtener 12 briquetas, como se puede observar en la Figura 3:



(a)



(b)



(c)

**Figura 3** Elaboración de briquetas: (a) Mezcla de áridos, polvo de caucho y cemento asfáltico hasta 140 °C, (b), producción de briquetas y (c) 12 briquetas listas.

Finalmente, en la cuarta etapa, y con las 12 briquetas fabricadas, transcurridas 24 horas en las que se secaron y enfriaron, se realizan ensayos de laboratorio para determinar: estabilidad, flujo, densidad, % de vacíos, VFA y VMA, de cada una de las mezclas asfálticas modificadas.

### 3. Resultados

En la siguiente tabla encontramos los resultados de los ensayos de laboratorio que se realizó a las briquetas tas de mezcla asfáltica combinada con distintos porcentajes de polvo de caucho:

**Tabla 3:** Resumen de resultados de la caracterización de briquetas modificadas con caucho.

PORCENTAJE DE CAUCHO	DENSIDAD		VACIOS	VMA	VFA	ESTABILIDAD	FLUJO
	BULK	RICE					
0%	2.355	2.450	3,88	15,4 1	74,8 2	3952	12,6
2%	2.126	2.380	10,67	23,9 2	55,3 9	1642	15,9
3%	2.094	2.373	11,76	25,2 1	53	1251	17,2
4%	1.982	2.365	16,19	29,3 7	45	893	17,4
5%	1.880	2.343	19,76	33,1 8	40	998	17
<b>Especificación MOP-001F-2002</b>			<b>3-5</b>	<b>&gt; 14</b>	<b>65- 75</b>	<b>&gt; 1800</b>	<b>8-14</b>

Además, es importante indicar que los diseños y cálculos se realizaron en base a la normativa para vehículos pesados.

#### 3.1. Estabilidad y flujo

La capacidad para resistir desplazamientos y deformaciones producto de las cargas del tránsito se conoce como estabilidad de un asfalto, además, es capaz de mantener su forma y lisura producto de repetitivas cargas; si es inestable desarrolla ondulaciones, ahuellamiento y más señales que muestran cambio en la mezcla asfáltica.

Para acomodar de manera adecuada el tránsito esperado, pero si sobre pasar de lo exigido en las condiciones de tránsito las condiciones de estabilidad deben ser lo suficientemente altas. Es importante indicar que al tener valores muy altos de estabilidad se obtiene pavimentos demasiado rígidos y por lo tanto, una vida útil menor a la deseada.

La deformación de la briketa es medida en centésimas de pulgas lo que se denomina Flujo, expresada por la disminución del diámetro vertical de la briketa.

Se conoce entonces que las mezclas que contienen valores bajos de fluencia y valores muy altos de estabilidad son consideradas demasiado frágiles y rígidas para un pavimento en una vía; en el presente estudio no se presenta esta condición. Aquellas que cuentan con valores altos de fluencia son consideradas demasiado plásticas con tendencia a deformarse fácilmente bajo cargas de tránsito. En la tabla 3 se observa que la mezcla asfáltica combinada con caucho en todos sus porcentajes tiene valores superiores al valor de 14 que indica la norma, lo que indica que en ningún caso cumpliría.

Otro parámetro que se analizó es el porcentaje de vacíos en comparación con la mezcla patrón. Ésta se encuentra fuera del rango de la normativa, por lo tanto, este porcentaje de vacíos tiende a descender mientras el porcentaje de caucho aumenta.

El porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VAM), en las mezclas modificadas con cada porcentaje de caucho este valor es distinto, mismo que aumenta con el incremento gradual del porcentaje de caucho.

El porcentaje de vacíos llenos de asfalto (VFA) en las mezclas modificadas aumenta al elevar el porcentaje de caucho.

Los valores de estabilidad en las muestras de mezclas modificadas tienden a disminuir con cada aumento de porcentaje de caucho.

Los valores de flujo en las muestras de mezclas modificadas inician con valores bajos e incrementan con cada aumento de porcentaje de caucho.

#### 4. Discusión

De los resultados anteriores se concluye que, con relación a los valores de la mezcla asfáltica patrón, la mezcla asfáltica modificada tienen valores menores de gravedad específica (método RICE) y densidad bulk, además, la estabilidad y el flujo presenta valores superiores.

Del “Análisis del comportamiento a compresión de asfalto conformado por caucho reciclado de llantas como material constitutivo del pavimento asfáltico”, concluye que, al incorporar el polvo de caucho a la mezcla asfáltica, se obtiene que la estabilidad Marshall disminuye, cuando el flujo, el contenido de vacíos y el ligante aumenta, además, que existe una mínima disminución del peso específico bulk de la mezcla modificada con caucho comparada con la del asfalto [16]. Resultados que están asociados a la obtención de mayor porcentaje de volumen de vacíos y mayor permeabilidad en la mezcla modificada, además, en las mezclas que se incorporó el 1% presenta valores superiores de estabilidad con respecto a las mezclas incorporada el 2% y 3%, con lo que se puede evidenciar que la estabilidad disminuye cuando se aumenta la cantidad de caucho.

Asimismo, el trabajo de investigación de “Obtención de Asfalto Modificado con polvo de caucho proveniente del reciclaje de neumáticos de automotores”, determinó que la gravedad específica y la densidad de mezclas asfálticas obtenidas tanto mediante el proceso seco como el húmedo son ligeramente inferiores a las del asfalto sin modificar. Esto está asociado con mayores volúmenes vacíos en el asfalto modificado y mayor permeabilidad en las mezclas modificadas [2,16].

## 5. Conclusión

Los resultados obtenidos en esta investigación permiten constatar que, al incorporar el polvo de caucho de llantas recicladas para la producción de mezcla asfáltica en caliente, se reduce significativamente la contaminación ambiental que ésta produce por el largo tiempo que dura su degradación en el medio ambiente o por los distintos métodos de eliminación.

Una desventaja de la implementación del polvo de caucho, es el costo de producción que ésta tiene asociada, ya que aumenta debido a la incorporación del mismo. Al añadir el polvo de caucho en la mezcla asfáltica, el peso específico bulk, es levemente inferior al del asfalto patrón, que está ligado con el aumento del volumen de vacíos. La estabilidad de las mezclas asfálticas modificadas con polvo de caucho, evidentemente son inferiores en todas las dosificaciones de caucho. El polvo de caucho reciclado se incorporó fácilmente en la granulometría de la formula patrón, obteniendo una mezcla homogénea y trabajable.

**Contribución de autores:** conceptualización M.J y R.V; redacción–revisión y edición, M.J

**Financiamiento:** Los autores financiaron a integridad el estudio.

**Conflictos de interés:** Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

### Referencias

1. La verdad Más de 2 millones de neumáticos se desechan cada año. Available online: <https://laverdadnoticias.com/ecologia/Mas-de-2-millones-de-neumaticos-se-desechan-cada-ano.-20180605-0041.html>.
2. Fazli, A.; Rodrigue, D. Recycling waste tires into ground tire rubber (GTR)/rubber compounds: A review. *J. Compos. Sci.* **2020**, *4*, 103.
3. Medina, N.F.; Garcia, R.; Hajirasouliha, I.; Pilakoutas, K.; Guadagnini, M.; Raffoul, S. Composites with recycled rubber aggregates: Properties and opportunities in construction. *Constr. Build. Mater.* **2018**, *188*, 884–897.
4. Rahman, M.T.; Mohajerani, A.; Giustozzi, F. Recycling of waste materials for asphalt concrete and bitumen: A review. *Materials (Basel)*. **2020**, *13*, 1495.
5. Gonzalez–Raymat, H.; Liu, G.; Liriano, C.; Li, Y.; Yin, Y.; Shi, J.; Jiang, G.; Cai, Y. Elemental mercury: Its unique properties affect its behavior and fate in the environment. *Environ. Pollut.* **2017**, *229*, 69–86.
6. Li, J.; Zhang, J.; Qian, G.; Zheng, J.; Zhang, Y. Three–dimensional simulation of aggregate and asphalt mixture using parameterized shape and size gradation. *J. Mater. Civ. Eng.* **2019**, *31*, 4019004.
7. La hora Parque automotor creció 13% en los últimos tres años Available online: <https://www.lahora.com.ec/pais/crecimiento-parque-automotor-desde-2018/>.
8. Zhang, J.; Yao, Z.; Yu, T.; Liu, S.; Jiang, H. Experimental evaluation of crumb rubber and polyethylene integrated modified asphalt mixture upon related properties. *Road Mater. Pavement Des.* **2019**, *20*, 1413–1428.
9. La hora En funcionamiento planta trituradora de llantas. **2022**.
10. Ortegon Sabogal, D.F.; Villabón Abello, A.F. Evaluar el comportamiento de una mezcla asfáltica en frío modificada mediante fibras kevlar 2018.
11. Zarei, M.; Rahmani, Z.; Zahedi, M.; Nasrollahi, M. Technical, economic, and environmental investigation of the effects of rubber powder additive on asphalt mixtures.

- J. Transp. Eng. Part B Pavements* **2020**, *146*, 4019039.
12. Yu, H.; Leng, Z.; Dong, Z.; Tan, Z.; Guo, F.; Yan, J. Workability and mechanical property characterization of asphalt rubber mixtures modified with various warm mix asphalt additives. *Constr. Build. Mater.* **2018**, *175*, 392–401.
  13. Wang, H.; Liu, X.; van de Ven, M.; Lu, G.; Erkens, S.; Skarpas, A. Fatigue performance of long-term aged crumb rubber modified bitumen containing warm-mix additives. *Constr. Build. Mater.* **2020**, *239*, 117824.
  14. ASTM, D. 1188. Standard Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Compacted Bituminous Mixtures Using Coated Samples. In Proceedings of the American Society of Testing Materials; 2007.
  15. Tenesaca Villacrés, J.L.; Flores Oñate, G.N. Fabricación de un prototipo de bloque a partir de arena de caucho, plástico PET y vidrio reciclados para el sector de la construcción 2023.
  16. Santos Carlos, S.R.; Lobato Campos, J.C. Evaluación del asfalto modificado a base de caucho reciclado de neumáticos en comparación del asfalto convencional. **2020**.



© 2023 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>