

**Análisis del  
comportamiento  
físico-mecánico  
de una mezcla  
densa en  
caliente  
tipo MDC-2  
modificada con  
caucho y cuero  
en porcentajes  
de 25% y 75%,  
respectivamente**

Artículo resultado de investigación científica y tecnológica

---

**Camilo Andrés Aranda-Rojas**

Universidad Católica de Colombia  
kmllocivil@gmail.com

---

**César Mauricio Clavijo-Rey**

Universidad Católica de Colombia  
clavocivil@gmail.com

---

**Luis Ángel Moreno-Anselmi**

Universidad Católica de Colombia  
Director del Semillero SEMPAV  
lamoreno@ucatolica.edu.co

**Recibido: junio del 2014  
Aprobado: agosto del 2014**

## Resumen

En el presente trabajo de investigación se busca determinar y analizar el comportamiento físico-mecánico de una de las mezclas asfálticas más utilizadas en Colombia: la mezcla densa en caliente tipo MDC-2. Se busca que se pueda comparar una mezcla asfáltica tipo convencional con diversas mezclas asfálticas modificadas por vía húmeda, en diferentes porcentajes, con caucho y cuero (25% y 75%, respectivamente). Estos materiales modificantes son obtenidos del material desechado por las Fuerzas Armadas de Colombia, del cual se conforman las botas militares. Por otra parte, se busca determinar el contenido óptimo de asfalto y el contenido óptimo de materiales modificantes que permitan el mejor desempeño de la mezcla asfáltica densa en caliente, en cuanto a sus propiedades de resistencia, deformación y durabilidad. Para ello se utilizará el método Marshall, ya que nos permite medir algunas de las propiedades más importantes, como la estabilidad, el flujo y la rigidez Marshall.

**Palabras clave:** mezcla densa en caliente, asfalto modificado, cuero, caucho, estabilidad Marshall, deformación, rigidez Marshall.

## Abstract

The goal of this research is to determinate and to analyze the physical and mechanical behavior of one of the most used asphalt mixtures in Colombia, the dense hot mix type MDC-2. A comparison is made of one conventional asphalt mixture with different modified ones via the “wet technique” in different percentages (25% of rubber and 75% of leather). These modifying materials are obtained from wasted materials of the Colombian Military Forces. In addition, the goal is to find out the optimum content of asphalt and modifying materials in order to achieve the best performance and behavior of the mixture when it reaches a dense/hot temperature measuring properties such as strength, deformation and durability. This measurement was done using the Marshall Method which allows the quantification of the most important properties such as the stability, the flow and the Marshall Stiffness.

**Keywords:** hot dense mix, modified asphalt, leather material, rubber material, Marshall stability, deformation, Marshall stiffness.

## 1. Introducción

Las estructuras viales son prioridad fundamental de la sociedad y la economía en un territorio. Ellas son el medio principal de comunicación y transacción de bienes y servicios. Un mal estado de estas configura una fuerte problemática para la comunidad y su desarrollo. En Colombia, la mayor parte de la red vial está constituida por pavimentos flexibles, debido a que estos permiten mayores deformaciones sin rotura y son más económicos que otros tipos de pavimentos. No obstante, estos pavimentos presentan otros inconvenientes principalmente generados por las fuertes variaciones de temperatura, las precipitaciones, la erosión, las corrientes de agua, la creciente demanda del tráfico en las vías y la capacidad portante del suelo que soporta la infraestructura vial, entre otros aspectos.

Los pavimentos flexibles están conformados por una capa asfáltica, que es el producto obtenido de la adición y el mezclado uniforme de un cemento asfáltico en un agregado granular. Estas mezclas son conocidas como *mezclas asfálticas*, y según el procedimiento de mezclado, se pueden clasificar en *mezclas densas en caliente* y *mezclas densas en frío*. En nuestro caso se decidió analizar una mezcla densa en caliente tipo MDC-2, debido a que son las más utilizadas en Colombia para conformar carpetas de rodadura y, por consiguiente, son las que se encuentran sometidas de manera directa a las condiciones reales de carga, ambientales y demás solicitaciones.

Por esta y otras causas, la cantidad de vías en excelente estado del territorio Colombiano son muy pocas, pues los pavimentos muchas veces trabajan en condiciones extremas de diseño y terminan por hacer fallar el pavimento antes de su periodo de duración. Por consiguiente, para solucionar estos problemas se han realizado diversas investigaciones que buscan mejorar las capacidades físico-mecánicas de las mezclas asfálticas, adicionando a su composición polímeros o materiales de reciclaje que aumenten sus capacidades de resistencia y durabilidad y sean amigables con el medioambiente.

A lo largo de dichas investigaciones se han planteado soluciones para que el comportamiento del asfalto mejore. Se busca que además de

cumplir con sus funciones básicas de diseño, también aporte a mitigar los impactos y sea amigable con el medioambiente, y para ello se incorpora a su composición materiales reciclados, como cauchos, cueros, plásticos, escoria o PVC. Señalan en este sentido Rondón *et al.* (2008):

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.

Algunos de los resultados obtenidos mediante estudios previos en Colombia sobre asfaltos modificados con diferentes tipos de aditivos lo resumen Rondón *et al.* (2008) brevemente a continuación:

Adiciones de asfalto *caucho* en mezclas drenantes que producen una disminución del porcentaje óptimo de asfalto de 5.1% (asfalto convencional) a un 4.6% (asfalto modificado). Además eleva la estabilidad en un 25%, sin presentar diferencias considerables en las otras propiedades. Se puede afirmar que la adición de caucho mediante el proceso por vía húmeda permite mejorar la resistencia a las cargas producidas por el tráfico, utilizando una menor proporción de ligante. [...]

Las mezclas asfálticas modificadas con *caucho reciclado* presentan un aumento de estabilidad (entre 14 y 17% cuando se compacta a 75 golpes y 50 golpes, respectivamente) y densidad independientemente de la forma del aditivo (grano, fibra y polvo). Cuando la adición del caucho se realiza por vía seca a la mezcla, el contenido de vacíos y el flujo aumentan y la estabilidad y el peso unitario disminuyen. Rondón *et al.* (2008) Modifico asfaltos con PVC reciclado demostrando que un mejor desempeño con respecto a esta propiedad se logra cuando se emplean altos porcentajes de aditivo (5-7% del peso de la muestra). [...]

Cuando se adiciona por vía seca al agregado pétreo, *tiras de bolsas plásticas, caucho molido y trozos de diskette*, la estabilidad de las mezclas modificadas disminuye con respecto a la convencional. Se observó además que el porcentaje de vacíos y el flujo

de las mezclas modificadas incrementan. Los autores recomiendan en fases posteriores de la investigación, agregar los aditivos al asfalto (vía húmeda) (Rondón *et al.*, 2008).

Una de las investigaciones más particulares que se han realizado en Colombia acerca de la modificación de mezclas asfálticas en caliente es la desarrollada con la reutilización de llantas desechadas por el parque automotor del país:

Cada año, solo la capital colombiana produce alrededor de dos millones de llantas. Gran parte son almacenadas en lugares no aptos generando daños ambientales y para las personas, ya que se convierten en el hábitat de ratas y mosquitos culpables de la transmisión de males como el dengue o la fiebre amarilla. Otras son quemadas de forma ilegal, a cielo abierto, para extraer el acero, causando más contaminación (Sheroj, 2012).

En este contexto, Rondón *et al.* (2008) agregan:

En una prueba realizada en el “Carrusel de Fatiga” de la Universidad de Los Andes, donde se comparó el comportamiento de una mezcla asfáltica con y sin caucho molido, se pudo observar que la estructura de pavimento que más se deformó fue aquella que no empleó caucho como aditivo (es decir, la mezcla convencional).

La Universidad Católica de Colombia también ha realizado diversas investigaciones sobre el comportamiento de los asfaltos luego de modificarlos con diferentes materiales, como es el caso de los estudios de Aranda y Clavijo (2014), Bello (2014), Viveros (2012), Morales (2011), Ojeda (2008), Ayala (2006) y Mojica (2005).

Por todo lo anterior, a los fines de esta investigación, se tiene en cuenta que las Fuerzas Armadas de Colombia están compuestas por más de 750.000 hombres a los cuales se les da una dotación anual de dos pares de botas; y sin importar el estado en que se encuentren, estas deben ser entregadas cada doce meses al Distrito Militar, con el fin de sepultarlas en fosas destinadas para esto, ya que estas son de uso privativo de la Fuerza Pública. Por ello, la finalidad de la presente investigación es aprovechar el caucho y el cuero del cual están conformadas

las botas usadas por esta institución, en función de disminuir de esta forma el impacto ambiental generado por su sepultamiento.

En el desarrollo de la investigación que se encuentra en marco al proyecto “Comportamiento del asfalto y análisis dinámico de mezclas asfálticas MDC-2 elaboradas con materiales producto de botas de uso privativo de las fuerzas militares”, financiado por la Universidad Católica de Colombia, se busca determinar y analizar el comportamiento de las propiedades físico-mecánicas de las mezclas densas en caliente tipo 2 (MDC-2), modificadas por vía húmeda con porcentajes de cuero y caucho industrial de 75% y 25%, respectivamente. Esto se realizará mediante el método Marshall y según las especificaciones dadas por el Instituto Nacional de Vías (Invías) para las características y los procedimientos que se deben seguir.

## 2. Metodología

La investigación básicamente consta de dos etapas: una teórica y una experimental. En la primera se realizó una revisión de conceptos sobre temas relacionados con asfaltos convencionales, asfaltos modificados, polímeros, métodos de diseño de mezclas asfálticas, normas Invías para los diferentes ensayos aplicados a las muestras, etc. Luego, en la fase experimental se realizaron varios diseños de mezclas densas en caliente tipo 2 (MDC-2) convencional y modificadas, en las cuales se realizaron diferentes pruebas de laboratorio para determinar su estabilidad, flujo y rigidez por medio del método Marshall.

En la presente investigación se busca determinar el comportamiento de las mezclas densas en caliente tipo MDC-2; modificadas por vía húmeda con cuero (75%) y caucho (25%) en diferentes proporciones, como lo son el 1, 2, 4 y 8. Con ello se pretende determinar la condición más favorable en cuanto a contenidos óptimos de asfalto y cantidad óptima de agentes modificadores para un buen desempeño del asfalto.

Puntualmente, el proceso consistió en la elaboración de 100 briquetas con un valor aproximado de 1200 gr de materiales, las cuales se realizaron con agregados pétreos de orígenes aluviales extraídos del río Coello y con cemento asfáltico producido por Ecopetrol en la planta

de Barrancabermeja, de penetración 60-70. A estos materiales se les realizó un proceso de caracterización y verificación de sus propiedades, para así determinar la calidad y las condiciones en las que se encuentran y además corroborar que cumplan con los rangos establecidos en la

normativa del Invías. A continuación en las tablas 1 y 2 se pueden ver los valores obtenidos a partir de los ensayos respectivos y determinando de esta manera que estos valores cumplen con lo exigido.

*Tabla 1. Resumen de los valores y ensayos realizados al cemento asfáltico*

Ensayo	Unidad	Valor obtenido	Especificación
Penetración	mm	6	INV E 706-07
Densidad y gravedad específica	g/cm <sup>3</sup>	1,01	INV E 707-07
Ductilidad de materiales asfálticos	cm	142,	INV E 702-07
Punto de ignición	°	315,5	INV E 709-07
Punto de llama	°	337,7	INV E 709-07
Punto de ablandamiento de anillo y bola	°	45,7	INV E 712-07

*Fuente: Aranda y Clavijo (2014).*

*Tabla 2. Resumen de los valores y ensayos realizados a los agregados pétreos*

Ensayo	Unidad	Valor obtenido	Especificación
Índice de aplanamiento	%	6	INV E 230-07
Índice de alargamiento	%	9	INV E 230-07
Equivalente de arena (arena natural)	%	9	INV E 133-07
Equivalente de arena (arena de trituración)	%	8	INV E 133-07
Equivalente de arena (combinación de agregados finos)	%	8	INV E 133-07
Porcentaje de caras fracturadas 3/4"	%	9	INV E 227-07
Porcentaje de caras fracturadas 1/2"	%	8	INV E 227-07
Peso específico	g/cm <sup>3</sup>	1,47	INV E 217-07
Peso específico (apisonado)	g/cm	1,54	INV E 217-07
Densidad y absorción de agregado fino	%	2,0	INV E 222-07
Densidad y abosorción de agregado grueso	%	1,0	INV E 222-07
Abrasión en la máquina microdeval (TM 1/2)	%	3	INV E 238-07
Abrasión en la máquina microdeval (TM 3/4)	%	3	INV E 238-07
Abrasión en la máquina de los ángeles (TM 1/2)	%	23,	INV E 218-07
Abrasión en la máquina de los ángeles (TM 3/4)	%	22,	INV E 219-07
Azul de metileno	%	3,	INV E 235-07

*Fuente: Aranda y Clavijo (2014).*

Luego, las primeras veinte briquetas corresponden a la elaboración de un mezcla asfáltica densa en caliente tipo (MDC-2) convencional, como se describe en el artículo 450-07 del Invías. Con el fin de determinar la condición más óptima de trabajo para la mezcla, se realizaron cinco briquetas por cada porcentaje de asfalto, iniciando en 4,5% y aumentándolo gradualmente cada 0,5% hasta llegar al 6% de

contenido de asfalto. A continuación se realizó el mismo procedimiento mencionado para la fabricación de la mezcla asfáltica, pero ahora se adicionó al cemento asfáltico por vía húmeda diferentes porcentajes de modificación: 1, 2, 4 y 8%; es decir; que por cada porcentaje de modificación se realizaron también 20 briquetas con las cuales determinar sus propiedades de manera más aproximada.

### 3. Resultados

A continuación, en las figuras 1, 2 y 3 se puede observar un breve resumen de los valores obtenidos de algunas de propiedades más importantes a la hora de realizar el diseño. La estabilidad Marshall se entiende como una medida de carga bajo la cual una briqueta falla. En nuestra investigación se puede observar que esta propiedad no se ve mejorada con la adición de los materiales modificantes; sin embargo, la normativa de Invías especifica que para un buen desempeño de la mezcla asfáltica, deberá tener una estabilidad mayor o igual a los 900 kg como mínimo. Por consiguiente, a pesar de que la estabilidad no se ve mejorada con la adición del cuero y caucho, esta propiedad cumple con los rangos establecidos.

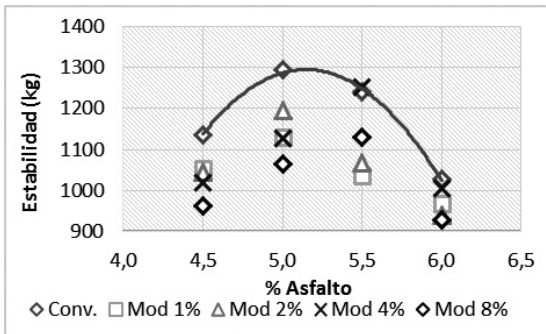


Figura 1. Comparación entre valores de estabilidad para asfalto convencional y modificado con el 1, 2, 4 y 8%

Fuente: Aranda y Clavijo (2014).

Por otra parte, el flujo es la deformación que sufre la briqueta cuando es sometida a una carga es representada como la disminución en el diámetro de esta. En nuestro caso, podemos notar que debido a la composición de los materiales modificantes y la composición del asfalto, a mayor contenido de estos, mayor será la deformación o el flujo que sufrirá la briqueta. En las especificaciones del Invías se recomienda que este valor se encuentre entre 2 y 4 mm; por consiguiente, como se observa en la figura 2, los porcentajes de modificación al asfalto que mejor se ajustan a los requerimientos dados por el Invías son el 1% y 2% de modificación, ya que presentan un comportamiento similar al asfalto convencional.

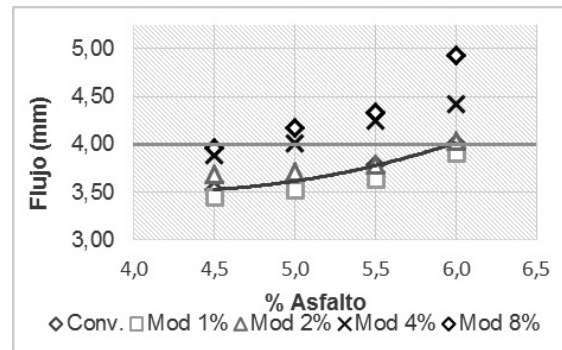


Figura 2. Comparación entre valores de flujo para asfalto convencional y modificado con el 1, 2, 4 y 8%

Fuente: Aranda y Clavijo (2014).

La rigidez Marshall no es más que la relación entre la estabilidad y el flujo de la muestra. Se considera que las mezclas con valores muy altos de rigidez son demasiado frágiles y muy rígidas para un pavimento. Por otra parte, las mezclas que tienen valores muy bajos de rigidez Marshall son consideradas plásticas y fácilmente deformables. En las especificaciones del Invías se recomienda que este valor se encuentre entre 300 y 600 kg/mm para el buen desempeño de la mezcla asfáltica. En la figura 3 se observa que este valor cumple lo requerido para el contenido óptimo de asfalto que oscila entre 5,1% y 5,3% para las mezclas modificadas en menor proporción como lo son el 1% y el 2%.

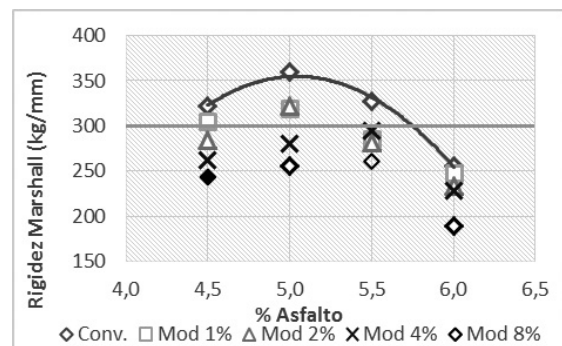


Figura 3. Comparación entre valores de rigidez Marshall para asfalto convencional y modificado con el 1, 2, 4 y 8%.

Fuente: Aranda y Clavijo (2014).

## 4. Conclusiones

En general, podemos observar que las propiedades físico-mecánicas de la mezcla densa en caliente tipo MDC-2 modificada con cuero y caucho en porcentajes 75% y 25%, respectivamente, no se ven mejoradas en comparación con la mezcla asfáltica convencional. Podemos analizar así algunas de las propiedades más importantes de la mezcla asfáltica, con los resultados obtenidos en laboratorio de estabilidad y rigidez Marshall, en los que podemos ver que la primera propiedad disminuye entre un 5% y un 20% con respecto a las propiedades dadas por la mezcla asfáltica convencional. Por otra parte, la rigidez Marshall se ve disminuida entre un 10% y un 30% con respecto a la mezcla convencional.

Con base en los datos obtenidos a partir de los ensayos de laboratorio, se puede notar que el flujo o deformación de la mezcla va aumentando su valor entre un 2% y un 15% con respecto al valor obtenido en la mezcla convencional, debido a la composición físico-química que presentan los materiales como el asfalto, el cuero y el caucho.

Dado que solo algunos de los valores del asfalto modificado cumplen con la normativa del Invías, para verificar dichos valores y constatar los resultados de la investigación, se requiere realizar un análisis dinámico la deformación que presenta la briqueta con respecto al sometimiento de la está a una carga dinámica repetitiva, simulando una constante de tráfico, y con esto poder observar el comportamiento físico-mecánico de la mezcla más detalladamente

Por otra parte, en este trabajo de investigación se realizó la modificación de la mezcla asfáltica por vía húmeda, es decir, se modificó el cemento asfáltico antes de iniciar la mezcla con los agregados minerales. Con ello se busca de analizar su comportamiento más detalladamente y observar de qué forma es mejor realizar la modificación de la mezcla, se recomienda analizar el comportamiento de está modificándola por vía seca, es decir, modificando los agregados minerales antes de realizar la mezcla con el cemento asfáltico, para luego comparar los resultados obtenidos

y determinar porque método se comporta de mejor manera la mezcla.

## 5. Referencias

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

Ayala Perdomo, A. (2006). *Estudio del comportamiento de mezclas densas en caliente tipo 1 (MDC-1) empleando asfaltos modificados con poliestireno de desecho*. Bogota: Universidad Católica de Colombia.

Bello, C. (2014). *Características mecánicas de una mezcla MDC-2 con adición de caucho y cuero de bota militar*. Bogotá: Universidad Católica de Colombia.

Mojica Pineda, A. A. (2005). *Estudio del comportamiento de mezclas densas en caliente tipo 1 (MDC-1) empleando asfaltos modificados con polietileno de desecho*. Bogota: Universidad Católica de Colombia.

Morales Bolaños, J. L. (2011). *Modificación de mezclas densas en caliente tipo 2 (MDC-2) con residuos de caucho de llanta, caucho industrial de calzado y desechos de caucho-cuero provenientes de una remontadora de calzado cemento asfáltico 80-100 y agregado de peña*. Bogotá: Universidad Católica de Colombia.

Ojeda Martínez, B. E. (2008). *Caracterización dinámica de mezclas asfálticas empleado asfalto modificado con desecho de PVC (Policloruro de Vinilo)*. Bogotá: Universidad Católica de Colombia.

Quintana, R. et al. (2008). *Infraestructura vial digital*. Recuperado de [http://www.lanamme.ucr.ac.cr/riv/index.php?option=com\\_content&view=article&id=256&Itemid=202](http://www.lanamme.ucr.ac.cr/riv/index.php?option=com_content&view=article&id=256&Itemid=202)

Rondón Quintana, H. A. et al. (2008). Estado del conocimiento del estudio sobre las mezclas asfálticas en Colombia. *Infraestructura Vial*, 10-19.

Sheroj (2012). Llantas que aportan a la sostenibilidad. Recuperado de <http://www.incoasfaltos.com/llantas.php>

Viveros Briceño, C. A. (2012). *Estudio del comportamiento de mezclas densas en caliente tipo 2 (MDC-2) empleando asfaltos modificados con caucho*. Bogotá: Universidad Católica de Colombia.