

# Estudio mecánico del asfalto modificado con polímeros y cueros que son utilizados en la elaboración del calzado

Artículo de investigación científica y tecnológica

---

**Luis Ángel Moreno-Anselmi**

Universidad Católica de Colombia  
lamoreno@ucatolica.edu.co.

---

**Damaris Andrea Calvo-López**

Investigadora del Departamento  
Administrativo de Ciencia,  
Tecnología e Innovación  
(Colciencias)

Recibido: junio de 2014  
Aprobado: julio de 2014)

## Resumen

Este artículo es resultado de un trabajo de cooperación entre el Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación (Colciencias) y el Grupo de Investigación de Pavimentos y Materiales de Ingeniería de la Universidad Católica de Colombia, cuya finalidad fue entender el comportamiento físico-mecánico del cemento asfáltico modificado con polímeros y cueros, así como caracterizar el material modificado en términos de sus propiedades químicas. En concreto, se toma como material de investigación las botas de combate desechadas por los militares en Colombia, y se procede a la elaboración de muestras con diferentes combinaciones de porcentajes de cada uno de los polímeros y cueros para la modificación del cemento asfáltico. Se realiza también la caracterización de este material y sus propiedades físicas de rigidez, fluidez y estabilidad, de lo cual se obtiene el porcentaje de mejor comportamiento. Luego de múltiples pruebas, los resultados obtenidos muestran mejoras en las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica modificada y deja la puerta abierta para un aprovechamiento adecuado de residuos contaminantes que contribuyan a reducir el impacto ambiental.

**Palabras clave:** asfaltos modificados, caucho, cuero, mezcla asfáltica.

## Abstract

This paper is the result of a cooperation between the Administrative Department of Science, Technology and Innovation (COLCIENCIAS) and Research Group of Pavements and Engineering Materials of the Catholic University of Colombia. The research goal was to understand the physical-mechanical properties of the asphalt cement modified with polymers and leather and also to characterize its chemical properties. The leather used for this modification comes from waste combat boots from the Colombian Army. Several samples were prepared with different combinations of percentages of each of the polymers and leather for the modification of the asphalt cement. The characterization of this material includes stiffness, fluidity and stability in order to find out the percentage with the better performance. After multiple tests, the results show improvements in the mechanical properties of the modified asphalt and leaves the door open for the proper use of polluting material that contributes to reduce the environmental impact.

**Keywords:** modified asphalt, rubber, leather, asphalt mixture.

## 1. Introducción

La Universidad Católica de Colombia y su grupo de Pavimento y Materiales de Ingeniería han venido trabajando en proyectos de investigación con productos de desecho de remotoras de calzado. Los resultados obtenidos mediante ensayos Marshall han sido satisfactorios, puntualmente en el comportamiento que tuvieron las mezclas asfálticas en los parámetros de estabilidad y flujo, lo cual permite deducir que la adición de desecho de caucho y cuero mejora el comportamiento de las estructuras de pavimento.

En el desarrollo del estado del conocimiento se evaluaron varias empresas nacionales que realizan dotaciones de zapatos a sus empleados, y se observó que una de las mayores problemáticas de la investigación era la obtención final de este material de desecho, debido a que ninguna de las empresas tenía control sobre la disposición final de los zapatos de desecho. Luego de varios análisis, se concluyó que el Ejército Nacional es una de las entidades que más produce este tipo de elementos de desecho y que, además, tiene control sobre él. Esta institución anualmente produce toneladas de este desecho, que no puede salir de los batallones debido a los problemas de orden público que se podrían generar si este material llegara a manos inescrupulosas.

La metodología consistió en la incorporación del caucho y el cuero en la elaboración de mezclas asfálticas MDC-2 por vía húmeda en diferentes porcentajes. Se evaluó su comportamiento por medio del ensayo Marshall, calculando así el porcentaje óptimo de asfalto modificado con la combinación adecuada de los aditivos de la muestra.

## 2. Asfaltos y mezclas asfálticas modificadas

El asfalto es un material que se obtiene como residuo de la refinación de yacimientos de petróleo, debido a sus propiedades físicas y a su facilidad para cambiar de estado con la temperatura. Es muy usado en la industria de la construcción y, en general, en la pavimentación en forma de mezclas asfálticas, donde se combinan el cemento asfáltico y algunos agregados pétreos en proporciones exactas

y previamente especificadas (Asociación de Productores y Pavimentadores Asfálticos de Colombia [Asopac], 2004, p. 20). Al agregarle aditivos, como productos de desechos industriales o de construcción, toma el nombre de *asfalto modificado*. Mediante este proceso se busca mejorar algunas de las propiedades físicas, mecánicas y dinámicas tanto en los asfaltos como en las mezclas asfálticas.

A medida que el tiempo avanza, también la tecnología evoluciona y se empiezan a crear nuevos métodos para optimizar los procesos y sus productos. Ello no es diferente en las estructuras viales, donde en la actualidad hay gran cantidad de investigaciones sobre el mejoramiento de su capacidad y la resistencia a diferentes agentes. En Colombia, los desarrollos investigativos en el área de los asfaltos y las mezclas asfálticas modificadas son extensos en comparación con la cantidad de estructuras de pavimentos flexibles construidas con esta tecnología (Rondón *et al.*, 2008).

Durante los últimos años, modificar asfaltos con desechos industriales o de construcción ha sido motivo de estudio para mejorar el comportamiento de los materiales asfálticos y de esta manera suplir y resistir las cargas impuestas por el tráfico y las diversas condiciones ambientales. Además, se busca controlar la disposición de materiales de desecho, en función de disminuir la contaminación que producen los polímeros y otro tipo de materiales similares.

Los materiales más utilizados para la modificación de asfaltos son grano de caucho reciclado (GCR), etileno vinil acetato (EVA), polietileno de baja densidad, látex reciclado, látex natural, policloruro de vinilo (PVC), polietileno de alta densidad (PEAD), poliestireno (PS), estireno-butadieno-estireno (SBS), estireno-butadieno (SBR) y ácido fosfórico poli (PPA) (Contreras, 2013; Barinas y Magaldi, 2012; Viveros y González, 2012).

Las investigaciones anteriormente referenciadas resaltan que la resistencia mecánica de mezclas asfálticas modificadas con diferentes tipos de polímeros y elastómeros es mayor en comparación con mezclas que emplean asfaltos sin ningún aditivo. También se concluyó que el cemento asfáltico modificado con caucho

produce un material menos quebradizo a bajas temperaturas y con punto de ablandamiento más alto, lo cual mejora la resistencia a la deformación plástica a temperaturas elevadas. De igual manera, los autores afirman que las mezclas asfálticas MDC-2 modificadas con caucho reciclado presentan comportamiento similar al de la mezcla asfáltica convencional, pero con una tendencia a mejorar las propiedades de peso unitario y porcentaje de vacíos a medida que se adiciona caucho reciclado al asfalto.

### 3. Materiales de desecho

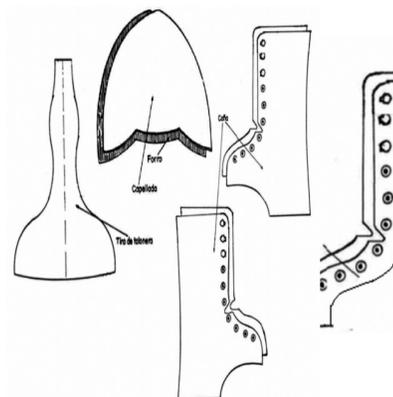
Los materiales usados en el calzado de Colombia comprenden cuero de tres tipos, de acuerdo con su ubicación en el calzado (parte exterior, parte interna y parte inferior). Los tipos de cuero empleados en la parte exterior son cueros con la flor (cuero de empeine de vacuno, vacuno al cromo, vacuno al cromo esmerilado, *waterproof*, cuero engrasado, cuero de Rusia, cuero de pulir, cuero de empeine para sandalia, *boxcalf*, cuero de empeine de becerros, cabritilla, cuero de empeine de cabras, empeine de oveja, cueros de empeine de caballos y potrillos, cuero de empeine de cerdos, cuero de empeine de canguro, cuero charol, cuero crispado, cuero de reptiles, cueros de pieles de peces, cuero de empeine de cerraje en carne de bovino) y cueros de afelpado y nobuk (cuero afelpado o cuero áspero, cuero de cerraje afelpado, cuero nobuk) (Quim, 2014, p. 43).

La fabricación interna del calzado tiene como tarea principal equilibrar la absorción y secreción de humedad del pie durante el uso. Los tipos de cuero utilizado para esta parte del calzado son tres: cuero para forrería de curtido vegetal, cuero para forrería de curtido combinado y cuero para forrería de curtido al cromo.

El cuero utilizado en la parte inferior del calzado es de tipo suela o suela ligera. Los cueros suela son duros y con baja flexibilidad, mientras que los de suela ligera conservan mejores propiedades. En esta parte del zapato se utilizan los tipos de cuero suela (según el procedimiento antiguo de curtido), suela curtida (según el método antiguo en el foso), suela curtizada (según el método moderno), suela ligera, cuero para plantillas, cuero para viras, suela al cromo y suela curtida combinada.

En cuanto a los materiales usados en las botas de combate, las entidades que utilizan este calzado son las Fuerzas Militares de Colombia, conformadas por el Ejército, la Armada y la Fuerza Aérea, que entre sus filas suman un total de 461.092 hombres efectivos que anualmente reciben una dotación de dos pares de botas. Para la fabricación de las botas de combate, se utilizan cuero y caucho vulcanizado. Según las características que poseen estas botas fabricadas en la zapatería del Batallón de Intendencia 1 "Las Juanas", el material usado es el cuero tipo A-tanino y caucho para vulcanizar.

- a. *Corte del cuero tipo A-tanino.* Estas son algunas de las condiciones y los parámetros que se deben cumplir en la elaboración de las botas: el cuero usado tiene que ser de ganado bovino, curtido al cromo y recurtido al vegetal, plena flor, hidrofugado, semibrillante, color homogéneo, debe pasar los ensayos requeridos y ser de color negro, sin usar colorantes; el calibre debe ser de 1,80 a 2,0 mm, con una resistencia a la tensión longitudinal de 18 Mpa mínimo, y todos deben cumplir con las ensayos 1048, 4045 y las normas NTC 2217, 1077 y 1042, correspondientes a los ensayos físicos y mecánicos que se le realicen al cuero (Fuerzas Militares de Colombia, 2014). En la figura 1 se muestra el corte de las botas de combate.



**Figura 1.** Vista de empleo de corte A-tanino en la confección de la bota

Fuente: Fuerzas Militares de Colombia (2014).

b. *Caucho para vulcanizar.* Los requisitos y los ensayos a los cuales se debe someter el caucho para vulcanizar son estos: el caucho tiene que ser negro, sin manchas y sin visos de otro color; la densidad relativa debe estar entre 1,08 y 1,25 g/cm<sup>3</sup>; la dureza (*Shore A-15* segundos) debe ser 65 ± 5; la resistencia a la flexión ha de ser de 200 K ciclos para la propagación del corte inicial hasta los 2/3 del ancho total de la probeta de ensayo; un máximo incremento del corte inicial de 6,9 mm; resistencia al desgarre de 7500 kg/m mínimo; resistencia a la abrasión de 130 mm<sup>3</sup> máximo; ensayos correspondientes a las normas NTC 4811, 812, 445, 724, 447, 632, 456 y 467 (Fuerzas Militares de Colombia, 2014).

## 4. Metodología

La investigación se realizó en cuatro etapas. Inicialmente se hizo una revisión bibliográfica sobre asfaltos modificados con diferentes tipos de polímeros y elastómeros. Se consideraron especialmente aquellas fuentes en la que se usó caucho como agente modificador, así como aquellas sobre los tipos de zapatos usados en el país y los materiales más utilizados por las empresas productoras. Asimismo, se buscaron fuentes que establecieran la disposición del calzado, con el fin de determinar su potencial uso como material de desecho en la modificación del cemento asfáltico. Finalmente, una vez evaluada esta información, se definió la empresa con la cual se realizaron las muestras como agente modificador para las briquetas.

En la segunda etapa se elaboraron las muestras: se ejecutó la caracterización del material granular y del cemento asfáltico, la obtención del agente modificador y la modificación de la mezcla tipo MDC-2 por vía húmeda con porcentajes de 1, 2, 4 y 8% de DCC (agente modificador con diferentes porcentajes de caucho y cuero).

En la tercera fase caracterizó el asfalto modificado con diferentes porcentajes del agente modificador. La primera muestra, de 75% cuero + 25% caucho; la segunda, de 0% cuero + 100% caucho, mediante el método Marshall de la mezcla asfáltica convencional con porcentajes de asfalto de 4,5, 5, 5,5 y 6% y de la mezcla asfáltica modificada. En la cuarta fase se registraron y

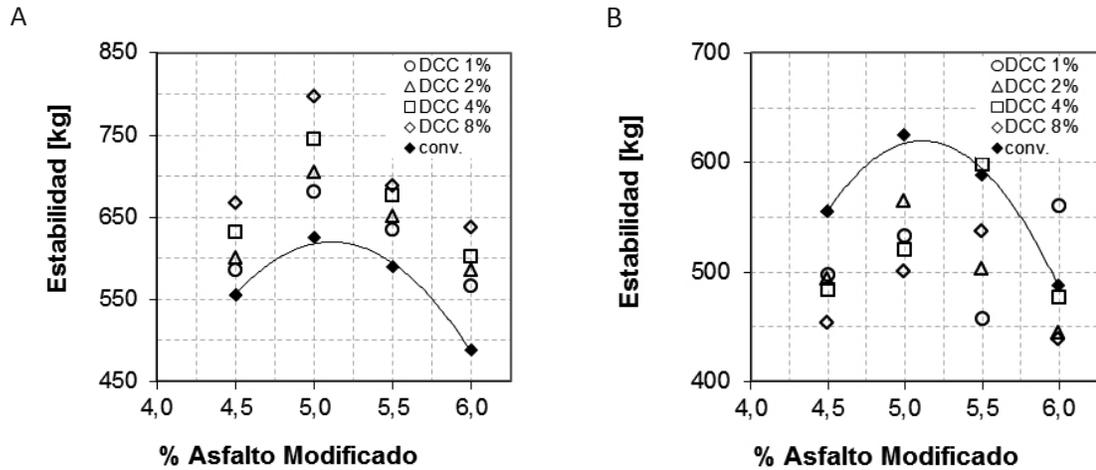
analizaron los datos obtenidos de los ensayos de laboratorio y se establecieron los porcentajes de los polímeros y el cuero que proporcionaron el mejor comportamiento.

## 5. Resultados

### 5.1 Ensayo Marshall

Para el ensayo se modificó el asfalto por vía húmeda con el aditivo DCC triturado. Los porcentajes de agente modificador se escogieron con base en la teoría y la experiencia de otras investigaciones, que observaron que entre más alto fuera el porcentaje del agente modificador, más aumentaba la dificultad de manejo al momento de realizar la mezcla, debido a la forma tan artesanal en la que se elaboraba. Los porcentajes del agente modificador seleccionados son de 1, 2, 4 y 8% de DCC. Como resultado, se compararon las propiedades físicas de los dos laboratorios de mezcla densa en caliente tipo 2 (MDC-2), elaborada con asfalto 60-70 según la clasificación del Instituto Nacional de Vías (Invías) y modificada con diferentes porcentajes de caucho vulcanizado y cuero proveniente de las botas militares. Los datos son tomados de los trabajos de grado de Gutiérrez y Vivas (2014) y Clavijo y Aranda (2014), que trabajaron adiciones de 100% caucho vulcanizado, y 25% caucho vulcanizado + 75% cuero. Los resultados de laboratorio se pueden observar en las tablas 1 y 2.

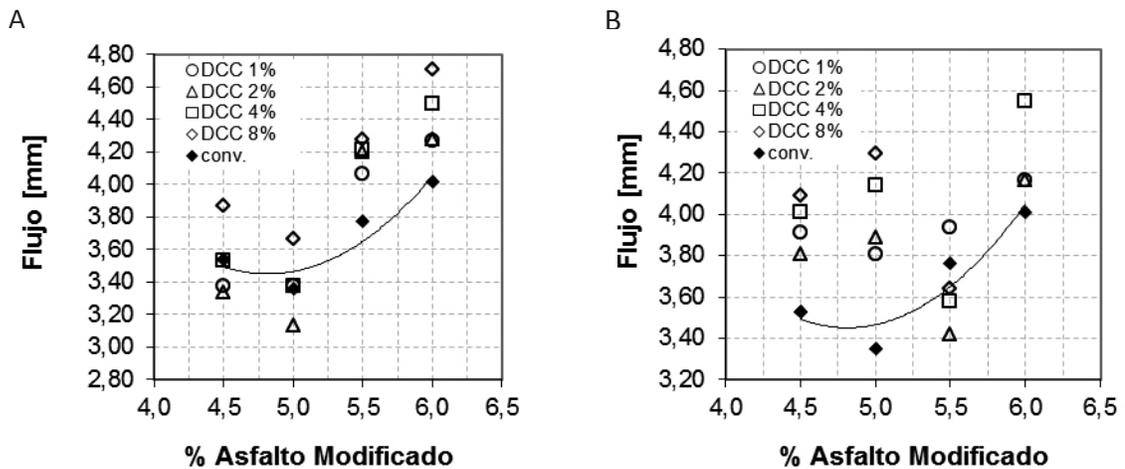
Es importante resaltar que las briquetas con asfalto convencional y modificado fueron elaboradas con el mismo agregado pétreo y cemento asfáltico. Al evaluar el flujo en la figura 2, se observa que la fluidez de la mezcla aumenta con la adición de DCC que tiene mayor porcentaje de cuero para los porcentajes más bajos del asfalto modificado de 4,5 y 5%. Para el porcentaje de 5,5%, el flujo disminuye en la adición de DCC de 75% cuero + 25% caucho, con respecto a las mezclas anteriores (porcentajes de adición de 8, 4 y 2%, que son menores que la mezcla convencional). Ocurre de modo diferente para la adición de DCC de 100% caucho vulcanizado, en la cual los porcentajes siguientes aumentan la fluidez de la mezcla con respecto a la convencional. Para el porcentaje de adición de asfalto modificado de 6%, en B el flujo vuelve a aumentar y ser superior que la mezcla convencional.



Fuente: autores.

El mejor comportamiento lo presenta el 8% de aditivo DCC para el 100% de caucho vulcanizado, en el 6% de asfalto modificado. Este comportamiento superior se mantiene durante todos los porcentajes de asfalto modificado que se manejaron; su punto más alto tiene una

diferencia de aproximadamente 0,8 mm que la mezcla convencional. El porcentaje de adición que presentó peor comportamiento fue el de 2% de DCC para el 100% de caucho vulcanizado, que tuvo un flujo inferior que la mezcla convencional a 4,5 y 5% de asfalto modificado.



Fuente: autores.

**Tabla 1: Resultados obtenidos con el test Marshall modificado con DCC (100% caucho – 0% cuero)**

Porcentaje de asfalto (%)	Peso Unitario (g/cm³)			Estabilidad Marshall (kg)			Fluencia (mm)			Vacíos totales de la Mezcla (%)			Vacíos en los agregados (%)			Vacíos Llenos de Asfalto (%)			Rigidez Marshall (kg/mm)					
	Porcentaje de modificación			Porcentaje de modificación			Porcentaje de modificación			Porcentaje de modificación			Porcentaje de modificación			Porcentaje de modificación			Porcentaje de modificación					
	1%	2%	4%	1%	2%	4%	1%	2%	4%	1%	2%	4%	1%	2%	4%	1%	2%	4%	1%	2%	4%			
4,5	2,2	2,2	2,2	586	599	632	3,3	3,3	3,5	7,8	7,8	7,4	17,8	17,3	16,7	36	35	37	41	41	41	173	180	172
5,0	2,2	2,2	2,3	680	704	745	3,3	3,1	3,3	6,9	6,8	6,5	18,0	17,8	17,3	40	41	41	41	41	41	201	225	218
5,5	2,3	2,3	2,3	635	649	676	4,0	4,2	4,2	5,4	5,8	5,8	17,7	17,9	17,7	54	49	47	46	46	46	156	155	160
6,0	2,3	2,3	2,3	566	583	601	4,2	4,3	4,5	3,0	2,8	2,7	16,8	16,4	16,0	65	64	67	67	67	67	132	137	134

Fuente: autores

**Tabla 2: Resultados obtenidos con el test Marshall modificado con DCC (75% caucho – 25% cuero)**

Porcentaje de asfalto (%)	Peso Unitario (g/cm³)			Estabilidad Marshall (kg)			Fluencia (mm)			Vacíos Totales de la Mezcla (%)			Vacíos en los agregados (%)			Vacíos Llenos de Asfalto (%)			Rigidez Marshall (kg/mm)					
	Porcentaje de modificación			Porcentaje de modificación			Porcentaje de modificación			Porcentaje de modificación			Porcentaje de modificación			Porcentaje de modificación			Porcentaje de modificación					
	1%	2%	4%	1%	2%	4%	1%	2%	4%	1%	2%	4%	1%	2%	4%	1%	2%	4%	1%	2%	4%			
4,5	2,27	2,25	2,26	497	493	484	3,91	3,8	4,01	7,82	8,70	8,43	17,85	18,58	18,23	36,1	33,6	34,0	33,7	34,0	33,7	127,13	129	111
5,0	2,28	2,27	2,32	533	564	521	3,81	3,9	4,14	6,79	7,19	5,29	17,98	18,28	16,48	42,0	40,4	47,6	36,4	36,4	36,4	139,85	145	116
5,5	2,31	2,28	2,31	457	501	598	3,94	3,4	3,58	4,84	6,18	5,21	17,32	18,41	17,43	52,7	46,5	50,4	55,5	55,5	55,5	115,96	147	147
6,0	2,32	2,28	2,31	561	443	477	4,17	4,2	4,55	3,75	5,45	4,34	17,42	18,80	17,70	61,1	51,8	57,1	21,1	21,1	21,1	134,59	106	87

Fuente: autores

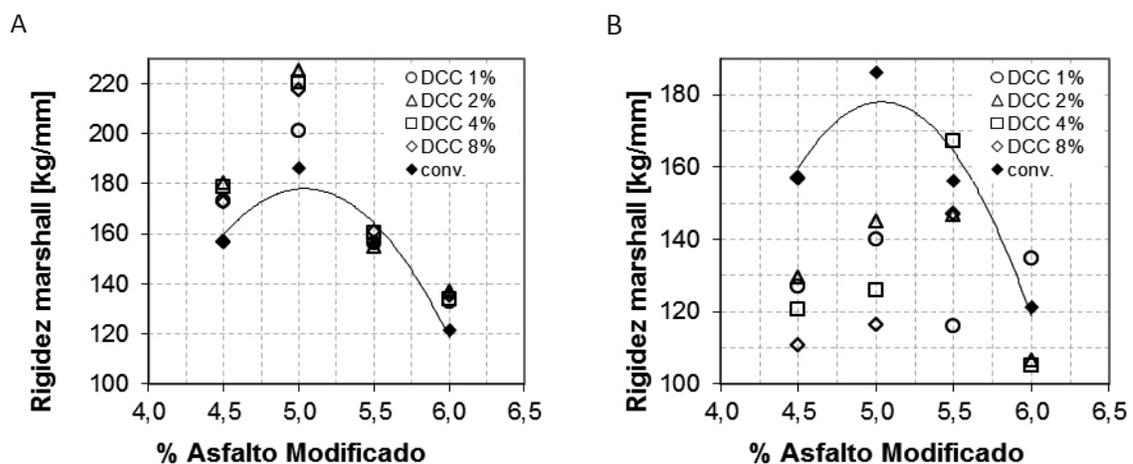
La rigidez Marshall modificada con la adición de DCC de 100% de caucho vulcanizado aumenta en comparación con la mezcla convencional, en todos los porcentajes de asfalto modificado, excepto en el porcentaje de 5,5%, en el cual las cuatro modificaciones de DCC están por debajo de la mezcla convencional. Caso distinto es para la modificación de DCC de 75% cuero + 25% caucho, en la que la rigidez disminuye con respecto a la mezcla convencional en la gran mayoría de sus modificaciones.

En el figura 3, el mejor comportamiento se da en A para el porcentaje de 5% de asfalto modificado, que da una rigidez cercana a 220 kg/mm para las adiciones de 2, 4 y 8%. Es mayor la de 2% (aproximadamente 40 kg/mm) respecto a la mezcla convencional. Y el peor comportamiento se presentó en B, en el porcentaje de asfalto modificado de 4,5% y en el porcentaje de 8% de DCC en 48 kg/mm, aproximadamente.

## 6. Conclusiones

Al agregar caucho vulcanizado extraído de las suelas de botas militares, se evidencia un aumento en la rigidez, lo que hace que también aumente el esfuerzo que soporta la mezcla MDC-2 evaluada. Al incrementar el porcentaje de caucho vulcanizado, se obtuvieron mayores deformaciones, lo cual evidencia que este agente modificador proporciona más elasticidad a la mezcla.

En las figuras sobre las adiciones de DCC de 100% caucho se puede evidenciar que la mayoría de las pendientes de las curvas son más pronunciadas, lo que quiere decir que las deformaciones son más críticas; sin embargo, es importante considerar que si relacionamos esto con respecto a la estabilidad, no se requiere tanto asfalto y, por ende, se disminuyen los costos en las mezclas.



**Figura 3. Rigidez Marshall vs. asfalto modificado**  
Nota: para A, 100% caucho + 0% cuero; para B, 75% cuero + 25% caucho.

Fuente: autores.

Los resultados arrojan que el mejor rendimiento se presenta cuando se realiza la adición de DCC compuesto por 100% de caucho vulcanizado con un porcentaje entre 5,5 y 6% de asfalto modificado para un porcentaje de DCC de 8%, pues este reflejan las mejores propiedades físicas de la muestra. La rigidez, la estabilidad y el flujo tienen valores de 156 kg/mm, 796 kg y 4,7 mm, respectivamente. Estos valores son superiores en las características mecánicas que en la

mezcla convencional y en las demás muestras modificadas y evaluadas. El comportamiento de los vacíos fue un poco irregular, con tendencia a disminuir con respecto a los valores encontrados en la mezcla convencional. Se puede asumir que el caucho ocupa más vacíos, lo que genera mezclas un poco más cerradas.

En resumen, se puede concluir que se logró evidenciar mejoras en la rigidez Marshall y en

la estabilidad. Además, se logra aprovechar un producto de desecho que el Ejército y, en general, los organismos de control ambiental no han logrado regular, por no contar aún con políticas o procedimientos que permitan reducir el impacto negativo en el medioambiente.

## 7. Referencias

---

Ander, Q. (2014). *Especialidades químicas. Tipos de cuero*. S. d.

Asociación de Productores y Pavimentadores Asfálticos de Colombia (Asopac) (2004). *Cartilla del pavimento asfáltico*. Bogotá: Autor.

Barinas, B. y Magaldi, P. (2012). *Caracterización de mezclas asfálticas tipo 2 (MDC-2) en caliente, modificadas con desechos de caucho-cuero y caucho molido de llanta* (tesis de grado) Bogotá: Universidad Católica de Colombia.

Clavijo, R. y Aranda, C. (2014). *Análisis del comportamiento físico-mecánico de una mezcla densa en caliente tipo mdc-2 modificada con caucho y cuero en porcentajes 25%, 75%, respectivamente*. (tesis de grado). Bogotá: Universidad Católica de Colombia.

Contreras Aguilar, A. (2013). *Mejoramiento de mezclas asfálticas con grano de caucho reciclado* (tesis de grado). Veracruz: Universidad Veracruzana.

Gutiérrez, D. y Vivas, S. (2014). *Evaluación de las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica densa en caliente tipo 2 MDC-2 elaborada con asfalto modificado con caucho vulcanizado de suela de bota militar* (tesis de grado). Bogotá: Universidad Católica de Colombia.

Fuerzas Militares de Colombia, Ejército Nacional (2012). *Especificación técnica corte de cuero A-tanino. Proceso: diseño, investigación y desarrollo de material de intendencia*. Bogotá: Autor.

Maila Paucar, M. E. (2013). *Comportamiento de una mezcla asfáltica modificada con polímero etileno vinil acetato (EVA)* (tesis de grado). Quito: Universidad Central del Ecuador.

Rondón, H. A. *et al.* (2008). Mezclas asfálticas modificadas en Colombia. *Revista Infraestructura Vial*, 19, 12-21

Viveros, H. y González, J. (2012). *Estudio del comportamiento de mezclas densas en caliente tipo 2 (MDC-2) empleando asfaltos modificados con caucho* (tesis de grado). Bogotá: Universidad Católica de Colombia.