

Evaluación de las propiedades mecánicas de una mezcla densa en caliente modificada con un desecho de polietileno de baja densidad (PEBD)

Mechanical properties evaluation of a dense hot asphalt mixture modified with a residue of low density polyethylene (LDPE)

Hugo Rondón Quintana¹, Wilmar Fernández Gómez*, William Castro López*

* Universidad Distrital Francisco José de Caldas, D.C. COLOMBIA

Fecha de recepción: 01/ 03/ 2010
Fecha de aceptación: 25/ 03/ 2010
PAG. 83 - 94

Resumen

El artículo presenta los resultados experimentales de ensayar una mezcla asfáltica densa en caliente tipo MDC-2 (acorde con las especificaciones del Instituto Nacional de Vías - INVIAS, 2007) modificada con un desecho de polietileno de baja densidad (PEBD). Para la evaluación del comportamiento de las mezclas asfálticas convencionales (sin aditivo) y modificadas se realizaron ensayos Marshall, módulo dinámico, deformación permanente y resistencia a fatiga. Las mezclas fueron elaboradas con un cemento asfáltico (CA) producido en Colombia tipo CA 80-100. Al CA con y sin aditivo se realizaron ensayos de caracterización de asfaltos como penetración y punto de ablandamiento. La modificación de las mezclas se realizó por vía húmeda. Las mezclas modificadas con desecho de PEBD experimentan mayor rigidez (bajo carga monotónica y cíclica) y resistencia a la deformación permanente en comparación con las convencionales. Sin embargo la resistencia a fatiga de las mezclas convencionales disminuye cuando se adiciona PEBD al CA. Adicionalmente el CA modificado presenta mayor resistencia a la penetración, mayor punto de ablandamiento y menor susceptibilidad térmica a fluir que el convencional.

Palabras Clave: Polietileno de baja densidad, PEBD, asfalto modificado, mezcla densa en caliente, resistencia mecánica

Abstract

Laboratory tests were used to evaluate the effect on the mechanical properties of a hot asphalt mix (MDC-2 as per INVIAS, 2007 specifications) due to the addition by wet way of a residue of low density polyethylene (LDPE). The strength under monotonic load, resilient modulus, rutting and fatigue strength were evaluated. Asphalt cement (AC) AC 80-100 was used from Colombia. The results show that the monotonic and cyclic mechanical strength evaluated were higher for the mixes modified with LDPE compared with mixtures with asphalts without additives. However, the mixes modified with LDPE undergo less fatigue strength. Additionally, characterization tests were conducted on asphalt cement with and without additive. The LDPE produces higher penetration resistance and viscosity, and lower thermal flow susceptibility.

Keywords: Low density polyethylene, LDPE, modified Asphalt, hot asphalt dense mix, mechanical strength

1. Introducción

La tecnología de los asfaltos y las mezclas asfálticas modificadas ha sido una técnica ampliamente estudiada y utilizada en el mundo. Con la adición de polímeros al asfalto se modifican las propiedades mecánicas, químicas y reológicas de las mezclas asfálticas. Cuando se utiliza esta tecnología se pretende mejorar el comportamiento que experimentan las mezclas tradicionales cuando son sometidas a diferentes condiciones de carga y del medio ambiente. Por lo general las propiedades que se intentan mejorar son la rigidez,

1. Introduction

The asphalt technology and modified asphalt mixtures has been widely used and studied, worldwide. Adding polymers to asphalt modifies mechanical, chemical and rheological properties of the asphalt mixtures. The use of this technology tries to improve behavior in traditional mixtures subjected to different environmental and load conditions. The properties to improve usually are rigidity,

¹ Autor de correspondencia / Corresponding author:
E-mail: harondonq@udistrital.edu.co

la resistencia bajo carga monotónica, al ahuellamiento, a fatiga, al envejecimiento, y disminuir la susceptibilidad térmica.

La mayor parte de las investigaciones realizadas en el área de los asfaltos modificados utilizan como agentes modificadores polímeros del tipo elastómero (McQuillen et al., 1988; Stastna et al., 2000; Chen et al., 2002; Lee et al., 2008; Olivares et al., 2009; estados del conocimiento sobre el tema pueden ser consultados en Papagiannakis & Loughheed, 1995; Copeland, 2007; Yildirim, 2007 y para el caso colombiano en Rondón et al., 2008). Este tipo de aditivos al ser agregados al asfalto mejoran principalmente el comportamiento resiliente (recuperación elástica) de las mezclas cuando son solicitadas a ciclos de carga y descarga especialmente a altas temperaturas de servicio. En este estudio se propone modificar el cemento asfáltico con un polímero del tipo plastomérico, utilizando un desecho de polietileno de baja densidad (PEBD) obtenido del reciclaje de palillos utilizados para mezclar bebidas calientes. Este aditivo se escogió debido principalmente a:

- Este tipo de polímero (plastómero) generalmente produce un incremento en la resistencia mecánica de las mezclas a altas temperaturas debido a que el asfalto se rigidiza.
- Es un material de alta resistencia térmica y química.
- De acuerdo con Reyes y Figueroa (2008), en Bogotá D.C. diariamente se producen alrededor de 600 toneladas de basuras de las cuales el 10% aproximadamente son plásticos y el consumo per capita de estos materiales en Colombia es de 11.3 kg anuales. De este 10% gran parte proviene de desechos de PEBD el cual puede ser utilizado para modificar las propiedades de mezclas asfálticas y así disminuir el impacto ambiental negativo que generan.

El artículo presenta los resultados experimentales de ejecutar ensayos sobre una mezcla asfáltica densa en caliente tipo MDC-2 (utilizada como capa de rodadura asfáltica de acuerdo al Instituto Nacional de Vías – INVIAS, 2007) modificada con un desecho de PEBD. Para la elaboración de las mezclas y la evaluación de las mismas fue modificado un cemento asfáltico (CA) tipo CA 80-100 proveniente de la Refinería de la Empresa Colombiana de Petróleos – ECOPETROL ubicada en la ciudad de Barrancabermeja (Colombia). El desecho de PEBD se adicionó al CA por vía húmeda a una temperatura adecuada y controlando el tiempo de mezcla para garantizar su homogeneidad.

strength under monotonic load, rutting, fatigue, aging and reduction of thermal susceptibility.

Most of the researches about modified asphalt used elastomer polymers as modifier agents (McQuillen et al., 1988; Stastna et al., 2000; Chen et al., 2002; Lee et al., 2008; Olivares et al., 2009; more about this subject at Papagiannakis & Loughheed, 1995; Copeland, 2007; Yildirim, 2007 and for the Colombian case at en Rondón et al., 2008). Adding this kind of admixtures in asphalt, mainly improves the mix resilient behavior (elastic recovering) in cycles of load and unload at high temperatures. The aim of this research is to modify the asphalt cement with plastomeric polymers, using a residual of a low density polyethylene (PEBD) obtained recycling the sticks used for hot drinks. This admixture was mainly chosen because:

- This polymer (plastomeric) usually produces an increase in the mixtures mechanical strength at high temperatures due that asphalt becomes rigid.
- It is a material with high chemical and thermal strength
- According to Reyes and Figueroa (2008) at Bogotá D.C., waste products everyday reach 600 tons, which nearly 10% is plastic, being the per capita Colombian consumption 11.3 kg per year. A significant part of this 10% is PEBD residuals that can be used to modify the properties of asphalt mixes diminishing the negative environmental impact produced by it.

This paper considers the practical results of tests over a MDC-2 hot asphalt mixtures (used as asphalt pavement layers in compliance with the standards of Instituto Nacional de Vías – INVIAS, 2007) modified with a PEBD residue. Asphalt cement, CA 80-100 original from Empresa Colombiana de Petróleos ECOPETROL at Barrancabermeja (Colombia), was modified to elaborate and assessing mixtures. The residual of PEBD was added to CA by a wet method controlling mixing time in order to achieve uniformity.

Para la evaluación de la resistencia mecánica bajo carga monotónica de las mezclas asfálticas convencionales y modificadas se empleó el ensayo Marshall y para el CA con y sin aditivo se realizaron ensayos de penetración y punto de ablandamiento. Con el fin de evaluar el comportamiento de las mezclas bajo carga cíclica se realizaron ensayos de módulo dinámico, deformación permanente medida en la dirección vertical y resistencia a fatiga. Si esta técnica de modificación fuera implementada a nivel industrial, para producir el CA modificado con PEBD es necesario contar con los mismos equipos que se utilizan para producir asfalto-caucho (p.e., IDU, 2009):

- Tolva para almacenamiento del desecho de PEBD que lo conserve libre de humedad y de materiales contaminantes.
- Tanque de reacción capaz de mantener la temperatura de mezcla entre el CA y el PEBD. Adicionalmente debe ser capaz de variar la velocidad de mezcla con el fin de garantizar la homogeneidad del asfalto-PEBD.
- Alimentadores de CA y PEBD calibrados de tal forma que garanticen la proporción de volumen y masa adecuados de CA y PEBD.

2. Metodología

Al agregado pétreo empleado para la elaboración de las mezclas asfálticas se le realizaron los siguientes ensayos, siguiendo las especificaciones del Instituto Nacional de Vías (2007a): Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos (INV. E-213), peso específico y absorción de agregados finos (INV. E-222), peso específico y absorción de agregados gruesos (INV. E-223), resistencia al desgaste de los agregados (tamaños menores de $\frac{3}{4}$ " por medio de la máquina de Los Ángeles (INV. E-218), partículas fracturadas (INV. E-227), ensayo para medir el equivalente de arena (INV. E-133), índice de alargamiento aplanamiento (INV. E-230), Pérdida en ensayo de solidez utilizando sulfato de magnesio (INV. E-220), Micro Deval (INV. E-238) y 10% de finos (INV. E-224). Los resultados de estos ensayos se presentan en la Tabla 1 y se observa que los valores cumplen con los requisitos mínimos de calidad exigidos por las especificaciones INVIAS (2007) para fabricar mezclas tipo MDC-2 para capas de rodadura.

Al cemento asfáltico se le realizaron los ensayos típicos que exige la especificación INVIAS (2007a) para caracterizarlos como son (ver Tabla 2): penetración,

The Marshall test was used to assess the mechanical strength under conventional monotonic loads; and CA, with or without admixture, was tested in penetration and softening point. Dynamical modulus tests were done in order to assess the behavior of cyclic loads, permanent deformation measured in vertical direction and fatigue strength. If this technique was used industrially to produce CA modified with PEBD, it would be required to have the same equipment to produce asphalt rubber (p.e., IDU, 2009):

- Storage for the PEBD waste keeping it free from pollution and wetness.
- A tank to keep the mix temperature between CA and PEBD. Additionally it should be able to change load speed in order to grant uniformity of PEBD-Asphalt.
- CA and PEBD feeder machine calibrated in such a way to grant the suitable CA and PEBD mass and volume proportion

2. Methodology

The aggregate used to elaborate asphalt mixtures meets the standards of the Instituto Nacional de Vías (2007a): sieve analysis of fine and coarse aggregate (INV. E-213), specific weight and absorption of fine aggregate (INV. E-222), relative weight and absorption of coarse aggregate (INV. E-223), impact strength of aggregate (smaller size than $\frac{3}{4}$ " by mean of Los Angeles machine (INV. E-218), crushed particles (INV. E-227), test to measure the equivalent sand content (INV. E-133), enlargement and flatness rate (INV. E-230), loss in soundness using magnesium sulphate (INV. E-220), Micro Deval (INV. E-238) and 10% fines (INV. E-224). The results of these tests are shown in Table 1, in compliance with the minimum quality requirements of INVIAS (2007) for manufacturing MDC-2 loads for pavement layers.

Asphalt cement received the typical test required by INVIAS (2007a) (see Table 2): penetration,

viscosidad absoluta, ductilidad, solubilidad en tricloroetileno, contenido de agua, punto de ablandamiento (anillo y bola) y ensayos al residuo luego del ensayo de película delgada en horno rotatorio (RTFOT por sus siglas en inglés).

absolute viscosity, ductility, solubility in trichloroethylene, water content, softening point (ring and ball) and residual tests after thin layers in rotative ovens (RTFOT by its name in English).

Tabla 1. Caracterización de los agregados

Table 1. Characterization of aggregate

Característica/Characteristics	Valor/Value
Peso específico [-]/Relative weight [-]	2.52
Equivalente de arena [%]/Clay equivalent [%]	58.0
Caras fracturadas [%]/Crushed faces [%]	92
Índice de alargamiento [%]/Enlargement rate [%]	9.1
Índice de aplanamiento [%]/Flatness rate [%]	9.5
Pérdida en ensayo de solidez [%]/Loss in solidity test [%]	13.0
Micro Deval [%]/Micro Deval [%]	24.2
Resistencia al desgaste en la máquina de los Ángeles [%]/Fatigue strength in Los Angeles machine [%]	23.0
10% de finos en seco [kN]/10% dried fines [kN]	140

Tabla 2. Características generales del cemento asfáltico CA 80-100

Table 2. General characteristics in asphalt cement CA 80-100

Ensayo/Test	Método/Method	Unidad/Unit	CA 80-100	Resultado/Result
Ensayos sobre el asfalto original/Tests on the original asphalt				
Penetración/Penetration (25°C, 100 g, 5 s)	ASTM D-5	0.1 mm	80-100	87
Índice de penetración/Penetration rate	INV. E-724	-	-1/+1	-0.2
Punto de ablandamiento/Softening point	INV. E -712	°C	42 - 52	48
Viscosidad absoluta/Relative viscosity (60°C)	ASTM D-4402	Poises	1000 mín.	1400
Ductilidad/Ductibility (25°C, 5cm/min)	ASTM D-113	Cm	100 mín.	>100
Solubilidad en Tricloroetileno/Solubility in trichloroethylene	ASTM D-2042	%	99 mín.	>99
Contenido de agua/Water contain	ASTM D-95	%	0.2 máx.	<0.2
Punto de inflamación COC/Flash point COC	ASTM D-92	°C	232 mín.	295
Ensayos sobre el residuo luego del RTFOT/Results of residual tests after RTFOT				
Pérdida de masa/Mass loss	ASTM D-2872	%	1.0 máx.	0.3
Penetración/Penetration (25°C, 100 g, 5 s)	ASTM D-5	%	48 mín.	65

El desecho de polietileno fue obtenido del reciclaje de palillos de coloración blanca que son utilizados para mezclar bebidas calientes en empresas (ver Figura 1), y presenta una densidad de 0.92 g/cm³. Los palillos fueron cortados de tal forma que sus dimensiones pasaran el tamiz No. 4 y fuera retenido en el No. 10 de un ensayo de granulometría.

Luego de realizar los ensayos al agregado pétreo y al cemento asfáltico (CA), se mezcló por vía húmeda el CA y el desecho de polietileno (PEBD) en relaciones de PEBD/CA=1.0, 3.0, 5.0 y 7.5% a una temperatura entre 145 ± 5°C. Esta temperatura fue escogida debido a que por encima de la misma el CA experimenta envejecimiento por pérdida de componentes químicos por oxidación, y por debajo, el mezclado se dificulta especialmente cuando el contenido de PEBD es alto.

The polyethylene residual was obtained recycling white straws use in hot drinks at offices (Figure 1) and presents a thickness of 0.92 g/cm³. The sticks were cut in such a way to pass through sieve No. 4 and being kept at No. 10 in a sieve test.

After testing aggregate and asphalt cement (CA), the CA and the polyethylene (PEBD) were mixtured in relations PEBD/CA=1.0, 3.0, 5.0 y 7.5% at a temperature of 140 ± 5°C. This temperature was selected to avoid loss by the chemical components aging due to oxidation in CA, and problems during construction, in particular with a high PEBD contain.

Los tiempos de mezclado variaron entre 30 a 55 minutos para PEBD/CA=1.0 y 7.5% respectivamente. Sobre el cemento asfáltico modificado se realizaron ensayos de penetración (a la temperatura estándar de 25°C) y punto de ablandamiento. Adicionalmente se realizaron ensayos de viscosidad con el fin de determinar las temperaturas de mezcla y compactación para la fabricación de las mezclas (Tabla 3).

The mixing times had variations between 30 and 55 minutes per PEBD/CA=1.0 and 7.5% respectively. Penetration (at a standard temperature of 25°C) and softening point tests were done over modified asphalt cement. Additionally there were tests of viscosity to determine the mix and compact temperature to elaborate mixtures (Table 3).

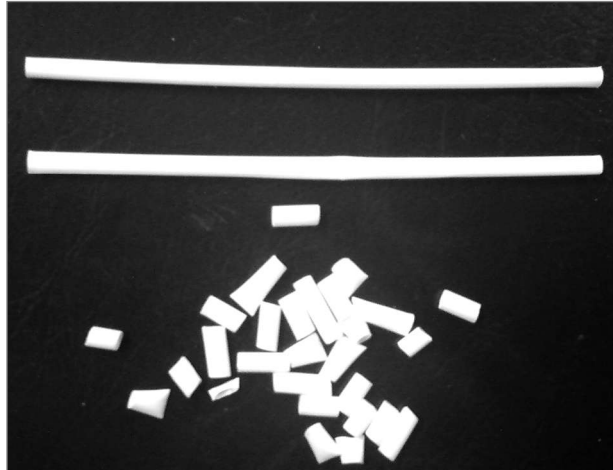


Figura 1. Palillos reciclados de PEBD
Figure 1. PEBD Recycled sticks

Tabla 3. Temperaturas de mezcla y compactación para relaciones de PEBD/CA=0.0, 1.0, 3.0, 5.0 y 7.5%
Table 3. Mixture and compact temperature for relations PEBD/CA=0.0, 1.0, 3.0, 5.0 y 7.5%

PEBD/CA [%]	Temperatura de mezcla [°C] <i>Mix Temperature [°C]</i>	Temperatura de compactación [°C] <i>Compact Temperature [°C]</i>
0.0	135	130
1.0	142	138
3.0	149	144
5.0	155	150
7.5	165	160

Las muestras de mezcla asfáltica tipo MDC-2 (briquetas) se fabricaron del tipo Marshall (compactadas a 75 golpes por cara) utilizando los valores promedio en porcentajes de la franja granulométrica que exige la especificación INVIAS (2007). Las briquetas se fabricaron utilizando relaciones de PEBD/CA=0.0 (denominadas convencionales), 1.0, 3.0, 5.0%. No se elaboraron muestras con PEBD/CA=7.5% debido a que las temperatura de mezcla y compactación son elevadas (165 y 160°C), lo que genera un rápido envejecimiento del ligante asfáltico durante su fabricación y dificultad en los procesos de construcción de la mezcla en obra.

The asphalt mixtures MDC-2 (briquets) followed the Marshall test standard process (compacted at 75 hits per face) using average values in percentage of the same grading band required by INVIAS specifications (2007). The briquets were elaborated using a PEBD/CA=0.0 relation (called conventional), 1.0, 3.0, 5.0%. There was no sample with PEBD/CA=7.5% because mixtures and compaction temperatures were elevated (165 y 160°C), which produces fast aging of asphalt binders during elaboration process and difficult the mix building process.

Inicialmente se realizó el ensayo Marshall sobre las mezclas convencionales empleando porcentajes de asfalto de 4.5, 5.0, 5.5 y 6.0%, con el fin de realizar el diseño Marshall para determinar el contenido óptimo de asfalto. El ensayo realizado a la mezcla asfáltica fue el de resistencia de mezclas bituminosas empleando el aparato Marshall (INV. E – 748) y el diseño fue realizado con base en los criterios presentes en el artículo 450-07 de las especificaciones generales de construcción del INVIAS (2007) (ver Tabla 4). El porcentaje óptimo de cemento asfáltico de acuerdo con los datos de la Tabla 4 es de 5.5%. En este porcentaje se están cumpliendo, los requisitos mínimos exigidos por la especificación INVIAS (2007) para MDC-2 y tránsitos tipo NT3 (altos volúmenes).

Initially there was a Marshall test over the conventional mixes, using asphalt percentage of 4.5, 5.0, 5.5 y 6.0%, in order to do a Marshall design for determining the optimum contain of asphalt. The test was on bituminous asphalt mixes using Marshall apparatus (INV. E – 748) and its design was based on the current criterion of article 450-07 about general building code of (2007) (see Table 4). The optimum percentage of asphalt cement, according to Table 4 is 5.5%. This percentage complies with the minimum requirements of INVIAS (2007) for MDC-2 and transit NT3 (high volumes).

Tabla 4. Resumen del ensayo Marshall para mezcla asfáltica convencional MDC-2
Table 4. Summary of Marshall test for conventional asphalt load MDC-2

Asfalto/Asphalt [%]	Densidad/Density [g/cm3]	Estabilidad/Stability (E) [kg]	Vacios de la mezcla [%]/Void in mix [%]	Flujo/Flow (F) [mm]	Relación/Relation E/F [kg/mm]
4.5%	2.10	1059.60	7.62	3.35	316.03
5.0%	2.22	1146.62	5.27	3.33	343.94
5.5%	2.15	1080.08	4.21	4.13	261.68
6.0%	2.11	993.06	3.91	4.06	244.35

Luego de realizar el diseño de mezcla se fabricaron muestras de mezcla asfáltica tipo MDC-2 empleando relaciones de PEBD/CA=1.0, 3.0, 5.0%. El contenido de CA utilizado para la fabricación de estas muestras fue de 4.5, 5.0, 5.5, 6.0 y 6.5%. Sobre estas muestras se realizó el ensayo Marshall para evaluar las propiedades de las mismas bajo carga monotónica y comparar los resultados con aquellos que experimentaron las mezclas convencionales (presentados en la Tabla 4).

The mix design was followed by the elaboration of MDC-2 asphalt mixes using relation PEBD/CA=1.0, 3.0, 5.0%. The CA contain was 4.5, 5.0, 5.5, 6.0 y 6.5%. The Marshall test aim was to assess monotonic loads and comparing its results with conventional mixes (shown in Table 4).

Con los resultados obtenidos del ensayo Marshall se determinó un porcentaje de cemento asfáltico y aditivo (PEBD) con base principalmente en el máximo valor de la relación estabilidad – flujo (llamada por algunos investigadores como rigidez Marshall; esta relación físicamente puede ser entendida como una resistencia mecánica evaluada en el estado de falla de las mezclas, bajo carga monotónica en un ensayo de tracción indirecta). Con el valor de CA y PEBD se fabricaron nuevas briquetas para realizar los ensayos de módulo resiliente (INV. E 749), resistencia a la deformación permanente de mezclas asfálticas (EN 12697-22, CEN, 2000, que es uno de los ensayos de carácter internacional que permiten las normas de ensayos de materiales en Colombia de acuerdo al artículo 450-07 del INVIAS, 2007) y resistencia a fatiga.

The obtained results in Marshall test determined an asphalt cement percentage and admixture (PEBD), mainly based in the maximum value of the Marshall stability– flow relation (some researchers call it Marshall rigidity; this relation can be physically understood as a mechanic strength assessed in the mixture failure state, under monotonic load at an indirect test of tension). New specimens were elaborated with value CA and PEBD to test the resilient modulus (INV. E 749), permanent deformation strength of asphalt mixtures (EN 12697-22, CEN, 2000, which is one of the international tests allowed by the Colombian norms according to article 450-07 del INVIAS, 2007) and fatigue strength.

El módulo resiliente fue obtenido bajo tres temperaturas (10, 20 y 30°C) y frecuencias de carga diferentes (2.5, 5.0 y 10.0 Hz) utilizando un equipo Nottingham Asphalt Tester (NAT). Las muestras para determinar el módulo fueron ensayadas bajo carga cíclica en tracción indirecta. El ensayo de resistencia a la deformación permanente bajo carga repetida fue realizado bajo un esfuerzo de 100 kPa y a 3600 ciclos de carga.

La resistencia a fatiga de las mezclas convencionales y modificadas se evaluó para una temperatura ambiente promedio de 16°C siguiendo el procedimiento establecido por el ensayo de viga trapezoidal en voladizo y dos puntos estipulado por la especificación francesa NFP 98-260. La frecuencia de ensayo fue de 10 Hz. El tipo de carga utilizado en el ensayo fue el de deformación controlada, el cual de acuerdo con Epps y Monismith (1972) y Di Benedetto y De la Roche (2005), es el más representativo para describir la carga que ocurre en campo. Las muestras trapezoidales fueron fabricadas de tal forma que presentaran la misma densidad que reportaron los especímenes del ensayo Marshall. Las dimensiones de las muestras fueron de B=7.5 cm, b=2.5 cm, H=25 cm y e=2.5 cm.

3. Resultados y análisis

Ensayo Marshall. En la Tabla 5 se presentan los valores de estabilidad (E), flujo (F) y E/F para las mezclas modificadas con PEBD/CA=1.0, 3.0, 5.0% y CA=4.5, 5.0, 5.5, 6.0 y 6.5%. Estos resultados son presentados gráficamente en las Figuras 2-4.

En las Figuras 2-3 se evidencia que la mayor resistencia bajo carga monotonica y rigidez se obtiene cuando se adiciona al 5.0% de CA una relación de polímero y aditivo (PEBD/CA) de 5.0%. Las mezclas modificadas experimentan con este contenido de PEBD y CA un aumento del 36% en la estabilidad y 24% en la relación E/F con respecto a las convencionales. En este contenido de CA el incremento en estabilidad disminuye a medida que decrece la cantidad de PEBD. Para cualquier porcentaje de CA, la relación E/F es independiente del contenido de PEBD adicionado al asfalto. Valores inferiores o superiores al 5.0% de CA generan disminución en la resistencia de las mezclas modificadas debido a que en este rango las mismas experimentan mayor deformación bajo carga (ver Figura 4).

The resilient modulus was obtained under three different temperatures (10, 20 y 30°C) and load frequencies (2.5, 5.0 y 10.0 Hz) using Nottingham Asphalt Tester (NAT). The samples to determine modulus were tested by cyclic loads at indirect tension. The test of permanent deformation strength under repetitive loads required load cycles of 100 kPa and 3600.

The fatigue strength of conventional and modified mixtures was assessed by an average temperature of 16°C following the process trapezoidal beam according to the French norm NFP 98-260. The test frequency was 10 Hz. The kind of load used in the test was controlled deformation, in accordance with Epps, Monismith (1972), Di Benedetto and De la Roche (2005), which is the most representative to describe load in the field. The trapezoidal samples were elaborated in such a way to present the same density of the specimens in Marshall tests. The sample sizes were B=7.5 cm, b=2.5 cm, H=25 cm and e=2.5 cm.

3. Results and analysis

Marshall Test. The Table 5 shows stability values (E), flow (F) and E/F for modified mixes with PEBD/CA=1.0, 3.0, 5.0% and CA=4.5, 5.0, 5.5, 6.0 y 6.5%. These results are graphically represented in Figures 1-3.

According to Figures 2-3, the larger strength is under monotonic load and rigidity is obtained adding a 5.0% of CA to a relation polymer and admixture (PEBD/CA) of 5.0%. The mixtures experiment, with this PEBD and CA contain, an increase of 36% in stability and a 24% in the relation E/F in comparison to the conventional ones. The increase of stability, at this content of CA, diminishes as the quantity of PEBD decreases. The relation E/F, for each CA percentage is independent of the PEBD contain added to asphalt. The CA values higher or lower than 5.0% decrease the mix modified strength due that in this range they experiment the bigger deformation under load (see Figure 4).



Tabla 5. Evolución de los parámetros de resistencia bajo carga monotónica de las mezclas asfálticas modificadas
 Table 5. Evolution of the strength parameters of modified asphalt mix under monotonic load

PEBD/CA [%]	Estabilidad / Stability (E) [kg]					Flujo / Flow (F) [mm]					Relación / Relation E/F [kg/mm]				
	4.5%	5.0%	5.5%	6.0%	6.5%	4.5%	5.0%	5.5%	6.0%	6.5%	4.5%	5.0%	5.5%	6.0%	6.5%
1.0	1222.2	1310.4	1249.0	1197.8	1105.7	4.52	2.92	3.25	3.80	4.25	270.4	448.6	384.1	314.9	259.9
3.0	1301.4	1479.4	1356.5	1228.5	1064.7	4.40	3.30	3.71	4.00	4.29	295.8	448.0	365.2	307.1	248.4
5.0	1498.8	1566.4	1535.7	1371.9	1100.6	5.30	3.46	4.13	4.60	5.14	282.8	452.6	372.1	298.0	214.0

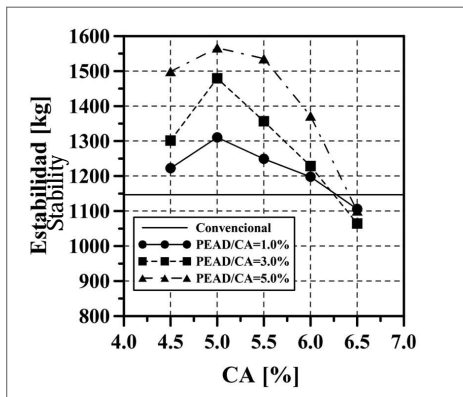


Figura 2. Evolución de E con el contenido de CA y PEBD/CA
 Figure 2. Evolution of E with contain of CA and PEBD/CA

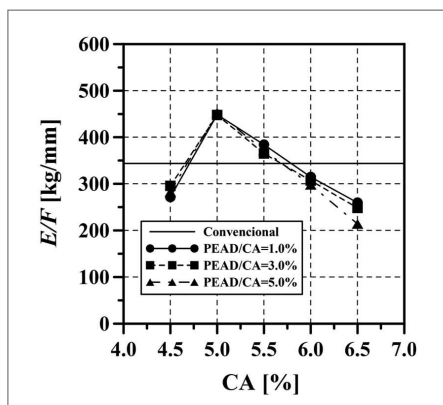


Figura 3. Evolución de E/F con el contenido de CA y PEBD/CA
 Figure 3. Evolution of E/F with contain of CA and PEBD/CA

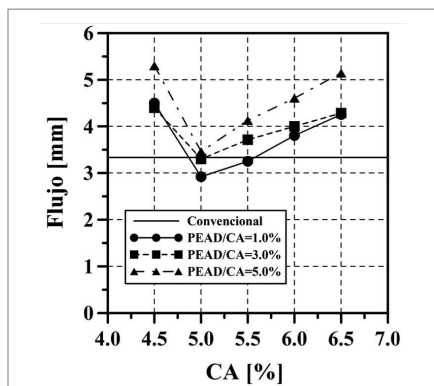


Figura 4. Evolución de F con el contenido de CA y PEBD/CA
 Figure 4. Evolution of F with contain of CA and PEBD/CA



Módulo dinámico, deformación permanente y resistencia a fatiga. En las Figuras 5-6 se presenta la evolución del módulo resiliente y la deformación permanente en la dirección vertical de las mezclas asfálticas convencionales y modificadas con PEBD/CA=5.0% y CA=5.0%. Como se mencionó en la metodología, este contenido de CA y PEBD/CA fue escogido debido a que en este rango de asfalto y polímero la mezcla modificada experimenta la máxima resistencia bajo carga monotónica. Se observa un incremento típico del módulo cuando se aumenta la frecuencia de carga y disminuye la temperatura del ensayo. La rigidez y la resistencia a la deformación permanente de la mezcla modificada son mayores que las convencionales. El módulo resiliente de las mezclas modificadas incrementa entre 25 a 65% con respecto a las convencionales. El máximo incremento en rigidez (65%) lo experimentan las mezclas sometidas a la mayor temperatura del ensayo (30°C).

La deformación permanente disminuye en 40% cuando se modifica la mezcla asfáltica con PEBD. Adicionalmente se observa que la mezcla convencional no cumple el valor máximo de deformación que se exige para el ensayo realizado, el cual es de 1.0% medido a 3×10^3 ciclos de carga. Sin embargo, cuando se modifican las mezclas con PEBD el valor es ligeramente inferior al permitido. Este aumento en rigidez y resistencia a la deformación permanente se debe a que con la incorporación del PEBD al CA se obtiene un material más rígido tal como se observa en el subcapítulo siguiente.

Dynamic modulus, permanent deformation and fatigue strength. Figures 5 and 6 show the evolution of the resilient modulus and the permanent deformation in the vertical direction of conventional and asphalt mixes modified with PEBD/CA=5.0% and CA=5.0%. The content of CA and PEBD/CA, as previously mentioned, was preferred because in this range of polymer and asphalt, the modified mixture experiments the maximum strength under monotonic load. Increasing the load frequency and reducing the test temperature produced the expected increase in modulus. The rigidity and strength of modified mixture are larger than that of the conventional mixture. The resilient modulus of modified mixes increases between 25% and 65% in comparison with the conventional ones. The maximum rigidity increase (65%) is in mixtures tested at higher temperature (30°C).

The permanent deformation decreases by 40% when the asphalt mixture is modified with PEBD. Additionally, it is observed that the conventional mixture lacks the required maximum value of deformation demanded by the test, which is a 1.0% measured at load cycles of 3×10^3 . Nevertheless, when mixes are modified with PEBD, the value is lower than the maximum code requirements. This increase in rigidity and permanent deformation strength is because incorporating PEBD to CA produces a more rigid material as observed below.

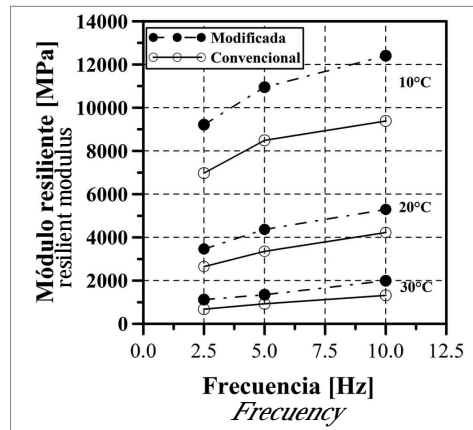


Figura 5. Evolución del módulo resiliente vs. Porcentaje de PEBD para mezclas modificadas MDC-2 empleando CA 80-100
 Figure 5. Evolution of resilient modulus vs. PEBD percentages for modified MDC-2 mixes using CA 80-100

Tipo de CA/ Type of CA	Convencional/ Conventional	Modificado/ Modified
Deformación permanente [%]	1.63	0.98

Tabla 6. Evolución de la deformación permanente
 Table 6. Evolution of Permanent Deformation

En la Figura 6 a y b se presentan las leyes de fatiga de las mezclas convencionales y modificadas respectivamente. Se muestra la evolución de la amplitud de la deformación a tracción aplicada (ϵ_t) durante el ensayo contra el número de ciclos de carga (N). De los ensayos de fatiga se obtiene que la mezcla convencional disminuye su resistencia a fatiga entre un 13 y 32% cuando se modifica con PEBD. Lo anterior es debido al aumento en rigidez que experimenta el CA y la mezcla cuando se adiciona el PEBD tal como ha sido reportado ampliamente por otros investigadores que han ejecutado este tipo de ensayos bajo deformación controlada (p.e., Epps y Monismith, 1972; Di Benedetto y De la Roche, 2005). La amplitud de la deformación necesaria para que las mezclas fallen por fatiga en $N=10^6$ (ϵ_6) y la pendiente de la ley de fatiga (b) (valores necesarios para realizar el dimensionamiento de pavimentos por el Método Racional del Instituto de Desarrollo Urbano – IDU y la Universidad de Los Andes, 2002) de las mezclas se presenta en la Tabla 7.

Figures 6 and b show the conventional and modified mixture fatigue laws respectively. It shows the evolution of deformation range in tension (ϵ_t) during the test versus the number of load cycles (N). From the results it can be stated that the conventional mixture diminishes its fatigue strength between a 13 and 32% when modified with PEBD. This is due to the increase in rigidity experimented in CA and mixture when adding PEBD, as widely reported by other researchers that have done this kind of tests under controlled deformation (p.e., Epps and Monismith, 1972; Di Benedetto and De la Roche, 2005). Table 7 presents, range of the required deformation for mixtures to fail in fatigue in $N=10^6$ (ϵ_6) and the slope of the fatigue law (b) (the required values to design pavements according to the Rational method of the Urban Development Institute at – IDU and Universidad de Los Andes, 2002).

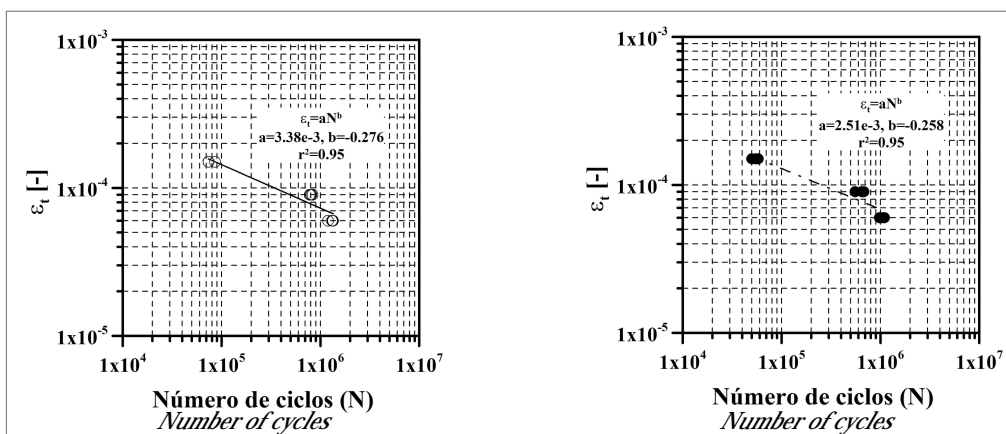


Figura 6. Leyes de fatiga para a) mezcla convencional y b) mezcla modificada
 Figure 6. Laws for Fatigue a) Conventional mixture y b) Modified mixture

Tabla 7. Valores de los parámetros ϵ_6 y b
 Table 7. Parameters of values ϵ_6 and b

Parámetro/Parameter	ϵ_6 [-]	b
Convencional/Conventional	Convencional	0.276
Modificado/Modified	Modificado	0.258

Caracterización del cemento asfáltico. En la Figura 7 se observa que el asfalto modificado presenta una resistencia a la penetración superior con respecto al convencional para cualquier porcentaje de CA y PEBD, y aumenta conforme se incrementa la adición de PEBD al CA. El punto de ablandamiento incrementa cuando se adiciona por vía húmeda PEBD al CA (Figura 8). El incremento en

Characterization of asphalt cement. The Figure 7 shows that modified asphalt presents higher penetration strength, in regard to the conventional one, for any percentage of CA and PEBD, and increases at adding PEBD to CA. The softening point increases adding PEBD to CA in wet conditions (Figure 8). The increase in



la viscosidad (presentado en la Tabla 3), resistencia a la penetración y el punto de ablandamiento de los asfaltos modificados con PEBD permiten predecir menor ahuellamiento de las mezclas a altas temperaturas de servicio en comparación con las convencionales. Este incremento es debido principalmente a que el desecho de PEBD es un polímero plastomérico que presenta una mayor rigidez que el CA.

the penetration strength and softening points of asphalt modified with PEBD, allow foreseeing less mixture rutting at high temperatures in comparison with conventional mixture. This increase is because the PEBD residual is a plastometer polymer that represents a bigger rigidity than CA.

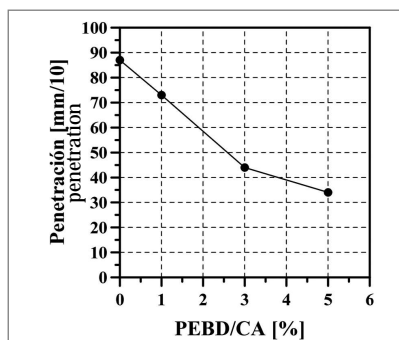


Figura 7. Evolución de la penetración con la adición de PEBD al CA

Figure 7. Evolution of penetration adding PEBD to CA

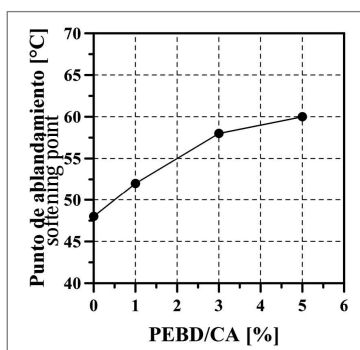


Figura 8. Evolución del punto de ablandamiento con la adición de PEBD al CA

Figure 8. Evolution of the softening point adding PEBD to CA

4. Conclusiones

En el artículo se presenta la influencia que tiene, sobre las propiedades mecánicas bajo carga monotónica y cíclica de una mezcla asfáltica tipo MDC-2, adicionar un desecho de PEBD al cemento asfáltico. En general, las mezclas asfálticas modificadas con desecho de PEBD tienden a poseer un comportamiento rígido. A bajas temperaturas de servicio estas mezclas pueden tener un comportamiento frágil, llevando a pensar que tendrían un mejor desempeño en climas cálidos.

Cuando se modifica la mezcla asfáltica con PEBD la resistencia bajo carga monotónica incrementa notablemente. De la misma forma la rigidez bajo carga cíclica y la resistencia a la deformación permanente aumenta. Los mayores incrementos en rigidez bajo carga cíclica se obtienen cuando la temperatura del ensayo aumenta.

4. Conclusions

This paper shows the influence of in mechanical properties under cyclic and monotonic asphalt mixture MDC-2.- adding PEBD residual to asphalt cement. The asphalt mixtures modified with PEBD residual have a tendency to rigid behavior. These loads under low temperatures may have a weak behavior, and then would present a better fulfillment in warm climates.

When asphalt mixture is modified with PEBD, the strength under monotonic load increases significantly. The same as rigidity under a low cyclic load and permanent deformation strength. The bigger increase in rigidity under cyclic loads is obtained when the test temperature increases.



Lo anterior permite prever que el desecho de PEBD como modificador de asfaltos puede ser un material que permita mejorar las características de rigidez y resistencia a las deformaciones permanentes de mezclas que sean utilizadas en climas cálidos. Sin embargo este aumento en rigidez condujo a una reducción en la resistencia a fatiga entre 12 a 32% cuando la temperatura del ensayo fue de 16°C.

La resistencia que tienen los asfaltos modificados a fluir es mayor con respecto al convencional. Los valores de penetración y punto de ablandamiento del asfalto modificado permiten predecir menor ahuellamiento a altas temperaturas de servicio en comparación con los convencionales.

Con los resultados obtenidos, se recomienda la modificación de CA con desecho de PEBD en zonas con condiciones de temperaturas medias anuales promedios (TMAP) altas. El incremento en viscosidad y rigidez del ligante y la mezcla asfáltica modificada permiten prever su utilización en vías para altos volúmenes de tránsito y/o zonas con TMAP elevadas donde se presenten problemas de ahuellamiento.

Las fases futuras del proyecto deben medir propiedades como reología y envejecimiento a corto y largo plazo de los asfaltos. Adicionalmente para entender los cambios que ocurren en las propiedades físicas y mecánicas de las mezclas modificadas es necesario evaluar los cambios que experimentan las propiedades químicas de las mismas.

This foresees PEBD residual as an asphalt modifier that may improve rigidity and strength characteristics of the permanent load deformations used in warm climates. Nevertheless this increase in rigidity brought the attention to a reduction in fatigue strength between 12 and 13% when temperature test was 16°C.

The modified asphalt strength to flow is bigger than conventional ones. The modified asphalt penetration values and softening points help to foresee less rutting at high load temperature than in the conventional ones.

According to the results obtained herein, to modify CA with PEBD residual in areas with an average of medium and high temperature per year (TMAP) is recommended. The binder viscosity and rigidity, with the modified asphalt mix allow foreseeing its use in high ways and zones with high temperature average which presents problems of rutting.

The future steps of this project should measure properties as rheology, asphalt short and long term aging. Additionally to understand changes in the physical and mechanic properties of modified mixes is necessary to assess changes in its chemical properties.

7. Referencias / References

- Committee European of Normalization – CEN (2000), Bituminous mixture test methods for hot mix asphalts – Part 25: Cyclic compression tests.
- Copeland A. R., Youtcheff Jr, J. S and Shenoy A. (2007), Moisture Sensitivity of Modified Asphalt Binders: Factors Influencing Bond Strength. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Issue number 1998, 18-28.
- Chen J-S., Liao M-C. and Shiah M-S. (2002), Asphalt modified by Styrene-Butadiene-Styrene triblock copolymer: morphology and model. Journal of Material in Civil Engineering, Vol. 14, Issue 3,
- Di Benedetto H. and De la Roche C. (2005), State of the Art on Stiffness Modulus and Fatigue of Bituminous Mixtures. Report RILEM No. 17 Bituminous binders and mixes: State of the art and interlaboratory test on mechanical behavior and mix design, L. Francken, ed., E and FN Spon, London, 97-123.
- Epps J. A. and Monismith C. L. (1972), Fatigue of Asphalt Concrete Mixtures – Summary of Existing Information. Fatigue of Compacted Bituminous Aggregate Mixtures, ASTM STP 508, American Society for Testing and Materials, 19-45.
- Instituto de Desarrollo Urbano – IDU. (2009), Especificación Técnica Para la Aplicación del Grano de Caucho Reciclado (GCR) en Mezclas Asfálticas en Caliente (Vía Húmeda). Bogotá D.C., Colombia.
- Instituto de Desarrollo Urbano - IDU y Universidad de Los Andes. (2002), Manual de Diseño de Pavimentos para Bogotá. Bogotá D.C., Colombia.
- Instituto Nacional de Vías – INVIAS. (2007), Especificaciones generales de Construcción de carreteras. Bogotá D. C.
- Instituto Nacional de Vías – INVIAS. (2007a), Normas de Ensayos de Materiales para Carreteras. V. I y II. Bogotá D.C., INVIAS.
- Lee S-J., Amirkhanian S-N., Shatanawi K. and Thodesen C. (2008), Influence of compaction temperature on rubberized asphalt mixes and binders. Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 35, No. 9, 908-917.
- McQuillen J. L., Takallou H. B., Hicks R. G. and Esch D. (1988), Economic Analysis of Rubber-Modified Asphalt Mixes. Journal of Transportation Engineering, Vol. 114, No. 3, 259-277.
- Olivares F., Schultz B., Fernández M. and Moro B. (2009), Rubber-modified hot-mix asphalt pavement by dry process. International Journal of Pavement Engineering, Vol. 10, Issue 4, 277-288.
- Papagiannakis A. T. and Loughed T. J. (1995), A review of crumb-rubber modified asphalt concrete technology. Research report for project T9902-09 “Rubber-Asphalt Study”, Washington State Transportation Commission and U. S. Department of Transportation.
- Reyes F. A. y Figueroa A. F. (2008), Uso de desechos plásticos en mezclas asfálticas – Síntesis de la investigación colombiana. Editorial Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá D.C. (Colombia), 103 p.
- Rondón H. A., Reyes F. A., Figueroa A. S., Rodríguez E., Real C. M. and Montealegre T. A. (2008), Mezclas asfálticas modificadas en Colombia. Revista Infraestructura Vial, No. 19, 12-21.
- Stastna J., Zanzotto L. and Vacin O. (2000), Damping of shear vibrations in asphalt modified with styrene-butadiene-styrene polymer. Transportation research record, Annual Meeting of the Transportation Research Board, No. 1728, 15-20.
- Yildirim Y. (2007), Polymer modified asphalt binders. Construction and Building Materials, Vol. 21, Issue 1, 66-72.