

Evaluación de la viabilidad técnica de reutilizar colillas de cigarrillos en asfalto

Evaluation of the technical feasibility of reusing cigarette butts in asphalt

Hernán José Hernández Durán
Maestro en Dirección de Empresas por la Escuela de Postgrado UNIVO
Arquitecto por la Universidad Nacional de El Salvador
Investigador de la Universidad de Oriente UNIVO.
hhernandez@univo.edu.sv
<https://orcid.org/0000-0003-0344-9770>

Recibido: 20 de marzo de 2026

Aceptado: 15 de julio de 2026

Volumen: Vol 5, N° 2, 2026

Resumen

La eliminación inadecuada de colillas de cigarrillo representa uno de los principales problemas de contaminación ambiental a nivel mundial. Según el informe del Índice de Basura en el Océano, de la Ocean Conservancy (2018), las colillas de cigarrillo encabezan la lista de los diez artículos más recolectados a nivel global, con 2,349,141 unidades recuperadas, esta situación ha llevado a la propuesta de esta investigación, incorporación de este componente en la fabricación de asfalto para la construcción de carreteras. La investigación es considerada de Innovación Tecnológica y aplicada, se enfoca en determinar los efectos de incorporar las colillas de cigarrillo en el asfalto, buscando resultados confiables y aplicables en la construcción de infraestructura vial resistente y segura. Se realizaron pruebas MARSHALL, ensayo Bulk, ensayo teórico y la cantidad de colillas a utilizar, para lo cual se realizaron dos dosificaciones con el 0.24% equivalente a 123.0 gramos y con el 0.48% equivalente a 295.2 gramos de colillas. Tomando la información anterior, 123.0 gramos para 1m² con un grosor de 5cm equivaldría a 1554 colillas de cigarrillos y para los 295.2 gramos para 1m² con 5cm de grosor equivale a 3108 colillas. Los resultados fueron positivos, en la mezcla asfáltica de 1554 colillas de cigarros por metro cuadrado, los resultados fueron comparables a los de una mezcla asfáltica convencional. Por otro lado, la mezcla asfáltica que incorporó el equivalente a 3108 colillas de cigarros por metro cuadrado, también arrojó resultados positivos.

Palabras claves: colillas de cigarrillos, producto petrolífero, desarrollo sostenible, Ingeniería vial

Abstract

Improper disposal of cigarette butts represents one of the main environmental pollution problems worldwide. According to the 2018 Ocean Trash Index report, cigarette butts top the list of the ten most collected items globally, with 2,349,141 units recovered. This situation has led to the proposal for this research: incorporating this component into asphalt manufacturing for road construction. The research, considered technological and applied innovation, focuses on determining the effects of incorporating cigarette butts into asphalt, seeking reliable and applicable results for the construction of resistant and safe road infrastructure. MARSHALL tests, a bulk test, a theoretical test, and the amount of plastic to be used were performed. Two dosages were tested: 0.24%, equivalent to 123.0 grams, and 0.48%, equivalent to 295.2 grams of cigarette butts. Based on the information above, 123.0 grams per square meter with a thickness of 5 cm would be equivalent to 1554 cigarette butts, and 295.2 grams per square meter with a thickness of 5 cm would be equivalent to 3108 cigarette butts. The results were positive. In the asphalt mix containing 1554 cigarette butts per square meter, the results were comparable to those of a conventional asphalt mix. Furthermore, the asphalt mix incorporating the equivalent of 3108 cigarette butts per square meter also yielded positive results.

Keywords: cigarette butts, petroleum product, sustainable development, road engineering

Introducción

Los filtros de cigarrillos, son fabricados con acetato de celulosa, un bioplástico derivado de la celulosa de la madera, son inherentemente no tóxicos e incombustibles (Escobar y Maderuelo-Sanz, 2017). Aunque rodeados por una capa delgada de papel, durante el proceso de combustión del tabaco, absorben sustancias químicas que los convierten en contaminantes ambientales, la degradación de estos filtros puede llevar años, y durante este proceso, se descomponen en diminutos fragmentos de plástico conocidos como micro plásticos (Ocean Conservancy, 2018). Estos representan un riesgo para la vida silvestre, ya que los animales pueden ingerirlos al confundirlos con alimentos, además de contaminar fuentes de agua como pozos, ríos y mares; según Otálvaro Ortiz y Restrepo (2020) “una sola colilla de cigarrillo puede contaminar hasta 50 litros de agua dulce y hasta 10 litros de agua salada lo que constituye un desperdicio tóxico para el medioambiente y que requiera una solución” (p. 2).

El problema que se aborda en esta investigación es evaluar la viabilidad técnica y ambiental de utilizar colillas de cigarrillos como agregado en la producción de asfalto en caliente, buscando reducir la demanda de agregados convencionales, la incorporación de colillas de cigarrillos en el asfalto para mitigar los problemas asociados con su disposición inadecuada, transformándose en un recurso valioso. Desde el punto de vista técnico, fue crucial la evaluación de cómo esta inclusión afecta las propiedades mecánicas y la durabilidad del pavimento, esto asegurará que la seguridad y funcionalidad de las carreteras no se vean comprometidas, contribuyendo así al desarrollo de prácticas más sostenibles en la industria del asfalto.

El estudio se centra en la pregunta general: ¿Es técnicamente viable utilizar colillas de cigarrillos como agregado en la producción de asfalto en caliente sin comprometer las propiedades mecánicas y durabilidad del pavimento resultante? Se abordan aspectos específicos, como el efecto en la resistencia a la compresión y las propiedades de flexibilidad y elasticidad del asfalto modificado, el objetivo general es evaluar la viabilidad técnica y ambiental de la incorporación de colillas de cigarrillos en el asfalto en caliente, analizando sus efectos en las propiedades mecánicas y la durabilidad del pavimento.

Metodología

El método utilizado en la investigación es de enfoque cuantitativo, tipo experimental y aplicada.

El enfoque cuantitativo, utiliza la recolección de datos para probar hipótesis con base en la medición numérica y el análisis estadístico, con el fin establecer pautas de comportamiento y probar teorías (Hernández-Sampieri et al., 2014). La investigación experimental se caracteriza por la manipulación intencionada de la variable independiente y el análisis de su impacto sobre una variable dependiente (Ramos-Galarza, 2021). La investigación aplicada busca la generación de

conocimiento con aplicación directa a los problemas de la sociedad o el sector productivo. Esta se basa fundamentalmente en los hallazgos tecnológicos de la investigación básica, ocupándose del proceso de enlace entre la teoría y el producto (Lozada, 2014). La investigación integra el enfoque cuantitativo y experimental al recolectar datos numéricos mediante ensayos de laboratorio como el Marshall y Bulk, para evaluar cómo la manipulación de la cantidad de colillas trituradas implementadas en las mezclas asfálticas, las cuales fueron de 0.24% y 0.48% y como afecta las propiedades mecánicas y la durabilidad del asfalto. Además, al clasificarse como investigación aplicada, el estudio trasciende la teoría para ofrecer una solución directa a la contaminación ambiental, transformando un residuo tóxico en un insumo valioso que, según los resultados, permite construir carreteras resistentes, seguras y con beneficios térmicos adicionales.

Tabla 1

Materiales utilizados para la elaboración de la mezcla asfáltica

Materiales utilizados
Brea asfáltica
Arena
Polvo de piedra
Piedra entre 5-10mm
Piedra entre 10-14mm
Colillas de cigarrillo trituradas

La población utilizada fue de 6 briquetas elaboradas de brea, arena, polvo de piedra, piedra entre 5-10 mm y de 10-14 mm y colillas de cigarrillos triturada, la muestra consistió en 3 briquetas con el 0.24% de colillas de cigarrillo y 3 briquetas con el 0.48% de colillas. El estudio se llevó a cabo en el Laboratorio de la Planta Asfáltica La Hulera de ECON, el cual es un laboratorio acreditado por la Organización Salvadoreña de Acreditación. Las cantidades de briquetas utilizadas responden a los estándares requeridos para la realización de los ensayos aplicados, por lo que, no se incrementó el número de briquetas, pues no modificaría los resultados, al menos que se hubiese elaborado otra mezcla con diferente proporción.

El proceso inició con el tamizado de los materiales, el cual consiste en separar los diferentes tipos de materiales pétreos según sus diferentes tamaños a utilizar, para esto se utilizan zarandas de diferentes dimensiones de agujeros, cálculo de materiales que se necesitaron para las pruebas y mezclado de los agregados pétreos y colillas de cigarrillos, finalizado con pruebas MARSHALL, ensayo Bulk, ensayo teórica y la cantidad de colillas de cigarrillos a utilizar, para lo cual se acordó realizar tres briquetas con el 0.24% equivalente a 123.0 gramos y tres con el 0.48% equivalente a 295.2 gramos de colillas. Tomando la información anterior 123.0 gramos para 1m² con un grosor de 5cm equivaldría a 1554 colillas de cigarrillos y para los 295.2 gramos para 1m² con 5cm de grosor equivale a 3108 colillas.

Figura 1

Briquetas de asfalto con colillas de cigarrillo



Nota. Las briquetas de asfalto fueron fabricados con una mezcla homogénea de brea asfáltica con una temperatura entre 162° a 164°, agregados pétreos gruesos, finos y las diferentes dosificaciones de colillas de cigarrillos triturados. Estos fueron compactados con un martillo mecánico.

Figura 2

Se sumergen los cilindros de asfalto a una temperatura del agua a 60°C por 30 a 40 minutos



Nota. Se toma la temperatura de las briquetas, medidas del diámetro y la altura del cilindro, esto para calcular la masa de cada espécimen, se pesó seco y sumergido en agua, posterior a la toma de medidas se colocaron las briquetas sumergido en agua a 60°C por un tiempo de 30 a 40 minutos

Figura 3

Colocación de los especímenes en el anillo de carga



Nota. Se coloca el cilindro al anillo de carga, y se centra en el aparato de carga, el resultado es la falla por estabilidad y fluidez.

Figura 4

Ensayo estándar para la gravedad específica Bulk y densidad



Nota. Para realizar el ensayo, es necesario dejar la mezcla asfáltica en reposo a temperatura ambiente, se recoge con una pala manual y se coloca en el recipiente de vacío, se pesa el recipiente vacío y con asfalto, se le agrega agua y se sumerge completamente el recipiente según la norma a una temperatura de 25.1°C.

Figura 5

Ensayo estándar para la gravedad específica Bulk y densidad



Nota. Recipiente de vacío, bomba de vacío, barómetro y dispositivo de agitación mecánica, para hacer el método de ensayo estándar para gravedad específica BULK y densidad de la mezcla compactada no absorbente, en el picnómetro.

Resultados

Los resultados fueron positivos, si es viable la incorporación de colillas de cigarrillo triturada en asfalto en caliente, aunque con condiciones particulares para cada una de ellas; en la mezcla asfáltica que incluyó una equivalencia de 1554 colillas de cigarros por metro cuadrado, considerando un grosor de 5 cm, los resultados fueron comparables a los de una mezcla asfáltica convencional tanto en términos de fabricación como de resistencia. Por otro lado, la mezcla asfáltica que incorporó el equivalente a 3108 colillas de cigarros por metro cuadrado, con el mismo grosor de 5 cm, también arrojó resultados positivos. Sin embargo, se observó que para su preparación se requiere una mayor cantidad de brea, esto debido a que, a mayor cantidad de colillas de cigarrillos, es mayor la cantidad de brea absorbida por parte de las colillas para elaborar el material, lo que elevaría el costo económico del asfalto.

Es relevante tener en cuenta que ambas muestras fueron sometidas a pruebas en un laboratorio certificado, y ambas demostraron resultados favorables. No obstante, es importante destacar que, al considerar la incorporación de colillas de cigarrillo en el asfalto para su aplicación en calles y carreteras, la inversión inicial sería significativa. Esto se debe a la necesidad de implementar una tolva exclusiva para las colillas de cigarrillos, así como a la dosificación posterior del nuevo material.

Proporción de bachadas de mezcla de laboratorio utilizando 1,554 colillas de cigarros por 1 m² de colocación de mezcla para 5 cm de espesor compactado.

Tabla 2

Método estándar de ensayo para la extracción cuantitativa de bitumen de mezclas para pavimentos bituminosos método "A".

Cantidad	Número de ensayos	1
de colillas		
	Porción de masa de ensayo W1	1700.0
	Masa de el extracto agregado mineral	1608.3
	W4= M3	0.0
1,554	Masa inicial filtro	0.0
	Masa final del filtro	0.0
	Masa finos en el filtro	0.0
	Masa del frasco + solución extraída	2634.7
	% Contenido de asfalto	5.39

Nota. Elaboración propia con apoyo del Laboratorio Planta Asfáltica La Hulera ECON.

El ensayo para extracción cuantitativa de bitumen de mezcla para pavimentar, determinó un contenido de asfalto del 5.39%. Para este proceso se utilizó una masa de ensayo inicial de 1,700.0 g, obteniendo una masa de extracto de agregado mineral de 1,608.3 g.

Análisis: Se muestra un contenido de asfalto del 5.39%. Este valor es fundamental ya que indica que la mezcla mantiene un porcentaje de ligante dentro de los rangos estándar para mezclas asfálticas en caliente, permitiendo una cohesión adecuada de los agregados y las colillas trituradas.

Tabla 3

ASTM D 5444, Método estándar para el análisis mecánico de tamaño de los agregados extraídos.

Cantidad de colillas	Peso seco lavado			PXL			Bandas de control granulométrico
	Tamiz	Peso retenido g.	% Retenido parcial	% Retenido acumulado	% que pasa		
1,554	3/4"	0.0	0.0	0.0	100	100	100
	1/2"	144.3	7.1	7.1	93	90	97
	3/8"	246.8	15.3	22.4	78		
	4	355.0	22.1	44.5	56	52	62
	8	268.3	16.7	61.2	39	35	43
	16	204.8	12.7	73.9	26		
	30	149.6	9.3	83.2	17		
	50	72.1	4.5	87.7	12	9	17
	100	66.2	4.1	91.8	8		
	200	42.3	2.6	94.4	5.6	4	8
	P	88.9	5.5	99.9			
	200=(Px L + fondo +M3+fi nos en filtro)						

Nota. Elaboración propia con apoyo del Laboratorio Planta Asfáltica La Hulera ECON.

Los porcentajes que pasan por los tamices principales incluyen un 100% en 3/4", 93% en 1/2", 56% en el tamiz No. 4, 39% en el No. 8, y un 5.6% en el tamiz No. 200.

Análisis: Los resultados confirman que la mezcla sigue las bandas de control granulométrico requeridas. Al tener un 100% de paso en el tamiz de 3/4" y un 5.6% en el tamiz No. 200, se asegura un esqueleto mineral bien graduado que proporciona la fricción interna necesaria para la estabilidad estructural.

Tabla 4

*ASTM D-2041/D-2041M-19: Método de ensayo estándar para gravedad específica máxima teórica y densidad de mezclas para pavimentos asfálticos. *ensayo acreditado.*

Cantidad de colillas	Número de ensayos	Ensayo 1
		1693.0
	D = Masa de picnómetro y tapa lleno con agua a 25°C, g	7447.3
1,554	E = Masa picnómetro y tapa, muestra y agua desairada 25°C g.	8481.2
	Gravedad específica teórica máxima	
	$Gmm = \frac{A}{A + D - E} =$	2.569

Nota. Elaboración propia con apoyo del Laboratorio Planta Asfáltica La Hulera ECON El resultado de la Gravedad Específica Teórica Máxima (Gmm) fue de 2.569.

Análisis: El valor obtenido de 2.569 representa la densidad máxima que alcanzaría la mezcla si no tuviera vacíos de aire. Este dato es el punto de referencia crítico para calcular posteriormente el porcentaje real de vacíos en la mezcla compactada.

Tabla 5

*ASTM D-2726/D-2726M-21: Método de ensayo estándar para la gravedad específica Bulk y densidad de la mezcla compactada no absorbente. *ensayo acreditado.*

Cantidad de colillas		1	2	3
	A= Masa espécimen seco en aire, g.	1236.6	1243.9	1220.3
	B = Masa en aire saturado superficialmente seco, g.	1238.1	1245.8	1221.0
	C = Masa de espécimen sumergido en agua, g.	737.8	742.3	727.1
1,554	(B - C) = Masa de volumen de agua desplazado (a 25°C), g	500.3	503.5	493.9
	Gmb = A/(B - C)	2.472	2.471	2.471
	% Absorción de agua	0.3	0.4	0.1

Nota. Elaboración propia con apoyo del Laboratorio Planta Asfáltica La Hulera ECON

Se analizaron tres especímenes obteniendo un promedio de 2.471 para la gravedad específica Bulk (Gmb). La absorción de agua varió entre el 0.1% y 0.4%.

Análisis: Con un promedio de 2.471, los tres especímenes mostraron una consistencia notable (2.472, 2.471 y 2.471), lo que indica un proceso de compactación uniforme en el laboratorio. La baja absorción de agua (0.1% a 0.4%) sugiere que la mezcla es altamente impermeable, lo cual es vital para la durabilidad frente a climas lluviosos.

Tabla 6

*ASTM D 6927-15, Método de ensayo estándar estabilidad y flujo MARSHALL mezclas asfálticas
ensayo acreditado.

Cantidad	Lectura anillo	441	375	398
de colillas				
	Factor de corrección	1.04	1.04	1.09
	Ec. del anillo	(0.0419lect +0.1247)		
	Estabilidad, KN	19.35	16.45	18.30
	Estabilidad, lbf	4,350	3,700	4,110
1,554	Estabilidad, kg	1,975	1,680	1,865
	Flujo, 0.01 pulgadas	13	12	12
	Flujo, mm	3.25	3.00	3.00

Nota. Elaboración propia con apoyo del Laboratorio Planta Asfáltica La Hulera ECON.

La mezcla mostró una estabilidad promedio de 18.03 KN (con valores individuales de 19.35, 16.45 y 18.30 KN). El flujo promedio fue de 3.08 mm (12 en unidades de 0.01 pulgadas).

Análisis: La estabilidad promedio de 18.03 KN (4,050 lbf) supera con creces el mínimo de 1,800 lbf requerido por las normativas. Esto demuestra que la incorporación de colillas no debilita la capacidad del pavimento para soportar cargas de tráfico pesado. El flujo de 3.08 mm está dentro del rango ideal (2.0 a 4.0 mm), garantizando que el asfalto sea lo suficientemente flexible para no agrietarse, pero lo bastante rígido para no deformarse.

Tabla 7

Resumen de resultados para mezcla de 1,554 colillas de cigarros por 1 m².

Cantidad	Contenido de asfalto, %	5.39	5.20*5.80
de colillas			
	Gravedad especif. máx. teórica	2.569	
	Gravedad específica Bulk	2.471	
	Densidad Bulk kg/m ³	2464	
	Estabilidad, KN	18.05	
1,554	Estabilidad corregida, lbf	4,050	1800 min.
	Estabilidad corregida, kgf	1,840	817 kgf
	Flujo, 0.01 pulgadas	12	8*14
	Flujo, mm	3.08	2.0 a 4.0

Nota. Elaboración propia con apoyo del Laboratorio Planta Asfáltica La Hulera ECON.

La densidad Bulk se registró en 2,464 kg/m³. La estabilidad corregida promedio fue de 4,050 lbf (1,840 kgf), cumpliendo con el mínimo requerido de 1,800 lbf.

Análisis: Se integra los datos previos y confirma que la densidad Bulk de 2,464 kg/m³ y la estabilidad corregida cumplen satisfactoriamente con los estándares de diseño para carreteras.

Tabla 8

Parámetros volumétricos

Cantidad de	% Vacíos aire	38	3.0 a 5.0
colillas			
	%Vacíos agregado mineral	140	14.0% min.
1,554	%Vacíos llenos de asfalto	728	65 a 75

Nota. Elaboración propia con apoyo del Laboratorio Planta Asfáltica La Hulera ECON.

Los resultados mostraron un 3.8% de vacíos de aire, un 14.0% de vacíos en el agregado mineral (VMA) y un 72.8% de vacíos llenos de asfalto (VFA). Todos estos valores se encuentran dentro de los rangos estándar permitidos.

Análisis: Los resultados de 3.8% de vacíos de aire se sitúan en el punto del diseño (rango 3.0% - 5.0%), lo que permite espacio para la expansión térmica sin comprometer la impermeabilidad. El VMA (14.0%) y el VFA (72.8%) aseguran que hay suficiente espacio para el asfalto y que el agregado está recubierto de manera óptima para evitar la oxidación.

Tabla 9

Relaciones de parámetros

Cantidad	Relación filler/CA efect.	1.32	0.60 a 1.60
de colillas			
1,554	% Asfalto efectivo	4.25	

Nota. Elaboración propia con apoyo del Laboratorio Planta Asfáltica La Hulera ECON.

Se determinó una relación filler/asfalto efectivo de 1.32 y un porcentaje de asfalto efectivo de 4.25%.

Análisis: La relación filler/asfalto de 1.32 se encuentra dentro del límite permitido (0.60 a 1.60). Esto significa que la mezcla no es ni demasiado "seca" (lo que causaría fragilidad) ni demasiado "rica" (lo que causaría inestabilidad o exudación).

Tabla 10

Gravedad específica mineral y asfalto

Cantidad	Gravedad especif. comb., G_{sb} =	2.718
de colillas		
	G. especif. efectiva, G_{se} =	2.807
	Gravedad específica del asfalto	1.033
1,554	Otros parámetros	
	Absorción de agua, %	0.30% Max 2.0

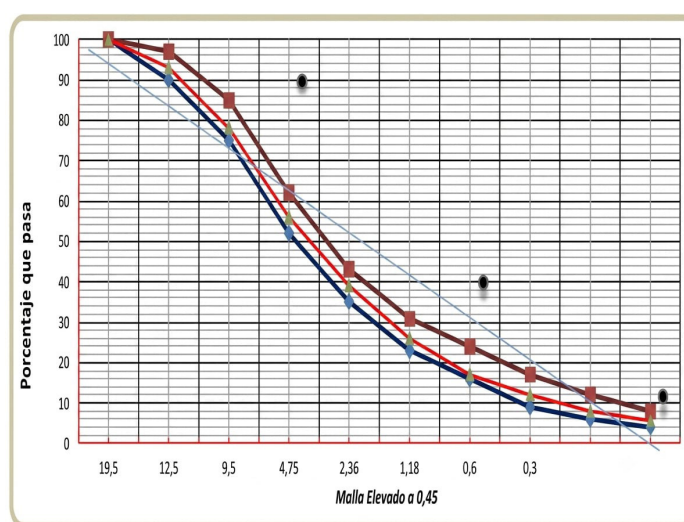
Nota. Elaboración propia con apoyo del Laboratorio Planta Asfáltica La Hulera ECON.

Los valores finales incluyeron una Gravedad Específica Combinada (Gsb) de 2.718, una Gravedad Específica Efectiva (Gse) de 2.807 y una gravedad específica del asfalto de 1.033. La absorción de agua final se registró en 0.30%.

Análisis: Los valores de gravedad específica combinada (2.718) y efectiva (2.807) confirman la calidad de los agregados utilizados. Además, la absorción de agua final de 0.30%, muy por debajo del máximo de 2.0%, ratifica que el asfalto protege eficazmente los materiales internos contra el daño por humedad.

Figura 6

Análisis mecánico de tamaño de los agregados extraídos, para especímenes de cantidad 1,554 colillas.



Nota. 1) Los especímenes de ensayo para la determinación de la gravedad específica Bulk y densidad de la mezcla compactada no absorbente, la estabilidad y flujo MARSHALL de mezclas asfálticas son elaborados bajo la ASTM D-6926-20 práctica estándar para la preparación de especímenes bituminosos usando aparatos MARSHALL. *ensayo acreditado 2) muestreo mezcla asfáltica según norma ASTM D-979-15*práctica estándar ACREDITADA disminución o cuarteo según AASHTO R 47.

*Laboratorio de Ensayo acreditado por el OSA con registro N° LEA-10:17 para el alcance detallado en www.osa.gob.sv. Se agregaron 1554 colillas de cigarrillos por 1 m² de colocación de mezcla para 5 cm de espesor compactado.

Proporción de bachadas de mezcla de laboratorio utilizando 3,108 colillas de cigarrillos por 1 m² de colocación de mezcla para 5 cm de espesor compactado.

Tabla 11

ASTM D-2172/D-2172M-17: Método estándar de ensayo para la extracción cuantitativa de bitumen de mezclas para pavimentos bituminosos método "A".

Cantidad	Número de ensayos	1
de colillas		
	Porción de masa de ensayo W1	1700.0
	Masa de el extracto agregado mineral	1608.3
	W4= M3	0.0
3,108	Masa inicial filtro	0.0
	Masa final del filtro	0.0
	Masa Finos en el filtro	0.0
	Masa del frasco + solución extraída	2634.7
	% Contenido de asfalto	5.39

Nota. Elaboración propia con apoyo del Laboratorio Planta Asfáltica La Hulera ECON.

El ensayo determinó un contenido de asfalto del 5.39%, utilizando una masa de ensayo de 1,700.0 g y obteniendo 1,608.3 g de extracto de agregado mineral.

Análisis: Los resultados muestran un contenido de asfalto del 5.39%. Aunque este porcentaje es idéntico al de la muestra con menos colillas, la discusión técnica señala que las concentraciones más altas de este residuo tienden a requerir una mayor cantidad de brea para mantener la cohesión, lo que impacta directamente en el costo de preparación.

Tabla 12

ASTM D 5444, Método estándar para el análisis mecánico de tamaño de los agregados extraídos.

Peso seco lavado		PXL				
Cantidad de colillas	Tamiz	Peso retenido g.	% Retenido parcial	% Retenido acumulado	% que pasa	Bandas de control granulométrico
3,108	3/4"	0.0	0.0	0.0	100	100
	1/2"	144.3	7.1	7.1	93	90
	3/8"	246.8	15.3	22.4	78	
	4	355.0	22.1	44.5	56	52
	8	268.3	16.7	61.2	39	35
	16	204.8	12.7	73.9	26	
	30	149.6	9.3	83.2	17	
	50	72.1	4.5	87.7	12	9
	100	66.2	4.1	91.8	8	
	200	42.3	2.6	94.4	5.6	4
	P	88.9	5.5	99.9		8
	200=(P xL + fondo +M3+f inos en filtro)					

Nota. Elaboración propia con apoyo del Laboratorio Planta Asfáltica La Hulera ECON.

La gradación mostró un 100% de paso en el tamiz de 3/4", un 93% en 1/2", un 56% en el No. 4 y un 5.6% en el tamiz No. 200, manteniéndose dentro de las bandas de control.

Análisis: Los resultados muestran que la mezcla mantiene una gradación adecuada, con un 100% de paso en el tamiz de 3/4" y un 5.6% en el tamiz No. 200. Esto confirma que la inclusión de una mayor cantidad de colillas trituradas no altera significativamente el esqueleto mineral ni saca a la mezcla de las bandas de control establecidas.

Tabla 13

*ASTM D-2041/D-2041M-19: Método de ensayo estándar para gravedad específica máxima teórica y densidad de mezclas para pavimentos asfálticos. *Ensayo acreditado.*

Cantidad	Número de ensayos	Ensayo 1
de colillas		
	A= Masa de la muestra seca en aire, g.	1700
	D =Masa de picnómetro y tapa lleno con agua a 25°C, g	7447.3
	E = Masa Picnómetro y tapa, muestra y agua desairada 25°C g.	8486.1
3,108	Gravedad Específica Teórica Máxima $G_{mm} = \frac{A}{A + D - E} =$	2.571

Nota. Elaboración propia con apoyo del Laboratorio Planta Asfáltica La Hulera ECON.

Se obtuvo un valor de Gmm de 2.571.

Análisis: Se obtuvo un valor de 2.571. Este dato es ligeramente superior al de la mezcla de 1,554 colillas, lo que refleja un cambio en la densidad teórica de la mezcla al aumentar la proporción de material plástico.

Tabla 14

*ASTM D-2726/D-2726M-21: Método de ensayo estándar para la gravedad específica Bulk y densidad de la mezcla compactada no absorbente. *Ensayo acreditado.*

Cantidad	1	2	3	
de				
colillas				
	A= Masa espécimen seco en aire, g.	1238.4	1239.9	1245.4
	B = Masa en aire saturado superficialmente seco, g.	1239.5	1242.8	1245.8
	C = Masa de espécimen sumergido en agua, g.	733.4	736.5	740.5
	(B - C) = Masa de volumen de agua desplazado (a 25°C), g	506.1	506.3	505.3
3,108	Gmb = A/(B - C)	2.447	2.449	2.465
	% Absorción de agua	0.2	0.6	0.1

Nota. Elaboración propia con apoyo del Laboratorio Planta Asfáltica La Hulera ECON.

Los tres especímenes analizados arrojaron valores de 2.447, 2.449 y 2.465, con una absorción de agua muy baja que osciló entre el 0.1% y el 0.6%.

Análisis: El promedio de los especímenes fue de 2.454, mostrando una densidad consistente entre las muestras analizadas. La absorción de agua se mantuvo extremadamente baja (0.1% a 0.6%), lo que garantiza que la mezcla sea impermeable y resistente al daño por humedad.

Tabla 15

ASTM D 6927-15, Método de ensayo estándar estabilidad y flujo MARSHALL mezclas asfálticas
**Ensayo acreditado.*

Cantidad	Lectura anillo	484	405	524
de colillas				
	Factor de corrección	1.04	1.04	1.04
	Ec. del anillo	(0.0419lect +0.1247)		
	Estabilidad, KN	21.20	17.80	22.95
3,108	Estabilidad, lbf	4,770	4,000	5,160
	Estabilidad, kg	2,165	1,815	2,340
	Flujo, 0.01 pulgadas	16	15	16
	Flujo, mm	4.00	3.75	4.00

Nota. Elaboración propia con apoyo del Laboratorio Planta Asfáltica La Hulera ECON.

Esta mezcla alcanzó una estabilidad promedio de 20.65 KN (con picos de hasta 22.95 KN) y un flujo promedio de 3.92 mm.

Tabla 16

Resumen de resultados para mezcla de 3,108 colillas de cigarros por 1 m²

Cantidad	Contenido de asfalto, %	5.39	5.20*5.80
de colillas			
	Gravedad especif. máx. teórica	2.571	
	Gravedad específica bulk	2.454	
	Densidad bulk kg/m ³	2446	
	Estabilidad, KN	20.65	
3,108	Estabilidad Corregida, lbf	4,640	1800 min.
	Estabilidad Corregida, kgf	2,105	817 kgf
	Flujo, 0.01 pulgadas	16	8*14
	Flujo, mm	3.92	2.0 a 4.0

Nota. Elaboración propia con apoyo del Laboratorio Planta Asfáltica La Hulera ECON

La estabilidad corregida resultó en 4,640 lbf (2,105 kgf), superando ampliamente el mínimo de 1,800 lbf exigido.

Análisis de tabla 14 y 15: Esta dosificación alcanzó una estabilidad promedio de 20.65 KN (4,640 lbf), lo cual supera significativamente el mínimo de 1,800 lbf requerido por la normativa. Sin embargo, el flujo promedio de 3.92 mm se encuentra muy cerca del límite máximo permitido (4.0 mm), lo que sugiere que una cantidad mayor de colillas podría empezar a comprometer la rigidez del asfalto.

Tabla 17

Parámetros volumétricos

Cantidad	% vacíos aire	4.6	3.0 a 5.0
de colillas			
3,108	%Vacíos agregado mineral	14.6	14.0% min.
	%Vacíos llenos de asfalto	68.7	65 a 75

Nota. Elaboración propia con apoyo del Laboratorio Planta Asfáltica La Hulera ECON.

Se registró un 4.6% de vacíos de aire, un 14.6% de vacíos en el agregado mineral (VMA) y un 68.7% de vacíos llenos de asfalto (VFA).

Análisis: Los vacíos de aire se registraron en 4.6%, situándose dentro del rango óptimo de 3.0% a 5.0%. El VMA (14.6%) y el VFA (68.7%) cumplen con los estándares, asegurando que el agregado esté bien cubierto por el ligante asfáltico para prevenir el envejecimiento prematuro.

Tabla 18

Relaciones de parámetros

Cantidad	Relación filler/CA efect.	1.33	0.60 a 1.60
de colillas			
3,108	% Asfalto efectivo	4.22	

Nota. Elaboración propia con apoyo del Laboratorio Planta Asfáltica La Hulera ECON.

La relación filler/asfalto efectivo fue de 1.33, con un porcentaje de asfalto efectivo del 4.22%.

Análisis: La relación filler/asfalto efectivo de 1.33 es adecuada (rango 0.60 a 1.60), indicando un equilibrio correcto entre los finos y el cemento asfáltico para evitar que la mezcla se vuelva quebradiza o demasiado blanda.

Tabla 19

Gravedad específica mineral y asfalto

Cantidad	Gravedad especif. comb., G_{sb}=	2.718
de colillas		
	G. especif. efectiva, G_{se} =	2.809
	Gravedad específica del asfalto	1.033
3,108	Otros parámetros	
	Absorción de agua, %	0.30% Max 2.0

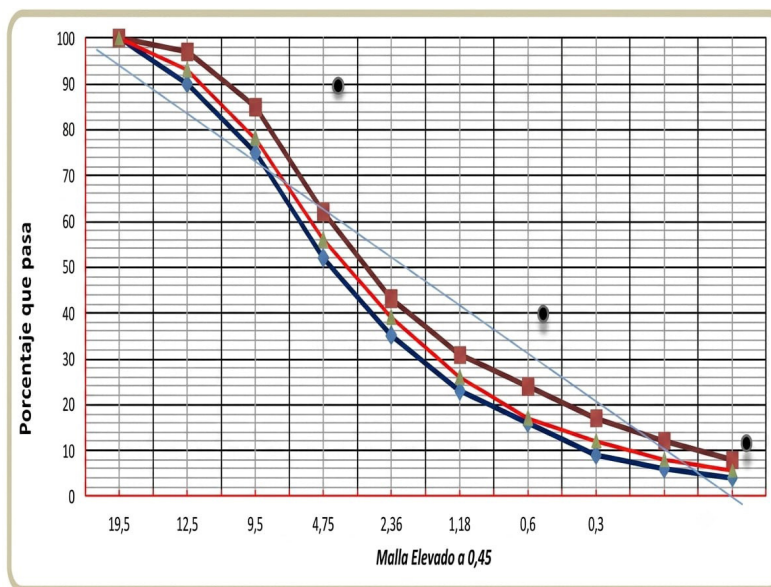
Nota. Elaboración propia con apoyo del Laboratorio Planta Asfáltica La Hulera ECON.

Los valores finales incluyeron una Gravedad Específica Combinada (G_{sb}) de 2.718, una Gravedad Específica Efectiva (G_{se}) de 2.809 y una absorción de agua del 0.30%.

Análisis: Se confirma una absorción de agua final de 0.30%, muy por debajo del máximo permitido de 2.0%. Esto ratifica que, incluso con una alta carga de colillas, el asfalto logra encapsular los materiales de manera eficiente, protegiéndolos de la intemperie.

Figura 7

Análisis mecánico de tamaño de los agregados extraídos, para especímenes de cantidad 3,108 colillas.



Nota. 1) Los especímenes de ensayo para la determinación de la gravedad específica Bulk y densidad de la mezcla compactada no absorbente, la estabilidad y flujo MARSHALL de mezclas asfálticas son elaborados bajo la ASTM D-6926-20 práctica estándar para la preparación de especímenes bituminosos usando aparatos MARSHALL. *Ensayo acreditado 2) Muestreo mezcla asfáltica según norma ASTM D-979-15*práctica estándar acreditada disminución o cuarteo según AASHTO R 47.

Laboratorio de ensayo acreditado por el OSA con registro N° LEA-10:17 para el alcance detallado en www.osa.gob.sv. Se agregaron 3108 colillas de cigarrillos por 1 m² de colocación de mezcla para 5 cm de espesor compactado.

Discusión

El estudio no solo cumple con sus objetivos, sino que también presenta hallazgos prometedores y desafíos significativos. La categorización de la investigación como experimental y aplicada se valida mediante una conexión coherente entre la investigación y la promoción de prácticas innovadoras en la ingeniería de pavimentos. La metodología, que aborda cada etapa del proceso, desde la recolección hasta la desinfección y trituración de las colillas, destaca por su enfoque meticuloso en cuestiones de seguridad y limpieza, además del diseño de mezcla asfáltica y pruebas de laboratorio es crucial para la fiabilidad de los resultados.

Los materiales y equipos utilizados, junto con las técnicas de recolección de datos avanzadas como el ensayo Marshall, realizado en laboratorio certificado por el Organismo Salvadoreño de Acreditación, proporcionan una base técnica para la fiabilidad de los resultados.

Los datos obtenidos en los diseños asfálticos, indican un éxito en la estabilidad y flujos iguales a los convencionales, demostrando que la inclusión de este residuo no compromete el diseño asfáltico para pavimentar calles. Los resultados en los dos diseños asfálticos que incorporan diferentes cantidades de colillas, indican un éxito evidente en términos de estabilidad, flujo y gravedad específica. Sin embargo, se plantea un desafío económico importante al notar la necesidad aumentada de brea en el ensayo con mayor número de colillas de cigarrillos, además de la incorporación de una tolva específicamente para las colillas señala importancia en consideraciones financieras para la viabilidad a largo plazo de esta innovación teniendo un precio actual de \$20.00 +IVA por metro cuadrado la fabricación, la colocación en carretera depende de la cantidad a asfaltar y la distancia del proyecto, plantea el debate de asumir entre el aumento de costo en favor de la sostenibilidad, considerando que una colilla sin tratamiento puede contaminar hasta 50 litros de agua dulce, generando un ahorro en servicios de remediación ambiental y salud pública (Ortiz, 2020).

Según una investigación realizada por Mohajerani et al. (2016) en Australia, realizaron la combinación de asfalto con colillas de cigarrillos para mejorar su resistencia al tráfico vehicular. Para garantizar la seguridad ambiental, el equipo de científicos incrustó las colillas de cigarrillos en el asfalto convencional para evitar cualquier filtración de productos tóxicos al suelo. Los resultados revelaron que el material de las colillas era altamente beneficioso para el asfalto.

De igual manera, la investigación de Rahman et al. (2020) consistió en estudiar el reciclaje de colillas de cigarrillo como modificador de fibra en bitumen para concreto asfáltico. Los investigadores pre procesaron las colillas secado y triturado y las incorporaron en porcentajes de 0.2% a 0.5% en tres tipos de bitumen, comparándolas con fibra de celulosa virgen 0.3% y muestras control.

Realizaron pruebas de penetración, punto de ablandamiento, viscosidad y drenaje de ligante. Los resultados mostraron que las propiedades físicas y reológicas mejoraron o se mantuvieron similares a las del control, con menor drenaje de bitumen, concluyendo que las mezclas modificadas pueden sustituir eficazmente la fibra de celulosa virgen en pavimentos flexibles.

A su vez, en la investigación de Liu et al. (2021) reutilizaron diacetato de celulosa reciclada de colillas de cigarrillo como estabilizador de fibras en mezclas de asfalto Stone Mastic. Tras caracterizar este material, se evaluaron sus propiedades volumétricas, térmicas, de humedad y fatiga. Los resultados indicaron que el contenido óptimo fue 0,4% de diacetato de celulosa reciclada respecto al ligante, logrando excelente estabilidad a altas temperaturas (4.105 ciclos/mm) y una buena resistencia a bajas temperaturas, aunque con menor estabilidad ante humedad. Así mismo, la fatiga fue similar a las fibras convencionales a bajos esfuerzos.

Uno de los aspectos del uso de colillas de cigarro en mezclas asfálticas es su capacidad para reducir la absorción de radiación solar en comparación con el asfalto convencional. Esto contribuye a mantener la superficie del asfalto más fresca durante los días calurosos de verano (Sustainability Times, 2021).

Conclusiones

La investigación concluye que es técnicamente viable incorporar colillas de cigarrillos trituradas en la producción de asfalto en caliente sin comprometer sus propiedades mecánicas ni la durabilidad del pavimento resultante, sin embargo, se propone abonar más con esta temática a través de futuras investigaciones que den continuidad, siempre cumpliendo los parámetros de rigurosos ensayos Marshall y pruebas de laboratorio acreditados. Con el presente estudio se determinó que una mezcla con una dosificación de 1,554 colillas por metro cuadrado ofrece un rendimiento y una resistencia totalmente comparables a los de la mezcla asfáltica convencional. A su vez, la muestra con una densidad de 3,108 colillas por metro cuadrado también arrojó resultados positivos en términos de estabilidad y fluidez, validando que este residuo puede transformarse de un contaminante a un recurso valioso para la infraestructura vial.

Desde una perspectiva ambiental, este avance representa una solución innovadora y sostenible, aunque no reduce exponencialmente la extracción de agregados convencionales por el porcentaje mínimo de colillas agregado a la mezcla asfáltica, mitiga la contaminación que puede producir, que actualmente encabezan la lista de desechos en los océanos y pueden contaminar individualmente hasta 50 litros de agua dulce. Al encapsular las colillas dentro de la matriz asfáltica, se previene eficazmente la filtración de sustancias tóxicas al suelo y su degradación en microplásticos que amenazan la vida silvestre. Adicionalmente, se destaca un beneficio térmico relevante.

No obstante, la transición hacia una aplicación industrial a gran escala enfrenta desafíos operativos y económicos sustanciales, principalmente debido a que la inversión inicial sería significativa, esto incluye la necesidad de implementar infraestructura específica en las plantas, como una tolva exclusiva para la dosificación de las colillas, y el hecho de que concentraciones más altas de este material demandan una mayor cantidad de brea, lo que incrementa el costo de producción.

Para consolidar la aplicabilidad de esta tecnología, es necesario desarrollar estudios de campo en carreteras reales que permitan evaluar el desempeño mecánico y la durabilidad del asfalto modificado bajo condiciones reales de tráfico y clima, enfocándose en ajustar las proporciones de la mezcla para optimizar el equilibrio entre la estabilidad estructural, la sostenibilidad ambiental y el costo económico de implementación.

Referencias

- Escobar, V., y Maderuelo-Sanz, R. (2017). Acoustical performance of samples prepared with cigarette butts. *Applied Acoustics*, 125, 166–172. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2017.01.012>
- Liu, H., Chen, Y., y Xue, Y. (2021). Diacetate from discarded cigarette filters in production of stone mastic asphalt mixtures. *Frontiers in Materials*, 8, Artículo 770150. <https://doi.org/10.3389/fmats.2021.770150>
- Lozada, J. (2014). Investigación aplicada: Definición, propiedad intelectual e industria. *CienciAmérica*, 3(1), 34-39. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6163749>
- Mohajerani, A., Kadir, A.A y Larobina, L. (2016). A practical proposal for solving the world's cigarette butt problem: Recycling in fired clay bricks. *Waste management*, 52, 228-244. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.03.012>
- Ocean Conservancy. (2018). *Building a clean swell*. <https://oceanconservancy.org/wp-content/uploads/2018/07/Building-a-Clean-Swell.pdf>
- Otálvaro Ortiz, L. C., y Restrepo, R. (2020). Dispositivo para la recolección de colillas de cigarrillo en el Campus Verde de la Institución Universitaria Pascual Bravo. *Encuentro Internacional de Educación En Ingeniería*. <https://acofipapers.org/index.php/eiei/article/view/825/829>
- Rahman, M. T., Mohajerani, A., y Giustozzi, F. (2020). Possible recycling of cigarette butts as fiber modifier in bitumen for asphalt concrete. *Materials*, 13(3), Artículo 734. <https://doi.org/10.3390/ma13030734>
- Ramos-Galarza, C. (2021). Diseños de investigación experimental. *CienciAmérica*, 10(1), 1-7. <https://doi.org/10.33210/ca.v10i1.356>
- Hernández-Sampieri, R., Fernández Collado, C., y Baptista Lucio, P. (2014). Metodología de la investigación (6.ª ed.). McGraw-Hill / Interamericana Editores.
- Sustainability Times. (12 de noviembre de 2021). Cigarette butts mixed in asphalt can have surprising benefits. *Sustainability Times*. <https://www.sustainability-times.com/clean-cities/cigarette-butts-mixed-in-asphalt-can-have-surprising-benefits/>