

Behavior of an asphalt mixture with the incorporation of plastic for airport pavements

Juan Gabriel Bastidas-Martínez ^a Jessica Melissa Loaiza-Mendoza ^a Arnoldo Junior Iguarán-Pabón ^a Juan Carlos Ruge-Cárdenas ^b & Hugo Alexander Rondón-Quintana ^c

^a Especialización en Ingeniería de Pavimentos, Universidad Católica de Colombia, Bogotá, Colombia. ingenieriapavimentos@ucatolica.edu.co, jmloaiza52@ucatolica.edu.co, ajiguaran47@ucatolica.edu.co

^b Programa de Ingeniería Civil, Universidad Católica de Colombia, Bogotá, Colombia. jcruge@ucatolica.edu.co

^c Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. harondong@udistrital.edu.co

Received: October 22th, 2024. Received in revised form: January 28th, 2025. Accepted: February 5th, 2025.

Abstract

This paper analyzed the physical-mechanical behavior and durability of two P-401 asphalt mixtures manufactured with asphalt modified with plastic waste and polymer. For this purpose, the mixture design was carried out using the Marshall test to determine the optimal asphalt content. Tests were carried out to evaluate the mechanical behavior using monotonic load tests (indirect tensile strength), repeated (resilient modulus, fatigue resistance) and static (static creep). ANOVA statistical analysis was used to determine significant variations between the results of the two mixtures. The results indicate that the incorporation of plastic waste is technically feasible and provides similar mechanical performance and durability in the P-401 asphalt mixture compared to polymer-modified asphalt. Additionally, it provides a final form of environmentally safe disposal of solid waste.

Keywords: hot-mixture asphalt; pavements; airports; modified asphalt; PET.

Comportamiento de una mezcla asfáltica con incorporación de plástico para pavimentos aeroportuarios

Resumen

Este trabajo analizó el comportamiento físico mecánico y la durabilidad de dos mezclas asfálticas tipo P-401 fabricadas con asfalto modificado con residuos de plástico y con polímero. Para tal fin se realizó el diseño de mezclas mediante el ensayo Marshall a fin de determinar el contenido óptimo de asfalto. Fueron realizados ensayos para evaluar el comportamiento mecánico mediante ensayos de carga monotónica (resistencia a la tracción indirecta), repetida (módulo resiliente, resistencia a la fatiga) y estática (fluencia estática). Análisis estadístico ANOVA se emplearon para determinar variaciones significativas entre los resultados de las dos mezclas. Los resultados indican que la incorporación de residuos plásticos es viable técnicamente y proporciona similar desempeño mecánico y durabilidad en la mezcla asfáltica P-401 en comparación al asfalto modificado con polímero. Adicionalmente, proporciona una forma final de disposición ambientalmente segura de residuos sólidos.

Palabras clave: mezcla asfáltica densa en caliente; pavimentos; aeropuertos; asfalto modificado; PET.

1 Introducción

Colombia reporta 253 terminales aéreas o aeropuertos de pasajeros, de los cuales aproximadamente el 67.6% (171), 20.6% (52), 6.3% (16) y 5.5% (14) son administrados por alcaldías municipales, aeronáutica civil, concesionados a

cargo de la Agencia Nacional de Infraestructura Colombiana (ANI) y otros, respectivamente, de los cuales, 12 son internacionales [1]. En el año 2019 se reportaron 268 rutas aéreas (165 nacionales y 103 internacionales) que movilizaron aproximadamente 45.5 millones de personas (65.9% destino nacional y 34.1% internacional) [1].

How to cite: Bastidas-Martínez, J.G., Loaiza-Mendoza, J.M., Iguarán-Pabón, A.J., Ruge-Cárdenas, J.C., and Rondón-Quintana, H.A., Comportamiento de una mezcla asfáltica con incorporación de plástico para pavimentos aeroportuarios DYNA, 92(235), pp. 172-180, January - March, 2025.

Universidad Nacional de Colombia.
Revista DYNA, 92(235), pp. 172-180, January - March, 2025, ISSN 0012-7353
DOI: <https://doi.org/10.15446/dyna.v92n235.117161>

Tabla 1

Comparación de las características de pavimentos aeroportuarios y de carreteras.

Características	Aeropuertos	Carreteras
Vehículo de diseño	aeronaves	buses y camiones
Carga máxima	500 tf	52 tf
Presión de contacto	200 a 430 psi	85 a 120 psi
Velocidad de operación	260 a 280 km/hora	40 a 100 km/hora
Ancho de la sección	10 a 45 m	6 a 10 m
Largo	Entre 3 a 4 km	Varios km
Acción de frenado	Crítico	Despreciable
Impacto vehículo-pavimento	Alto	Bajo
Acción de carga dinámica	Alta	Baja

Fuente: Autores.

Adicionalmente, se reporta la movilización de 808.000 toneladas de carga para el comercio nacional y exterior. En total, para el año 2022 se alcanzaron aproximadamente 1.246.135 y 149.172 operaciones nacionales e internacionales, respectivamente [2]. No se reportan datos de años siguientes, dado que estos valores fueron inferiores en años siguientes debido a la pandemia de Covid-19.

Los pavimentos aeroportuarios son estructuras de materiales que se diseñan y construyen para soportar la acción del tránsito de aeronaves y la incidencia del clima [3]. Estos pavimentos presentan similitud con los pavimentos de carreteras en lo referente a los tipos de materiales [4,5]. Sin embargo, presentan diferencias considerables en la magnitud de carga, presiones, dimensiones, número de repeticiones de carga, velocidad de aplicación, entre otros [6]. En la Tabla 1 se observa un comparativo entre las principales características de pavimentos aeroportuarios y pavimentos de carreteras.

Los pavimentos aeroportuarios requieren mayor capacidad estructural para soportar la acción dinámica de las aeronaves [5]. Lo anterior implica mayores requerimientos técnicos en los materiales en términos de su rigidez y de espesores de las capas [6]. Adicionalmente, en las pistas de aterrizaje y despegue y rodaje o de aproximaciones se presenta mayor interacción dinámica entre la superficie y la aeronave [4]. Lo anterior implica mayor calidad en los aspectos funcionales del pavimento en términos de mayor resistencia al deslizamiento, rugosidad y menores deterioros superficiales, dado que las velocidades de operación de las aeronaves oscilan entre 260 a 280 km/hora [7,8].

El diseño de mezclas asfálticas para pavimentos aeroportuarios está regulado por las especificaciones de la Administración Federal de Aviación FAA AC 150/5370 [9]. La especificación contempla mezclas tipo P-401 tipo I, II y III, las cuales hacen referencia al tamaño máximo del agregado de 25 mm, 19 mm y 12.5 mm, respectivamente. El diseño se puede realizar por medio del ensayo Marshall o metodología Superpave. El asfalto por utilizar deberá ser calificado por grado de desempeño, por sus siglas en inglés PG Performance Grade según la especificación ASTM D4318. Adicionalmente deberá proporcionar recuperación elástica de 75% obtenida en el ensayo ASTM D6084. De forma general se requiere el uso de características Cementos Asfálticos Modificados CAM con polímeros. La obtención del contenido óptimo de asfalto se establece para garantizar

vacíos con aire Va en la mezcla de 3.5%. Asimismo, se debe garantizar la adherencia al daño por humedad inducida en la mezcla asfáltica, la cual es establecida por el parámetro TSR (Tensile Strength Ratio, por sus siglas en inglés) mínimo del 80%. Ese parámetro se obtiene a partir del ensayo ASTM D4867. Adicionalmente, se deben realizar ensayos para evaluar la resistencia a la deformación permanente que se puede evaluar mediante los ensayos de rueda de carga de Hamburg según AASHTO T-324 o el equipo APA (Asphalt Pavement Analyzer) conforme AASHTO T-340, los cuales establecen un valor máximo de desplazamiento final en la mezcla de 10 mm a 20000 y 40000 pasadas de carga a 50°C y 64°C, respectivamente.

Por lo anterior, para el diseño de mezclas asfálticas generalmente se requiere el uso de asfaltos modificados, a fin de generar mayor rigidez, resistencia a la deformación permanente y durabilidad de los pavimentos. Usualmente, se emplean modificadores del asfalto que pueden ser polímeros de tipo plastómeros o elastómeros, a fin de generar mayor rigidez o recuperación elástica [10]. En los últimos se investigado el uso de materiales alternativos para la modificación de asfalto. El uso de residuos plásticos para la fabricación de mezclas asfálticas contribuye a la preservación y conservación del medio ambiente por proponer una forma de disposición final de residuos sólidos [11-13]. La incorporación de plástico se puede realizar mediante la vía seca o húmeda, las cuales consisten en la adición sobre los agregados o modificación del asfalto, respectivamente [14]. Algunas investigaciones recomiendan el uso de plástico por vía seca empleando partículas cuadradas de tamaño inferior a 2.36 mm [15 -17]. De forma general, el uso de plástico genera un incremento de la resistencia ante carga monotónica y cíclica, evidenciada por en el ensayo Marshall, resistencia a tensión indirecta, módulo resiliente, deformación permanente, resistencia a la fatiga, en referencia a las mezclas convencionales (sin incorporación de plásticos) [18-22]. En la literatura no se reporta un contenido específico de plástico a incorporar, dado que depende del tipo de asfalto, agregados, granulometrías, tipo de mezcla, entre otras. Sin embargo, los rangos típicos de incorporación oscilan entre 2% a 10% en referencia a la masa del asfalto (vía húmeda) [23]25] y entre 0.1% y 1.0% en referencia a la masa total [15-18]. De forma general, diversos estudios se han realizado -para evaluar la incorporación de residuos plásticos en mezclas asfálticas para pavimentos de carreteras. Sin embargo, pocos estudios se reportan para mezclas asfálticas de pavimentos aeroportuarios.

El objetivo de este estudio fue evaluar el desempeño físico-mecánico de una mezcla asfáltica P-402 tipo II fabricada con cemento asfáltico modificado CAM con residuos de plástico tipo PET para buscar un aprovechamiento de residuos sólidos y contribuir su disposición final y ambientalmente segura. Lo anterior, con el fin de ser comparada con una mezcla convencional elaborada con CAM polímero tipo SBS, la cual es de común uso para la construcción de pavimentos aeroportuarios. Para tal fin fueron realizados los diseños de mezcla según el ensayo Marshall. Fueron realizados ensayos de resistencia ante carga monotónica (resistencia a tracción indirecta RTI), cíclica repetida (módulo resiliente y fatiga a esfuerzo

controlado) y estática (fluencia estática). Asimismo, se analizó la durabilidad mediante ensayos de susceptibilidad al agua definida por la relación del RTI en condiciones húmedas/secas y el ensayo cantabro.

2 Materiales y metodología

La metodología de este estudio se fraccionó en tres fases. La primera fase corresponde a la caracterización de materiales empleados para la fabricación de la mezcla asfáltica P401. La segunda fase corresponde al diseño de dos mezclas mediante la metodología Marshall, las cuales fueron denotadas como MDC P-401 CAM plástico y MDC P-401 CAM polímero. Finalmente, la tercera etapa se evaluó el comportamiento mecánico mediante ensayos de carga monotónica, cíclica y estática.

2.1 Materiales

Fueron empleados dos CAMs con residuos plástico tipo PET y con polímero (Ver Fig. 1). Estos materiales fueron denominados como: CAM plástico y CAM Polímero. CAM plástico se empleó el 6% de PET (contenido sobre el peso del asfalto) y Cemento Asfáltico tipo CA 60-70. La modificación se realizó empleando un agitador rotacional, con una velocidad de agitación de 3000 rpm durante 45 minutos a una temperatura de 175 °C. El CAM polímero corresponde a un material manufacturado según los lineamientos del artículo INVIAS 414 2022 [26].

En la Tabla 2 se evidencian los resultados de caracterización física en la condición original y sometida a envejecimiento a corto plazo. Estos indican que los materiales cumplen con los requisitos de calidad dispuestos en el artículo INVIAS 414 2022 [26]. Por otro lado, los agregados pétreos son de origen natural obtenidos de roca triturada en cantera para la ciudad de Bogotá. En la Tabla 3 se exponen los resultados de los ensayos de caracterización física. Según los valores obtenidos, es posible evidenciar que los mismos cumplen con las especificaciones de la Administración Federal de Aviación FAA AC 150/5370 para la fabricación de mezclas asfálticas tipo P-401 para capas de aeropuertos [9].

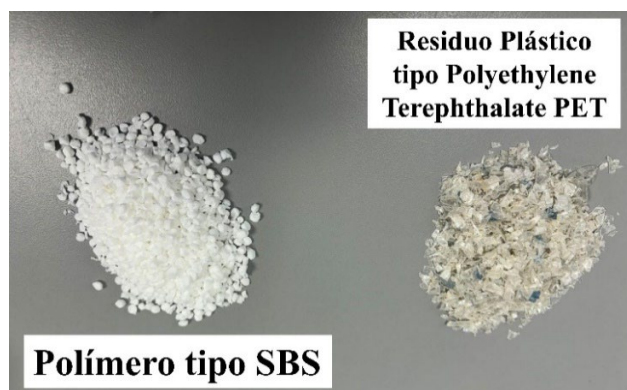


Figura 1. Materiales modificadores del cemento asfáltico.
Fuente: Autores.

Para la fabricación de mezclas asfálticas se empleó la granulometría tipo 2 de especificación AC 150/5370-10H [9] conforme se presenta en la Tabla 4.

Tabla 2.
Caracterización física de CAM plástico y polímero.

Ensayo	Especificación	CAM Polímero	CAM Plástico	Requisitos
Condición original				
Penetración (0.1 mm)	INV-E 706	56	56	55 - 70
Punto de ablandamiento (°C)	INV-E 712	87	86	mínimo 65
Ductilidad (cm)	INV-E 702	24	31	mínimo 15
Recuperación elástica por torsión (%)	INV-E 727	75	74.4	mínimo 70
Estabilidad al almacenamiento (°C)	INV-E 726	2.5	5	máximo 5
Punto de ignición (°C)	INV-E 709	286	294	mínimo 230
Envejecimiento a corto plazo				
Pérdida de masa (%)	INV-E 720	0.4	0.57	máximo 1
Penetración, en referencia al valor original (%)	INV-E 706	67.2	75.4	mínimo 65
Incremento del punto de ablandamiento (°C)	INV-E 712	5	5	máximo 10

Fuente: Autores.

Tabla 3.
Caracterización de los agregados para el diseño de mezclas.

Ensayo	Procedimiento	Especificación AC150/5370-10H	Resultado
Desgaste en la Máquina de los Ángeles (%)	ASTM C131	Máximo 40	21.2
Solidez en sulfato de Magnesio agregado grueso (%)	ASTM C88	Máximo 18	4.5
Terrones de arcilla en agregado grueso (%)	ASTM C142	Máximo 1	0.5
Caras fracturadas (1 cara)	ASTM D5821	Máximo 85	100
Caras fracturadas (2 caras)	ASTM D5821	Máximo 75	100
Partículas planas y alargadas (Relación 5:1)	ASTM D4791	Máximo 8	4.1
Límite Líquido (%)	ASTM D4318	Máximo 25	NL
Índice de Plasticidad (%)	ASTM D4318	Máximo 4	0
Solidez en sulfato de Magnesio en agregado fino (%)	ASTM C88	Máximo 15	9.5
Terrones de arcilla en agregado fino (%)	ASTM C142	Máximo 1	0.8
Equivalente de arena (%)	ASTM D1073	Mínimo 45	49

Fuente: Autores.

Tabla 4.
Granulometría tipo 2 para MDC P-401.

Tamiz	3/4"	1/2"	3/8"	4	8	16	30	50	100	200
Pasa (%)	100	95	80	63	49	37	28	19	12	4.5

Fuente: FAA AC 150/5370-10H [9]

2.2 Diseño de mezclas asfálticas

Se realizó el diseño de dos mezclas asfálticas MDC tipo P-401 según la especificación INVIAS 748 2013 empleando CAM con plástico y polímero por medio del método Marshall para determinar el contenido óptimo de asfalto. Fueron realizadas briquetas tipo Marshall de aproximadamente 101 mm y 63.5 mm de diámetro y altura, respectivamente. Se realizaron briquetas de 1200 g de material empleando contenidos probables de 5.5%, 6.0%, 6.5%, 7.0% y 7.5% de CAM. La compactación se realizó mediante la aplicación de 75 golpes por cada cara con el martillo Marshall. Los intervalos de temperatura para la fabricación fueron de 163 a 171°C y 165 a 175°C para las mezclas con CAM plástico y polímero, respectivamente. Para las dos mezclas el rango de temperatura de compactación fue de 150 a 155°C. En total, fueron realizadas 30 briquetas correspondiente a 5 contenidos de asfalto, 2 tipos de mezclas y 3 repeticiones por cada ensayo.

A partir de la fabricación de las briquetas se determinó la composición volumétrica, es decir: vacíos con aire V_a ; Vacíos en el Agregado Mineral VAM y Vacíos llenos de Asfalto VFA. Luego fueron sometidas en una prensa tipo Marshall a la acción de carga monotónica utilizando una velocidad de 48 mm/minuto hasta la falla. Se determinó la Estabilidad, Flujo y relación E/F Marshall sobre briquetas previamente acondicionadas a temperatura de 60 °C durante un tiempo de 35 minutos. Según los protocolos de FAA AC 150/5370, el contenido óptimo de asfalto se definió para V_a de 3.5%. A partir de ese valor, se fueron fabricadas briquetas para analizar el desempeño mecánico de las mezclas.

2.3 Caracterización mecánica

2.3.1 Resistencia a la tracción indirecta

Se realizó el ensayo de resistencia a la tracción indirecta RTI según la norma de ensayos INVIAS 725 2013 en condiciones secas y húmedas a fin de analizar la susceptibilidad al agua. las briquetas fueron sometidas a la acción de carga monotónica aplicando una velocidad de deformación de 50 mm/minutos hasta la falla. RTI se calculó con la Ecuación 1, donde P es la carga máxima de ruptura en N, d y h corresponde al diámetro y la altura en mm, respectivamente. Previamente, en condiciones secas las briquetas fueron sometidas a 25 °C durante 1 hora. En condiciones húmedas, las briquetas fueron sometidas a 60 °C en baño María por 24 horas, luego a 25 °C durante 2 horas. La susceptibilidad al agua fue determinada con la Ecuación 2, donde RRTI corresponde a la relación de resistencia a la tracción indirecta, RTIs y RTIh son los resultados de los ensayos en condiciones secas y húmedas, respectivamente. En este estudio las mezclas fueron compactadas con V_a entre 3.5±0.2%, dado que el objetivo era evaluar el desempeño de mezclas según los lineamientos FAA AC 150/5370 [9].

$$RTI = \frac{2000 \cdot P}{\pi \cdot d \cdot h} \quad (1)$$

$$RRTI = \frac{RTI_h}{RTI_s} \cdot 100 \quad (2)$$

2.3.2 Ensayo de módulo resiliente y resistencia a la fatiga

Ensayos de caracterización dinámica fueron realizados en una máquina Universal UTM-30. El ensayo de Módulo resiliente por compresión diametral sobre briquetas tipo Marshall se realizó según la norma de ensayo INVIAS 749 2013. Las briquetas fueron sometidas a la aplicación de 100 ciclos de carga de 1200 N asumiendo un coeficiente de Poisson de 0.3. Se utilizaron frecuencias de carga de 2.5 Hz, 5.0 Hz y 10 Hz a temperatura de 20 °C. Los valores obtenidos corresponden al promedio de tres briquetas. El ensayo de fatiga por compresión diametral (esfuerzo controlado) se realizó a 20 °C empleando carga cíclica (450 kPa) a una frecuencia de 2.5 Hz hasta la falla. Se emplearon 5 muestras por cada tipo de mezcla, a fin de obtener un valor promedio, dada la dispersión del ensayo.

2.3.3 Ensayo de fluencia estática

El ensayo de fluencia estática se realizó según el reporte 465 de Programa de Cooperación Nacional de Carreteras de Estados Unidos NCHRP 2002, por sus siglas en inglés National Cooperative Highway Research Program [27] Para tal fin fue empleada una carga estática de 100 kPa sobre una cara de la biqueta tipo Marshall por 3600 segundos a una temperatura de 20°C. Durante la aplicación del ensayo se determinaron los desplazamientos verticales axiales que experimentó la muestras en dos extremos. Los resultados presentados corresponden al promedio de 3 briquetas por cada tipo de mezcla. Se determinó la velocidad de deformación (vd) en $\mu\text{m}/\text{minuto}$ conforme la Ecuación 3, donde dt_2 y dt_1 corresponden a los desplazamientos verticales presentados en los tiempos 1800 (t_1) y 3600 (t_2), respectivamente. Los resultados presentados corresponden al promedio de tres briquetas.

$$Vd = \frac{d_{t_2} - d_{t_1}}{t_2 - t_1} \quad (3)$$

2.3.4 Ensayo Catabro

En ensayo cantabro se realizó con el objetivo de evaluar la durabilidad de mezclas asfálticas. A pesar de ser un ensayo que se realiza para el diseño de mezclas asfálticas drenantes, puede proporcionar un indicador de la durabilidad de las mezclas densas ante desprendimientos de agregados. Para tal fin, cada una de las briquetas fue sometida a 300 giros en la Máquina de Los Ángeles (sin esferas). Como resultado es obtenido el desgaste a la abrasión (D) conforme la Ecuación 4. Donde m_i y m_f corresponde a la masa inicial y final antes y después del ensayo, respectivamente. Los resultados presentados corresponden al promedio de tres briquetas.

$$D = \frac{m_i - m_f}{m_i} \cdot 100 \quad (4)$$

2.4 Análisis estadísticos ANOVA

Se realizaron análisis estadísticos ANOVA a fin de comparar si las variaciones en los resultados son significativas. Para tal fin, se estableció un nivel de confiabilidad de 95%.

3 Resultados

3.1 Ensayo Marshall

Resultados del diseño Marshall para las mezclas MDC P401 se presentan en la Fig. 2.

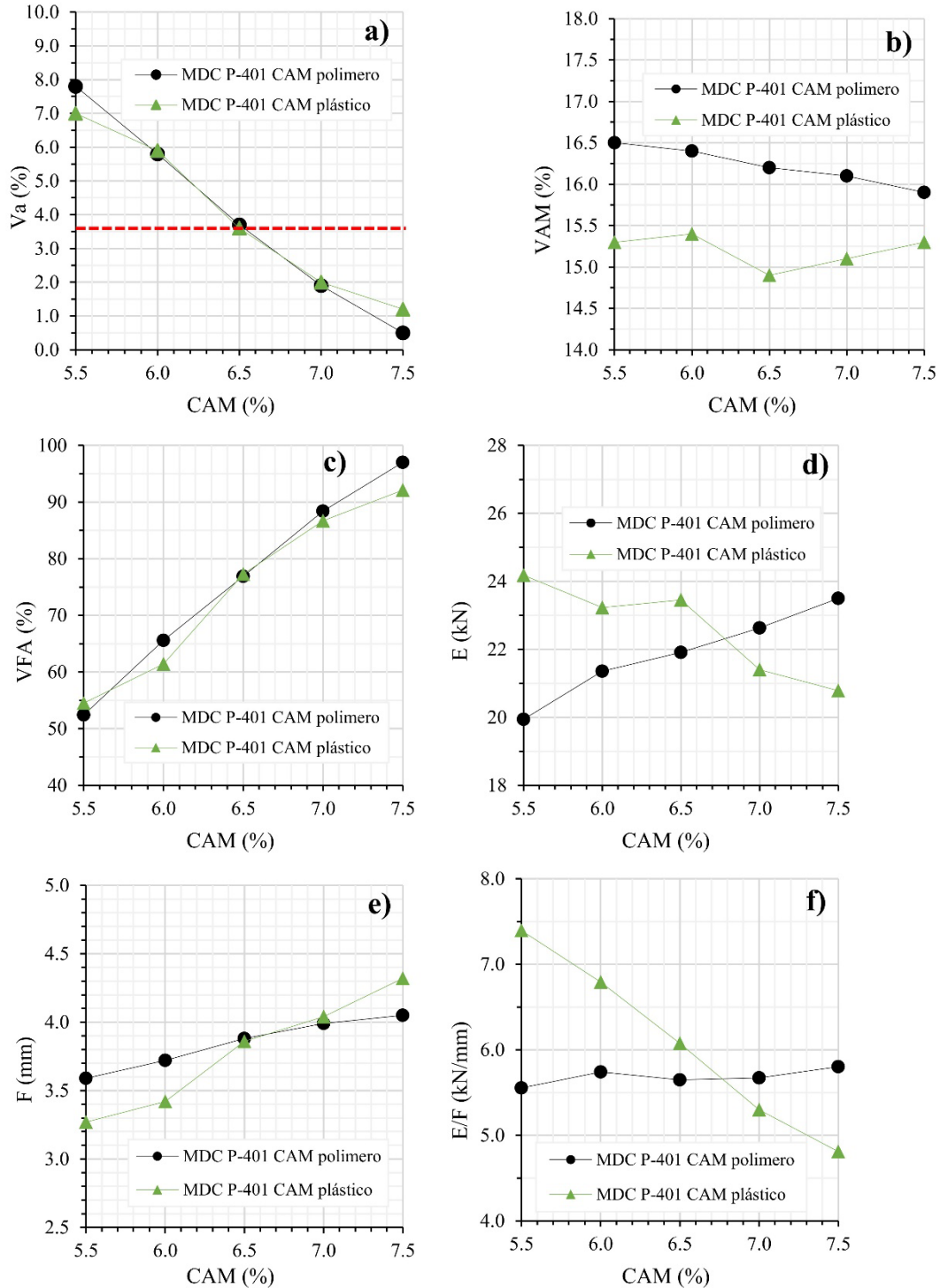


Figura 2. Resultados del diseño de mezclas MDC P-401 con CAM polimero y plástico: a) Va; b) VAM; c) VFA; d) E; e) F; f) E/F Marshall. Fuente: Autores.

Las evoluciones de Va y VFA para los contenidos de CAM son similares para las dos mezclas, lo cual indica que existen el mismo recubrimiento de las partículas en la MDC P401 al emplear CAM modificado con polímero con residuos plásticos tipo PET. Sin embargo, la mezcla con CAM polímero presenta aumento de VAM en aproximadamente 1% para todos los contenidos de CAM evaluados. Lo anterior, puede indicar que existe un leve incremento de la lámina de recubrimiento del agregado con CAM al emplear polímero. En ambos casos, las mezclas asfálticas cumplen con el valor mínimo establecido en la FAA AC 150/5370 2018 de 15%. En términos de los parámetros de resistencia ante carga monotónica, para 6.5% de CAM se evidencia que la MDC P 401 CAM plástico experimentó un aumento en aproximadamente 7% y 9% de E y rigidez Marshall (E/F), en referencia a la MDC P 401 CAM polímero. Lo anterior, indica que el uso de residuos plásticos puede mejorar levemente la resistencia a la acción de carga monotónica a temperatura de 60°C, es decir, puede contribuir a mejorar la resistencia a la deformación permanente en pavimentos sometidos a climas cálidos. Basados en los lineamientos FAA AC 150/5370 2018 para Va de 3.5%, se estableció que el contenido óptimo de asfalto para la MDC P-401 con CAM modificado con polímero y plástico corresponde a 6.6%.

3.1 Ensayo de tensión indirecta RTI

En la Figura 3 se presentan los resultados de RTI en condiciones secas, húmedas y RRTI para las mezclas MDC P-401 con CAM polímero y plástico.

De forma general, los resultados indican que la MDC P-401 CAM polímero experimentó mayor RTI en condiciones secas y húmedas. Sin embargo, análisis ANOVA reportaron que esas variaciones no son significativas para las condiciones secas ($F_0=3.00 < F_{0.05}=7.71$) y húmedas ($F_0=0.88 < F_{0.05}=7.71$). Lo anterior permite deducir que los valores de RTI son similares, lo cual puede ser explicado por tener el mismo contenido de CAM y la misma composición

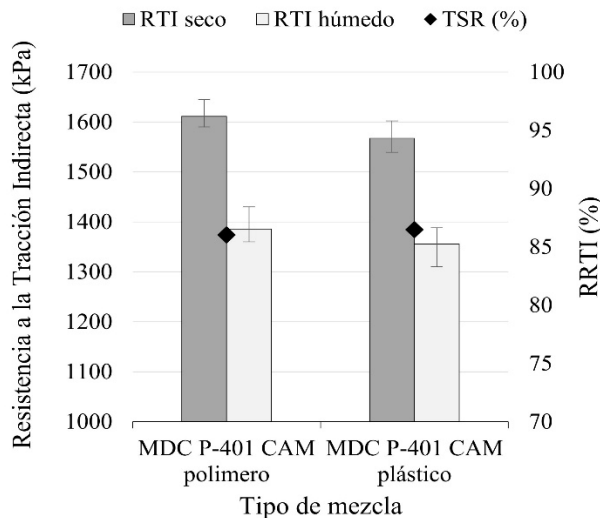


Figura 3. Resultados de ensayos de tensión indirecta.
Fuente: Autores.

volumétrica (Va y VFA). Resultados similares se determinaron al analizar la susceptibilidad mediante RRTI. Es decir, el uso de CAM modificado con plástico no afecta la adherencia y susceptibilidad al agua de la mezcla. Adicionalmente, los valores de RRTI cumplen con el valor mínimo establecido por FAA AC 150/5370 de 80% [9].

3.2 Ensayo de módulo resiliente

En la Figura 4 se presentan los resultados de módulo resiliente para las dos mezclas de estudio a frecuencias de 2.5, 5.0 y 10 Hz a 20°C. De forma general, la MDC P-401 CAM polímero experimentó mayor módulo resiliente para todas las frecuencias analizadas. Resultados ANOVA indican que para las frecuencias de 2.5 y 5.0 Hz no se presentan variaciones significativas entre las dos muestras, dado que $F_0=3.35 < F_{0.05}=7.71$ y $F_0=4.64 < F_{0.05}=7.71$, respectivamente. Sin embargo, para frecuencia de 10 Hz las variaciones son significativas $F_0=22.24 < F_{0.05}=7.71$. Lo anterior indica que la presencia del polímero genera mayor rigidez en la mezcla ante la acción carga repetida cíclica a 10 Hz.

3.3 Ensayo de resistencia a fatiga

En la Figura 5 se exponen los resultados de la resistencia a la fatiga a esfuerzo controlado de 450 kPa.

Los resultados indican que la MDC P-401 CAM polímero experimentó un leve aumento de ciclos hasta de ruptura. Estos resultados son coherentes con los obtenidos en los ensayos de tensión indirecta ante carga monotónica (RTI) y carga repetida cíclica (módulo resiliente). Sin embargo, análisis ANOVA indican que las variaciones de los resultados de las dos mezclas no son significativas ($F_0=0.29 < F_{0.05}=5.31$). Lo anterior indica que la incorporación de los residuos plásticos como material alternativo para CAM no reduce la resistencia al agrietamiento en mezclas asfálticas.

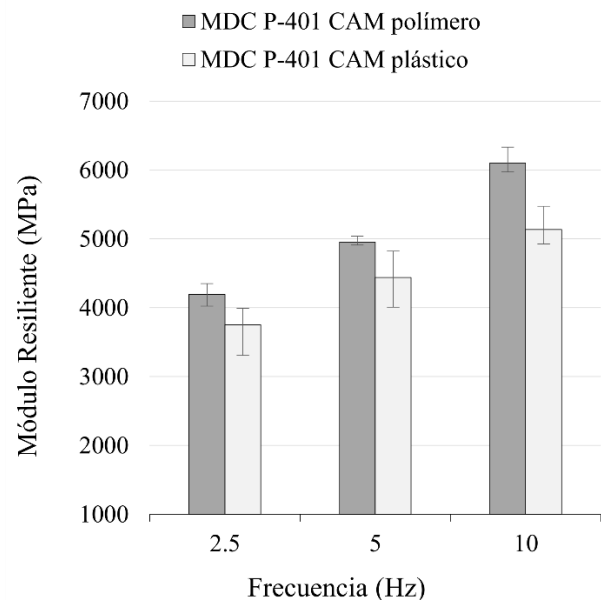


Figura 4. Resultados de ensayos de Módulo Resiliente.
Fuente: Autores.

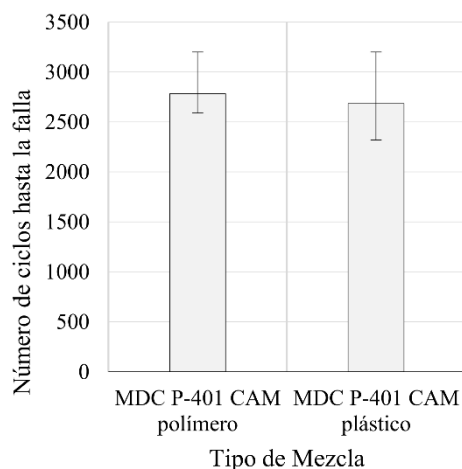


Figura 5. Resultados de ensayos de tensión indirecta.
Fuente: Autores.

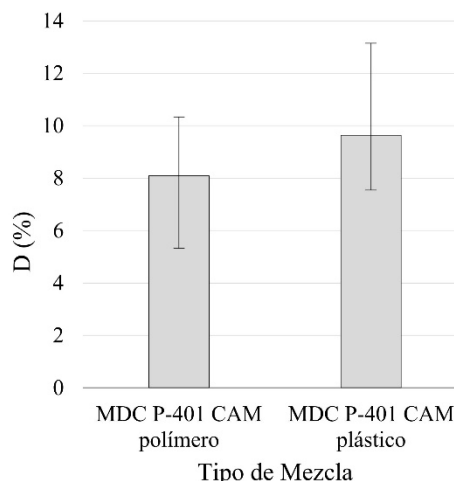


Figura 7. Resultados del ensayo cantabro.
Fuente: Autores.

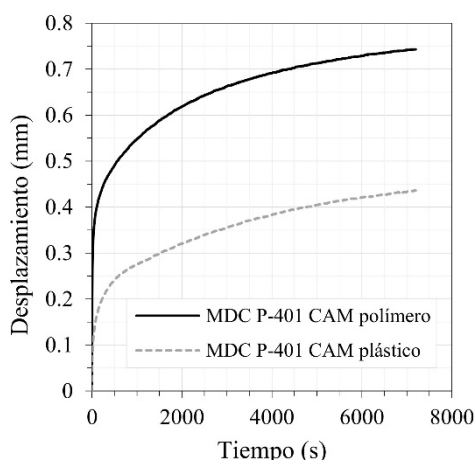


Figura 6. Resultados de ensayos de fluencia estática.
Fuente: Autores.

3.4 Ensayo de fluencia estática

En la Fig. 6 se presentan los resultados del ensayo de fluencia estática para las dos mezclas de estudio.

A partir de los resultados, es posible evidenciar que las briquetas tipo MDC P-401 polímero experimentaron mayor deformación vertical durante el ensayo, lo cual puede indicar menor resistencia a la deformación permanente en referencia a las mezclas con plástico. Lo anterior, también es evidenciado con la velocidad de deformación, dado que la MDC P-401 CAM polímero y con plástico experimentaron valores de 2.267 $\mu\text{m}/\text{minuto}$ y 2.067 $\mu\text{m}/\text{minuto}$. Lo anterior indica que la presencia del plástico tipo PET puede mejorar el comportamiento de la mezcla al ser sometida ante carga de compresión. Estos resultados son coherentes con los obtenidos en el ensayo Marshall, donde también se evidenció incremento de E y E/F ante la acción de carga monotónica a compresión.

3.5 Ensayo cantabro

En la Figura 7 se presentan los resultados del ensayo cantabro realizado sobre las mezclas MDC P-401 CAM polímero y plástico. Los resultados muestran que existe aumento en el desgaste a la abrasión en la MDC P-401 CAM plástico, lo cual indica mayor desprendimiento de las partículas durante el ensayo, pudiendo afectar la durabilidad de la mezcla. Estos resultados son coherentes con los evidenciados en los ensayos RTI, RRTI, módulo resiliente y resistencia a la fatiga, donde las briquetas MDC P-401 CAM plástico experimentaron una leve reducción de sus valores en comparación a MDC P-401 plástico. Sin embargo, los análisis estadísticos ANOVA reportan $F_0=0.46 < F_{0.05}=7.70$, lo cual indica que las diferencias entre los ensayos no son significativas.

4 Conclusiones

El objetivo de este estudio fue evaluar el desempeño físico-mecánico de dos mezclas asfálticas tipo P-401 fabricadas con asfalto modificado con residuos de plástico y polímero a fin de ser empleadas para la construcción de capas de pavimentos de aeropuertos. A partir de los ensayos realizados, es posible concluir que:

La utilización de CAM plástico en el diseño de una mezcla tipo MDC P-401 generó el mismo contenido óptimo de asfalto, volumen de vacíos y vacíos llenos de asfalto que la mezcla fabricada con CAM polímero. Adicionalmente, mejoró la resistencia ante la acción de carga monotónica, definido por la estabilidad y rigidez Marshall (E/F). Lo anterior originó incremento de la resistencia a la deformación permanente mediante el ensayo de fluencia estática.

La MDC P-401 plástico experimentó leve reducción de la resistencia a la tensión indirecta ante carga monotónica y cíclica repetida (módulo resiliente y resistencia a la fatiga). Adicionalmente, se evidenció un leve aumento en el desgaste cantabro. Sin embargo, análisis estadísticos indican que esas variaciones no son significativas. Por lo

anterior, el uso del CAM plástico no afecta el desempeño físico mecánico y la durabilidad de la mezcla asfáltica para aeropuertos.

El uso de residuos plásticos tipo PET puede ser viable desde el punto de vista técnico, ambiental, social y económico por permitir la incorporación de materiales reciclados en la fabricación de mezclas de concreto asfáltico para capas de pavimentos aeroportuarios. Adicionalmente, promover prácticas de reciclaje para buscar la disposición final y segura ambientalmente de residuos sólidos. Mayores estudios se deben realizar con el objetivo de mejorar la adherencia entre el asfalto y el plástico, a fin de incrementar la resistencia a tensión (p.e. Uso de promotores de adherencia, pretratamientos al residuo plástico, entre otros). Asimismo, se debe validar los hallazgos encontrados en este estudio a mediana y gran escala mediante ensayos de campo y laboratorio. Adicionalmente, se recomienda evaluar diferentes fuentes de agregados, materiales asfálticos y tipos de granulometrías.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Católica de Colombia y la Universidad Distrital José Francisco de Caldas por el apoyo para el desarrollo de la investigación. Asimismo, a la coordinación de laboratorios de la Facultad de Ingeniería por la ejecución de los ensayos.

Referencias

- [1] Ministerio de Transporte de Colombia. Anuario Nacional de Transporte. Bogotá, 2021.
- [2] Ministerio de Transporte de Colombia. Anuario Nacional de Transporte. Bogotá, 2022.
- [3] Correia, D., and Ferreira, A., Energy harvesting on airport pavements: state-of-the-art, *Sustainability*, 13(5893), pp. 1-20, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13115893>
- [4] White, G., State of the art: asphalt for airport pavement surfacing, *International Journal of Pavement Research and Technology*, 11(1), pp. 77-99, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.07.008>
- [5] White, G., State of the art: interface shear resistance of asphalt surface layers, *International Journal of Pavement Engineering*, 18(10), pp. 887-901, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1080/10298436.2015.1126270>
- [6] Loizos A., and Charonitis, G., Bearing capacity and structural classification of flexible airport pavements, *Journal of Transportation Engineering*, 130(1), pp. 34-42, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1061/ASCE0733-947X2004130:134>
- [7] Loprencipe, G., and Zoccali, P., Comparison of methods for evaluating airport pavement roughness, *International Journal of Pavement Engineering*, 20(7), pp. 782-791, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1080/10298436.2017.1345554>
- [8] Miah, M.T., Oh, E., Chai, G., and Bell, P., An overview of the airport pavement management systems (APMS), *International Journal of Pavement Research and Technology*, 13(6) pp. 581-590, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42947-020-6011-8>
- [9] Federal Aviation Administration FAA, AC 150/5370-10H, Standard Specifications for Construction of Airports. Washington, DC, 2018.
- [10] Bastidas-Martínez J.G., and Rondón-Quintana H.A., Caracterización de mezclas de concreto asfáltico. Editorial Universidad Piloto de Colombia, Bogotá, Colombia, 2020.
- [11] Sulyman, M., Haponiuk, J., and Formela, K., Utilization of Recycled Polyethylene Terephthalate (PET) in engineering materials: a review, *International Journal of Environmental Science and Development*, 7(2), pp. 100-108, 2016. DOI: <https://doi.org/10.7763/IJESD.2016.V7.749>
- [12] Almahdi, B.A., Ahmeda, A.G., Adwan, I., and Ladin, M.A. Feasibility of utilizing waste polyethylene terephthalate as replacement in asphalt binder mixture, *KBES*, 2(1), pp. 1-11, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123377>
- [13] You, L., Long, Z., You, Z., Ge, D., Yang, X., Xu, F., Hashemi, M., and Diad, A., Review of recycling waste plastics in asphalt paving materials, *Journal of traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 9(5), pp. 742-764, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2022.07.002>
- [14] Rincón-Estapa, J.A., González-Salcedo, E.V., Rondón-Quintana, H.A., Reyes-Lizcano, F.A., and Bastidas-Martínez, J.G., Mechanical behavior of low-density polyethylene waste modified hot mix asphalt, *Sustainability*, 14(7), pp. 1-19, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14074229>
- [15] Moghaddam, T., Karim, M., and Syammaun, T., Dynamic properties of stone mastic asphalt mixtures containing waste plastic bottles, *Construction and Building Materials*, 34(1), pp. 236-242, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.054>
- [16] Moghaddam, T., Soltani, M., and Karim, M., Evaluation of permanent deformation characteristics of unmodified and Polyethylene Terephthalate modified asphalt mixtures using dynamic creep test, *Materials & Design*, 53(1), pp. 317-324, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.07.015>
- [17] Esfandabad, A.S., Motevalizadeh, S.M., Sedghi, R., Ayar, P., and Asgharzadeh, S.M., Fracture and mechanical properties of asphalt mixtures containing granular polyethylene terephthalate (PET), *Construction and Building Materials*, 259(120410), pp. 1-10, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120410>
- [18] Ziari, H., Kaliji, A.G., and Babagoli, R., Laboratory evaluation of the effect of waste plastic bottle (PET) on rutting performance of hot mix asphalt mixtures, *Petroleum Science and Technology*, 34(9), pp. 819-823, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1080/10916466.2016.1169290>
- [19] Dehghan, Z., and Modarres, A., Evaluating the fatigue properties of hot mix asphalt reinforced by recycled PET fibers using 4-point bending test, *Construction and Building Materials*, 139, pp. 384-393, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.082>
- [20] Jegatheesan, N., Rengarasu, T.M., and Bandara, W., Mechanical properties of modified hot mix asphalt containing polyethylene terephthalate fibers as binder additive and carbonized wood particles as fine aggregate replacement, *Asian Transport Studies*, 6(100029), pp. 1-11, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eastsj.2020.100029>
- [21] Azarhoosh, A., Koohmishi, M., and Hamed, G.H., Rutting resistance of hot mix asphalt containing coarse recycled concrete aggregates coated with waste plastic bottles, *Advances in Civil Engineering*, 2021(1), pp. 1-11, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/9558241>
- [22] Ghabchi, R., Dharmarathna, C.P., and Mihandoust, M., Feasibility of using micronized recycled Polyethylene Terephthalate (PET) as an asphalt binder additive: a laboratory study, *Construction and Building Materials*, 292(123377), 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123377>
- [23] Ahmadinia, E., Zargar, M., Karim, M., Abdelaziz, M., and Ahmadinia, E., Performance evaluation of utilization of waste Polyethylene Terephthalate (PET) in stone mastic asphalt, *Construction and Building Materials*, 36, pp. 984-989, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.015>
- [24] Gürü, M., Çubuk, M., Arslan, D., Farzanian, S.A., and Bilici, I., An approach to the usage of polyethylene terephthalate (PET) waste as roadway pavement material, *Journal of Hazardous Materials*, 279, pp. 302-310, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.07.018>
- [25] Ameri M., and Nasr, D., Performance properties of devulcanized waste PET modified asphalt mixtures, *Petroleum Science and Technology*, 35(1), pp. 99-104, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1080/10916466.2016.1251457>
- [26] INVIAS, Instituto Nacional de Vías - INVIAS. Especificaciones Generales para Construcción de Carreteras. Bogotá D.C., Colombia, 2022.
- [27] NCHRP National Cooperative Highway Research Program, Simple Performance Test for Superpave Mix Design, National Academy Press, 2002.

J.G. Bastidas-Martínez, es Ing. Civil en 2010, de la Universidad del Cauca Colombia. MSc. en Geotecnia en 2014, y PhD. en Geotécnica en 2017 de la Universidad de Brasilia, Brasil. Profesor de la línea de Geotecnia y Pavimentos en cursos de pregrado y posgrado. Premio Nacional de Ingeniería Diodoro Sanches, otorgado por la Sociedad Colombiana de Ingenieros en 2021.
ORCID: 0000-0002-6818-0322.

J. M. Loaiza-Mendoza, es Ing. Civil egresada de la Escuela de Ingenieros Militares, Colombia en 2020. Esp. en Ingeniería de Pavimentos de la Universidad Católica de Colombia en 2024. Tiene amplia experiencia en construcción de pavimentos asfálticos para carreteras y aeropuertos.
ORCID: 0009-0007-8849-2968

J. Iguarán-Pabón, es Ing. Civil egresado de la Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta, Colombia en 2014. Esp. en Ingeniería de Pavimentos de la Universidad Católica de Colombia en 2024. Tiene amplia experiencia en la construcción de obras de infraestructura.
ORCID: 0009-0004-8346-0690

J.C. Ruge Cardenás, es Ing. Civil de la Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta, Colombia en 2002. MSc. en Ingeniería Civil con énfasis en infraestructura vial de la Universidad de los Andes en Colombia, en 2005. PhD. en Geotecnia de la Universidad de Brasilia, Brasil en 2014. Realizo una estancia posdoctoral en el Departamento de Ingeniería Civil y de Agricultura de la Universidad Nacional en 2017.
ORCID: 0000-0002-9100-6058

H.A. Rondón-Quintana, es Ing. Civil egresado de la Universidad Francisco de Paula Santander. MSc. en Ingeniería Civil con énfasis en infraestructura vial de la Universidad de los Andes. PhD en Ingeniería de la Universidad de Los Andes, Colombia. Posdoctorado en la Universidade de Brasília – UnB. Actualmente es profesor titular y emérito de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
ORCID: 0000-0003-2946-9411