



Revista UIS ingenierías

ISSN: 1657-4583

ISSN: 2145-8456

Universidad Industrial de Santander

Bastidas-Martínez, Juan Gabriel; Rondón-Quintana, Hugo Alexander;  
Contreras-Zartha, Leonardo; Forero-Castaño, Santiago; Rojas-Rozo, Laura  
Evaluación de una mezcla de concreto asfáltico con incorporación de agregados reciclados de concreto  
Revista UIS ingenierías, vol. 20, núm. 2, 2021, Abril-Junio, pp. 75-84  
Universidad Industrial de Santander

DOI: <https://doi.org/10.7440/res64.2018.03>

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=553770380007>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en [redalyc.org](https://www.redalyc.org)

UNAM [redalyc.org](https://www.redalyc.org)

Sistema de Información Científica Redalyc  
Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal  
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso  
abierto

# Evaluación de una mezcla de concreto asfáltico con incorporación de agregados reciclados de concreto

---

## Evaluation of hot mix asphalt with incorporation of recycled concrete aggregates

Juan Gabriel Bastidas-Martínez <sup>1a</sup>, Hugo Alexander Rondón-Quintana <sup>2</sup>,  
Leonardo Contreras-Zartha <sup>1b</sup>, Santiago Forero-Castaño <sup>1c</sup>, Laura Rojas-Rozo <sup>1d</sup>

<sup>1</sup> Semillero de Investigación en Gestión de la Infraestructura, Grupo de Investigación Habitat, Diseño e Infraestructura (HD+i), Programa de Ingeniería Civil, Universidad Piloto de Colombia, Colombia.

Orcid: <sup>a</sup> 0000-0002-6818-0322, <sup>b</sup> 0000-0002-4297-1281, <sup>d</sup> 0000-0003-2718-2628.

Correos electrónicos: <sup>a</sup> [juan-bastidas@unipiloto.edu.co](mailto:juan-bastidas@unipiloto.edu.co), <sup>b</sup> [leonardo-contreras@unipiloto.edu.co](mailto:leonardo-contreras@unipiloto.edu.co),

<sup>c</sup> [Santiago-forero@upc.edu.co](mailto:Santiago-forero@upc.edu.co), <sup>d</sup> [laura-rojas3@upc.edu.co](mailto:laura-rojas3@upc.edu.co)

<sup>2</sup> Grupo de Investigación Centro de Estudios en Pavimentos y Materiales Sostenibles, Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia. Orcid: 0000-0003-2946-9411.

Correo electrónico: [harondonq@udistrital.edu.co](mailto:harondonq@udistrital.edu.co)

Recibido: 26 marzo, 2020. Aceptado: 20 octubre, 2020. Versión final: 2 enero, 2021.


### Resumen

La generación y gestión de residuos sólidos industriales se considera una problemática ambiental a nivel mundial. Razón por la cual, diversos estudios se han enfocado en la implementación de Residuos de obras de Construcción y Demolición (RCD) para capas de pavimentos, centrándose en el uso de Agregados Reciclados de Concreto (RCA por sus siglas en inglés). El objetivo de este artículo fue establecer el impacto de la implementación del RCA en una mezcla asfáltica sobre algunas de sus propiedades físico-mecánicas, bajo tres escenarios: i) sustitución de la fracción gruesa, ii) fina y iii) 100% de la granulometría del agregado convencional (AC). Se evaluó la resistencia bajo carga monotónica de las mezclas (ensayos Marshall y Tracción Indirecta – RTI) y la resistencia al desgaste Cántabro. La sustitución de la fracción fina del AC por RCA, disminuye notablemente la resistencia bajo carga monotónica de la mezcla de referencia. Al sustituir la fracción gruesa, se cumplen los criterios de diseño de la mezcla asfáltica de referencia y se aumenta el RTI, pero se hace necesario incrementar ligeramente el contenido de asfalto. Al sustituir la totalidad de los agregados por RCA, se obtuvo un comportamiento satisfactorio ante la acción de cargas monotónicas, pero también se hace necesario incrementar ostensiblemente el contenido de asfalto. Un aumento del RCA en la mezcla incrementa la pérdida por desgaste Cántabro.

**Palabras clave:** agregados reciclados de concreto; concreto asfáltico; ensayo Marshall; resistencia a la tracción indirecta; ensayo Cántabro.

### Abstract

The generation and management of industrial solid waste is considered an environmental problem worldwide. Reason why, several studies have focused on the implementation of Construction and Demolition Waste (RCD) for pavement layers, focusing mainly on the use of Concrete Recycled Aggregates (RCA). The objective of this study was to determine the impact of the implementation of the RCA in hot asphalt mixture on its physical-mechanical properties, under three scenarios: i) replacement of the coarse fraction, ii) fine and iii) 100% of the aggregate granulometry

ISSN impreso: 1657 - 4583. ISSN en línea: 2145 - 8456, CC BY-ND 4.0 

Como citar: J. G. Bastidas-Martínez, H. A. Rondón-Quintana, L. Contreras-Zartha, S. Forero-Castaño, L. Rojas-Rozo, “Evaluación de una mezcla de concreto asfáltico con incorporación de agregados reciclados de concreto,” *Rev. UIS Ing.*, vol. 20, no. 2, pp. 75-84, 2021, doi: [10.18273/revuin.v20n2-2021007](https://doi.org/10.18273/revuin.v20n2-2021007)

conventional (AC). The monotonic load resistance of the mixtures (Marshall and Indirect Traction - IT tests) and the wear resistance Cántabro were evaluated. The substitution of the fine fraction of AC by RCA significantly reduces the resistance under monotonic load of the control mixture. When replacing the coarse fraction, the design criteria of the control asphalt mixture are met and the IT is increased, but it is necessary to slightly increase the asphalt content. By replacing all the aggregates with RCA, a satisfactory behavior was obtained in the face of the action of monotonic charges, but it is also necessary to significantly increase the asphalt content. An increase in RCA in the mixture increases the loss from Cántabro wear.

**Keywords:** recycled concrete aggregates; asphalt concrete; Marshall test; indirect tensile strength; Cántabro test.

## 1. Introducción

El desarrollo económico y la competitividad de un país son influenciados por el sector de los transportes. En este sentido, es fundamental la conservación y preservación de la calidad de las vías terrestres y de los pavimentos. En Colombia se reportan 204.855 km de carreteras, de los cuales 17.434 se encuentran distribuidos en la red primaria y 187.421 en la red secundaria y terciaria. Para el caso de la red vial pavimentada, el 47.2% se encuentra en un estado muy bueno a bueno, 34.3% en estado regular y 18.5% en estado malo a muy malo [1]. Ante este panorama, es indispensable el desarrollo de nuevas técnicas, tecnologías y materiales en la ingeniería de pavimentos colombiana, a fin de garantizar condiciones técnicas que contribuyan con el cuidado y protección del medio ambiente. En Colombia, entre los años 2014 y 2017 se estimó la utilización de aproximadamente 177 millones de toneladas de agregados pétreos. Por otra parte, para el periodo entre el año 2019 y 2024 se estima la utilización de 75 millones de toneladas en material para la construcción de carreteras [2]. En este sentido, se torna interesante la implementación de materiales alternativos, dadas las grandes cantidades de materiales requeridos para la construcción de pavimentos.

En el mundo, existen diversos estudios relacionados con el uso de los materiales alternativos en la construcción de estructuras de pavimentos. Los Residuos de Construcción civil y Demolición (RCD) son los principales residuos generados en la industria de la construcción civil y se consideran un subproducto de actividades de construcción, demolición y reparación de obras civiles que se compone de residuos de concreto, mortero, cerámica, ladrillos, madera, yeso, plásticos, vidrio, material de excavación, entre otros. En el año 2016 se estimó una producción total aproximada de 322 millones de toneladas de RCD para los países de Europa, liderada por Alemania, Reino Unido y Francia con producciones aproximadas de 86.4, 63.5 y 60.2 millones de toneladas de RCD respectivamente [3]. En China se reporta una producción de 2.36 billones de toneladas de RCD entre 2003 y 2013 [4]. Para el caso colombiano se

reporta una producción diaria de más de 100.000 toneladas en sus principales ciudades [5]. En la ciudad de Bogotá se reporta el tratamiento y disposición final de más de 11 millones de toneladas de RCD. Ante este panorama, diversas políticas en el mundo reconocen que el sector de la construcción civil necesita acciones de mitigación inmediatas para disminuir el cambio climático, emisiones de gases de efecto invernadero y agotamiento de los recursos, a fin de garantizar el uso sostenible de los materiales de construcción [6]. Una forma de proporcionar el uso sostenible de los materiales de construcción es a través de la utilización de los residuos de concreto y mortero proveniente de los RCD. Los grandes residuos de concreto pueden ser sometidos a procesos de trituración y reducción de tamaño, generando agregados reciclados de concreto, comúnmente conocidos por sus siglas en inglés como Recycled Aggregate Concrete (RCA) [7] [8].

Ante la necesidad de disminuir el uso considerable de Agregados Convencionales (AC) utilizados en la construcción de pavimentos y cooperar con la conservación y preservación del medio ambiente, diversos estudios se han realizado con el fin de viabilizar el uso de agregados RCA en la ingeniería de pavimentos. En este sentido, diferentes trabajos [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17] analizaron la incorporación de diferentes proporciones de RCA en mezclas asfálticas del tipo denso y en caliente (MDC). Los resultados derivados en dichos estudios indican la viabilidad técnica dado el cumplimiento de parámetros volumétricos y de resistencia con las especificaciones para la fabricación de MDC. Sin embargo, los resultados específicos dependen de las características físicas de los agregados RCA, principalmente de su resistencia mecánica, durabilidad, forma, textura de las partículas, entre otros. Adicionalmente, el comportamiento de la mezcla asfáltica influye en función del contenido de RCA incorporado en la mezcla. Por otro lado, los investigadores concluyen que las mezclas asfálticas con RCA requieren de mayores contenidos de asfalto por la elevada absorción y área superficial [11], [18].

Ante lo anterior, las nuevas tendencias en el estudio de los RCA en mezclas asfálticas buscan encontrar: ¿Cuál es la fracción de RCA a incorporar en la mezcla? y ¿Cómo reducir la absorción superficial de las partículas de RCA?. Lo anterior, con el fin de disminuir el contenido de asfalto en la mezcla y obtener un adecuado desempeño del comportamiento mecánico de la mezcla.

Este documento evaluó en laboratorio, la viabilidad técnica del uso de RCA en una MDC-19 conforme la especificación [19], con el fin proporcionar otra forma de disposición final segura para estos productos del concreto y proteger el medio ambiente. En el presente estudio, se evaluaron los parámetros volumétricos, la resistencia bajo carga monotónica (ensayo Marshall y resistencia a la tracción indirecta en condiciones secas) y el desgaste por abrasión Cántabro, cuando se sustituyeron las fracciones gruesas, finas y el 100% de los AC de origen natural por RCA en una MDC. Esta técnica podría considerarse innovadora por considerar el estudio de materiales alternativos para el caso colombiano.

## 2. Materiales y métodos

### 2.1. Materiales

El AC utilizado para la fabricación de las mezclas es procedente de la ciudad de Bogotá D.C. El agregado RCA es proveniente del proceso de recolección y trituración de residuos de construcción civil y demolición de la ciudad de Bogotá D.C., y se obtuvo de una de las plantas de recolección de RCAs permitida por el Instituto de Desarrollo Urbano (IDU). Sobre los dos tipos de agregados se realizaron ensayos de caracterización física, siguiendo la especificación [19]. Para la elaboración de las mezclas, se cambió la granulometría inicial de los agregados por los valores medios de la franja (MDC-19) que exige la especificación [19] (ver Figura 1).

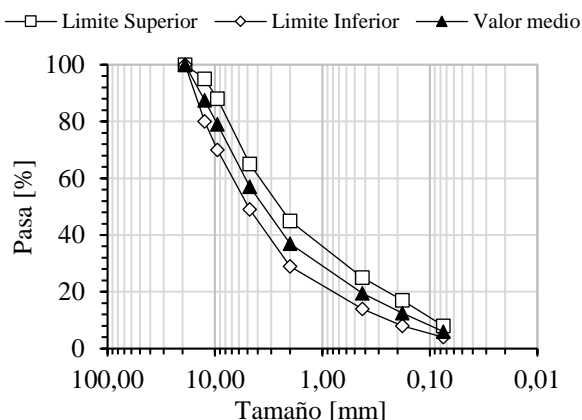


Figura 1. Especificación granulométrica para la elaboración de las mezclas asfálticas.

Fuente: elaboración propia.

El Cemento Asfáltico (CA) corresponde a un CA 60-70, clasificado por grado de penetración, el cual es de común uso en obras de pavimentos en Colombia.

### 2.2. Diseño de mezclas asfálticas

El diseño de las mezclas asfálticas tipo MDC-19 se realizó siguiendo la metodología Marshall y los criterios establecidos por INVIAS [19]. Inicialmente fueron fabricadas 48 briquetas Marshall para realizar los diseños correspondientes a cuatro tipos de mezclas MDC-19, variando el contenido de asfalto CA 60-70 en cuatro proporciones (3 briquetas por cada porcentaje de asfalto). La primera mezcla, denominada de control (MDC-AC), empleó AC como agregado. La segunda sustituyó la fracción gruesa del AC por RCA, y la tercera, la sustitución de la fracción fina del AC por RCA (denominadas MDC-RCA-G y MDC-RCA-F, respectivamente). La cuarta mezcla, sustituyó la totalidad del AC por RCA (MDC-RCA). Las fracciones de agregados gruesa (G) y fina (F), corresponden a los tamaños comprendidos entre 19 mm a 4.75 mm y 4.75 a 0.075 mm, respectivamente.

Los contenidos de asfalto para la mezcla de control MDC-AC fueron 4.5%, 5.0%, 5.5% y 6.0%, respectivamente. Lo anterior, basado en investigaciones donde fueron utilizados los materiales convencionales (agregados AC y CA 60-70) de la ciudad de Bogotá [17, 20]. Se utilizaron mayores contenidos de asfalto en las mezclas con RCA con el fin de garantizar el recubrimiento de las partículas dada su elevada absorción. En este sentido, la mezclas MDC-RCA-G y MDC-RCA-F utilizaron contenidos de asfalto de 5.0%, 5.5%, 6.0% y 6.5%, respectivamente. Para el caso de la mezcla MDC-RCA, dado el aumento en la cantidad de partículas RCA, se utilizaron contenidos de asfalto de 6.5%, 7.0%, 7.5% y 8.0%, respectivamente.

Las briquetas de 1200 g de masa se compactaron con 75 golpes por cara. Las dimensiones de cada biqueta corresponden a 4" de diámetro y 2.5" de altura, siguiendo la especificación AASHTO T245. Las temperaturas de compactación y de mezcla fueron de 140°C y 150°C, respectivamente, con base a la especificación ASTM D6925 para mezclas densas en caliente (la viscosidad requerida para obtener las temperaturas de compactación y de mezcla es de 280+/-30 cP y 170 +/-20 cP, respectivamente).

A partir de los resultados del ensayo se determinó la composición volumétrica de las mezclas (contenido de vacíos con aire-Va, vacíos en los agregados minerales-VAM y vacíos llenos de asfalto-VFA) y la resistencia bajo carga monotónica (estabilidad-E, flujo-F y rigidez

Marshall-E/F) a temperatura de ensayo de 60 °C y velocidad de deformación de 48 mm/minuto. Con los resultados obtenidos, se eligió el porcentaje óptimo de asfalto utilizado para cada tipo de mezcla (MDC-AC, MDC-RCA-G, MDC-RCA-F y MDC-RCA).

### 2.3. Resistencia a Tracción Indirecta por compresión diametral - RTI

Utilizando el contenido óptimo de asfalto determinado en la prueba Marshall, se fabricaron tres briquetas Marshall por tipo de mezcla (MDC-AC, MDC-RCA-G, MDC-RCA-F y MDC-RCA) para medir la resistencia a la tracción indirecta por compresión diametral, siguiendo las especificaciones establecidas por ASTM D6931. Cada muestra se sometió a la aplicación de carga monotónica a deformación controlada de 50 mm/minuto hasta la ruptura. La temperatura de ensayo fue de 25 °C. La determinación de la RTI en kPa, se realizó con la Ecuación 1, donde P es la carga máxima de ruptura (N), h y d son la altura y el diámetro en (mm) respectivamente para cada biqueta. Como resultado se presentó el promedio de tres briquetas y su respectiva desviación estándar ( $\sigma$ ).

$$RTI = \frac{2000P}{\pi \cdot t \cdot D} \quad (1)$$

### 2.4. Ensayo Cántabro

Se realizaron ensayos de desgaste sin carga abrasiva en la máquina de Los Ángeles en cuatro muestras Marshall para cada tipo de mezcla (MDC-AC, MDC-RCA-G, MDC-RCA-F y MDC-RCA). Se aplicó 300 vueltas a 33 revoluciones por minuto (ensayo Cántabro - NTL 352). Las briquetas utilizaron el contenido óptimo de asfalto determinado a partir de las pruebas Marshall. La temperatura de las muestras durante la prueba fue de 25 °C. Teniendo como base la masa final – mf (g) de las muestras después de la prueba y la masa inicial – mi (g) antes del ensayo, se determinó la pérdida de masa por desgaste Cántabro – PC (%) de las muestras (Ecuación 2). La prueba de pérdida por abrasión de Cántabro se desarrolló como una medida relativa de la resistencia a la desintegración (por ejemplo, raveling) de mezclas abiertas. Sin embargo, para el caso de mezclas densas tipo MDC, se puede utilizar para evaluar la durabilidad y propiedades de cohesión [21], [22]. Como resultado se presentó el promedio de tres briquetas y su respectiva desviación estándar ( $\sigma$ ).

$$PC = \left(1 - \frac{mf}{mi}\right) \times 100 \quad (2)$$

## 3. Resultados y discusión

### 3.1. Caracterización de materiales

Los ensayos de caracterización física de los agregados AC y RCA se presentan en la Tabla 1. De los resultados obtenidos en la Tabla 1 es posible concluir que:

i) Con respecto a la geometría de las partículas, los agregados RCA presentan menores porcentajes de partículas alargadas y planas con respecto a los agregados AC. En este sentido, los agregados RCA adquieren una forma más cubica, con mayor porcentaje de caras fracturadas.

ii) La gravedad específica del agregado grueso RCA es menor en comparación al AC, es decir, las partículas de RCA son más ligeras en comparación al material convencional, posiblemente por la presencia del recubrimiento de mortero en los agregados RCA. La presencia de mortero conlleva a generar un volumen de vacíos superficiales y consecuentemente un porcentaje de absorción mayor en comparación al material convencional en la fracción gruesa y fina, respectivamente.

iii) Con respecto al desgaste en la máquina de los Ángeles del AC cumple con el requerimiento de especificación (máximo de 25%) para la elaboración de mezclas que van a ser usadas como capas de rodadura en vías de altos volúmenes de tráfico (NT1). Sin embargo, para capas de rodadura en vías NT1, este material no cumple el valor máximo especificado por el ensayo Microdeval (máximo 20%), pero sí cumple para ser usado como base asfáltica. En el caso del RCA el desgaste en los ensayos de abrasión no cumple los valores especificados para capa de rodadura, sin embargo, puede ser usado para bases asfálticas, incluso en vías NT1. La menor resistencia del RCA en la máquina de Los Ángeles y en el Microdeval es debida principalmente al mortero de recubrimiento, ya que éste tiende a separarse, desgastarse y quebrar ante la acción abrasiva del cilindro metálico y las esferas durante el ensayo.

iv) En el ensayo de solidez, el agregado AC cumple con los valores de la especificación (máximo de 18%). Sin embargo, el agregado RCA presenta un valor superior al estipulado a la especificación, posiblemente por el desprendimiento del mortero en las partículas de RCA ante el ataque de sulfato de sodio.

v) En términos de presencia de materia orgánica y azul de metileno, los agregados AC y RCA presentan valores inferiores al estipulado en la especificación. Es decir, no se presentará una posible pérdida de adherencia agregado-asfalto por la presencia de materia orgánica.

Las características físicas del cemento asfáltico (CA 60-70) utilizado se presentan en la Tabla 2 y cumplen con las exigencias de calidad exigidos para la elaboración de mezclas MDC según la especificación [19].

### 3.2. Diseño de mezclas asfálticas

Los resultados de los parámetros volumétricos y de resistencia derivados con el diseño Marshall para las mezclas MDC-AC, MDC-RCA-G, MDC-RCA-F y MDC-RCA se presentan en las Figuras 2 a 7. En los

resultados del ensayo Marshall realizados a las mezclas que sustituyeron AC por RCA se observa un aumento notable de  $V_a$  y  $V_{AM}$ , así como también una disminución de los VFA. Lo anterior es debido principalmente al menor recubrimiento de las partículas con asfalto (ver Figura 4) como producto de la mayor absorción y de la sustitución en masa del AC por RCA (este proceso genera aumento en el número de partículas de la mezcla debido a la menor gravedad específica del RCA en comparación con el AC). Dichos resultados son coherentes con algunos estudios evidenciados en la literatura [23],[24],[25], los cuales afirman que la absorción superficial de los agregados RCA indican en la composición volumétrica y el desempeño de las mezclas.

Tabla 1. Propiedades de los agregados convencionales y alternativos

Ensayo	Norma	Unidad	AC	RCA	Requerido
Abrasión en máquina de Los Ángeles	AASHTO T 96-02	%	19.5	32	Máx. 25–35
Microdeval	AASHTO T 327-05	%	22.3	24.5	Máx. 20–25
Índice de aplanamiento/ alargamiento	NLT 354-91	%/%	19/14	13/12	
Porcentaje de caras fracturadas	ASTM D 5821-01	%	85.2	91.4	Min. 85
Solidez utilizando sulfato de magnesio	AASHTO T 104-99	%	13.34	45.94	Máx. 18
Contenido de materia orgánica		%	<1.0	<1.0	Máx. 1.0
Valor azul de metileno		mg/g	1.25	1.00	Máx. 10
Adhesión del agregado para material bituminoso	DNER ME 078-94	Cualitativo	Cumple	Cumple	----
Gravedad específica finos/absorción	AASHTO T 84-00	----/%	2.60/3.1	2.55/9.5	----
Gravedad específica gruesos/absorción	AASHTO T 85-91	----/%	2.64/1.8	2.79/6.5	----

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. Propiedades del cemento asfáltico CA 60-70

Ensayo	Método/Norma	Unidad	Requerimiento		Valor
			Min	Max	
Ensayo sobre la muestra original					
Penetración (25°C, 100 g, 5 s)	ASTM D-5	0.1 mm	60	70	61.1
Punto de ablandamiento	ASTM D 36-95	° C	48	54	52.0
Índice de Penetración	NLT 181/88	-	-1.5	+0.7	-0.67
Gravedad Especifica	AASHTO T 228-04	-	-	-	1.022
Viscosidad Dinámica (60°C)	AASHTO T-316	Poises	1500	-	1750
Punto de inflamación	ASTM D3143	°C	230	-	338
Ductilidad (25°C, 5cm/min)	ASTM D-113	cm	100	-	>105
Asfalto residual, luego de la prueba de acondicionamiento en la película delgada rotatoria					
Pérdida de masa por calentamiento	ASTM D-2872	%	-	0.8	0.1
Penetración del residuo, en % de la penetración del asfalto original	ASTM D-5	%	55	-	81
Incremento en el punto de ablandamiento	ASTM D-36-95	° C	-	8	7.5

Fuente: elaboración propia.

Con respecto a la máxima E y E/F, las mezclas con RCA presentaron disminución con respecto a la mezcla de control MDC-AC, atribuida a la susceptibilidad que tiene el mortero adherido del RCA a separarse y quebrar ante cargas mecánicas. Asimismo, a la menor resistencia al desgaste por abrasión en la máquina de los Ángeles y menor resistencia en el aparato Microdeval que experimentó el RCA en comparación con el AC.

Por otro lado, se puede evidenciar, que las mezclas MDC-RCA-G y MDC-RCA requieren de un mayor contenido de asfalto para alcanzar valores cercanos de

resistencia ante carga monotónica en comparación con la mezcla MDC-AC. Para el caso de la mezcla MDC-RCA-F se presentaron valores inferiores a la especificación [19], lo cual es atribuido principalmente a la absorción de los agregados finos del RCA y a la generación de un mastic (asfalto-agregado fino) frágil y quebradizo, lo cual pudo causar reducción de la cohesión interna entre las partículas. Por lo anterior, no se diseñó la mezcla MDC-RCA-F y se eliminó de las fases posteriores.

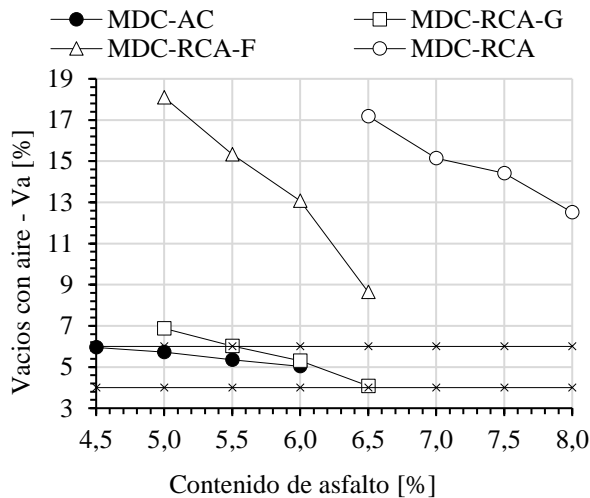


Figura 2. Evolución de los vacíos con aire con el contenido de asfalto. Fuente: elaboración propia.

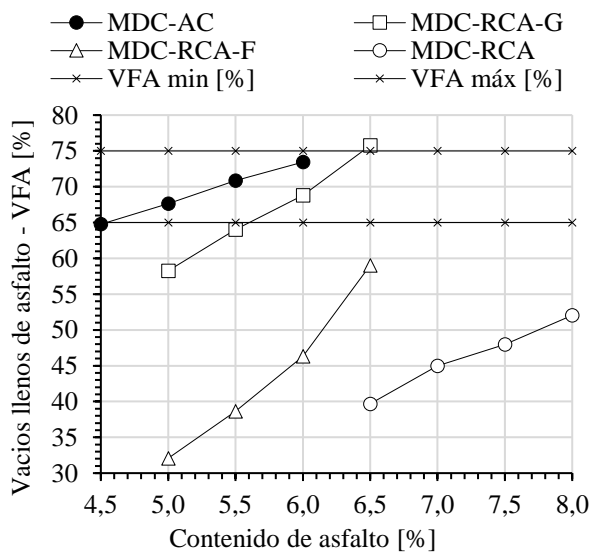


Figura 4. Vacíos llenos de Asfalto con el contenido de asfalto. Fuente: elaboración propia.

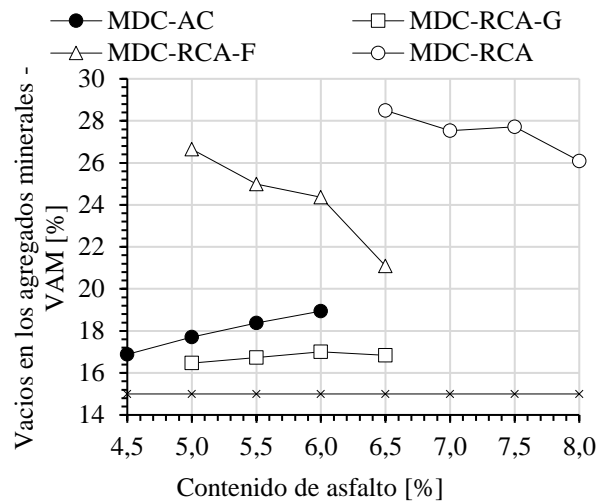


Figura 3. Evolución de los vacíos en los agregados minerales con el contenido de asfalto. Fuente: elaboración propia.

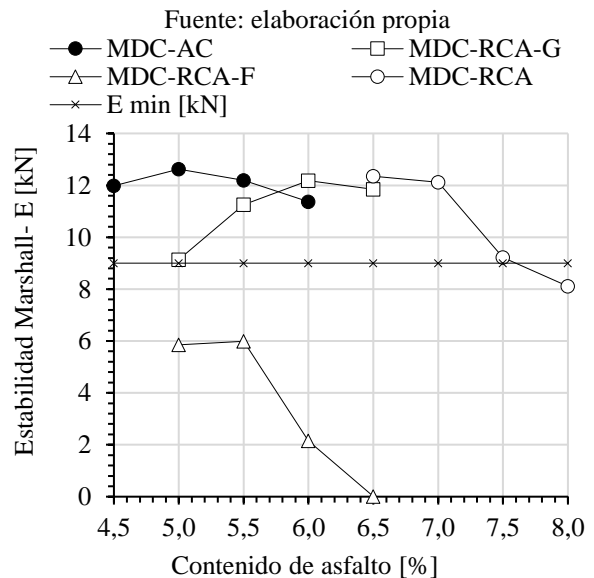


Figura 5. Evolución de la Estabilidad Marshall con el contenido de asfalto. Fuente: elaboración propia.

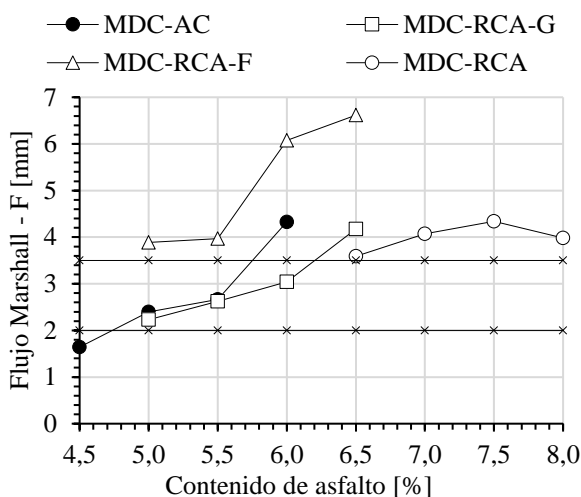


Figura 6. Evolución del flujo Marshall con el contenido de asfalto. Fuente: elaboración propia.

Finalmente, teniendo en cuenta los criterios de diseño de la especificación [19], el contenido óptimo de CA para las mezclas de control MDC-AC y MDC-RCA-G son de 5.5% y 6.0% respectivamente (Va entre 4.0-6.0%, VMA mínimo de 15%, VFA entre 65-75%, E mínimo de 9 kN, F entre 2-3.5 mm y E/F entre 3-6). Para el caso de la mezcla MDC-RCA se adoptó un contenido óptimo de asfalto de 7.0% (basado principalmente en los parámetros E y E/F), dado el incumplimiento de los requisitos de Va, VFA, F y E/F. No se eliminó de las siguientes fases experimentales la mezcla MDC-RCA, ya que, desde el punto de vista ambiental, emplear RCA como sustituto total del AC es benéfico.

### 3.3. Resistencia a Tracción Indirecta por compresión diametral - RTI

La Tabla 3 muestra la resistencia a la tracción indirecta por compresión diametral (RTI) para las mezclas MDC-AC, MDC-RCA-G y MDC-RCA. Se observa, que los valores de RTI en las mezclas que sustituyeron la fracción gruesa del AC y la totalidad de este por RCA aumentaron respecto a la mezcla de control, a pesar de que las mezclas MDC-RCA son mucho más porosas. No existe una explicación clara al respecto, sin embargo, este incremento en el RTI puede ser atribuido probablemente a una combinación de los siguientes factores:

i) Al aumento del porcentaje de asfalto en las mezclas con RCA.

ii) A la forma más cubica del agregado RCA (menores índices de alargamiento y aplanamiento).

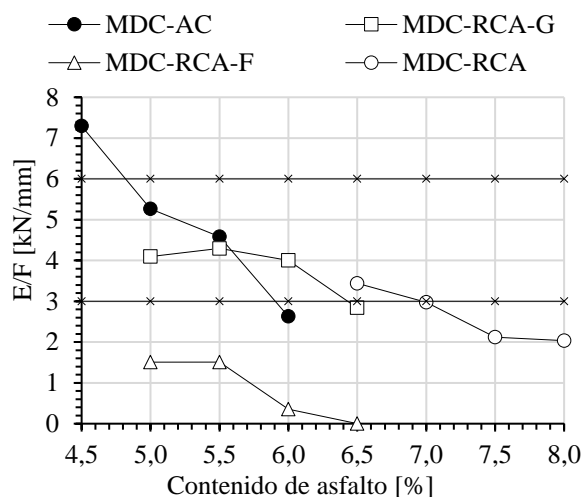


Figura 7. Evolución de la relación E/F con el contenido de asfalto. Fuente: elaboración propia.

iii) A la textura más rugosa del RCA como producto de la presencia de mortero adherido [14].

iv) A un posible aumento de la adherencia asfalto-agregado como producto de una mejor incrustación del asfalto en los vacíos superficiales de los agregados RCA (debido a la mayor absorción de las partículas de RCA en comparación con la del AC).

v) Posibles interacciones fisicoquímicas entre las superficies de los agregados y el CA 60-70. En este sentido, algunos investigadores [26], [27] reportan que la presencia de óxido de calcio (CaO), óxido de silicio (SiO<sub>2</sub>) y óxido de aluminio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) desarrollan características puzolanas en el concreto y pueden promover la adherencia en la mezcla asfáltica.

Tabla 3. Resultados del ensayo RTI

Mezcla	Contenido de asfalto [%]	Vacíos con aire Va [%]	RTI [kPa]	σ [kPa]
MDC-AC	5.5	6.4	747	47.5
MDC-RCA-G	6.0	6.6	820	45.5
MDC-RCA	7.0	14.8	874	39.7

Fuente: elaboración propia.

### 3.4. Ensayo Cántabro

La Tabla 4 muestra los resultados del ensayo Cántabro. Con respecto a la mezcla de control, se observa una disminución en la resistencia al desgaste Cántabro cuando se sustituye el AC por el RCA, y dicha disminución es mayor cuando se aumenta el contenido de



RCA. La disminución de la resistencia al desgaste puede ser atribuido probablemente a una combinación de los siguientes factores:

- i) Aumento de los vacíos con aire (Va), a pesar del aumento en el contenido de asfalto.
- ii) Mayor susceptibilidad de romper y desgastar el mortero adherido al RCA bajo una carga abrasiva, tal como se evidenció en los ensayos de desgaste dureza en la máquina de Los Ángeles y en equipo Microdeval.

Tabla 4. Resultados del ensayo Cántabro

Mezcla	Contenido de asfalto [%]	Vacíos con aire Va [%]	PC [%]	( $\sigma$ ) [%]
MDC-AC	5.5	6.3	4.5	0.16
MDC-RCA-G	6.0	6.7	9.2	0.48
MDC-RCA	7.0	14.1	12.5	0.91

Fuente: elaboración propia.

#### 4. Conclusiones

El objetivo principal del presente estudio fue evaluar el comportamiento mecánico que puede experimentar una mezcla tipo MDC-19 cuando se sustituyen la fracción gruesa, fina y la totalidad de un AC por un RCA. Para tal fin, se realizaron los diseños de mezclas asfálticas por medio de la metodología Marshall y se evaluó la resistencia a la tracción indirecta y al desgaste a la abrasión Cántabro. Con base en los resultados obtenidos de las pruebas de laboratorio, se concluye lo siguiente:

- Los RCA cumplen con las exigencias de las especificaciones INVIAS (2013) para la fabricación de mezclas MDC que vayan a ser usadas como bases asfálticas, excepto en los valores del ensayo de solides en sulfatos de sodio. Sin embargo, este ensayo evalúa la susceptibilidad de los agregados a fisurar, agrietar o fracturar bajo ciclos de congelamiento-secado, los cuales no se experimentan bajo las condiciones climáticas colombianas.
- Al sustituir la fracción del agregado grueso del AC en la mezcla MDC por RCA, se cumplen los requisitos de los parámetros volumétricos y de resistencia Marshall para el diseño de la mezcla. Cuando se sustituyó la fracción gruesa o la totalidad de los AC por RCA, se obtuvo un comportamiento satisfactorio ante la acción de la carga monotónica (similitud de la máxima E y aumento de la RTI con respecto a la

mezcla de control). Por lo anterior, podría considerarse viable el uso del RCA como sustituto del AC desde el punto de vista técnico (especialmente en vías con bajos volúmenes de tránsito). Sin embargo, la utilización de los RCA de la forma propuesta incrementa el contenido de asfalto. Adicionalmente, un aumento del RCA en la mezcla incrementa la pérdida por desgaste Cántabro, y esto debe ser profundizado en futuros estudios, ya que puede incidir a largo plazo, en la generación de mecanismos de daño como son los desprendimientos, descascaramientos, peladuras, separación asfalto-agregado (stripping), entre otros.

- No se recomienda sustituir la fracción fina del AC por RCA, ya que disminuye considerablemente la resistencia bajo carga monotónica de la mezcla (evidenciado por la reducción de E y E/F Marshall inferiores a los mínimos especificados por el INVIAS).

#### Agradecimientos

Los autores agradecen a las Universidades vinculadas por el tiempo dado a la realización de la investigación.

#### Referencias

- [1] INVIAS – Instituto Nacional de Vías, “Estado de la red vial. Bogotá D.C. (Colombia)”, 2019 [En línea]. Disponible en: <https://www.invias.gov.co/index.php/component/content/article/2-uncategorised/57-estado-de-la-red-vial>
- [2] J. P. Ríos-Ocampo, Y. Olaya-Morales, G. J. Rivera-León, “Proyección de la demanda de materiales de construcción en Colombia por medio de análisis de flujos de materiales y dinámica de sistemas”, *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, vol. 16, no 31, pp. 75-95, 2017, doi: 10.22395/rium.v16n31a4
- [3] Unión Europea EU, “Datos estadísticos de la producción de residuos de construcción y demolición 2016-2018”, 2019 [En línea] Disponible en: <https://ec.europa.eu/eurostat/data/database>
- [4] L. Zheng, H. Wu, H. Zhang, H. Duan, J. Wang, W. Jiang, B. Dong, G. Liu, J. Zuo, Q. Song, “Characterizing the generation and flows of construction and demolition waste in china”, *Journal Construction and Building Materials*, vol. 136, pp. 405-413, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.01.055

- [5] Y. F. Silva, R. A. Robayo, P. E. Matthey, S. Delvasto, "Properties of self-compacting concrete on fresh and hardened with residue of masonry and recycled concrete", *Journal Construction and Building Materials*, vol. 124, pp. 639-644, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.07.057
- [6] S. H. Ghaffar, M. Burman, N. Braimah, "Pathways to circular construction: An integrated management of construction and demolition waste for resource recovery", *Journal of Cleaner Production*, vol. 244, pp. 118710, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118710
- [7] S. Ismail, M. Ramli, "Engineering properties of treated recycled concrete aggregate (RCA) for structural applications", *Journal Construction and Building Materials*, vol. 44, pp. 464-476, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.03.014
- [8] R. Jin, Q. Chen, "Investigation of concrete recycling in the U.S. Construction Industry", *Journal Procedia Engineering*, vol. 118, pp. 894-901, 2015, doi: 10.1016/j.proeng.2015.08.528
- [9] S. Paranavithana, A. Mohajerani, "Effects of recycled concrete aggregates on properties of asphalt concrete", *Journal Resources, Conservation and Recycling*, vol. 48, no. 1, pp. 1-12, 2006, doi: 10.1016/j.resconrec.2005.12.009
- [10] J. Mills-Beale, Z. You, "The mechanical properties of asphalt mixtures with Recycled Concrete Aggregates", *Journal Construction and Building Materials*, vol. 24, no. 3, pp. 230-235, 2010, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.08.046
- [11] S. Bhusal, X. Li, H. Wen, "Evaluation of effects of recycled concrete aggregate on volumetrics of hot-mix asphalt", *Journal Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2205, no. 1, pp. 36-39, 2011, doi: 10.3141/2205-05
- [12] M. M. Rafi, A. Qadir, S. H. Siddiqui, "Experimental testing of hot mix asphalt mixture made of recycled aggregates", *Journal Waste Management & Research*, vol. 29, no. 12, pp. 1316-1326, 2011, doi: 10.1177/0734242X10370379
- [13] A. R. Pasandín, I. Pérez, "Laboratory evaluation of hot-mix asphalt containing construction and demolition waste", *Journal Construction and Building Materials*, vol. 43, pp. 497-505, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.02.052
- [14] I. Pérez, A. R. Pasandín, "Moisture damage resistance of hot-mix asphalt made with recycled concrete aggregates and crumb rubber", *Journal of Clean Production*, vol. 165, pp. 405-414, 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.07.140
- [15] A. R. Pasandín, I. Pérez, "Performance of hot-mix asphalt involving recycled concrete aggregates", *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 21, no. 9, pp. 1044-1056, 2018, doi: 10.1080/10298436.2018.1518525
- [16] M. Arabani, A. R. Azarhoosh, "The effect of recycled concrete aggregate and steel slag on the dynamic properties of asphalt mixtures", *Journal Construction and Building Materials*, vol. 35, pp. 1-7, 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.02.036
- [17] J. G. Bastidas-Martínez, H. A. Rondón-Quintana, C. A. Zafra-Mejía, "Study of hot mix asphalt containing recycled concrete aggregates that were mechanically treated with a los Angeles machine", *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*, vol. 10, no. 10, pp. 226-243, 2019.
- [18] A. Radević, A. Đureković, D. Zakić, G. Mladenović, "Effects of recycled concrete aggregate on stiffness and rutting resistance of asphalt concrete", *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 136, pp. 386-396, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.01.043
- [19] INVIAS – Instituto Nacional de Vías, *Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras de Colombia*. Colombia, 2013.
- [20] H. A. Rondón-Quintana, J. C. Ruge-Cardenas, J. G. Bastidas-Martínez, M. Y. Velandia-Castebianco, M. Farias, "Use of thermally treated bentonite as filler in hot mix asphalt", *Journal of materials in civil engineering*, vol. 32, no. 5, pp. 77-88, 2020, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003127
- [21] J. D. Doyle, I. L. Howard, "Characterization of dense-graded asphalt with the Cantabro test", *Journal of Testing and Evaluation*, vol. 44, no. 1, pp. 77-88, 2016, doi: 10.1520/JTE20140212
- [22] B. C. Cox, B. T. Smith, I. L. Howard, R. S. James, "State of Knowledge for Cantabro Testing of Dense Graded Asphalt", *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 29, no. 10, 2017, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002020

- [23] J. Gopalam, J. Prakash Giri, M. Panda, “Effect of filler on bituminous base layer containing recycled concrete aggregates”, *International Journal of Transportation Science and Technology*, vol. 9, no. 3, 2020, doi: 10.1016/j.ijtst.2020.04.002
- [24] P. Mikhailenko, M. Rafiq Kakar, Z. Piao, M. Bueno, L. Poulidakos, “Incorporation of recycled concrete aggregate (RCA) fractions in semi-dense asphalt (SDA) pavements: Volumetrics, durability and mechanical properties”, *Journal Construction and Building Materials*, vol. 264, pp. 120-166, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120166
- [25] E. Sanchez, L. Fuentes, G. Martinez, H. A. Rondón, L. F. Walubita, J. M. Cantero, “Influence of recycled concrete aggregates from different sources in hot mix asphalt design”, *Journal Construction and Building Materials*, vol. 259, pp. 120427, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120427
- [26] M. C. Limbachiya, E. Marrocchino, A. Koulouris, “Chemical–mineralogical characterization of coarse recycled concrete aggregate”, *Journal Waste Management*, vol. 27, no. 2, pp. 201-208, 2007, doi: 10.1016/j.wasman.2006.01.005
- [27] A. Zulkati, Y. D. Wong, D. D. Sun, “Mechanistic performance of asphalt concrete mixture incorporating coarse recycled concrete aggregate (RCA)”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 25, no. 29, pp. 1299-1305, 2013, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000668