

Incidencia del empleo de polímeros como modificadores del asfalto¹

Rolando Vila Romani², José Gabriel Jaramillo Briceño³

RESUMEN

Introducción. El empleo de asfaltos modificados con polímeros en la construcción de obras viales es una práctica frecuente a nivel internacional pero limitada aún en Ecuador. Sin embargo, ante la poca durabilidad de nuestros pavimentos asfálticos, mayormente causada por agrietamientos prematuros de fatiga o bloques, el potencial de estos productos debe ser considerado.

Objetivo. Evaluar el comportamiento del asfalto procedente de la Refinería de Esmeraldas al mezclarse con tres tipos de polímeros, mediante las pruebas exigidas para la clasificación por viscosidad y por grados de desempeño Superpave, incluyendo un análisis reológico empleando diagramas de Black. **Materiales y métodos.** Los polímeros empleados fueron: SBS,

Elvaloy y caucho de llantas, dosificados para cumplir ciertas exigencias de calidad determinadas por métodos experimentales, según las normativas ASTM. **Resultados.** Como principales resultados se obtuvo que al modificar el asfalto PG 64-28 con los distintos polímeros todos incrementaron el grado alto de temperatura a 76, manteniéndose el grado bajo en los modificados con Elvaloy y caucho en -28, mientras que para el SBS aumentó a -22. En relación a las temperaturas intermedias, la temperatura crítica a la fatiga no tuvo mayor variación al emplear los diferentes modificadores. Esta situación fue corroborada con los diagramas de Black. **Conclusiones.** Tratar de solucionar el mal comportamiento del asfalto ecuatoriano ante el agrietamiento mediante su mezcla con los polímeros estudiados no sería la solución más efectiva, aunque es notoria la

1 Artículo derivado del Proyecto de Investigación: "Evaluación del nivel de daño generado por el agua en las mezclas asfálticas calientes" realizado entre 2016 y 2018 en la UCSG. Auspiciado por el SIN-DE-UCSG.

2 Doctor en Ciencias Técnicas. Ingeniero Civil. Profesor-Investigador. Director del Laboratorio de Carreteras. Universidad Católica de Santiago de Guayaquil. ORCID: 0000-0002-9109-5679 Correo electrónico: rolando.vila@cu.ucsg.edu.ec

3 Ingeniero Civil. Investigador. Laboratorio de Carreteras. Universidad Católica de Santiago de Guayaquil. <https://orcid.org/0000-0002-8356-1094> Correo electrónico jose.jaramillo@cu.ucsg.edu.ec

Artículo recibido: 1/05/2018; Artículo aprobado: 19/07/2018

Autor para correspondencia, Rolando Vila, E-mail: rolando.vila@cu.ucsg.edu.ec

mejora del comportamiento ante las deformaciones plásticas.

Palabras Clave: asfaltos, polímeros, Superpave, diagramas de Black

Incidence of the use of polymers as modifiers of the asphalt

ABSTRACT

Introduction. The use of modified asphalts with polymers in the construction of roads is a frequent practice at an international level but still limited in Ecuador. However, due to the short durability of our asphalt pavements, mainly caused by premature fatigue cracks or blocks, the potential of these products should be considered.

Objective. Evaluate the behavior of the asphalt coming from the Esmeraldas Refinery when it is mixed with three commercial polymers, by means of the tests required for the classification of viscosity and by Superpave performance grades, including a rheological analysis using master curves and Black diagrams. **Materials and methods.** The polymers used were: SBS, Elvaloy and rubber tires, dosed to meet certain quality requirements determined by experimental methods, according to ASTM regulations. **Results.** As main results the high degree of temperature increased to 76 by modifying the PG 64-28 asphalt with the different polymers, maintaining the low degree on those modified with Elvaloy and rubber in -28, while for the SBS it increased to -22.

Regarding to intermediate temperatures, the critical temperature to fatigue didn't have much variation when the different modifiers were applied. This situation was corroborated with Black diagrams. **Conclusions.** Trying to solve the poor cracking performance of the Ecuadorian asphalt by mixing it with the polymers studied would not be the most effective solution, although the improvement of the performance to plastic deformations is notorious.

Key Words: asphalts, polymers, Superpave, Black diagrams

Incidência do uso de polímeros como modificadores do asfalto equatoriano

RESUMO

Introdução. O uso de asfalto modificado com polímeros na construção de obras viárias é uma prática frequente em nível internacional, mas ainda limitada no Equador. No entanto, dada a curta durabilidade de nossos pavimentos asfálticos, causada principalmente por rachaduras prematura de fadiga ou blocos, o potencial desses produtos deve ser considerado. **Objetivo.** Avaliar o comportamento do asfalto da refinaria de Esmeraldas quando misturado com três tipos de polímeros, por meio dos testes exigidos para a classificação por viscosidade e pelos graus de desempenho Superpave, incluindo uma análise reológica usando diagramas pretos. **Materiais e métodos.** Os

polímeros utilizados foram: SBS, Elvaloy e pneus de borracha, dosados para atender a determinados requisitos de qualidade determinados por métodos experimentais, de acordo com as normas da ASTM. **Resultados.** Como principais resultados, foi obtido que, ao modificar o asfalto PG 64-28 com os diferentes polímeros, todos aumentaram o alto grau de temperatura para 76, mantendo o baixo grau naqueles modificados com Elvaloy e borracha em -28, enquanto para o SBS aumentou para -22. Em relação às temperaturas intermediárias, a temperatura crítica à fadiga não

apresentou muita variação ao utilizar os diferentes modificadores. Esta situação foi corroborada com os diagramas de Black. **Conclusões.** Tentar resolver o mau comportamento do asfalto produzido na Refinaria de Esmeraldas antes de partir pela fadiga, misturando-o com os polímeros estudados, não é a solução mais eficaz, embora seja notório a melhora do comportamento diante das deformações plásticas.

Palavras-chave: asfalto, polímero, superpave, diagramas Black

INTRODUCCIÓN

Desde hace varias décadas el empleo de polímeros para el mejoramiento de ciertos comportamientos del asfalto, como las deformaciones permanentes, el agrietamiento térmico, por fatiga y mayor durabilidad de la mezcla en general ha ido ganando terreno a nivel internacional (Walker, 2014). En el Ecuador el empleo de estos modificadores ha sido escaso y es posible que esto se deba a las condiciones del mezclado de los asfaltos con polímeros, donde son usuales las elevadas temperaturas y los prolongados tiempos de mezcla, que sin dudas ocasionan una afectación importante en la calidad de nuestro asfalto. A esta situación debe añadirse los costos de los polímeros. No obstante, a finales de los noventa se construyó el primer tramo experimental de pavimento empleando asfaltos mejorados con polímeros SBS (Vila, 1999) y poco tiempo después se construyeron los carriles exclusivos de

la llamada Ecovía, donde se empleó un polímero tipo plastómero. Ambas obras en la ciudad de Quito.

En general los asfaltos modificados se utilizan cuando las necesidades de determinadas propiedades están por encima de aspectos meramente económicos. O sea, que conocer el efecto de los polímeros en el asfalto, al menos los más comunes en el mercado, es interesante y necesario para el país, especialmente ante las nuevas pruebas de calificación Superpave que ya se aplican.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para el estudio se utilizó el asfalto procedente de la Refinería de Esmeraldas, al que se le realizaron modificaciones mediante el empleo de tres polímeros comerciales: SBS, Elvaloy y caucho de llantas, que fueron mezclados con el asfalto en ciertos

porcentajes para cumplir las exigencias de las clasificaciones recogidas en las normativas ASTM (American Society for Testing Materials). Es decir, se emplearon:

- Polímero SBS (estireno-butadieno-estireno) dosificado al 3.0% en peso.
- ELVALOY ® RET, terpolímero elastomérico, dosificado al 1.3% en peso.
- Caucho de llantas, dosificado al 5.0% en peso.

En todos los casos se utilizaron además productos fluidificantes y catalizadores en cantidades variables.

Posteriormente a estos materiales se les realizaron estudios mediante la tecnología Superpave que permitieron su clasificación por desempeño y análisis reológicos más detallados aplicando los diagramas de Black.

RESULTADOS

Clasificación del asfalto base y los modificados según ASTM

En la Tabla N° 1 se muestran los resultados de las pruebas al cemento asfáltico para su clasificación por viscosidad.

Tabla N° 1. Resultados de la clasificación por viscosidad

Propiedades	Unidad	Asfalto base	ASTM D3381/D3381M-12 (Tabla 4)			
			AC 20		AC 30	
			mín	máx	mín	máx
Ligante original						
Viscosidad dinámica, 60 °C	Pa.s	256	160	240	240	360
Viscosidad cinemática, 135 °C	mm ² /s	367,1	300	-	350	
Punto de inflamación	°C	295	232	-	232	
Solubilidad en tricloroetileno	%	99,9	99	-	99,00	
Gravedad específica	-	1,0136	Reportar		Reportar	
Índice de penetración	-	-0,8	-1,5	1	-1,5	1,0
Residuo RTFO (163°C, 85 min)						
Viscosidad absoluta, 60 °C	Pa.s	-0,02	-	800	-	1
Cambio de masa	% w/w	1220	-	1	-	1200
Ductilidad 25°C, 5 cm/min	cm	38	50	-	40	-

Fuente: elaborado por los autores

En las tablas N° 2, 3 y 4 se observan los efectos de los polímeros sobre algunas de las propiedades del asfalto, según los estándares desarrollados por la ASTM para los diferentes tipos de polímeros.

Tabla N° 2. Resultados de las pruebas en el asfalto con SBS

Propiedades	Unidad	Asfalto con SBS	ASTM D- 5892-00 Designación IV-F	
		mín	máx	
Viscosidad dinámica, 60 °C	Pa.s	1800	800	-
Viscosidad cinemática, 135 °C	mm ² /s	1454		3000
Penetración, 25°C, 100 g, 5s	0,1 mm	47	35	-
Punto de inflamación	°C	298	232	-
Residuo RTFO (163°C, 85 min)				
Penetración, 4°C, 200 g, 60s	0,1 mm	39	10	-
Recuperación elástica, 25C, 10 cm elongación	%	70	70	-

Fuente: elaborado por los autores

Tabla N° 3. Resultados de las pruebas en el asfalto con Elvaloy

Propiedades	Unidad	Asfalto con ELVALOY	ASTM D- 5841-00 Designación III-D	
		mín	máx	
Punto de ablandamiento	°C	66	60	-
Penetración, 25°C, 100 g, 5s	0,1 mm	63	30	150
Penetración, 4°C, 200 g, 60s	0,1 mm	45	22	-
Punto de inflamación	°C	293	218	-
Residuo RTFO (163°C, 85 min)				
Penetración, 4°C, 200 g, 60s	0,1 mm	27	11	-

Fuente: elaborado por los autores

Tabla N° 4. Resultados de las pruebas en el asfalto con caucho

Propiedades	Unidad	Asfalto con CAUCHO mín	ASTM D- 6114-00 TIPO II	
			mín	máx
Punto de ablandamiento	°C	60	54,4	-
Penetración, 25°C, 100 g, 5s	0,1 mm	38	25	75
Penetración, 4°C, 200 g, 60s	0,1 mm	36	15	-
Punto de inflamación	°C	308	232	-
Residuo RTFO (163°C, 85 min)				
Penetración retenida, 4°C	% del original	77	75	-

Fuente: elaborado por los autores

Clasificación por grados de desempeño según Superpave

Esta consiste en determinar un grado de desempeño (PG), que consta de dos temperaturas: una alta que debe satisfacer al promedio de las temperaturas máximas de los 7 días consecutivos más calurosos del año registrados a 20 mm de profundidad y una baja que debe satisfacer la temperatura mínima anual media en la superficie del pavimento. Vale señalar que la temperatura alta puede sufrir ajustes atendiendo al tipo de tráfico.

En las especificaciones Superpave (AASHTO M 320, 2010) se emplean los valores de módulo de corte complejo (G^*) y ángulo de fase (δ) obtenidas en el reómetro de corte dinámico (DSR). Las deformaciones permanentes se controlan limitando el valor mínimo de

$G^*/\text{sen}\delta$ a 1 kPa en estado original y a 2.2 kPa después del RTFO.

El agrietamiento por fatiga se controla limitando el valor de $G^*.\text{sen}\delta$ del material con envejecimiento secundario en cámara de envejecimiento a presión (PAV) a un máximo de 5000 kPa, mientras que el agrietamiento por contracción a bajas temperaturas se controla a través de dos parámetros: la rigidez a la fluencia (S) con un valor máximo de 300 MPa y el valor de la pendiente “m” con un valor mínimo de 0.300, que representa la variación de la rigidez. Estos dos valores son determinados con el reómetro de viga en flexión (BBR). Las temperaturas bajas no se consideran importantes en nuestras carreteras y por tanto no se hará énfasis en las mismas.

Los resultados obtenidos en las pruebas para la clasificación por grados PG se resumen a continuación en la Tabla 5.

Tabla. 5 Resultado y exigencia

PROPIEDAD	RESULTADOS				EXIGENCIA	
	BASE	SBS	ELVALOY	CAUCHO		
	Ligante original					
Punto de inflamación, °C	295	298	293	308	230 mín	
Viscosidad, Pa.s	135°C	0,348	1,454	2,383	1,100	3,0 máx
	46°C	18,60	52,70	25,30	38,00	
	52°C	7,86	26,90	13,10	18,20	
Módulo de Corte Dinámico (G*/sinδ, 10 rad/seg), kPa	58°C	3,34	13,30	7,20	8,62	
	64°C	1,47	6,79	4,05	4,51	1,0 mín
	70°C	0,66	3,38	2,38	2,43	
	76°C		1,73	1,45	1,41	
	82°C		0,92	0,92	0,89	
	Residuo RTFOT (163°C, 85 min)					
Pérdida de masa, %		-0,02	0,06	0,06	0,07	1,0 máx
	46°C	58,70	125,00	57,90	90,20	
	52°C	25,80	65,30	31,70	43,80	
Módulo de Corte Dinámico (G*/sinδ, 10 rad/seg), kPa	58°C	11,00	33,30	17,20	22,20	
	64°C	4,87	17,30	9,64	10,90	2,2 mín
	70°C	2,20	9,79	5,57	5,83	
	76°C	1,16	5,54	3,39	3,12	
	82°C		3,21	2,14	1,67	
	Residuo envejecido PAV (100°C, 300 psi, 20 hr)					
Módulo de Corte Dinámico (G* x sinδ, 10 rad/seg), kPa	37°C		551	392	355	
	34°C		759	544	521	
	31°C	708	1070	762	761	
	28°C	1020	1500	1100	1090	
	25°C	1480	2070	1580	1540	5000 máx
	22°C	2126	2820	2250	2130	
	19°C	3060	3800	3160	2920	
	16°C	4230	5050	4410	3970	
	13°C	5800		6140	5310	
	Rigidez, MPa (60 s)	-30°C	728			
Valor m		0,199				0,300 mín
Rigidez, MPa (60 s)	-24°C	457	271	471	360	300 máx
Valor m		0,262	0,254	0,260	0,269	0,300 mín
Rigidez, MPa (60 s)	-18°C	240	204	218	191	300 máx
Valor m		0,317	0,290	0,316	0,304	0,300 mín
Rigidez, MPa (60 s)	-12°C		100			300 máx
Valor m			0,319			0,300 mín
GRADO PG SUPERPAVE		64-28	76-22	76-28	76-28	XXX

Fuente: elaborado por los autores

Diagramas de Black

El cambio del módulo G^* en el comportamiento visco elástico depende principalmente del tiempo de carga (t) y temperatura (T), por lo que un mismo G^* se puede obtener con diferentes

combinaciones de dichos parámetros. Precisamente, el diagrama de Black permite valorar las relaciones entre G^* y δ obtenidos para diferentes frecuencias y temperaturas (King et al, 2012). En este estudio se realizaron los diagramas de los asfaltos estudiados

correspondientes a sus diferentes estados (original, RTFO, PAV), con un rango de frecuencias de 0.1 a 37.5 Hz, pero solo a ciertas temperaturas.

Las deformaciones plásticas se manifiestan fundamentalmente en presencia de temperaturas altas en el pavimento, para su análisis se realizaron las gráficas del Diagrama de Black a una temperatura de 50°C que corresponde a un valor representativo de las altas temperaturas en Ecuador. Es conocido además que las exigencias del método Superpave para el control de las deformaciones plásticas se basan en el parámetro $G^*/\text{Sen}\delta$, siendo favorable para contrarrestar las deformaciones plásticas un menor G^* y un mayor δ .

En la Figura N° 1 se presenta el diagrama de Black para los asfaltos estudiados.

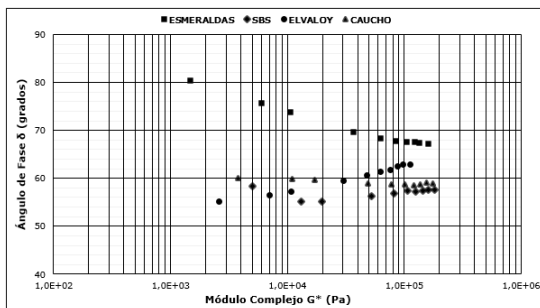


Figura N° 1: Diagrama de Black de los asfaltos en estado original a 50 °C
Fuente: elaborado por los autores

Luego del envejecimiento RTFO y a la misma temperatura, el diagrama adopta la forma mostrada en la Figura N° 2.

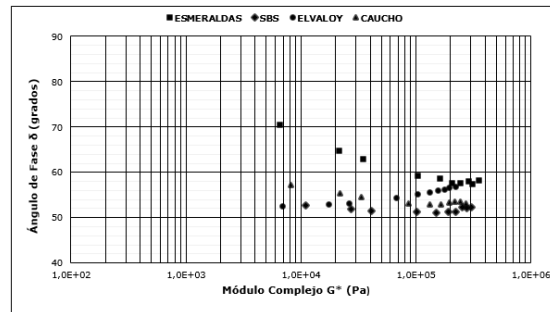


Figura N° 2: Diagrama de Black de los asfaltos después del RTFO a 50 °C
Fuente: elaborado por los autores

El agrietamiento por fatiga es un problema que se presenta en el pavimento principalmente a temperaturas intermedias, por lo que en la elaboración de los diagramas de Black se consideró una temperatura representativa de 20°C con un rango de frecuencia similar al empleado anteriormente. La fatiga es un fenómeno controlado típicamente por esfuerzo en pavimentos con grandes espesores de mezcla asfáltica y un fenómeno controlado por deformación en capas asfálticas delgadas. Dado que se sabe que el agrietamiento por fatiga es más frecuente en pavimentos delgados, los investigadores del SHRP supusieron que debía considerarse principalmente un fenómeno controlado por deformación (Querol et al, 2009).

En las estructuras de poco espesor de mezcla asfáltica, donde las deformaciones van a ser grandes, interesa la máxima recuperación elástica, es decir una curva de relajación rápida. Además, tomando como referencia el criterio Superpave ante el agrietamiento por fatiga, donde se exige: $G^*\text{Sen}\delta \leq 5000 \text{ kPa}$ para asfaltos con envejecimiento secundario (PAV),

puede deducirse que un menor δ y un menor G^* serían favorables para prevenir el agrietamiento por fatiga. En la Figura N° 3 se presentan los diagramas para los diferentes cementos asfálticos después del PAV.

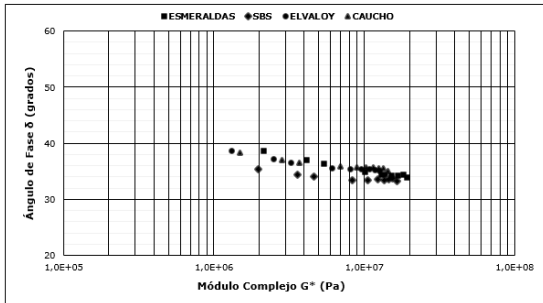


Figura N° 3: Diagrama de Black de los asfaltos después del PAV a 20 °C
Fuente: elaborado por los autores

DISCUSIÓN

De acuerdo a la Tabla 1 el cemento asfáltico cumple como AC 30 en las pruebas al asfalto original pero incumple por un margen muy pequeño las exigencias de viscosidad y ductilidad en el residuo del ensayo de película delgada en horno rotatorio (RTFO). Esta situación nos indica que este asfalto sufrirá un excesivo endurecimiento durante el proceso de mezclado, transporte y tendido de la mezcla.

Los asfaltos modificados de acuerdo a las dosificaciones seleccionadas cumplen las exigencias indicadas por las normativas correspondientes como se observa en las Tablas 2, 3 y 4.

En dicha Tabla 5 se aprecia que de acuerdo a la clasificación por grado PG el cemento asfáltico tomado como base o referente, y procedente de Esmeraldas, califica como PG 64-28. Puede notarse que pese a existir problemas con las afectaciones por envejecimiento, según las pruebas para la clasificación por viscosidad realizadas al residuo (ver Tabla N° 1) y validados con los agrietamientos por fatiga frecuentes de las mezclas en obra, estos no se identifican claramente en la clasificación PG. Al modificar el asfalto con los distintos polímeros todos incrementaron el grado alto de temperatura a 76, manteniéndose el grado bajo en los asfaltos modificados con Elvaloy y caucho en -28, mientras que para el SBS aumentó a -22.

Respecto a las temperaturas intermedias se muestra en la Tabla 6 una comparación entre las calculadas a partir del PG, o sea, la semisuma entre la máxima y mínima temperatura más 4 °C, y la temperatura crítica a la fatiga, que corresponde a la temperatura exacta de cumplimiento del parámetro de control de fatiga.

Tabla N° 6. Comparación de las temperaturas intermedias

TIPO DE ASFALTO	BASE	SBS	ELVALOY	CAUCHO
Grado PG Superpave	64-28	76-22	76-28	76-28
Temp. Intermedias según Superpave, °C	22	31	28	28
Temp. Intermedias críticas a la fatiga, °C	14,5	16,1	15,0	13,7

Fuente: elaborado por los autores

Puede notarse que según Superpave existe una variación en dichas temperaturas, especialmente entre el asfalto base de Esmeraldas y los modificados; sin embargo, de acuerdo a las temperaturas críticas a la fatiga la variación es extremadamente pequeña, en la práctica no significativa. Este comportamiento de las temperaturas críticas es parecido al obtenido por investigadores en Chile (Araya et al, 2012).

En la Figura N° 1 puede verse que los asfaltos modificados con polímeros en estado original presentan para todos los módulos un ángulo de fase menor que el asfalto base de Esmeraldas. Esto permite considerar que todos los asfaltos modificados estudiados tendrán un mejor comportamiento que el asfalto base ante esta falla. Se destaca que el asfalto modificado con SBS es el que mejor se comporta, seguido del modificado con caucho.

Luego del envejecimiento RTFO, como se muestra en la Figura N° 2, se mantiene la tendencia de los asfaltos modificados de comportarse de mejor manera debido a que presentan menores δ y mayores G^* para frecuencias bajas. Los mejores comportamientos también se observan en los asfaltos modificados con SBS y con caucho.

Puede observarse Figura 3 que existieron cambios considerables en el comportamiento de los diferentes asfaltos respecto a la magnitud tanto de G^* como de δ , encontrándose todos los diagramas muy cercanos. Por esta razón se hace difícil establecer una

calificación respecto al comportamiento a la fatiga en los mismos, aunque el asfalto modificado con SBS presenta ligeramente menores δ , lo que sin dudas sería beneficioso. De hecho, el estudio de la fatiga es uno de los más complejos y aún en la actualidad existen discrepancias para su determinación y comprensión (Villegas et al, 2017).

CONCLUSIONES

El asfalto procedente de la refinería de Esmeraldas clasifica por grado de viscosidad en su estado original como un AC-30, sin embargo después de haber sido envejecido en el horno RTFO, no cumple con las exigencias de la normativa ASTM, lo que implica un posible comportamiento inadecuado en obra luego del proceso de mezclado, transporte y compactación. Esta situación no se detecta en la clasificación por grado de desempeño Superpave, donde el mismo asfalto califica como PG 64-28, que sería un grado excelente para nuestras condiciones climáticas.

Los asfaltos modificados en general cumplen las exigencias ASTM correspondientes. Al aplicar la clasificación PG se obtuvo que el asfalto modificado tanto con Elvaloy como con caucho clasifica como PG 76-28, indicando un mayor rango de temperaturas de trabajo que el asfalto modificado con SBS que clasifica como PG 76-22. Si bien en los tres casos se obtuvo una mejora significativa en el grado alto de temperatura, no ocurre lo mismo respecto al grado bajo, donde para el Elvaloy y caucho se mantuvo

el valor de -28 y para el SBS aumentó a -22. En relación a las temperaturas intermedias, la crítica a la fatiga no tuvo mayor variación al emplear los diferentes modificadores, por lo que pretender emplear los mismos para mejorar el comportamiento a la fatiga, problema común en Ecuador, sería un error.

Los diagramas de Black indican que los asfaltos modificados tienen mejores comportamientos ante las deformaciones plásticas que el asfalto de Esmeraldas, ya que en general las exigencias del Superpave podrán cumplirse con menores ángulos de fase. El polímero SBS fue el que mostró mejores resultados. Por otra parte el comportamiento a la fatiga no mejora sustancialmente con el empleo de los polímeros estudiados ya que el rango de variación obtenido en los diagramas es muy estrecho a temperaturas próximas a la intermedia luego del PAV.

AGRADECIMIENTOS

El apoyo de la Universidad Católica Universidad Católica Santiago de Guayaquil, y los participantes del proyecto.

REFERENCIAS

AASHTO M 320-10. (2010). Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder, Washington D.C., American Association of State Highway and Transportation Officials.

Araya F., González A., Delgadillo R., Wahr C., García G. y Zúñiga R. (2012). Caracterización reológica avanzada de betunes tradicionales y modificados utilizados actualmente en Chile. *Revista Ingeniería de Construcción*. (Vol. 27 N°3, p. 198-210)

ASTM D3381/D3381M-12. (2012). Standard Specification for Viscosity-Graded Asphalt Cement for Use in Pavement Construction, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012. Recuperado de www.astm.org

ASTM D-5841. (2001). Standard Specification for Type III Polymer Modified Asphalt Cement for Use in Pavement Construction, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2001. Recuperado de www.astm.org

ASTM D-5892 (2001). Standard Specification for Type IV Polymer-Modified Asphalt Cement for Use in Pavement Construction, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2001. Recuperado de www.astm.org

ASTM D-6114 (2001). Standard Specification for Asphalt-Rubber Binder, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2001. Recuperado de www.astm.org

King, G., Anderson, M., Hanson, D. & Blankenship, P. (2012). Using Black Space Diagrams to Predict Age-Induced Cracking. RILEM 2012 Cracking Conference, pp. 1-11. Delft. The Netherlands.

- Querol, N., Del Pozo, J., Pérez, A., Felipo, J.; García, J. y Potti J. (2009). *Envejecimiento de los ligantes bituminosos empleados en mezclas recicladas en caliente con muy altas tasas*. Proyecto Fénix, Monografía 1. Madrid. Pp 97-119.
- Vila, R. (1999). Tramo experimental con mezclas asfálticas mejoradas con polímero en el carril exclusivo del trolébus de la ciudad de Quito. *10mo Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto* (Pp.361-369). Sevilla: Asociación Española de la Carretera.
- Villegas, R. E., Baldi, A., Aguiar, J.P. & Loría, L.G. (2017). Análisis reológico de fatiga en asfaltos a temperaturas intermedias de servicio. Trabajo presentado en el XIX CILA, Medellín, Colombia.
- Walker, D. (2014). The Benefits of Modified Asphalts. *ASPHALT. The Magazine of the Asphalt Institute*. Volumen 29. Issue 1, p.p. 13-19. USA.