

**Evaluación de mezclas  
asfálticas reciclables con  
aditivos: Una alternativa  
de reducción de impactos  
económicos y ambientales**

**Evaluation of recyclable  
asphalt mixes with  
additives as an option for  
reducing economic and  
environmental impacts.**

**Avaliação de misturas  
asfálticas recicláveis com  
aditivos como alternativa  
de redução de impactos  
econômicos e ambientais.**

Para citar este artículo / To reference this article / Para citar este artigo: Martínez Montaña, Y.P y Higuera Sandoval, C.H. (2016). Evaluación de mezclas asfálticas reciclables con aditivos: alternativa de reducción de impactos económicos y ambientales. *Ingenio Magno*, 7(2), 10-24.

**Yeny Paola Martínez-Montaña**

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia,  
Facultad de Ingeniería, Vías y Transporte, Grupo de  
Investigación y Desarrollo en  
Infraestructura Vial (Grinfravial)  
[ymartinez@gasnaturalfenosa.com](mailto:ymartinez@gasnaturalfenosa.com)

**Carlos Hernando Higuera-Sandoval**

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia,  
Facultad de Ingeniería, Vías y Transporte, Grupo de  
Investigación y Desarrollo en  
Infraestructura Vial (Grinfravial)  
[carlos.higuera@uptc.edu.co](mailto:carlos.higuera@uptc.edu.co)

Fecha Recepción: 01 de Junio de 2016

Fecha Aceptación: 30 de Junio de 2016

## Resumen

El presente artículo de investigación es un aporte, desde el punto de vista académico, en el uso de nuevas mezclas asfálticas que apunten a la solución de necesidades prioritarias en el mantenimiento de la red vial. Se evalúan cuatro mezclas asfálticas (MDC-19) a través de la metodología Marshall, con el uso de material de reciclaje proveniente del fresado de pavimentos (RAP) y con variaciones en el contenido de la mezcla. La etapa preexperimental comprendió la realización de ensayos de laboratorio para la caracterización de los componentes de las mezclas de diseño, de acuerdo con las normas establecidas por el Instituto Nacional de Vías (Invías). La fase experimental evaluó la mezcla en cuanto al módulo dinámico, la resistencia por deformación a la fatiga y la adherencia. De acuerdo con los resultados, se incrementa el óptimo de asfalto según la relación de contenido RAP en la mezcla; se evidenció también la mejora de esta en cuanto a la resistencia y la deformación. Por otra parte, se validó como satisfactoria la utilización del aditivo rejuvenecedor en el material de reciclaje RAP, lo que permite afirmar que el aditivo mejoró notoriamente las condiciones del asfalto.

**Palabras clave:** reciclaje, rejuvenecedores de asfalto, RAP, pavimentos, rehabilitación, costos ambientales.

## Abstract

This research project is a contribution, from an academic point of view, to the use of new asphalt mixtures aimed at solving priority needs in road network maintenance. Its main goal was the evaluation of four asphalt mixtures [MDC - 19], via the Marshall method, using recycled material from planed pavement [RAP] with variations in the content of the mixture. The pre-experimental stage included laboratory testing for the characterization of the components of the design mixes, in accordance with the standards set by the National Roads Institute; the experimental phase evaluated the mixture with regard to the dynamic module, the resistance to distortion due to fatigue and the adhesion. According to the results we determined that the optimum amount of asphalt increases according to the relation of RAP content in the mixture and there was evidence of an improvement of the same regarding resistance and distortion; moreover, the study validated as satisfactory the use of the rejuvenating additive material in the recycled RAP material which allows us to confirm that the additive significantly improved the conditions of the asphalt.

**Keywords:** recycling, asphalt rejuvenators, RAP, pavement, restoration, environmental costs

## Resumo

O presente projeto de pesquisa é uma contribuição desde o ponto de vista acadêmico, e o uso de novas misturas asfálticas destinadas a resolver as necessidades prioritárias na manutenção da rede rodoviária, cujo objetivo principal foi a avaliação de quatro misturas asfálticas [MDC – 19], através da metodologia Marshall, com o uso de material de reciclagem proveniente da fresagem de pavimentos [RAP] e com variações no conteúdo da mistura. A fase pré-experimental compreendeu a realização de ensaios de laboratório para a caracterização dos componentes de misturas do projeto, em concordância com as normas estabelecidas pelo Instituto Nacional de Vias; na fase experimental, avaliou-se a mistura em relação ao módulo dinâmico, resistência à deformação, fadiga e à aderência. Segundo os resultados obteve-se o asfalto ótimo de acordo com a relação de conteúdo de RAP na mistura e se evidenciou a melhora da mesma em relação à resistência e a deformação; por outro lado, se aceitou como satisfatória a utilização do aditivo rejuvenecedor no material de reciclagem RAP o que permite afirmar que o aditivo melhorou notoriamente as condições do asfalto.

**Palavras Chave:** reciclagem, rejuvenescedores de asfalto, RAP, pavimentos, reabilitação, custos ambientais.

## 1. Introducción

Los proyectos viales son uno de los principales factores que contribuyen al desarrollo de una comunidad, por cuanto generan competitividad y crecimiento económico y turístico, al tiempo que se mejora el bienestar del ciudadano. El gobierno y las entidades competentes invierten **año a año en la construcción**, el mantenimiento y la rehabilitación de la red vial primaria, secundaria y terciaria en cada uno de los municipios del país.

Para el mantenimiento de la red vial se han utilizado diferentes técnicas, pero la que ha tomado gran relevancia en varios países de Europa y Estados Unidos es el reciclado de pavimentos (Méndez, 2015). Las técnicas de aprovechamiento de subproductos y reutilización de materiales para la construcción o el mejoramiento de carreteras se conocen hace más de cincuenta **años**. Esta técnica ha generado la reducción en los costos y ha permitido reducir el impacto sobre el medioambiente.

Las tendencias actuales de la ingeniería de los pavimentos y del aprovechamiento óptimo de los recursos han impulsado procesos de investigación de productos que den solución a las necesidades del mantenimiento de la red vial. Se busca con ello mejorar el nivel de desempeño y el tiempo de vida útil de las carreteras, para lo cual es necesario evaluar alternativas de reutilización de materiales con el propósito de disminuir los impactos ambientales y reducir costos.

Empresas como Coralfaltos, Proim y Tecnopav han desarrollado aditivos rejuvenecedores de asfalto que devuelven las propiedades reológicas (viscoelásticas) y cementantes (físico-químicas) necesarias para tener unas capas estructurales de mejores condiciones. El producto se encarga de proporcionar al asfalto envejecido los componentes perdidos, de tal forma que recuperan sus propiedades originales; además

crea un reacomodo en el asfalto, lo cual disminuye la permeabilidad al agua y al aire.

## 2. Materiales y métodos

Los materiales empleados para el diseño de las mezclas tuvieron dos orígenes: los naturales, correspondientes a los agregados pétreos, y los provenientes del material de reciclaje RAP, que, al ser combinados con el asfalto y el rejuvenecedor en las gradaciones diseñadas, dan como resultado un conglomerado con características particulares (figura 1).

El comportamiento de un pavimento se ve altamente influenciado por la selección apropiada del agregado, debido a que este proporciona la mayoría de las características de capacidad portante (Corporación para la Investigación y Desarrollo de Asfaltos, 2011).

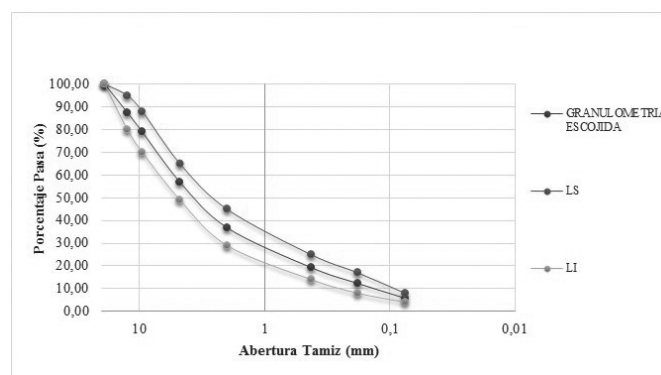


Figura 1. Curva granulométrica 10% de RAP

Los materiales empleados en los ensayos del presente trabajo de investigación fueron donados. El material grueso, agregado fino, material de reciclaje RAP y asfalto fue donado por el consorcio Solarte y Solarte, del acopio del material disponible en el kilómetro 7, intersección Toca a Tunja, vereda Pirgua, finca el Retamo, el cual es proveniente de canteras de los municipios de Nobsa y Sogamoso.

Por otra parte, el aditivo rejuvenecedor de asfalto Rejuiproim fue donado por la Empresa Proim, que brindó

su apoyo en contraprestación por conocer los resultados obtenidos en la investigación y ser reconocidos a lo largo del proyecto.

## A. Caracterización del material granular

Tabla 1. Caracterización de agregados pétreos

Ensayo	Norma	Resultado	Especificación norma Invías	Observación
Desgaste en la máquina de los ángeles	INV-E 218-13	19,77%	25% máx.	Cumple
Pérdida en el ensayo de solidez	INV-E 220-13	Fino 15,23%	18% máx.	Cumple
		Grueso 12,36%		
Partículas planas	INV-E 240-13	9,30%	10% máx.	Cumple
Partículas alargadas		8,88%		
Gravedad específica y absorción de los agregados finos	INV-E 222-13	Gsb 2,425		
		Gsb sss 2,503		
		Gsa 2,632		
		% de absorción 3,25%		
Gravedad específica y absorción de los agregados grueso	INV-E 223-13	Gsb 2,425		
		Gsb sss 2,667		
		Gsa 2,678		
		% de absorción 0,25%		
Equivalente de arena	INV-E 133-13	49,93%	≥50%	Cumple
Partículas fracturadas	INV-E 227-13	100%	60% mín.	Cumple

Estos ensayos se hicieron teniendo en cuenta los procedimientos y las especificaciones de los ensayos de laboratorio establecidos por el Invías (2013). En la tabla 1 se puede evidenciar que en la caracterización de los materiales (agregado grueso), se cumple con

los requerimientos de la tabla 450-13: “Ensayos de verificación sobre el llenante mineral de aporte para mezclas en caliente de gradación continua”, del Invías (2013).

## B. Caracterización del cemento asfáltico

Tabla 2. Resultados obtenidos de la caracterización del cemento asfáltico

Propiedad	Norma	Resultado	Especificación norma Invías	Observación
<b>Cemento asfáltico nuevo</b>				
Penetración	INV-E 706-13	63,7 mm	60 mm mín. 70 mm máx.	Cumple
Punto de ablandamiento	INV-E 410 -13	50°C	48 °C mín.	Cumple
Punto de ignición	INV-E 709-13	247°C	230°C mín.	Cumple
Gravedad específica	INV-E 707 -13	1,049		
<b>Cemento asfáltico del material reciclado</b>				
Extracción cuantitativa del asfalto	INV-E-732-13	5,5%		

En lo referente a la caracterización, se puede observar que los valores máximos y mínimos son satisfactorios en el cumplimiento de los requerimientos de las *Especificaciones de construcción de carreteras*, del Invías (2013), en particular el artículo 410-13: suministro de cemento asfáltico, y el artículo 462-13, reciclado de pavimentos asfálticos en plata y en caliente.

### C. Curvas granulométricas

La granulometría de las mezclas estuvo compuesta por material pétreo proveniente de cantera en diferentes proporciones, de tamiz  $\frac{3}{4}$ " a tamiz número 200, tal como lo establece el Invías (2013) en su tabla 450- 13: "Ensayos de verificación sobre el llenante mineral de aporte para mezclas en caliente de gradación continua", para una mezcla densa en caliente MDC-19. En el material proveniente de reciclaje RAP, la granulometría está compuesta del tamiz  $\frac{3}{4}$ " a tamiz número 80, ya que por su condición de origen no presenta finos.

## 3. Desarrollo del trabajo

### A. Diseño experimental

El diseño experimental consistió en la elaboración de cuatro mezclas asfálticas MDC-19 diseñadas con la metodología Marshall para un nivel de tránsito 1 y con la utilización de RAP. La participación del contenido en la mezcla fue de un 0%, 10%, 20% y 30%. La mezcla asfáltica está compuesta por un 4% de aditivo rejuvenecedor de asfalto, agregado nuevo, asfalto nuevo, según la fórmula de trabajo obtenida mediante los resultados de los ensayos Marshall.

Tabla 3. Esquema diseño experimental

Fuente agregado nuevo	Fuente RAP	Aditivo rejuvenecedor de asfalto	Cemento asfáltico	Mezcla
F1	RAP 10%	A1	AC	F1 RAP 0% A1 AC
	RAP 20%			F1 RAP 10% A1 AC
	RAP 30%			F1 RAP 20% A1 AC
	RAP 40%			F1 RAP 30% A1 AC

Una vez realizado el diseño de las cuatro mezclas, se procedió al análisis de especímenes en circunstancias determinadas en laboratorio, con el fin de simular las solitudes de carga ejercidas en la vida de servicio. Al realizar la comprobación, se investigó si las mezclas diseñadas estaban en condiciones de prestar un adecuado desempeño en cuanto a la deformación, fatiga y adherencia, tal como lo estipula el Invías (2013) en el artículo 450: “Mezclas asfálticas en caliente de gradación continua”.

## 4. Resultados

### A. Óptimo de asfalto

Los resultados obtenidos a partir de los ensayos de laboratorio de las cuatro mezclas, presentados en la figura 2, arrojaron que el porcentaje óptimo de asfalto se aumentó de manera considerable en la mezcla con 0% y con 10% de RAP, mientras que en la mezcla de 10% a 30% de RAP no fue significativo el incremento.

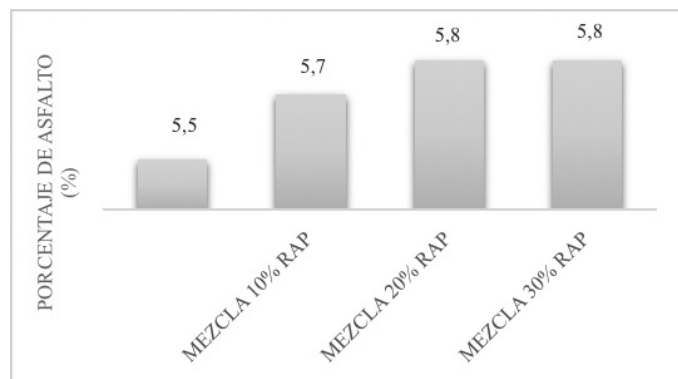
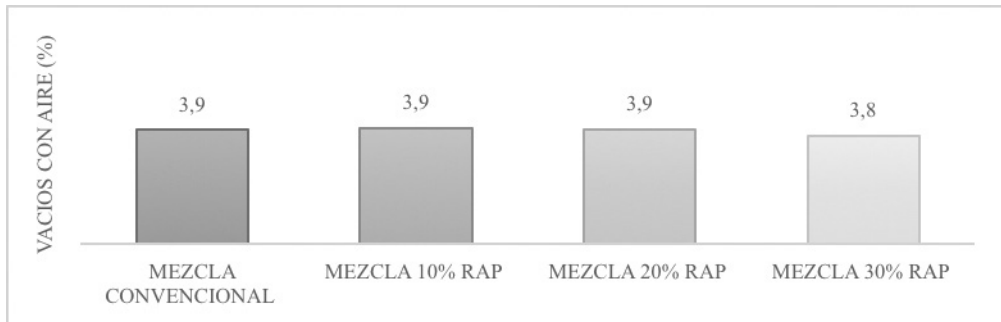


Figura 2. Óptimos de asfalto mezclas de diseño en rangos de porcentaje

### B. Resultado de diseño de mezclas con la metodología Marshall

En la figura 3 se observó que en las mezclas los porcentajes de vacíos con aire (%VA) presentaron un comportamiento similar, con un porcentaje de vacíos

menor a 4%. Esto garantiza que se encuentra dentro del intervalo de 3% a 5% exigido en por el Invías (2013), DMC-19, para un nivel de tránsito 1.

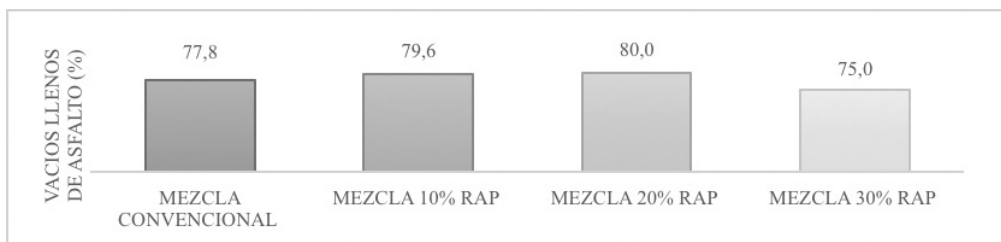


**Figura 3. Resultados de vacíos con aire asfalto en rangos de porcentaje**

Los resultados demostraron que el contenido de asfalto óptimo de cada mezcla es el correcto para cubrir la totalidad del agregado; por ende, el porcentaje de vacíos en la mezcla es correcto.

En la figura 4 se observa que respecto a los vacíos en los agregados minerales (VAM), se presentó un

comportamiento de crecimiento considerable de las mezclas con contenido de porcentaje de material reciclable, en comparación con la mezcla convencional. Esto se debe a que el porcentaje de VAM aumenta proporcionalmente al de asfalto. Igualmente, las mezclas diseñadas cumplieron con el requisito del 15% exigido por el Invias (2013), MDC-19, para un nivel de tránsito 1.



**Figura 4. Resultados de vacíos llenos de asfalto en rangos de porcentaje**

En la figura 6 se muestran los valores de relación entre el llenante mineral y el ligante para cada mezcla, los cuales se encontraron entre el intervalo de 0,8 y 1,2 exigido en el Invias (2013), MDC-19, para un nivel de tránsito 1. En comparación con la mezcla convencional, se observó una variación ascendente a las mezclas con contenido de %RAP, debido a la granulometría del material reciclaje, que por su origen es un material muy fino.

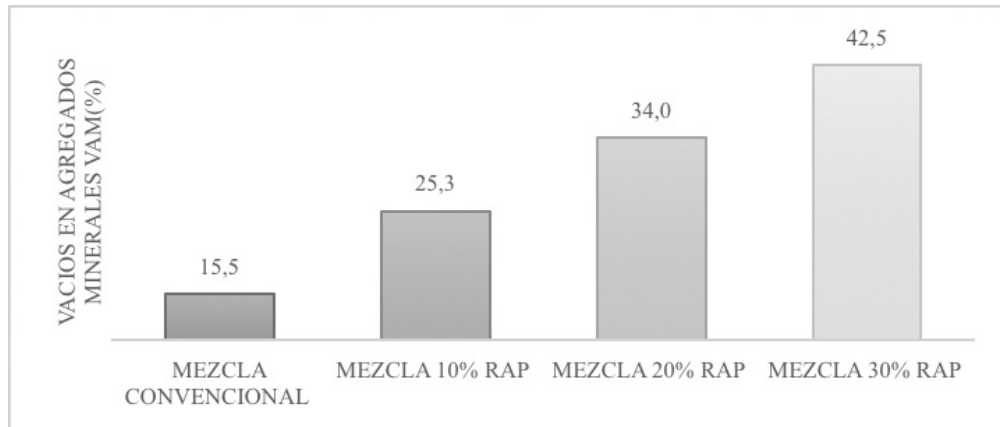


Figura 5. Resultados de vacíos en los agregados minerales VAM en rangos de porcentaje

En la figura 5 se muestran los valores de vacíos llenos de asfalto para cada mezcla, los cuales se encuentran entre el intervalo de 65 a 80 exigido por el Invías (2013), MDC-19, para un nivel de tránsito 1. Se observa una variación

baja entre las diferentes mezclas diseñadas, que se debe posiblemente a las propiedades volumétricas de las mezclas.

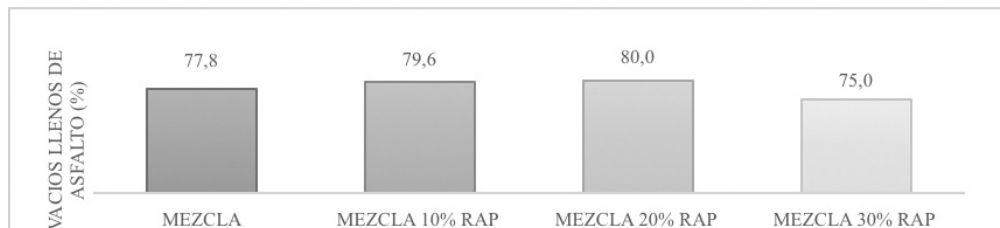
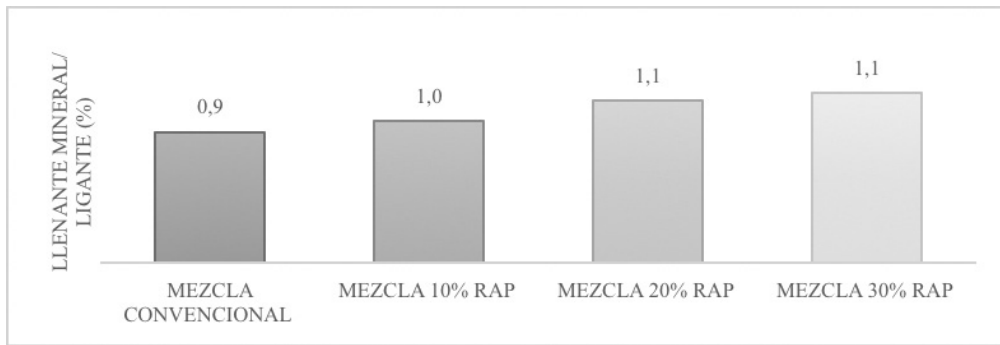


Figura 6. Resultados de vacíos llenos de asfalto en rangos de porcentaje

En la figura 6 se muestran los valores de relación entre el llenante mineral y el ligante para cada mezcla, los cuales se encontraron entre el intervalo de 0,8 a 1,2 exigido por el Invías (2013), MDC-19, para un nivel de tránsito 1. En comparación con la mezcla convencional, se observó una variación ascendente en las mezclas con contenido de %RAP, debido a la granulometría del material reciclaje, que por su origen es un material muy fino.

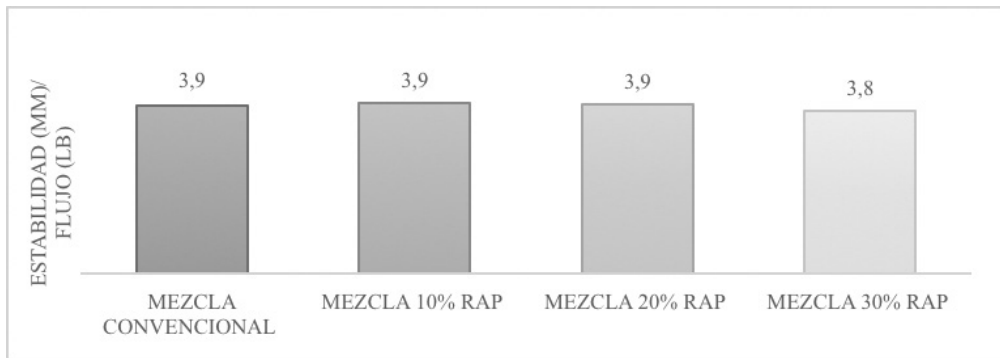




**Figura 7. Resultados de llenante mineral y ligante en rangos de porcentaje**

En la figura 7 se observa que el flujo fue satisfactorio, lo cual es indicativo de que las mezclas diseñadas pueden soportar deformaciones, asentamientos granulares y

movimientos en la base y en la subrasante sin efectos de agrietamientos.



**Figura 8. Resultados de Estabilidad (MM)/Flujo (LB)**

Adicionalmente, en este proyecto de investigación se realizó una briqueta a partir del resultado del diseño Marshall con el óptimo de asfalto y sin el aditivo rejuvenecedor, para evaluar el comportamiento que tiene en las mezclas.

A continuación se muestran los resultados obtenidos en laboratorio en cuanto a la estabilidad (figura 8) y el flujo (figura 9) de las mezclas diseñadas con la incorporación y no incorporación del aditivo.

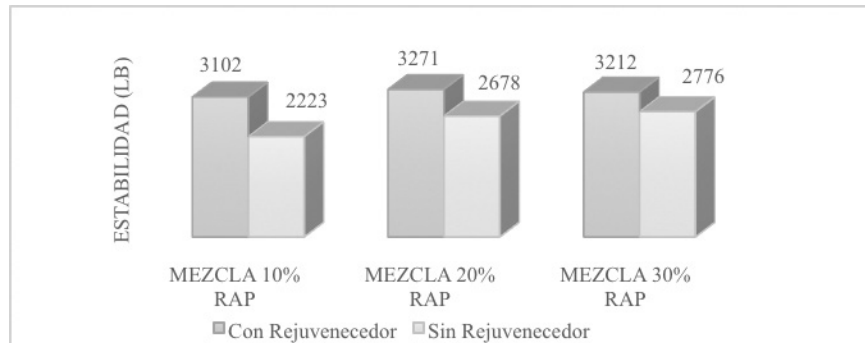


Figura 9. Utilización de aditivo en las mezclas con respecto a la estabilidad (LB)

Con respecto a los resultados de estabilidad de las mezclas diseñadas que contienen el aditivo rejuvenecedor de asfalto, se observa que son mayores

y, por tanto, tienen mejor capacidad de resistencia a las deformaciones.

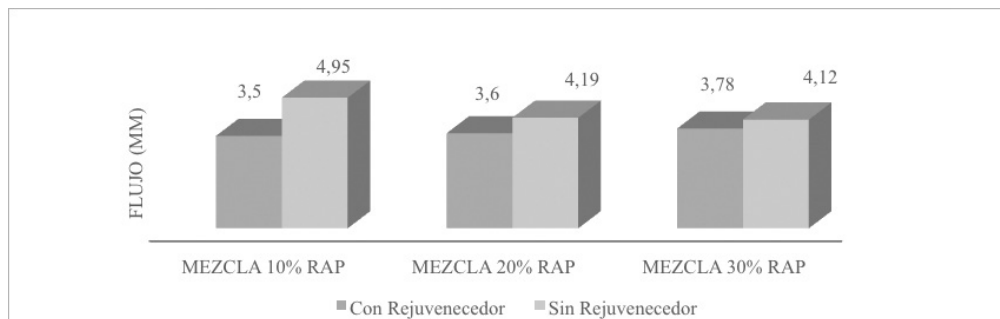


Figura 10. Utilización de aditivo en las mezclas con respecto a la estabilidad (LB)

En lo relacionado con los resultados del flujo de las mezclas diseñadas que contienen el aditivo rejuvenecedor de asfalto, estas se encuentran dentro del intervalo de 2-4 exigido por el Invías (2013), mientras que el resultado de las mezclas que no contienen el aditivo se encuentra por encima del intervalo permitido.

estructurales para materiales reciclados y estabilizados con aditivos químicos desarrollados y producidos en Colombia”, así como lo que indican empresas productoras de aditivos como Proim, que dan cuenta de las mejoras de las propiedades del asfalto al incorporar los aditivos a la mezcla.

Con base en los resultados, se puede ratificar lo que expone Echeverría (2011), ingeniero civil de la Universidad Javeriana, en su ponencia “Coeficientes

### C. Resultados de la verificación de mezclas de diseño

#### 1. Resultados del módulo dinámico de mezclas de diseño

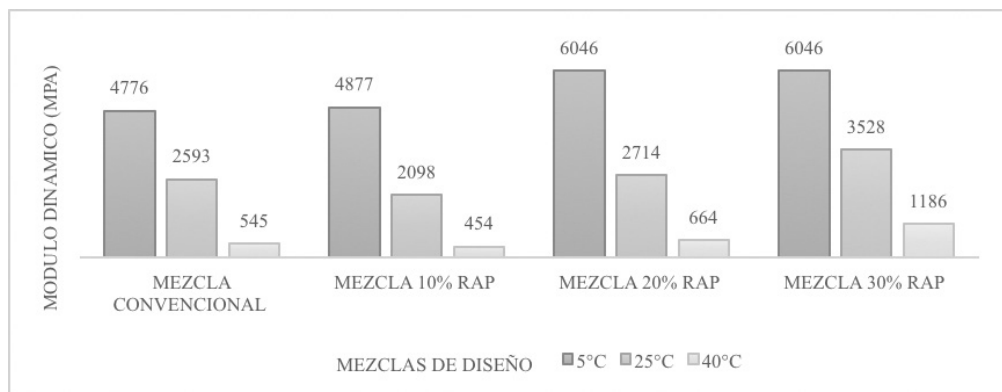


Figura 11. Comparativo del módulo dinámico (MPa) en las mezclas de diseño para una temperatura de 5°C, 25°C y 40°C.

Para establecer el desempeño de las mezclas diseñadas en cuanto a la deformación, se determinó el módulo dinámico, “que se define como el valor absoluto de la relación entre el valor del esfuerzo máximo y la deformación unitaria máxima, obtenida en un ensayo a compresión [uniaxial o triaxial], a flexión y tracción indirecta” (Higuera, 2010).

Mediante el equipo NAT, se obtuvo como resultado un comportamiento proporcional a la temperatura del ensayo; es decir, a menor temperatura, el valor en el módulo dinámico es mayor que con ensayos a temperaturas superiores. Así lo afirman Elizondo y Badilla (2007), fundamentos en que el módulo en mezclas asfálticas es altamente sensible a la temperatura y a la razón de aplicación de carga.

Con base en los reportes del equipo NAT y los cálculos realizados, se puede concluir que la mezcla con mayor valor de módulo dinámico fue la mezcla con 30% de material reciclable RAP en sus diferentes temperaturas.

##### a) Análisis de resultado de fatiga

Se obtuvieron las respectivas leyes de fatiga de cada

una de las mezclas mediante la siguiente ecuación, generada a partir de los gráficos obtenidos con los datos de los reportes del equipo NAT:

$$\epsilon_p = A \times N^B$$

Dónde  $\epsilon_p$  es la deformación radial ( $\mu\epsilon$ );  $N$  es el número de ejes equivalentes para un periodo de diseño en un carril de diseño; y  $A$  y  $B$  son constantes de cada mezcla.

Tabla 4. Valores de fatiga para las mezclas diseñadas

Mezcla	A	B	N	$\epsilon_p$
Convencional 0% RAP	60,53	-0,66	5.100.000	0,0023
Con RAP 10%	5,18	-0,31	5.100.000	0,0412
Con RAP 20%	87,76	-0,44	5.100.000	0,0997
Con RAP 30%	34,62	-0,30	5.100.000	0,3580

Los resultados muestran que al aumentar el número de ciclos de carga, la deformación disminuye. Con ello

se puede concluir que las mezclas diseñadas no van a presentar patologías como agrietamiento por fatiga o piel de cocodrilo.

Respecto a la adherencia, en la tabla 5 se muestran los resultados obtenidos de la prueba de tracción directa de los especímenes, en condición seca y húmeda, para cada una de las mezclas de diseño, así como la relación de estabilidad y el cumplimiento de la normativa.

**Tabla 5. Resultados de la susceptibilidad al agua de las mezclas de diseño**

% RAP	Adherencia baño de María 24 horas (húmeda)			Adherencia baño de María 0,5 horas (seca)			Resultado	Verificación
	N.º Briqueata	Estabilidad (lb)	Promedio estabilidad húmeda	N.º Briqueata	Estabilidad (lb)	Promedio estabilidad Seca		
RAP 0%	1	2909	2915	1	3211	3110	94%	MIN 8 %
	2	2861		2	3129			
	3	2975		3	2989			
RAP 10%	1	2834	2716	1	3120	3052	89%	
	2	2654		2	3090			
	3	2660		3	2945			
RAP 20%	1	2387	2514	1	2850	2902	87%	
	2	2644		2	2979			
	3	2512		3	2878			
RAP 30%	1	2443	2378	1	2777	2782	85%	
	2	2230		2	2801			
	3	2460		3	2768			

De acuerdo con los resultados obtenidos en el laboratorio, la relación de estabilidad seca y estabilidad húmeda de los especímenes fallados para cada mezcla de diseño dan como resultado la susceptibilidad al agua que tienen

las mezclas diseñadas. Estas fueron validadas con el cumplimiento del requisito de adherencia retenida: un mínimo del 80%, establecido por el Invías (2013).

### b) Análisis económico y ambiental

Se realizó el análisis de las mezclas de diseño puestas en sitio y compactadas con una distancia de acarreo de 1 km, para la geometría de la vía de longitud de 1 km, ancho de calzada de 7,5 metros y un espesor

de carpeta asfáltica de 0,10 metros. Se tuvieron en cuenta los materiales, el equipo, la mano de obra, la administración, los imprevistos y la utilidad. Los costos fueron tomados del análisis de precios unitarios del Invías, actualizados a diciembre de 2015.

**Tabla 6. Presupuesto de mezclas puestas en sitio**

Presupuesto			Mezcla 0% RAP		Mezcla 10% RAP		Mezcla 20% RAP		Mezcla 30% RAP	
Material	Und	Valor Unitario	Cant	Valor	Cant	Valor	Cant	Valor	Cant	Valor
Mezcla Densa en Caliente Tipo MDC-19 Comprada	m <sup>3</sup>	608.862	75	45.664.625	67,5	1.098.163	60	36.531.700	52,5	31.965.238
Mezcla Asfáltica Reciclada en caliente del tipo MDC-19	m <sup>3</sup>	133.219	0	-	7,5	999.143	15	1.998.285	22,5	2.997.428
Valor Total por mezcla para un Km de vía				\$ 45.664.625		\$ 42.097.305		\$ 38.529.985		\$ 34.962.665

Se observa que el mayor valor es el del costo de la mezcla densa en caliente, el cual supera en un 78% a la mezcla de material reciclable RAP. Esto se explica por cuanto en el análisis de precios unitarios, en el valor del RAP solo se tienen en cuenta los costos de mano de obra, equipos y agente rejuvenecedor, que equivale al 22% de una mezcla nueva.

## 5. Discusión

El diseño de las mezclas, la metodología Marshall arroja cuatro fórmulas de trabajo, las cuales, mediante la combinación de agregados y con una variable en el contenido de material reciclaje RAP y aditivo rejuvenecedor de asfalto, fueron preparadas mediante el procedimiento específico para calentar, mezclar y compactar la mezcla asfáltica. Se cumple así con los parámetros exigidos por Invías (2013), con un aporte en cuanto a los comportamientos observados a lo largo del proyecto. Se destacan los aspectos que se mencionan a continuación.

Las mezclas mostraron un comportamiento muy similar con respecto a la estabilidad y el flujo; por tanto, la capacidad de cada una de las mezclas resistirá las deformaciones plásticas provocadas por las cargas

impuestas al paso de los vehículos, y de este modo se contralan el ahuellamiento, los corrimientos y las ondulaciones en la capa de rodadura.

Los resultados de las mezclas con la utilización del aditivo rejuvenecedor de asfalto en el material de reciclaje RAP fueron satisfactorias, lo que da viabilidad para decir que el aditivo presenta una mejora evidente de las condiciones del asfalto en la mezcla; además, de no utilizarse, no se cumplirían los requerimientos de aceptación de las mezclas de diseño.

Para establecer el desempeño de las mezclas diseñadas en cuanto a la deformación, se determinó el módulo dinámico mediante la utilización del equipo NAT. Este arrojó como resultado un comportamiento proporcional a la temperatura del ensayo; es decir, a menor temperatura, el valor en el módulo dinámico es mayor que con ensayos a temperaturas superiores. Así lo afirman Elizondo y Badilla (2007), fundamentados en que el módulo en mezclas asfálticas es altamente sensible a la temperatura y a la razón de aplicación de carga.

Esta investigación ha mostrado la viabilidad técnica de la mezcla, en cuanto al cumplimiento de requisitos de las propiedades dinámicas y mecánicas de las mezclas de diseño.

## 6. Conclusiones

El objetivo principal de esta investigación fue la evaluación de cuatro mezclas asfálticas en caliente MDC-19, para un nivel de tránsito 1, mediante la metodología Marshall. Las mezclas están compuestas por agregado virgen, asfalto, aditivo rejuvenecedor, y con una variable en el porcentaje del material de reciclaje RAP. En cuanto a la caracterización del material reciclado, el agregado nuevo y el cemento asfáltico, se realizaron las validaciones de calidad y el cumplimiento, con una variación de porcentaje RAP. Se obtuvieron los siguientes resultados:

- El porcentaje óptimo de asfalto se incrementó de manera considerable entre la mezcla con 0% y 10% de RAP, mientras que el incremento de la mezcla de 10% a 30% RAP no fue tan significativo.
- Las mezclas presentaron una estabilidad y un flujo satisfactorios, lo cual indica que van a resistir las deformaciones plásticas provocadas por las cargas impuestas por el paso de vehículos, a la vez que se controlarán el ahuellamiento, los corrimientos y las ondulaciones en la capa de rodadura.

Con la implementación del modelo Marshall, en cada una de las mezclas se realizó la verificación del diseño preliminar exigido por el Invías (2013). Esto tuvo por propósito averiguar si las mezclas diseñadas están en condiciones de prestar un óptimo desempeño en cuanto a la deformación, la fatiga y la adherencia. A partir de los resultados obtenidos se logró concluir que la mezcla con mayor módulo dinámico fue la que contenía un 30% de material de reciclaje RAP, en sus diferentes temperaturas de ensayo.

Se evidenció que la mezcla convencional tiene un mejor comportamiento a la susceptibilidad al agua, ya que presentó una menor pérdida de resistencia en la estabilidad, comparada con las mezclas con material de reciclaje RAP.

Además, se observó que la adherencia del agregado pétreo con el asfalto, en condición seca y en condición húmeda, tiene una adecuada distribución de gradación. Ello evidencia una aceptable adherencia entre agregado y asfalto en las mezclas de diseño.

En cuanto a la deformación por fatiga, se observó que la mezcla convencional fue la menos afectada al incrementar el porcentaje de RAP en la mezcla.

Con base en los presupuestos de insumos, equipo, mano de obra, administración, impuestos e imprevistos de las mezclas de diseño, se evidencia la viabilidad económica de la utilización de material reciclable RAP en mezclas densas en caliente.

Lo anterior se debe a que el mayor costo es el valor de la mezcla densa en caliente, el cual supera en un 78% a la mezcla de material reciclable RAP, debido a que en el análisis de precios unitarios, en el valor del material reciclable RAP solo se tienen en cuenta los costos de mano de obra, equipos y agente rejuvenecedor, que equivalen al 22% de una mezcla nueva.

## 7. Referencias

Corporación para la Investigación y Desarrollo de Asfaltos (2011). *Preparación de mezclas asfálticas en caliente, su colocación y compactación*. Piedecuesta.

Echeverría, J. (2011). Coeficientes estructurales para materiales. En *XVIII Simposio Colombiano sobre Ingeniería de Pavimentos*. Medellín.

Elizondo, F. y Badilla, G. (2007). Predicción de módulos resilientes en mezclas asfálticas mediante el módulo de Witczak. *Infraestructura Vial*, 10(3).

Higuera, C. H. (2010). *Nociones sobre métodos de diseño de estructuras de pavimentos para carreteras* (vol. II). Tunja: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

Instituto Nacional de Vías (Invías) (2013). *Especificaciones generales de construcción de carreteras y normas de ensayo para materiales de carreteras*. Bogotá: Autor.

Méndez, A. A. (2015). *Evaluación técnica y económica del uso de pavimento asfáltico reciclado (RAP) en vías colombianas (tesis de especialización)*. Bogotá: Universidad Militar Nueva Granada.