



ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN / RESEARCH ARTICLE

<https://doi.org/10.14482/inde.42.02.864.445>

# Desempeño de los RCD en vías urbanas

*Performance of C&DW on urban roads*

ANA-SOFÍA FIGUEROA INFANTE\*

HUMBERTO RAMÍREZ GÓMEZ\*\*

\* Ingeniera civil. Ph.D. Directora del Grupo de Investigación en Desarrollo Tecnológico (INDETEC-INDETES), Facultad de Ingeniería, Universidad de La Salle. Bogotá, Colombia.

Orcid ID: <https://orcid.org/0000-0002-4185-362X>. [afigueroa@unisalle.edu.co](mailto:afigueroa@unisalle.edu.co).

\*\* Ingeniero civil. Unidad Administrativa Especial de Rehabilitación y Mantenimiento Vial (UMV). Orcid ID: <https://orcid.org/0009-0000-1035-9867>. [humberto.ramirez@umv.gov.co](mailto:humberto.ramirez@umv.gov.co).

**Correspondencia:** Ana Sofía Figueroa. Carrera 2 n.º 10-70. Piso 7. Bloque D. Universidad de La Salle. Bogotá, Colombia. [afigueroa@unisalle.edu.co](mailto:afigueroa@unisalle.edu.co).



## Resumen

En esta investigación se presenta un avance de la respuesta estructural de los Residuos de Construcción y Demolición (RCD), utilizados en una vía local de Bogotá, D.C. para tránsito medio. La mitad de esta construida con materiales vírgenes y la otra mitad con RCD. La construcción de la vía culminó en enero de 2020, y a partir de allí se ha venido realizando el monitoreo estructural y funcional de cada tramo para tener mayor certeza sobre el desempeño de los RCD. Entre los resultados obtenidos se destacan la alta susceptibilidad al daño por humedad de la Mezcla Densa en Frío, MDF 20, con 100 % Pavimento Asfáltico Reciclado (RAP). Entre los análisis realizados la auscultación visual con el método del Pavement Condition Index (PCI) arrojó un valor de 85 (excelente) para el pavimento convencional y 74 (muy bueno) para el pavimento con RCD. El Índice de Rugosidad Internacional (IRI) fue 3,3 m/km para el tramo convencional y 3,7 m/km para el de RCD. Lo anterior indica que la servicia-bilidad promedio a los 2,9 años, obtenida de la ecuación de Paterson y Gillespie, es de 2,66 para el pavimento convencional y 2,89 para el pavimento con RCD.

**Palabras clave:** IRI de RCD, MDF-20, pavimentos sostenibles, RCD.

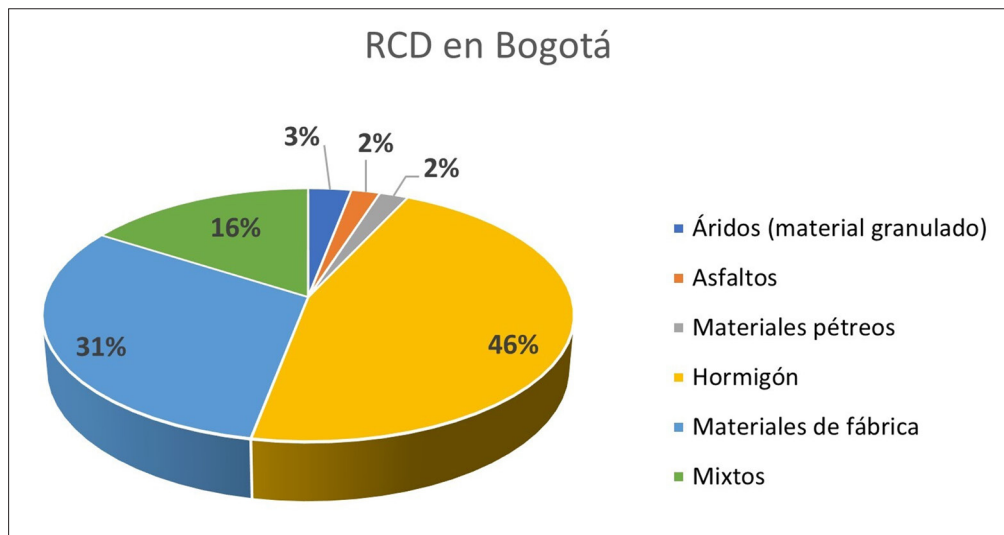
## Abstract

This research presents an advance of the structural response of the Construction and Demolition Waste (CD&W) used in a local road in Bogotá, D.C. for medium traffic, half of it was built with virgin materials and the other half with CD&W. The construction of the road was finished in January 2020, and since then, structural and functional monitoring of each section has been monitored in order to have greater certainty on the performance of the RCDs. Among the results obtained, the high susceptibility to moisture damage of the Cold Dense Mix, MDF 20, with 100 % Recycled Asphalt Pavement (RAP) stands out. Among the analyses performed, the visual auscultation with the Pavement Condition Index (PCI) method yielded a value of 85 (excellent) for the conventional pavement and 74 (very good) for the pavement with RCD. The International Roughness Index (IRI) was 3,3 m/km for the conventional section and 3,7 m/km for the RCD section. This indicates that the average serviceability at 2,9 years, obtained from the Paterson and Gillespie equation, is 2,66 for the conventional pavement and 2,89 for the RCD pavement.

**Keywords:** DCM-20, IRI of C&DW, Sustainable Pavements.

## INTRODUCCIÓN

Uno de los retos mundiales respecto a la infraestructura vial es la aplicación e implementación de procesos sostenibles que se extienden desde la obtención de agregados hasta la construcción y puesta en servicio de la vía. La sostenibilidad debe dar respuesta al equilibrio entre lo construido y el medio ambiente en un entorno de equidad y compromiso social. En este sentido, es necesario incorporar materiales con bajo consumo energético en su producción y aplicación, tales como materiales reciclados y renovables. Si bien en Colombia se regula y orienta a los sectores asociados a la producción minera para construcción de carreteras a través del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, aún falta un extenso trabajo que se asocie al estudio de los materiales reciclados y renovables para garantizar un ciclo de vida sostenible. De acuerdo con la Guía Técnica Ambiental para la *Formulación del Plan de Gestión de RCD en Obra*, emitido por la Secretaría Distrital del Ambiente 2015, en la Figura 1 se observa, los RCD que se generan en Bogotá, y en la Tabla 1 una propuesta de reutilización de estos.



Fuente: autores, información de origen [1].

**FIGURA 1.** DISTRIBUCIÓN DE RCD EN BOGOTÁ

**TABLA 1.** ALTERNATIVA DE REUTILIZACIÓN DE LOS RCD

Residuo	Alternativa de utilización
Concretos	Reutilizar como masa para relleno
	Reutilizar como suelos en vías
	Reciclar como grava suelta
	Reciclar para producción de mortero y cemento
	Reciclar como material granulado
Cerámicos	Reciclar como adoquín
	Reciclar como fachada
	Reciclar para acabados
Asfaltos	Reciclar como masa de rellenos
	Reciclar como asfalto
Metales	Reciclar como asfalto
	Reciclar como aleación
Madera	Reutilizar para casetones, vallados y linderos
	Reciclar para tableros y aglomerados

**Fuente:** Autores. Información tomada de [2].

Con esta investigación se presenta una alternativa de reutilización de los RCD en carreteras, colocados desde la subrasante para procesos de estabilización de suelos de baja capacidad portante hasta la superficie de rodadura, para estudiar su desempeño no solo a nivel de laboratorio sino también a escala natural, y así conocer su desempeño en el tiempo bajo los efectos ambientales y las solicitaciones a las que están expuestos durante el periodo de servicio.

## ESTADO DEL CONOCIMIENTO

El pavimento es un conjunto de capas estructurales conformada por diferentes materiales que deben cumplir unas condiciones de calidad y responder a las solicitaciones impuestas por el tránsito. Sin embargo, uno de los retos a los que recientemente se ha tenido que enfrentar la ingeniería de carreteras es al uso de materiales reciclados, no sólo por la disminución de la huella de carbono, sino también por la reducción de costos de explotación, producción y transporte. En este sentido, es necesario estudiar la calidad y respuesta estructural de materiales como los *Residuos de Construcción y demolición (RCD)*, para su utilización en vías, garantizando un buen desempeño del pavimento sin sacrificar su vida útil.

Existen diversos métodos no destructivos para medir la capacidad estructural y el desempeño de los pavimentos. Los más utilizados son el deflectómetro de impacto, la viga benkelman, el Índice de Rugosidad Internacional (IRI), el coeficiente de resis-

tencia al deslizamiento usando el péndulo británico, la cámara termográfica infrarroja y la macrotextura superficial con la técnica volumétrica, entre otros.

Una de las investigaciones de gran incidencia y referente mundial sobre el seguimiento al desempeño de los pavimentos es la realizada por [3], en la que se desarrolló un estudio llamado *Long Term Pavement Performance (LTPP)*, para analizar el desempeño del pavimento en el largo término, 20 años, y estudiar las causas de su deterioro. La investigación se basó en dos secciones de pavimento rural localizadas en Lake Ontario State Parkway en New York State, en las que se estudiaron los efectos ambientales, de tránsito, esfuerzos, deflexiones, y procesos constructivos, y su incidencia en la durabilidad del pavimento. El proceso desarrolló pruebas no destructivas acompañadas de algunas pruebas de campo para correlacionar los resultados destructivos y no destructivos en las secciones estudiadas.

Otra de las investigaciones realizadas sobre la medición del desempeño de materiales reciclados en un pavimento es la presentada por [4], quienes estudiaron la vida útil de los materiales reciclados en capas de bases y subbases de un pavimento utilizando ensayos de deflectometría. Eligieron seis combinaciones de materiales de desechos de construcción con dieciséis secciones de prueba diferentes, cada una de 3,5 m de ancho y 50 m de largo, con diferentes espesores de capas de base, entre 150 y 250 mm; y subbase de 200, 300 y 400 mm con mezclas de residuos. Entre los residuos utilizados se tienen: 40 % escoria de cobre + 60 % cenizas volantes, (CCF); 70% escoria de cobre + 23 % cenizas volantes + 7 % cal (CFL) y 75 % escoria de acero + 19% cenizas volantes + 6 % cal (SFL) como capas base y cenizas volantes + 5 % cal (FL); 80% cenizas volantes + 20 % GBFS (FG) y 70 % escoria de cobre + 30 % cenizas volantes (CF) como capas de subbase. Con base en la evaluación estructural inicial, las seis mezclas mencionadas presentaron deflexiones más bajas y módulos elásticos más altos en comparación con el material convencional. En particular, la base SFL y la subbase FL presentaron el módulo elástico más alto, de 710 MPa y 450 MPa; los módulos elásticos de las bases y subbases granulares convencionales fueron 138 MPa y 110 MPa, respectivamente. Además, las secciones con mezclas de residuos en las capas base y subbase mostraron una mejor vida útil, con una efectividad de hasta el 17 % en comparación con la sección convencional.

En 2016, [5] presentaron la investigación para pavimentos sostenibles utilizando en la carpeta asfáltica un modificador proveniente del bioetanol producido de residuos orgánicos, en la base granular utilizaron cantidades importantes de RAP y agentes biofluidificantes provenientes de aceite vegetal para mejorar el desempeño y adhesión de los materiales granulares con RAP, en la capa de subbase y subrasante, utilizaron RCD. Para la mezcla asfáltica diseñada con RAP, se encontró que, para controlar la susceptibilidad al daño por humedad, no se le debe incorporar más del 15% de este

RCD. Respecto a las bases y subbases, se recomendó el proceso de calidad, tamaño, forma y limpieza, siguiendo las normas europeas, EN. El tránsito recomendado en la investigación para estos granulados es medio, con un TPD entre 5-800 vehículos.

Estas son sólo algunas de las investigaciones recientemente realizadas en el mundo, sobre los RCD y su utilización en carreteras.

## MATERIALES Y MÉTODOS

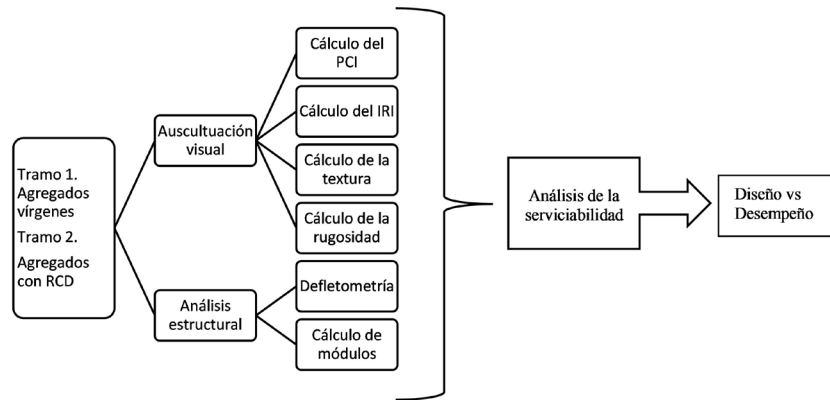
### Materiales

Los materiales utilizados en este proyecto incluyen agregados vírgenes, provenientes de canteras a cielo abierto ubicadas en la sabana de Bogotá; material de concreto hidráulico reciclado sin acero, proveniente de demoliciones; Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), proveniente de las vías reparadas a través del fresado, base y subbase granular tipo B (tránsito medio) según la especificación INV E-2013, y mezclas de base granular con material RAP.

El suelo de subrasante y los materiales utilizados fueron caracterizados y verificada su calidad para dar cumplimiento a los parámetros de diseño de pavimentos para vías locales de tránsito medio en Bogotá, D.C.

### Métodos

Los análisis y seguimiento de la estructura del pavimento se basan fundamentalmente en las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras INV E-2022 y las normas para ensayos de carreteras INVE-2013 [11],[12],[14]. Salvo en ciertos análisis que se indicarán en la medida que se presenten, se consultaron normas o especificaciones diferentes. El segmento vial escogido para el proyecto fue seleccionado entre las diferentes vías locales de un sector central en la ciudad de Bogotá, D.C., aptas para rehabilitar, ubicado en la carrera 37 entre calles 25C y 25D. La vía tiene un ancho de calzada de 7,11m, es decir, cada carril mide 3,56 m y dos carriles en una dirección. El segmento estudiado se dividió en dos subtramos: uno construido con materiales vírgenes de 32,46m y otro construido con RCD y de 32,28 m de longitud para contrastar el desempeño del tramo con RCD respecto al convencional, dado que están sometidos a las mismas solicitaciones y condiciones ambientales. En el diseño y la construcción se tuvieron en cuenta el subdrenaje, dada la topografía y el nivel freático de la zona. Las fases del análisis en esta investigación se presentan en la Figura 2.



Fuente: autores.

**FIGURA 2.** ETAPAS DEL PROYECTO

### Detalles constructivos del tramo de análisis

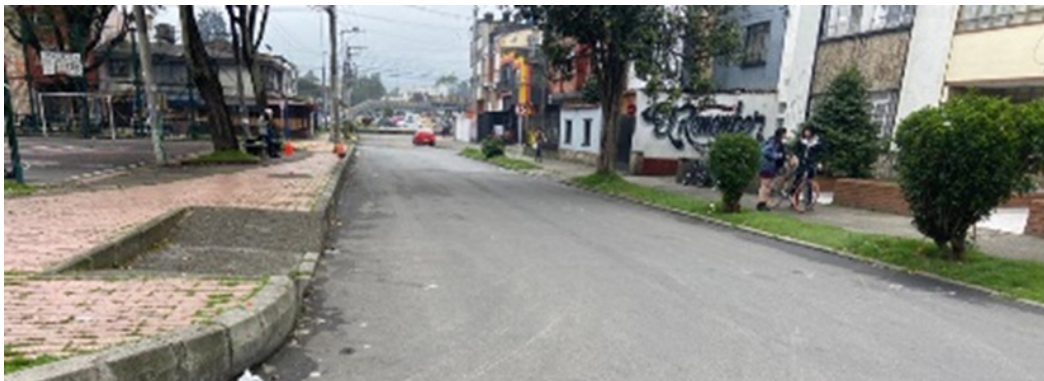
El diseño del tramo de análisis se realizó con base en el estudio de tránsito y el número de repeticiones de carga en ejes equivalentes de 8,2t. El suelo natural requirió estabilización, sin embargo, el potencial expansivo fue bajo, razón por la cual la subrasante se estabilizó con pedraplén (rajón natural), con tamaño máximo de 15 cm para el tramo convencional, y retal de concreto, imitando la forma del rajón natural, para el tramo con RCD. Los materiales granulares escogidos para los dos tramos de pavimento son tipo B por tener tránsito medio según la INV E-2013 (coincidente con la INV E-2022). Para el tramo con RCD se realizó una mezcla de 70 % base granular tipo B más 30 % de RAP y la rodadura con una mezcla asfáltica densa en frío estabilizada con 2 % de cemento y tamaño máximo nominal de 20 mm (MDF 20). El pavimento convencional se recubrió con una mezcla densa en caliente con tamaño máximo nominal de 12 mm (MDC 12). El diseño del tramo de análisis se realizó con base en el estudio de tránsito y el número de repeticiones de carga en ejes equivalentes de 8,2t (ver Tabla 2).

**TABLA 2.** ESPESORES DEL PAVIMENTO

Tramo convencional (agregados vírgenes)		Tramo con RCD	
Capa del pavimento	Espesor (cm)	Capa del pavimento	Espesor (cm)
Mezcla Densa en Caliente MDC-12	9	Mezcla Densa en Frio MDF-20 (100% RAP+2% cemento)	17
Base granular tipo B	15	Base granular tipo B (70% agregado natural +30% RAP)	15
Subbase granular tipo B	15	Subbase granular tipo B	15
Sello de subbase granular tipo B	5	Sello de subbase granular tipo B	5
Rajón natural (pedraplén)	25	Retal de concreto imitación rajón	25
Espesor total de la estructura	69	Espesor total de la estructura	77

Fuente: autores.

Cada una de las capas del pavimento en sus dos tramos fue instrumentada para realizar el monitoreo y análisis de los materiales RCD respecto a los vírgenes. Se instalaron celdas de carga a nivel de subrasante, deformímetros de fondo en la base y subbase granular, humidómetros en la parte superior de la base granular y deformímetros en la fibra inferior de la carpeta asfáltica (ver Figura 3).



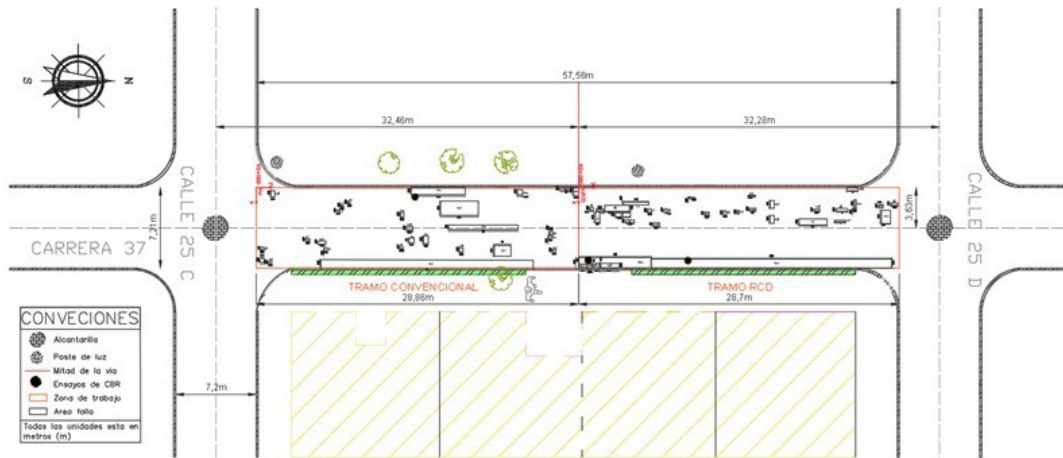
Fuente: autores.

**FIGURA 3.** VÍA CONSTRUIDA CON RCD Y MATERIALES VÍRGENES EN BOGOTÁ, D.C.

### Auscultación visual

La auscultación de la vía se realizó a partir de la metodología de Clasificación del Pavement Condición Índice (PCI) ASTM D6433 - 20, [7]. En la Figura 4 se observan las fallas del tramo convencional y con RCD.

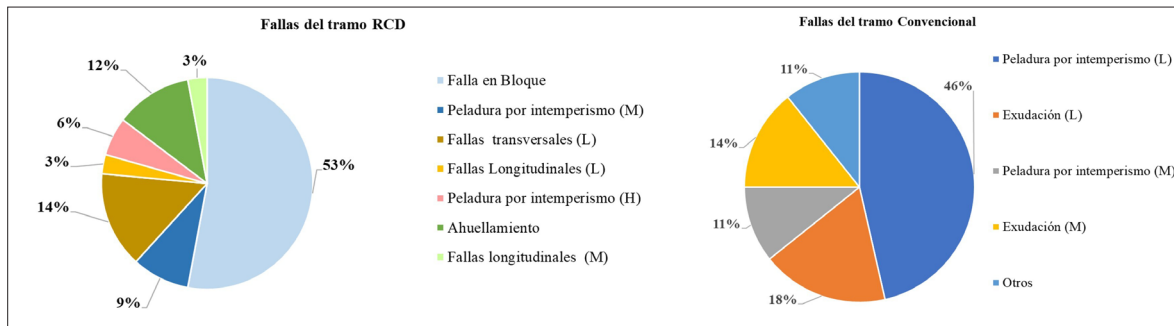




Fuente: autores.

**FIGURA 4.** VISTA EN PLANTA DE LAS FALLAS DEL TRAMO CONVENCIONAL Y TRAMO CON RCD

En el tramo convencional la falla predominante fue la peladura por intemperismo, con un 46 %, seguida de la exudación, con un 18 %. El tramo con RCD, cubierto previamente con un riego de arena de RAP y emulsión catiónica de rompimiento lento tipo 1(CRL-1), debido a la susceptibilidad al daño por humedad que presentó una vez construido, evidenció principalmente daños de bloque en un 53 %, seguidos de peladura por intemperismo en un 14 % (ver Figura 5).



Fuente: autores.

**FIGURA 5.** FALLAS DEL TRAMO CONVENCIONAL Y EL TRAMO CON RCD

### Cálculo del Índice de Rugosidad Internacional (IRI)

Este índice indica la rugosidad del pavimento como la sumatoria de las amplitudes medias en una distancia horizontal recorrida en el pavimento por un equipo o vehículo, a una velocidad constante y con un eje horizontal de referencia [8], de tal forma

que su valoración está en unidades de longitud vertical (cotas), respecto a la longitud recorrida, siendo la expresión más común m/km, pulgadas/pie, entre otros. El IRI se midió en campo con el rugosímetro de Merlín [10], debido a la longitud de los tramos de estudio.

### Cálculo de la fricción

La fricción permite hallar un coeficiente para valorar la adecuada adherencia entre la superficie y las llantas de los vehículos. Este valor es un indicativo de la seguridad por fricción en condición húmeda (la más crítica del pavimento), aplicada con esta metodología especialmente en pavimentos de bajo o medio volumen de tránsito. Cuanto mayor es el valor, tanto más alta y mejor es la fricción. El ensayo se realizó con base en la especificación INV E 791 - 13 (ver Tabla 3).

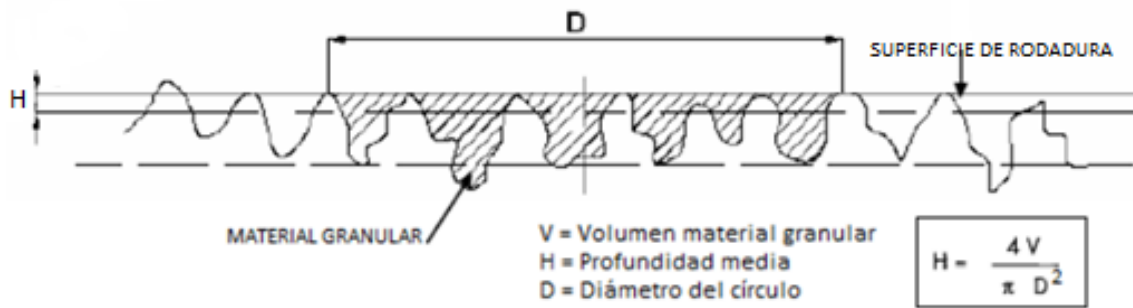
**TABLA 3.** COEFICIENTE DE RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO, NORMA INV E - 792 - 13 [11]

Coeficiente de resistencia al deslizamiento			
Tramo convencional		Tramo RCD	
Péndulo británico		Péndulo británico	
Punto 1:ko+012	Punto 2: ko+026	Punto 1: ko+003	Punto 2:ko+024
74	71	70	69
72	70	71	69
74	74	71	67
73	73	72	70
73		70	

Fuente: autores.

### Cálculo de la textura

El cálculo de la micro- y macrotextura de la superficie del pavimento debe realizarse para determinar la resistencia al deslizamiento. La microtextura es la pequeña aspereza superficial, e incide entre el neumático y el pavimento, y varía de áspera a pulida. La macrotextura se define por la aspereza mayor y se mide con la variación relativa entre las partículas y el plano base del pavimento, y varía de rugosa a suave. Su determinación se llevó a cabo con la técnica volumétrica de arena (ver Figura 6).



Fuente: [12].

### FIGURA 6. MACROTEXTURA SUPERFICIAL, TÉCNICA VOLUMÉTRICA

Adicionalmente, la macrotextura o microtextura se controla en el diseño de la mezcla; aspecto que permite determinar la mejor combinación de granulometría, vacíos y contenido de ligante asfáltico, entre otros, para cumplir con la seguridad vial. En la Figura 7 se observan los ensayos de textura, fricción e IRI, respectivamente, y en la Tabla 4, los resultados obtenidos para la macrotextura.



Fuente: autores, con base en [14].

**FIGURA 7.** EN LA IMAGEN (A) SE OBSERVA LA MEDIDA DE LA TEXTURA CON EL MÉTODO VOLUMÉTRICO, EN LA (B) LA MEDIDA DE LA FRICCIÓN Y EN LA (C) LA MEDICIÓN DEL IRI CON EL RUGOSÍMETRO DE MERLÍN.

**TABLA 4.** MEDIDAS DE LA MACROTEXTURA PARA EL TRAMO CONVENCIONAL Y CON RCD

Macrotectura tramo convencional					Macrotectura tramo RCD			
Diámetro	Punto 1		Punto 2		Punto 1		Punto 2	
	Volumen (mm <sup>3</sup> )	H	Volumen (mm <sup>3</sup> )	H	Volumen (mm <sup>3</sup> )	H	Volumen (mm <sup>3</sup> )	H
d1	100	0,67	100	0,51	100	0,50	100	0,45
d2		0,63		0,49		0,48		0,42
d3		0,58		0,50		0,49		0,45
d4		0,62		0,50		0,52		0,43
Promedio	0,55				0,47			

Fuente: autores.

## RESULTADOS Y ANÁLISIS

### Pavement Condition Index (PCI)

El *Pavement Condition Index* (PCI) es un índice que indica la calidad superficial de un pavimento a partir de la cuantificación de los daños en el mismo. En este proyecto su cálculo se realizó con base en la norma ASTM D6433 - 20 [7]. Los valores obtenidos fueron: 85 para el pavimento convencional y 74 para el pavimento con RCD, clasificándose como “excelente” y “muy bueno”, respectivamente.

### Índice de Rugosidad Internacional (IRI)

Los datos obtenidos para el IRI fueron 3,7 para el tramo convencional y 3,3 para el tramo con RCD. Estos valores fueron obtenidos dos años después de la construcción de la construcción de la vía en estudio. En la Tabla 5, se presenta de manera comparativa el nivel de servicio según AASHTO 93 (PSI) [17] (ver ecuación 1).

$$PSI = 5,03 - 1,91 \text{Log}(1 + SV) - 1,38(RD)^2 - 0,01(C + P)^{0,5} \quad (1)$$

En donde:

*SV*: Varianza de la pendiente de la sección medida con perfilómetro

*RD*: Profundidad del ahuellamiento en pulgadas

*C*: Áreas con agrietamiento clases AASHTO 2 y 3 (pie<sup>2</sup>/1000 pie<sup>2</sup>)

*P*: Área parchada (pie<sup>2</sup>/1000 pie<sup>2</sup>)

Acá se indica la pérdida de serviciabilidad que el pavimento ha tenido en los casi tres años de servicio (ver Tabla 5).

**TABLA 5. PÉRDIDA DE SERVICIABILIDAD DEL PAVIMENTO ESTUDIADO (ASHTO 93)**

Año	PAVIMENTO CONVENCIONAL				PAVIMENTO CON RCD			
	RD (Ahuellamiento) (inch)	Cracking (pie <sup>2</sup> /1000pie <sup>2</sup> )	Patching (pie <sup>2</sup> /1000pie <sup>2</sup> )	PSI	RD (Ahuellamiento)	Cracking (pie <sup>2</sup> /1000pie <sup>2</sup> )	Patching (pie <sup>2</sup> /1000pie <sup>2</sup> )	PSI
2020	0	0	0	4	0	0	0	4
2021	0,2	0	0	3,9	0,2	0,2	50	3,8
2022	0,3	0	0	3,8	0,4	0,78	50,4	3,6

Fuente: autores.

Si se compara el valor del PSI según AASHTO 93 con el obtenido por la ecuación (2) y ecuación (3) de Paterson y Gillespie, respectivamente, se tiene que el valor de PSI es:

$$PSI = 5 * (e)^{-0,18 * IRI} \quad (2)$$

$$PSI = 5 - 0,633 * IRI \quad (3)$$

En donde:

e: Número de Euler

IRI: Índice de rugosidad internacional

Reemplazando los valores de IRI obtenidos para el año 2022, se tiene para el tramo convencional un valor de IRI de 2,57 según Paterson y 2,66 según Gillespie. Para el tramo con RCD, el PSI según Paterson es 2,74, y según Gillespie 2,89.

## Fricción

Los valores obtenidos fueron 72,63 y 69,88 para el pavimento convencional y el construido con RCD, respectivamente. De acuerdo con la Tabla 4, los coeficientes de resistencia al deslizamiento cumplieron ampliamente para los dos tipos de pavimento y el tránsito de diseño de la vía NT2, sin embargo, el pavimento con RCD tuvo un menor coeficiente, debido al riego de emulsión que se le añadió para impermeabilizar la capa superficial y proteger la estructura del ingreso de agua, ya que la mezcla colocada inicialmente con 100 % pavimento asfáltico reciclado (RAP) en una Mezcla Densa en Frío (MDF), era altamente porosa (ver Tabla 6).

**TABLA 6.** VALORES MÍNIMOS ADMISIBLES DEL COEFICIENTE DE RESISTENCIA AL DESLAZAMIENTO CON PÉNDULO BRITÁNICO

Tipo de capa	Coeficientes de resistencia al deslizamiento, mínimo		
	NT1	NT2	NT3
Glorietas; curvas con radios menores de 200m; pendientes $\geq$ 5% en longitudes de 100m o más; intersecciones; zonas de frenado frecuente	50	55	60
Otras secciones	45	50	50

**Fuente.** autores, tomado de INVE ART 450. TABLA 450-14 [14].

## Textura

Los valores de textura (H) obtenidos fueron 0,55 y 0,47 para el pavimento convencional y el de RCD, respectivamente. Con base en la clasificación obtenida, se tiene que para los dos tipos de pavimento la textura corresponde a tipo medio, según [15].

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Uno de los retos de este proyecto fue utilizar una MDF 20 con el propósito de utilizar un 100 % de material reciclado, disminuyendo en un 92 % el uso de materiales vírgenes y adicionando 2 % de cemento hidráulico para controlar la susceptibilidad al daño por humedad. Sin embargo, los humedómetros instalados indicaron que en este pavimento la humedad retenida estaba en el 40 %, debido a su alta porosidad. Para mitigar este problema se colocó un riego de emulsión asfáltica CRR-1 con arena de RAP, el cual resultó efectivo.

Otro aspecto que vale la pena destacar es que a pesar de que la falla predominante en el tramo con RCD fue la de bloque con un 53 %, no hay deformaciones y estructuralmente el pavimento tiene una buena condición y desempeño.

El PCI del pavimento con RCD fue 74, con tres años de vida útil respecto a los 5 de diseño, lo cual indica que es un pavimento muy bueno. Comparativamente, el pavimento convencional tuvo un PCI de 85, es decir que la variación relativa a favor del pavimento convencional es del 12,9 %.

La variación del índice de servicio del pavimento con RCD a los tres años es del 5,26 %, lo cual indica una buena respuesta estructural en el tiempo. Vale la pena aclarar que esto es posible debido a la intervención de impermeabilización realizada tempranamente. Para el pavimento convencional esta variación fue del 5 %, presentando un mejor comportamiento que el pavimento con RCD.

Los coeficientes de resistencia al deslizamiento para los dos pavimentos se cumplieron ampliamente de acuerdo con el tránsito de diseño, lo cual es deseable para tener amplia maniobra de conducción en términos de la seguridad.

La profundidad media de la textura para el pavimento con RCD fue 0,47, valor que de acuerdo con lo recomendado en [16], donde se indica que para un valor de 0,80 mm existe una separación razonable entre la macrotextura rugosa y la suave, y para un valor menor a 0,20 la macrotextura es muy fina. En este sentido, los dos pavimentos clasifican en una textura media. Vale la pena resaltar que este valor fue menor para el pavimento con RCD debido al riego arena emulsión colocado.

Una de las recomendaciones que controlaría la baja textura del pavimento con RCD es el ajuste granulométrico de la MDF 20 con adición de arenas gruesas, medias, finas y material P200, adicionales al porcentaje de cemento aplicado. Esto controlaría la alta permeabilidad de esta mezcla y, por lo tanto, se evitaría la colocación de la emulsión.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad de La Salle y a los estudiantes del Semillero Green Roads que en algún momento se vincularon al proyecto, especialmente a Fabio Bautista y Julián Ríos.

## REFERENCIAS

- [1] A. I. Ortega Acosta, H. L. Casas Camargo y Y. X. Figueroa García, “Cartilla RCD - Secretaría Distrital de Ambiente”, Secretaría Distrital de Ambiente y Alcaldía Mayor de Bogotá, 2015. <http://www.ambientebogota.gov.co/web/publicaciones-sda/cartilla-rcd> (Accedido: 27 mayo, 2020).
- [2] Congreso de Colombia, Decreto 838 de 2005 (23 marzo), pp. 1-10, 2005. [En línea]. Disponible en: [http://www.corpamag.gov.co/archivos/normatividad/Decreto838\\_20050323.htm](http://www.corpamag.gov.co/archivos/normatividad/Decreto838_20050323.htm).
- [3] C. Olmedo y R. Korczak, “Forensic Pavement Study: Practical Methods, Analysis and Applications”, 2010. [En línea]. Disponible en: Stantec Consulting 49 Frederick Street, Kitchener, N2H 6M7 ON, Canada. [Accessed: 29 mayo, 2021].
- [4] S. Patel, R. R. Pai, M. D. Bakare y J. T. Shahu, “Field evaluation of road pavement constructed with waste materials through nondestructive testing,” en *Materials Today: Proceedings*, vol. 28, pp. 1254-1260, 2019. doi: 10.1016/j.matpr.2020.04.146.
- [5] K. J. Kowalski *et al.*, “Eco-friendly Materials for a New Concept of Asphalt Pavement”, *Transp. Res. Procedia*, vol. 14, pp. 3582-3591, 2016. doi: 10.1016/j.trpro.2016.05.426.

- [6] “Opciones de utilización de infraestructura vial y demolición-RCD en los residuos de construcción”, *Rev. Vial*, vol. 139, pp. 34-42, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://es.calameo.com/read/006347347023514cd0c31>.
- [7] ASTM, “Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys1”, pp. 1-48, 1995. doi: 10.1520/D6433-20.2.
- [8] T. D. Gillespie, “Everything You Always Wanted to Know about the IRI , But Were Afraid to Ask ! by Presented at the Road Profile Users Group Meeting Lincoln , Nebraska Everything You Always Wanted to Know about the IRI , But Were Afraid to Ask !”, *Transp. Res.*, 1992.
- [9] M. C. Arriaga Patiño, P. G. Anguas y A. Rico Rodríguez, “Índice Internacional de Rugosidad en la red carretera de México”, n.º 108, pp. 1-57, 1998. [En línea]. Disponible en:(favor, revisar esto. No está claro. Y aclarar si está bien así o falta el nombre de la publicación) <http://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt108.pdf>.
- [10] P. Aguila Rodriguez, “Manual del Usuario merlinermerliner™Merlín Equipo Para Rugosidad”. [En línea]. Disponible en: <https://fddocuments.ec/document/105392186-manual-usuario-merlin.html?page=1>.
- [11] Instituto Nacional de Vias [INVIAS], “Medida Del Coeficiente De Resistencia Al Deslizamiento Usando El Péndulo Británico”, 2013. [www.invias.gov.co](http://www.invias.gov.co).
- [12] Instituto Nacional de Vias [INVIAS], “Medida de la macrotextura superficial de un pavimento empleando la técnica volumétrica INV E – 791 – 13”, Invias, 2012. <https://www.da-lab.co/wp-content/uploads/2021/04/INV-791-13.pdf>.
- [13] M. de T. y C. G. J. Zabala, “Manual de Usuario del EvalPav - Software para evaluacion de pavimentos en carreteras y aeropuertos de superficie asfáltica, y carreteras no pavimentadas”, vol. 1, pp. 1-20, 2015. Lima, Perú: MTC.
- [14] Instituto Nacional de Vías [ INVÍAS], “Artículo 400- 07. Disposiciones generales para la ejecución de riegos de imprimación, liga y curado, tratamientos superficiales, sellos de arena asfalto, lechadas asfálticas, mezclas asfálticas en frío y en caliente y reciclado de pavimentos”, *Normas y Especificaciones INVÍAS*, 2013.
- [15] J. C. Wambold *et al.*, “International PIARC Experiment to Compare and Harmonize Texture and Skid Resistance Measurements Expérience internationale AIPCR para la comparison et d’harmonisation des mesures d’adhérence et de texture”, 1995.
- [16] Ministerio de Transporte de Colombia [INVIAS], “Guía metodológica para el Diseño de obras de rehabilitación de pavimentos asfálticos de carreteras,”. *Guía metodológica*, p, 104, 2002. <https://www.invias.gov.co/index.php/documentos-tecnicos>.
- [17] Transportation Officials, 1993. AASHTO *Guide for Design of Pavement Structures*, 1993 (Vol. 1). Aashto.I-54.