

# Trece años de continuo desarrollo con mezclas asfálticas modificadas con Grano de Caucho Reciclado en Bogotá: Logrando sostenibilidad en pavimentos

## Thirteen Years of Continuous Development in Crumb Rubber Modified Asphalt Mixtures in Bogotá: Achieving Pavement Sustainability

G. Martínez<sup>1\*</sup>, B. Caicedo\*\*, D. González\*\*\*, L. Celis\*\*\*, L. Fuentes\*, V. Torres\*\*\*

\*Universidad del Norte, Barranquilla. COLOMBIA

\*\*Universidad de los Andes, Bogotá. COLOMBIA

\*\*\*Instituto de Desarrollo Urbano de Bogotá, Bogotá, COLOMBIA

Fecha de Recepción: 26/07/2017

Fecha de Aceptación: 20/02/2018

PAG 41-50

### Abstract

*The present work describes different stages that the Urban Development Institute (IDU) has addressed to achieve the adequate and correct application of crumb rubber modified (CRM) asphalt mixtures. The first research stage in the laboratory included an exhaustive analysis of the mechanical properties of the mixtures, according to asphalt mixture typologies used in Colombia. In addition to a brief application on a fatigue carousel to evaluate the deterioration of this type of mixtures under accelerated loading. The second stage deals with the performance analysis and comparison with other types of asphalt mixtures modified with polymers available in the Colombian market. This stage involved the construction of one full-scale pavement test lane with different sections considering asphalt modified with polymers (SBS, SBR), and two sections with rubber asphalt, one through dry process and the other through wet process. As a result of these stages, a technical specification was developed to serve as guidelines for the production and analysis of mixtures added with crumb rubber. Likewise, the environmental advantages of applying this technology in the Colombian context are described.*

*Keywords: Asphalt mixtures, crum rubber, pavement sustainability*

### Resumen

El presente trabajo describe cada una de las diferentes etapas que ha abordado el IDU para una adecuada y acertada aplicación de las mezclas mejoradas con GCR. Una primera etapa de investigación en laboratorio que incluyó una exhaustiva evaluación de las propiedades mecánicas de las mezclas de acuerdo con la tipología de las mezclas asfálticas utilizadas en Colombia. Además de una breve aplicación en un carrusel de fatiga para evaluar el deterioro de este tipo de mezclas de una manera acelerada. Una segunda etapa de evaluación y comparación del desempeño con otros tipos de mezclas asfálticas modificadas con polímeros disponibles en el mercado colombiano. Esta etapa involucró la construcción de un tramo de prueba escala real con diferentes secciones considerando asfalto modificado con polímeros (SBS, SBR) y dos secciones con asfalto caucho, una por vía seca y otra por vía húmeda. Como resultado de estas fases una especificación técnica fue desarrollada para dar lineamientos sobre la producción y evaluación de las mezclas con GCR. Se describen de la misma manera las ventajas ambientales de la aplicación de esta tecnología dentro del entorno Colombiano.

**Palabras clave:** Mezclas asfálticas, grano de caucho, sostenibilidad en pavimentos

## 1. Introducción

La disposición de las llantas desechadas ha sido considerada como un grave problema tanto para las agencias públicas como para las empresas administradoras de los sitios de disposición de desechos sólidos. Esto sumado a las hoy por hoy exigencias y necesidades establecidas por el protocolo de Kyoto, motivan a buscar cada día soluciones ambientalmente amigables para lograr una infraestructura de transporte sostenible. En Bogotá, el Instituto de Desarrollo Urbano (IDU) no ha sido ajeno a estas necesidades y a la problemática de esta clase de desechos sólidos.

Es por esto que desde hace más de una década (2001), el IDU ha realizado grandes esfuerzos para estudiar e implementar mezclas asfálticas mejoradas con el grano de caucho reciclado (GCR), buscando identificar sus limitaciones y potenciales ventajas para ser aplicadas en la malla vial de la ciudad de Bogotá.

El desarrollo de la tecnología del asfalto modificado con desecho de llantas debe su origen a un estudio realizado por el Distrito Capital sobre el aspecto ambiental de los desechos sólidos, donde el manejo de las llantas usadas generadas por el parque automotor de Santa Fe de Bogotá recibió especial atención. Dentro de las conclusiones del estudio se recomendó como una opción sustentable incorporar el grano de caucho proveniente de llantas recicladas (GCR) en las mezclas asfálticas. Esta opción permitiría incorporar un residuo sólido de compleja disposición en un elemento de la infraestructura vial como lo son los pavimentos al mismo tiempo que permitiría mejorar el desempeño y propiedades mecánicas de la mezcla.

A raíz de esta recomendación, y como parte del Proyecto de Transporte Urbano para Santa Fe de Bogotá (BIRF 4021-CO), el Instituto de Desarrollo Urbano, IDU, contrató a la Universidad de los Andes para adelantar

<sup>1</sup> Autor de Correspondencia:



diferentes estudios con el fin de desarrollar una metodología de diseño de mezclas, de modificación de los asfaltos nacionales y finalmente obtener mezclas asfálticas mejoradas con desechos de llantas (Universidad de Los Andes, 2002), (Universidad de Los Andes, 2005).

El presente artículo describe cada una de las diferentes etapas que ha abordado el IDU para una adecuada y acertada aplicación de las mezclas mejoradas con GCR. Una primera etapa de investigación en laboratorio que incluyó una exhaustiva evaluación de las propiedades mecánicas de las mezclas de acuerdo con la tipología de las mezclas asfálticas utilizadas en Colombia. Además de una breve aplicación en un carrusel de fatiga para evaluar el deterioro de este tipo de mezclas de una manera acelerada. Una segunda etapa de evaluación y comparación del desempeño con otros tipos de mezclas asfálticas modificadas con polímeros disponibles en el mercado colombiano.

Esta etapa involucró la construcción de un tramo de prueba escala real con diferentes secciones considerando asfalto modificado con polímeros (SBS, SBR) y dos secciones con asfalto caucho, una por vía seca y otra por vía húmeda. Como resultado de estas fases, una especificación técnica fue desarrollada para dar lineamientos sobre la producción y evaluación de las mezclas con GCR. A la fecha el IDU ha intervenido más de 90 segmentos viales utilizando un volumen importante de llantas desechadas haciendo sostenible la red de pavimentos en Bogotá. Se describen de la misma manera las ventajas ambientales de la aplicación de esta tecnología dentro del entorno Colombiano.

Con los resultados finales, se verificó el potencial que tiene la vegetación respecto de las pérdidas de calor interno, puesto que dicha pérdida de calor es una de las medidas más útiles en el sentido de mejorar las condiciones ambientales internas.

### 1.1 Objetivo

Describir el desarrollo y el avance del proceso de implementación de la técnica de asfaltos modificados con

grano de llanta desechado en Colombia, en particular para Bogotá.

## 2. Etapas de la implementación del asfalto modificado con desechos de llantas en Colombia

### 2.1 Fase inicial: Experimentación inicial procesos vía húmeda y seca en laboratorio y en carrusel de fatiga

En esta etapa iniciada en el año 2001, estudió la factibilidad de la incorporación del GCR por medio de los procesos de vía seca y vía húmeda. El proceso por vía seca consiste en la inclusión del GCR en las mezclas asfálticas como si fuera parte de los agregados (generalmente fracción fina). El proceso de mezclado entre el asfalto y los agregados es llevado a cabo de la manera tradicional. La incorporación del GCR de una granulometría específica es realizada mediante el reemplazo de los mismos tamaños en los agregados en los porcentajes deseados. Por otro lado, el proceso por vía húmeda implica la modificación del cemento asfáltico previo al mezclado con los agregados. En la elaboración de mezclas asfálticas mejoradas con caucho mediante el proceso seco se utilizó cemento asfáltico de la refinería de Barrancabermeja, la principal en Colombia, en tanto que para el proceso húmedo se modificaron los cementos asfálticos de las refinerías Barrancabermeja y Apiay. Vale la pena destacar que estas dos refinerías son las únicas que producen asfalto en Colombia.

Debido a que a la fecha del estudio (año 2001), en Colombia no se contaba con ninguna trituradora de llantas, el grano de llantas fue obtenido del desecho de reencauchadora de llantas de camiones quienes generaban un desecho en forma de ripio libre de acero y nylon. El GCR utilizado fue seleccionado de tamaño fino, con partículas inferiores al tamiz No. 30 (595  $\mu\text{m}$ ), ya que las partículas finas permiten una mejor interacción entre el caucho y el cemento asfáltico.

La granulometría del GCR utilizado se puede observar en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Granulometría del Caucho propuesta para vía seca

Normal ( $\mu\text{m}$ )	595	297	74
Alternativo	No. 30	No. 50	No. 200
% que pasa	100	7.5	1.5

Para la modificación del cemento asfáltico con el GCR se analizaron entonces diferentes porcentajes de GCR para los dos cementos asfálticos producidos en Colombia. Para los fines del presente artículo al cemento asfáltico producido de la refinería de Apiay será denominado por la

letra (A) y para Barrancabermeja (B). Las propiedades físicas de los asfaltos se muestran en la Tabla 2.

El asfalto A era producido con grado de penetración 60-70 dmm, y el asfalto B 70-90 dmm.

**Tabla 2.** Propiedades físicas de los cementos asfálticos estudiados

Código	Ductilidad	Recuperación Elástica	Penetración	Punto Ablandamiento	Densidad	Pérdida de masa
	[25°C]	[25°C, 50 mm/min, 20 cm]	[25°C, 100 g, 5 s]		[25°C]	
	ASTM D113	ASTM T-301-95	ASTM D5	ASTM D 36	ASTM D70	ASTM D2872
	[cm]	[%]	[1/10 mm]	[°C]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[%]
Cemento asfáltico original						
A	> 100	6.25	65	51	1.02	-
B	> 100	5	71	44.8	1.02	-
residuo RTFO						
A	48.5	-	45	51.7	0.97	1.14
B	> 100	-	54	48.8	1.03	1
residuo RTFO+PAV						
A	9.9	-	38	62.3	0.89	-
B	7.75	-	18	66.9	0.99	-

### 2.1.1 Dosificación del GCR

La dosificación se hizo considerando como variables de entrada el tipo del ligante, el porcentaje de GCR, la temperatura de mezclado y el tiempo de reacción. La variable de respuesta para obtener la cantidad óptima de GCR fue la viscosidad Brookfield a 163°C del ligante modificado con GCR, la cual de acuerdo (Caltrans, 2003) debería estar entre 1500 y 3000 cP (10-2 Poises). El factorial para la dosificación del GCR se llevó a cabo de acuerdo con lo descrito en la Tabla 3.

La mezcla del cemento asfáltico y del GCR se realizó en un recipiente metálico, que fue introducido en un baño de

aceite térmico para calentar la mezcla a las temperaturas especificadas; esta mezcla era agitada constantemente mediante un sistema de aspas metálicas a una velocidad de 100 rpm. A medida que estos dos materiales se iban mezclando se extraían muestras dependiendo del tiempo de mezclado deseado. Este sistema de mezclado garantizó la homogeneidad de la mezcla asfalto-caucho. De todas las mezclas elaboradas se escogió aquella que cumpliera con los criterios definidos. Entre los criterios de selección estuvo la viscosidad Brookfield a 163°C, menores tiempos de reacción y bajas temperaturas de mezclado.

**Tabla 3.** Factorial para la dosificación de los cementos asfálticos

Cemento asfáltico	Contenido de GCR (%)	Temperatura de mezclado (°C)	Tiempo de Reacción (min)
Barranca 70/90 - (B)	15, 20	155, 165	45, 50, 55, 60, 70, 80
Apiay 60/70 - (A)	10, 13, 15, 20	155, 165	45, 50, 55, 60, 70, 80

La denominación de los asfaltos modificados fue definida por la combinación de variables involucradas. Por el ejemplo el asfalto denominado A-13-165-55, consistió en un asfalto de la refinería de Apiay (A), 13% de GCR, modificado

a 165°C durante 55 minutos. El cemento asfáltico de Apiay requirió el análisis de dos contenidos de GCR adicionales para poder cumplir con el criterio de viscosidad, Como se puede ver en la Figura 1.



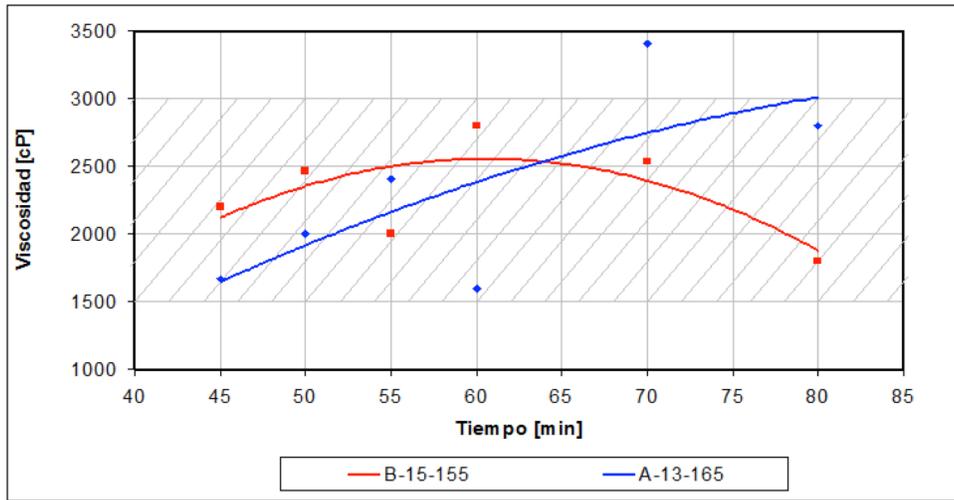


Figura 1. Variación de la viscosidad Brookfield a 163°C respecto al tiempo de mezclado, para los diseños A-13-165 y B-15-155

Finalmente las combinaciones A-13-165-55 y B-15-155-50 fueron escogidas como las dosificaciones óptimas de acuerdo con los criterios previamente establecidos. Sobre estas dosificaciones fue llevada a cabo una completa caracterización de SuperPave con el fin de determinar las mejoras en cuanto al grado de desempeño de cada asfalto (PG). Así para el ligante de A puro se determinó su grado de desempeño en PG58-22, y al ser modificado con 13% de GCR se mejoró a PG88-16, igualmente para el ligante de B, que en su estado puro presenta un grado de desempeño de PG58-22, se logró aumentar a PG76-22 con 15% de GCR. Mayores detalles en cuanto a la evaluación reológica de los

asfaltos modificados con llantas puede ser encontrada en (Martínez et al., 2006). Los resultados del desempeño de los asfaltos colombianos modificados con GCR se pueden observar en la Figura 2.  $G^* \text{sen } \delta$  es considerado un indicador del comportamiento en cuanto a la fatiga, menores valores de este indicarían un mejor desempeño frente a este modo de deterioro. Como se observa en la Figura 2, los asfaltos modificados con GCR independientemente al origen de los asfaltos presentaron mejor indicador que los asfaltos modificados con polímeros.

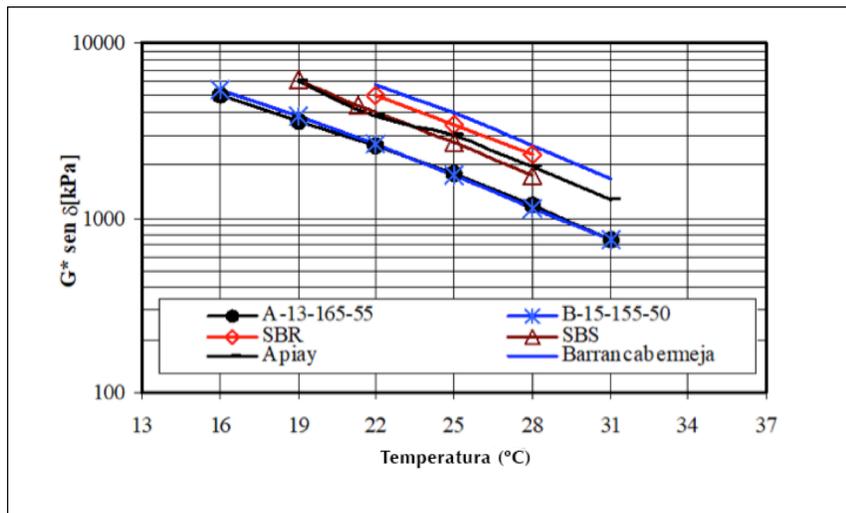


Figura 2. Factor de fatiga para los asfaltos colombianos modificados con GCR vs otros modificados con polímeros

La segunda parte de este estudio analizó el efecto de un porcentaje de 1 y 2% de GCR (% en peso respecto a los agregados) aplicando el proceso de vía húmeda en mezclas

tipo Mezclas Densas en Caliente tipo 1(MDC-1) y tipo 2 (MDC-2) ver Tabla 4.

**Tabla 4.** Distribución granulométrica mezclas MDC 1 y 2

Tamiz		Porcentaje que pasa	
Normal	Alterno	MDC-1	MDC-2
25.0 mm	1"	100	-
19.0 mm	3/4"	80-100	100
12.5 mm	1/2"	67-85	80-100
9.5 mm	3/8"	60-77	70-88
4.75 mm	No. 4	43-54	51-68
2.00 mm	No. 10	29-45	38-52
425 mm	No. 40	14-25	17-28
180 mm	No. 80	8 - 17	8 -17
74 mm	No. 200	4 - 8	4 - 8

Esta etapa consideró el diseño de mezclas y la caracterización mecánica de las mismas. A modo de información se incluyeron los siguientes ensayos:

- Diseño Marshall, para determinar la proporción óptima de cemento asfáltico evaluando la Estabilidad, el Flujo y el porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica, en los diseños de las mezclas asfálticas elaboradas por el proceso seco.
- Compactación en la prensa de compactación giratoria PCG, para determinar mediante la evaluación de módulos dinámicos y porcentaje de vacíos la proporción óptima de cemento asfáltico en los diseños de las mezclas asfálticas elaboradas por el proceso húmedo.
- Determinación del comportamiento a la fatiga.
- Determinación del Módulo Dinámico a 5, 25 y 40 °C, y frecuencias de 1, 4, 10 y 16 hz.
- Determinación de la resistencia a la deformación plástica mediante la Pista de ensayo de laboratorio.
- Los resultados del diseño de mezclas son mostrados en la Tabla 5.

Los resultados obtenidos en el diseño muestran que la inclusión del GCR por método de vía seca involucra mayores contenidos de asfalto, como consecuencia se observan

menores estabilidades y menores flujos para las mezclas con GCR.

Este puede explicarse en la superficie específica del GCR y en su capacidad de absorción del asfalto. Los módulos dinámicos (Este ensayo se realizó de acuerdo a la norma INV E-754) a 10Hz sobre estas mezclas demostraron que con la inclusión del GCR se obtuvieron mezclas de menor rigidez para las MDC-1 a 25°C se obtuvieron módulo al 0% GCR de 58000 kg/cm2 mientras que para las mezclas con el 1 y 2% con GCR se obtuvieron módulos dinámicos de 25000 y 11600 kg/cm2 respectivamente. Para las mezclas tipo MDC-2 los valores al 0% fueron de 81500 kg/cm2 mientras que para las mezclas con el 1 y 2% con GCR se obtuvieron módulos dinámicos de 28000 y 19200 kg/cm2 respectivamente.

El efecto de la inclusión de GCR en las MDC como quedó evidenciado es el de producir una mezcla menos rígida que la convencional hecho que contrasta con el objetivo de modificar asfaltos (método húmedo) con el cual se obtienen asfaltos con viscosidades mayores y generando mezclas con módulos igualmente mayores. Otras pruebas como deformación permanente y resistencia a fatiga fueron igualmente realizadas pero por limitaciones en la longitud del documento no son abordadas en este artículo. Sin embargo, los resultados del ensayo a escala real con las mezclas diseñadas muestran el real desempeño y mejoras de la adición del GCR mediante la vía seca.

**Tabla 5.** Diseño de mezclas con GCR vía seca de mezclas MDC 1 y 2

Ensayo	Vacíos con aire en la mezcla asfáltica	Porcentaje óptimo de cemento asfáltico	Estabilidad	Flujo	Peso Unitario	Vacíos en los áridos minerales
	[%]	[%]	[kg]	[mm]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[%]
Norma	INV* E-736	-	INV E-748	INV E-748	INV E-733	-
Especificación	4 - 6		min. 750	2-3.5	-	mín. 14
MDC-1 0%	5	4.7	1796	2.5	2.18	21.1
MDC-1 1%	5	5.7	898	3.1	2.07	26.5
MDC-1 2%	5	5.8	1012	3.6	2.09	26.8
Especificación	4 - 6		mín. 750	2-3.5	-	mín. 15
MDC-2 0%	5	5.4	1538	2.6	2.18	21.6
MDC-2 1%	5	6.5	1429	3	2.13	25.1
MDC-2 2%	5	6.6	1077	3	2.1	26.8

\*INV: corresponde a las especificaciones del Instituto Nacional de Vías – INVIAS



La Figura 3 muestra la aplicación directa a escala real de los diseños de mezcla obtenidos mediante la modificación con GCR por el método de la vía seca. El carrusel de fatiga fue construido aplicando una mezcla tipo MDC-2 con el 1% de GCR y el 0% de GCR como muestra de control. Lo anterior, debido a que con este porcentaje se obtuvo el mejor

desempeño de las mezclas analizadas. La pista de prueba consistió en 7 de MDC-2, la cual es una de los tipologías de mezclas más utilizados en Colombia, colocados bajo las mismas condiciones de soporte, y se hicieron circular cerca de 210.000 repeticiones de carga de 8.2 ton. El desempeño del mismo es mostrado en la Tabla 6.

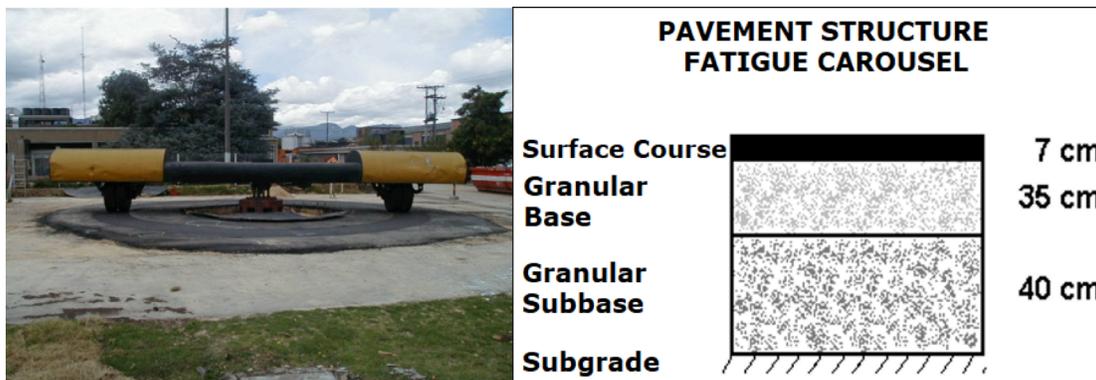


Figura 3. Prueba a escala real carrusel de fatiga Universidad de los Andes (Universidad de Los Andes 2002)

La Tabla 6 muestra el desempeño superior de la mezcla con GCR al 1%, el ahuellamiento para la mezcla convencional fue 5 veces mayor y la densidad de fisuración como indicador de la fatiga mostró diferencias del orden de 8 veces frente al tramo modificado. Los resultados en

laboratorio y en conjunto con los del carrusel de fatiga motivaron al IDU a llevar a cabo una segunda etapa haciendo énfasis en el diseño de mezclas por vía húmeda y en la construcción a escala real de un tramo de prueba en una vía urbana de la ciudad de Bogotá.

Tabla 6. Desempeño del carrusel de fatiga después 210.000 repeticiones de 8.2 toneladas

Diseño	MDC-2 0%GCR	MDC-2 + 1% GCR
Ensayo	Valores máximos	
Ahuellamiento, mm	49.28	9.96
Deflexión, 10 <sup>-3</sup> mm	254.1	160.8
Densidad de fisuración, cm/m	931	127
Temperatura registrada, °C	48	45

## 2.2. Fase dos tramo de prueba en vía urbana

En congruencia con los resultados obtenidos en la primera etapa del desarrollo de las mezclas hacia el año 2003 se inició la segunda fase del estudio de las mejoras mecánicas de mezclas modificadas con desechos de llantas

la cual culminó en el año 2005 con la fase final de seguimiento sobre el tramo a escala real.

Para esta etapa, debido a la implementación de una nueva especificación en Bogotá, se utilizaron mezclas de denominación 0/14. Cuya granulometría es mostrada en la Tabla 7.

**Tabla 7.** Granulometría mezclas 0/14

<b>Tamaño</b>	<b>Mezcla 0/14</b>
mm	(%) que pasa
14	94 – 100
10	72 – 84
6,3	50 – 66
4	40 – 54
2	28 – 40
0,08	7 – 10

Las mezclas fueron diseñadas con un contenido de GCR del 18% con respecto al peso del asfalto, porcentaje que cumplía con los criterios de viscosidad definidos en (Caltrans, 2003). Para el estudio Ecopetrol (Empresa Colombiana de Petróleos) modificó la producción de asfaltos en Barrancabermeja y pasó de producir cemento asfáltico de penetración 70-90 a penetración 80-100. Esta modificación obligó a incluir en el estudio mezclas con asfalto con penetración 80-100. La Tabla 8, muestra el diseño de

mezclas de los asfaltos analizados. En la tabla AM indica mezcla con asfalto convencional, VH indica asfalto modificado con GCR por vía húmeda, VS indica mezcla modificada con GCR por vía seca, PMSBR y SBS indican asfaltos comerciales modificados con polímeros. Mayores detalles sobre el desempeño de las mezclas puede ser encontrado en (Universidad de Los Andes, 2002), (Universidad de Los Andes, 2005).

**Tabla 8.** Resultados del Diseño de las Mezclas Asfálticas

<b>Tipo de Mezcla</b>	<b>Gravedad específica Bulk</b>	<b>Módulo dinámico (Kg/cm<sup>2</sup>) 15°C , 10 Hz</b>	<b>vacíos (%)</b>	<b>Contenido de asfalto (%)</b>
AM7090	2.124	140800	7.55	6.32
VH 7090	2.144	123000	7.2	6.46
AM80100	2.13	168779	6.54	6.89
VH80100	2.13	130000	6.5	6.78
VS80100	2.088	74000	6	6.78
VH6070	2.15	144849	6.25	6.89
PMSBS	2.155	130850	6.4	6.35
PMSBR	2.135	120000	6.5	6.72



### 2.2.1 Construcción del tramo de prueba a escala real

La producción a escala real tuvo tres importantes condiciones que cumplir. La primera la dificultad de mantener la temperatura controlada a 163 °C, la energía de agitación fue fijada en 1800 rpm, y se realizó la producción en bachadas de 0,21m<sup>3</sup>. El proceso de modificación se llevó a cabo a 163°C, 25 minutos de tiempo de mezclado y 18 % en peso del cemento asfáltico total, bajo estas condiciones se obtuvo una viscosidad de Brookfield dentro del rango de 2000 a 2500 cP.

El tramo de prueba fue escogido considerando que se garantizara el mismo volumen de tráfico a lo largo de las secciones y condiciones homogéneas de soporte. La longitud del tramo de prueba es de 270 m (54 m para cada tipo de mezcla), sobre los cuales se realizó una completa caracterización de los granulares y subrasantes existentes. La pista fue dividida en 5 secciones con la misma estructura de pavimento en granulares y el mismo espesor de carpeta asfáltica, variando para cada sección el cemento asfáltico. El tramo de prueba está compuesto por un tramo con mezcla asfáltica convencional, 2 tramos con mezclas modificadas con desechos de llantas por vía seca y vía húmeda respectivamente, y dos secciones con asfalto modificado con polímeros SBS y SBR.

La estructura de cada sección estuvo compuesta por un espesor de granulares variables entre 0.25 y 0.30 m, sobre los cuales se colocó una base estabilizada de RAP (reclaimed asphalt pavement) que consistió en la mezcla de los granulares existentes con el RAP obtenido del tramo de prueba, en un espesor de 0.10 m. Sobre la base estabilizada se colocaron 0.07 m de espesor de mezcla asfáltica para cada tipo de cemento asfáltico. Para la construcción de los tramos con asfalto modificado con GC se utilizaron solo

compactadores de cilindro metálico, como recomiendan las especificaciones en la literatura (Caltrans, 2003). Es importante mencionar que con el diseño y construcción del tramo se esperaba observar su deterioro durante un año, es decir, el tramo fue diseñado para una vida útil estimada de un año con las condiciones de tráfico existentes en el corredor. El tráfico en un año fue estimado en 1x10<sup>6</sup> Ejes equivalentes de 8.2 Ton.

El desempeño del tramo de prueba fue estudiado en una primera etapa durante un año. Durante ese primer año se realizaron medidas para establecer la evolución de las posibles fallas y deterioros que se pudieran presentar en cada sección, determinación de volúmenes de tráfico, medidas de rugosidad (IRI), deflexiones estáticas y extracciones de núcleos para verificación de reología de los cementos asfálticos, mediciones adelantadas cada tres meses durante el primer año. Así mismo, se buscaba verificar a escala real los resultados obtenidos a partir de estudios obtenidos en laboratorio consistentes en comportamiento reológico de los asfaltos caucho y el comportamiento mecánico de las mezclas elaboradas con asfalto-caucho (Universidad de Los Andes, 2002), (Universidad de Los Andes, 2005), (Martínez et al., 2006a), (Martínez et al., 2006b).

La Figura 4 y la Figura 5 muestran la densidad de fisuración y el estado superficial del tramo con GCR y con polímero SBR. Como se puede observar en la figura 4, la sección con asfalto convencional AM80100 presentó la mayor densidad de fisuración después de cuatro (4) de servicio. El asfalto modificado con GCR por vía húmeda mostro un desempeño similar al de los asfaltos modificados con polímeros, demostrando que podemos obtener mezclas con desempeño comparable a las mezclas modificadas con polímeros mediante esta técnica eco-sostenible.

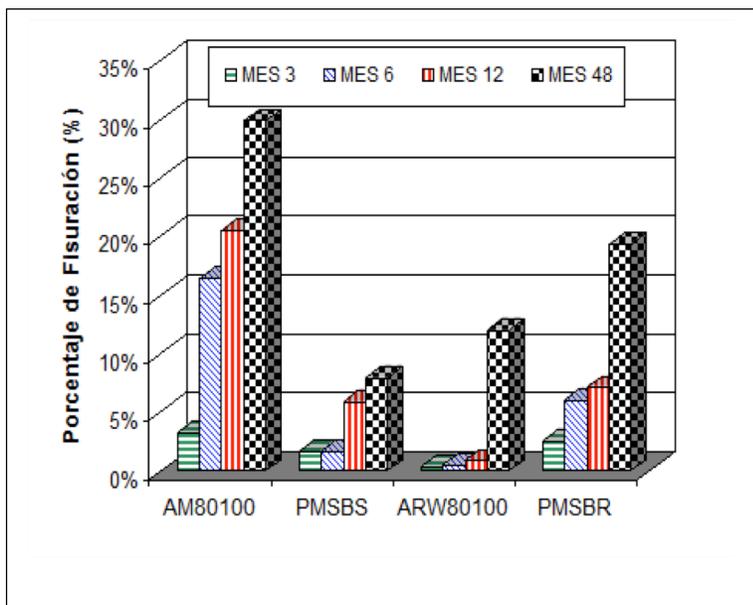


Figura 4. Densidad de fisuración durante cuatro (4) años de servicio para mezcla convencional 80-100, asfalto modificado con GCR vía húmeda y con polímeros

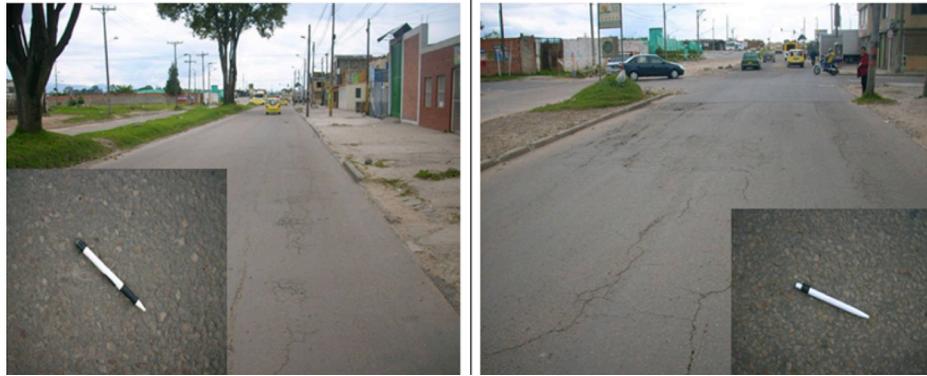


Figura 5. Estado superficial después de cuatro años, sección con GCR (VH) a izquierda y tramo Polímero SBR a derecha.

### 2.3 Desarrollo de la especificación técnica e implementación

Como resultado de toda la experimentación realizada, en las distintas etapas de desarrollo una especificación técnica para la ciudad de Bogotá ha sido desarrollada Sección 560-11 que trata sobre “Mezclas asfálticas en caliente con asfaltos modificados con caucho por vía húmeda” (Instituto de Desarrollo Urbano de Bogotá 2011). La especificación considera los criterios de viscosidad utilizados durante los estudios realizados en el rango de 1.5 y 3.0 Pa-s a 163°C, penetración mínima de 40 dmm a 70 mm y un punto de ablandamiento de mínimo 52°C. Como diferencia a las granulometrías utilizadas en los estudios antes descritos se proponen granulometrías abiertas en vez de las mezclas densas. Esta modificación se incluye en concordancia con las experiencias a nivel mundial, las cuales utilizan mezclas con granulometría “Gap Graded”, las cuales han demostrado un mejor desempeño y mejor manejabilidad que las mezclas densas (Rubber Pavement Association 2011).

En el año 2011 el gobierno distrital de Bogotá emite la Resolución 6981 del 27 de diciembre de 2011 “Por medio de la cual se dictan lineamientos para el aprovechamiento de llantas y neumáticos usados, y llantas no conforme en el Distrito Capital”, esta Resolución establece en el artículo 4°, la siguiente obligación:

“A partir del segundo semestre del 2012, toda persona que ejecute y adelante procesos constructivos de obras de infraestructura del transporte urbano del Distrito Capital deberán prever el uso de materiales provenientes del aprovechamiento de llantas o neumáticos usados o llantas no conforme, en un porcentaje no inferior al 5% de metros cuadrados por cada contrato de obra, con excepción de aquellos que a la entrada en vigencia de la presente resolución tengan estudios y diseños aprobados.

El porcentaje de que trata este artículo aumentará anualmente en cinco (5) unidades porcentuales hasta alcanzar el 25%, y en todo caso, estos procesos constructivos serán reportados en los primeros quince (15) días de los meses de junio y diciembre de cada año a la Secretaría Distrital de Ambiente por medio del formulario que ésta entregue para el efecto. El primer reporte, será en junio de 2013”.

Es precisamente esta resolución la que permite que las mezclas modificadas con desechos de llantas empiecen a ser aplicadas de forma masiva en los diferentes contratos de mantenimiento para la red vial de Bogotá. De acuerdo con el Boletín de grano de caucho reciclado de febrero de 2015, a la fecha se han colocado 14836 m<sup>3</sup> de mezcla modificada con GCR reutilizando un total de 51929 llantas (ver Tabla 9).

Tabla 9. Estadística de Cantidad total de mezcla asfáltica con GCR

Año	Cantidad total aplicada de mezclas m <sup>3</sup>	Mezclas Asfáltica con GCR m <sup>3</sup>	Mezclas Asfáltica con GCR m <sup>3</sup>	Total llantas usadas
2011	-	-	677,78	2372,23
2012*				0
2013	148874,49	24144,01	2518,81	8815,84
2014	421620,19	93876,94	11640,31	40741,1
Total	570494,68	118020,95	14836,91	51929,18

Fuente: Adaptado de (Instituto de Desarrollo Urbano de Bogotá 2015)



## 2.4 Incentivos y tramos construidos

El IDU, para incentivar la aplicación de esta tecnología eco-sostenible desde el año 2012, ha incluido en los pliegos de condiciones de las Licitaciones Públicas, para efectos de la calificación del factor de evaluación denominado CALIDAD, otorga un valor adicional a los proponentes que se comprometan a: "La utilización de materiales provenientes del aprovechamiento de llantas o neumáticos usados o llantas no conforme, en las actividades de pavimento asfáltico en proporción con los metros cuadrados (m<sup>2</sup>) totales del proyecto a construir en un porcentaje del 5% ó más, adicional al mínimo exigido", de esta manera da cumplimiento a lo establecido en la resolución 6981 de 2011, y se garantiza por lo como mínimo un 5% adicional en la aplicación de mezclas con GCR. A nivel nacional y motivado en los buenos resultados de la experiencia de la capital Colombiana, el Instituto Nacional de Vías – (INVIAS 2012), ha establecido especificaciones para la aplicación de las mezclas modificadas con grano de llantas en todo el territorio nacional, con lo cual se da un enorme paso para alcanzar la sostenibilidad de la red de carreteras nacional.

Actualmente muchos de estos tramos hacen parte del programa Institucional de seguimiento a tramos testigos para poder desarrollar modelos de deterioros que permitan planificar y mejorar el sistema de administración de pavimentos de la ciudad.

## 3. Conclusiones

El presente trabajo describió cada una de las diferentes etapas que ha abordado el IDU para una adecuada

y acertada aplicación de las mezclas mejoradas con GCR. El modelo adoptado por el IDU puede servir como ejemplo a administraciones o gobiernos para poder implementar técnicas novedosas de mantenimiento y/o rehabilitación pero sobre todo técnicas amigables con el medio ambiente.

La implementación de esta tecnología eco-sostenible ha involucrado el esfuerzo institucional durante varios años, agotando diferentes etapas de investigación y desarrollo, el cual ha sido exitoso debido al robusto apoyo técnico desde la academia, el personal técnico del sector público y del gremio de la construcción de carreteras.

Con la adaptación de esta tecnología al entorno colombiano se está dando solución a la disposición de un residuo sólido de difícil disposición, contribuyendo a la conservación del medio ambiente, al mismo tiempo que se está produciendo un material de alto desempeño que redundará en ahorros significativos en costos de mantenimiento y conservación. Desde el punto de vista social, se ha abierto un nuevo sector de producción y de generación de empleo, por ejemplo: la cadena de recolección de llantas y la creación de la industria de la trituración de llantas que hace algunos años eran inexistentes en Colombia.

Todas estas ventajas contribuyen a soportar los tres pilares de la sostenibilidad; economía, protección del medio ambiente y beneficios sociales logrando una infraestructura vial sostenible.

Futuras etapas de desarrollo deben involucrar técnicas de mantenimiento preventivo como los tratamientos superficiales basados en asfalto modificado con GCR, como por ejemplo, chip seals, y membranas de absorción de esfuerzos.

## 4. Referencias

- Caltrans (2003)**, State of California Department of Transportation- Asphalt Rubber User Guide.
- Instituto de Desarrollo Urbano de Bogotá (2015)**, Boletín de grano de caucho reciclado de febrero de 2015. <http://app.idu.gov.co/geodata/IntenasMain/tecnicas.html>
- Instituto de Desarrollo Urbano de Bogotá (2011)**, Especificaciones Técnicas Generales de Materiales y Construcción, para proyectos de Infraestructura Vial y de Espacio Público, para Bogotá DC. [http://app.idu.gov.co/espec\\_tecnicas/espec\\_tecnicas\\_2011.htm](http://app.idu.gov.co/espec_tecnicas/espec_tecnicas_2011.htm)
- INVIAS (2012)**, Instituto Nacional de Vías. Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras. Artículo 413-13. Bogotá, Colombia.
- Martínez, G., Caicedo, B., Gonzáles, D., Celis, L. (2006b)** Mechanical Properties of Hot Mix Asphalts with Crumbed rubber and others Modifiers. Proceedings of the Asphalt Rubber 2006 Conference. Palm Springs.
- Martínez, G., Caicedo, B., Gonzáles, D., Celis, L. (2006a)**, Rheological Behaviour of Asphalt with Crumbed Rubber and other Modifiers. Proceedings of the Asphalt Rubber 2006 Conference. Palm Springs.
- Rubber Pavement Association (2011)**, Asphalt-Rubber Standard Practice Guide [http://www.rubberpavements.org/Library\\_Information/AR\\_Std\\_Practice\\_Guide\\_20111221.pdf](http://www.rubberpavements.org/Library_Information/AR_Std_Practice_Guide_20111221.pdf).
- Universidad de Los Andes (2002)**, Instituto de Desarrollo Urbano de Bogotá, Estudio de las mejoras mecánicas de mezclas asfálticas con desechos de llantas, Bogotá D.C.
- Universidad de Los Andes (2005)**, Instituto de Desarrollo Urbano de Bogotá D.C., Segunda fase del estudio de las mejoras mecánicas de mezclas asfálticas con desechos de llantas – Pista de Prueba contrato 306-03, Bogotá D.C.