

Evaluación de asfaltos modificados en laboratorio con distintos polímeros

Ing. Luis Guillermo Loría Salazar
Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos
Estructurales (LanammeUCR)

Resumen

La modificación de asfaltos con polímeros de las más diversas variedades y procedencias es una de las tendencias más importantes de la industria de construcción de carreteras actual.

Los aportes de los polímeros a la mejora de las propiedades reológicas de los asfaltos han sido ampliamente estudiados. Sin embargo, cada vez que sale al mercado un nuevo producto, es fundamental realizar un análisis exhaustivo de las mejoras que podría provocar dicho polímero al asfalto.

La metodología de clasificación de asfaltos por grado de desempeño se ha constituido en la herramienta primordial de análisis de asfaltos, no obstante, en el caso de asfaltos modificados su rango de aplicación es muy limitado, tal y como se ha determinado hasta ahora. El principal problema que ha habido es que asfaltos modificados con distintos polímeros pueden tener el mismo grado de desempeño, sin poder discernir entre los aportes individuales de cada polímero, que podrían llevar a la escogencia de alguno que maximice las características del asfalto modificado.

Actualmente, los protocolos establecidos en el NCHRP 9-10, están implementando una serie de nuevos ensayos que podrán ponderar cuál, de varios modificadores provoca mejores condiciones reológicas al asfalto. Este aporte de NCHRP 9-10 es fundamental para determinar con qué polímero se desempeñará mejor el ligante, dado que en muchos casos, el criterio para escoger un modificador se basa solamente en criterios financieros, dado un mismo grado de desempeño. Con esta actualización a la tecnología, se podrán hacer análisis financieros considerando un tiempo de vida útil mayor de la carretera.

Este estudio nació con el objetivo principal de analizar distintos polímeros y su efecto sobre asfaltos base tipo AC-20 y AC-30, y determinar el grado de desempeño que tiene cada uno de ellos, en distintas concentraciones de polímero. Esta información puede ser de gran relevancia para constructores de carreteras para escoger adecuadamente entre las opciones que tiene el mercado. El resultado de la primera etapa del proyecto se encuentra en el reporte LM- PI - PV- IN- 18 – 02 a.

En esta segunda etapa, se presentan los resultados del análisis de un asfalto base tipo AC-30, mezclado con 6 modificadores diferentes, y luego se efectuará la clasificación del producto final mediante la clasificación por grado de desempeño primeramente, y posteriormente, mediante los ensayos indicados por el protocolo NCHRP 9-10: creep, fatiga y viscosidad de corte cero (Zero Shear Viscosity, ZSV, por sus siglas en inglés).

Palabras clave: asfalto modificado, polímero, pavimento, ligante asfáltico.

Abstract:

The modification of asphalts with polymers from different varieties and origins is one of the most important tendencies of the present highways construction industry.

Polymer contributions to rheological properties improvement of the asphalts have been extensively studied. However, each time that a new product is on the market, it is necessary to carry out an exhaustive analysis of the improvements that the polymer would be able to cause to the asphalt.

The asphalts classification methodology by performance has been constituted in the fundamental tool of analysis of asphalts; however, in the case of modified asphalts its rank of application is very limited, just as has been determined up to now. The main problem is that modified asphalts with different polymers can have the same performance, without being able to discern among the individual contribution of each polymer that would lead to choose the polymer that maximize the characteristics of the modified asphalt.

Today, the protocols established in the NCHRP 9-10, are implementing a series of new trials that will be able to consider which, of various modifying agents, can cause better rheological asphalt conditions. This NCHRP 9-10 contribution is fundamental to determine with what polymer will be the binder performed better, given that in many cases, the selection of a modifier is based only in financial criteria, with a same performance. With this technology update, it will be able to do financial analysis considering how useful it will be to the highway.

This study was born with the main objective to analyze different polymers and its effect on base asphalts AC-20 and AC-30, and to determine the performance that each one has, with different polymer concentrations. This information can be of great importance for highways builders to choose adequate options that the market has. The result of the first phase of this project can be found in the report LM- PI - PV- IN- 18 – 02 a.

In this second phase, the results of the analysis of the AC - 30 asphalt are presented, mixed with 6 different modifying agents, and the classification of the final product will be performed by means of the classification by performance primarily, and subsequently, by means of the trials indicated by the protocol NCHRP 9-10: creep, fatigue and zero cut viscosity (Zero Shear Viscosity, ZSV, by its acronyms in English).

1.1 Objetivos:

1.1.1 Objetivo general

- Implementar los ensayos reológicos de creep, fatiga y viscosidad de corte cero (Zero Shear Viscosity) para ligantes asfálticos modificados, de acuerdo con lo establecido en los protocolos del NCHRP 9-10, para establecer una normativa costarricense en esta materia.

1.1.2 Objetivos específicos

- Determinar, según los ensayos mencionados, para un ligante base tipo AC-30 y 6 modificantes, cuál combinación generará el ligante con mejor desempeño a fatiga y deformación permanente.

1.2 Esquema metodológico:

En la figura 1 se presenta el esquema metodológico del proyecto y posteriormente, se efectuará el análisis de la figura 2

Los ensayos indicados se efectuarán a cada uno de los ligantes producidos a partir de la mezcla del asfalto AC-30 base y cada modificador indicado, en la siguiente proporción: AC-30 + 1.5% EGA, AC-30 + 2.0% SBS, AC-30 + 3.0% PLASTÓMERO, AC-30 + 2.0% UPS-65, AC-30 + 12.0% NEGRO DE HUMO y AC-30 + 3.0% ASFALTITA.

La escogencia de estos modificadores se basa en que representan una muestra adecuada de la gran variedad que se encuentran en el mercado.

2. Marco teórico

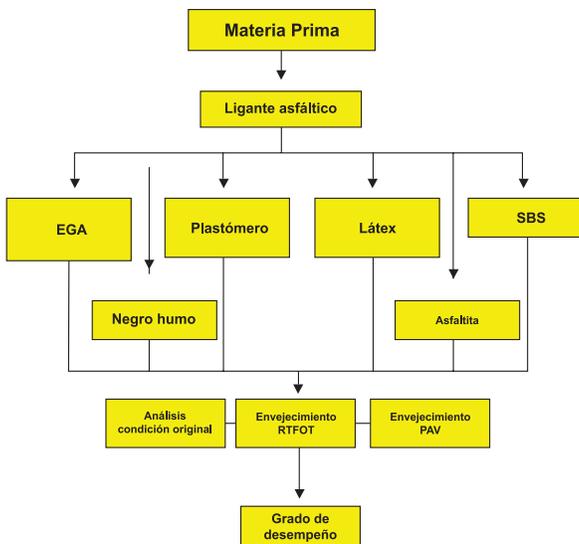
2.1 Evaluación de parámetros de comportamiento de ligantes actuales:

2.1.1 Deformación permanente

Para evaluar el efecto de la modificación a los ligantes, se requiere de algunos indicadores. Estos, son generalmente derivados del modelo recomendado por el programa SHRP. El modelo, definido en la siguiente ecuación incluye una deformación inicial ($\epsilon_{p(1)}$) y un factor de pendiente (S).

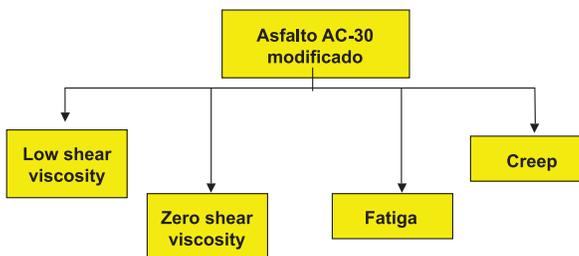
Esquema metodológico

Figura 1



Esquema metodológico para la segunda etapa del proyecto

Figura 2



$$\text{Log } \epsilon_p = \text{log } \epsilon_{p(1)} + S \text{ log } N \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde,

ϵ_p = deformación permanente total acumulada.

N = número de ciclos.

Se considera que la deformación permanente inicial puede ser afectada por muchos factores que no están relacionados con el ligante, y a su vez, este efecto es tomado por la deformación total, la cual es utilizada para comparar mezclas. Es por esto, que se considera que el valor de la pendiente logarítmica (S) se considera como un parámetro más representativo en el estudio del aporte de los ligantes a la resistencia a la deformación permanente de la mezcla. Finalmente, es importante resaltar que los estudios han encontrado bajas correlaciones entre la tasa promedio de acumulación de deformación de la mezcla (S) y el parámetro $G^*/\text{sen}\delta$.

2.1.2. Fatiga

Se observó también una carencia de correlación entre la resistencia a fatiga de las mezclas (cuando la rigidez decrece al 50% de la rigidez inicial) y el parámetro $G^*/\text{sen}\delta$.

Debido a que tanto el parámetro $G^*/\text{sen}\delta$, así como $G^*\text{sen}\delta$ no explican adecuadamente los fenómenos de resistencia a la deformación permanente y al agrietamiento por fatiga respectivamente, se ha buscado desarrollar mejores ensayos para la determinación de estos tipos de daño.

2.2. Desarrollo de nuevos ensayos para la caracterización de los ligantes:

2.2.1. Ensayo de deformación permanente

Con el objetivo de encontrar un parámetro que describiera el papel de los ligantes en la deformación permanente de la mezcla con mayor efectividad que $G^*/\text{sen}\delta$ se planteó lo siguiente:

1. Las deformaciones en los ligantes son mucho mayores que las deformaciones a las que se someten los ligantes en el Reómetro Dinámico de Cortante (DSR).

2. La carga cíclica con una completa reversión de esfuerzo o deformación no es apropiada para cuantificar la contribución del ligante a la resistencia a la deformación plástica ocasionada por cargas cíclicas irreversibles (conocida como deformación cíclica no reversible ó creep repetido).

La primera hipótesis se debe a que estudios previos han indicado que los ligantes modificados varían significativamente en su dependencia a la deformación. Además, se ha encontrado que el comportamiento reológico de la mezcla es muy susceptible al nivel de deformación. La segunda hipótesis se relaciona con el concepto de disipación de energía.

Se demostró que a altas temperaturas (70°C), los ligantes son muy sensibles a la deformación únicamente para niveles de deformación muy altos (exceden el rango razonable de 50%). Por tanto se concluyó que la sensibilidad a la deformación no puede ser utilizada para explicar los resultados de los ensayos de deformación permanente como se muestra en la figura 3, durante la carga cíclica reversible únicamente la energía total disipada puede ser estimada.

El mecanismo de deformación, tal y como ocurre en campo, no incluye cargas reversibles que lleven el material del pavimento a una deformación de cero. Como se muestra en la figura 4, la deformación es en realidad un mecanismo de creep repetido con pulsos de carga sinusoidal. En este caso, la capa de pavimento asfáltico no es forzada a una deflexión de cero, pero se recupera de alguna deformación debido a la energía elástica almacenada en el material de la capa. Bajo este tipo de carga, la energía es disipada en amortiguación (también llamado visco-elasticidad o histéresis) y en flujo permanente. La energía de amortiguamiento es en su mayoría recuperable, pero requiere de tiempo para ser utilizada efectivamente. La energía relacionada con el flujo permanente se pierde. Se cree que la parte permanente de la energía disipada es el mayor contribuyente de la resistencia a la deformación permanente de mezclas y pavimentos asfálticos. El problema principal con los métodos de carga cíclica reversible utilizados actualmente es la incapacidad de distinguir entre estos dos mecanismos que resultan en la disipación de energía.

Figura 3

Concepto utilizado en la derivación de $G^*/\text{sen}\delta$

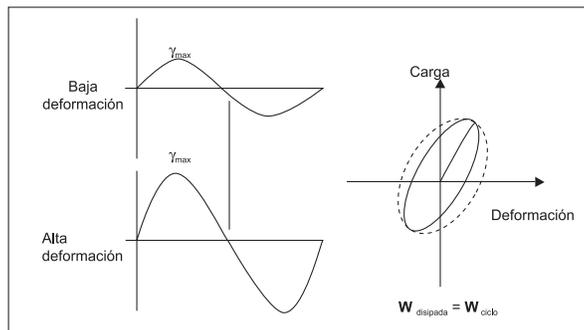
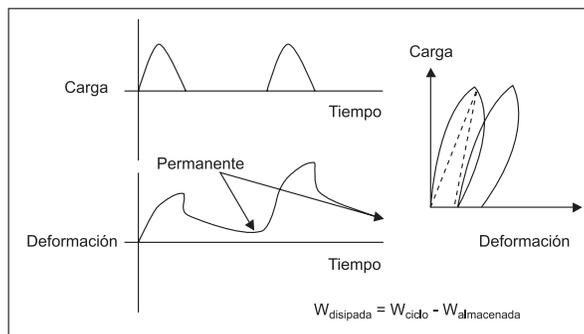


Figura 4

Concepto mejorado de energía disipada



Por esta razón se inició un proceso de ensayo de creep repetido con el DSR. Se observó de los resultados, una clara distinción entre la deformación permanente acumulada de los ligantes, lo cual no pudo ser identificado usando el parámetro $G^*/\text{sen}\delta$.

También, se da una inversión en el ranking de los parámetros, pues hay una capacidad de los ligantes de recuperarse bajo las condiciones de carga. Esta recuperación, sin embargo, no es detectada por $G^*/\text{sen}\delta$ debido a que el parámetro no puede distinguir entre la energía total disipada y la energía disipada por flujo permanente.

2.2.2. Ensayo de fatiga

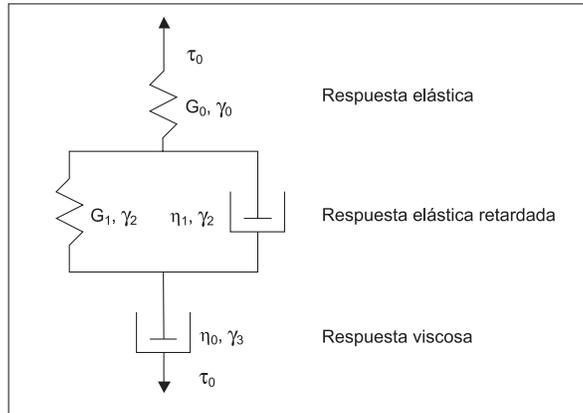
Como se discutió anteriormente, se ha encontrado que el parámetro $G^*\text{sen}\delta$ no correlaciona bien con el daño acumulado a la fatiga, para el ensayo de la viga a fatiga bajo condiciones de deformación controlada. Se considera que la razón de esto es que el parámetro $G^*\text{sen}\delta$ se mide en el rango visco-elástico lineal, utilizando deformaciones bajas. Hay un problema fundamental con este enfoque pues no es de esperarse que represente el efecto de cargas cíclicas y los cambios en las propiedades del ligante sometido a daño.

El esfuerzo para desarrollar un nuevo ensayo se enfocó en simular el fenómeno de la fatiga en un ensayo de fatiga para el ligante. El DSR se utilizó para realizar lo que se conoce como ensayo de barrido temporal. El ensayo brinda un método simple de aplicar ciclos repetidos de esfuerzo o deformación a distintas temperaturas y frecuencias de carga. También se encontró una buena correlación entre los resultados de este ensayo y el de fatiga para mezclas asfálticas.

2.3. Selección de nuevos parámetros:

2.3.1. Parámetro para deformación permanente

Basándose en los análisis anteriores del ensayo de creep repetido, se determinó que el ensayo de creep y recuperación incrementaría sustancialmente la estimación de la resistencia a la acumulación de la deformación permanente en ligantes y su contribución a la resistencia al ahuellamiento en mezclas asfálticas. En la derivación de un nuevo parámetro se utilizó el modelo que representa la tasa de creep secundaria como función del número de ciclos de carga (Ecuación 1).



Apesar de que este concepto ha sido utilizado en mezclas asfálticas, no había sido aplicado a ligantes asfálticos. Además, experimentalmente se ha demostrado que la tasa de creep secundaria en ligantes asfálticos es una función directa del número de ciclos y por tanto no se necesita de la transformación logarítmica. El siguiente modelo ha probado ser muy confiable:

$$\varepsilon_a = I + S \times N \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde,

ε_a = deformación acumulada permanente.

I = intercepto con el eje de la deformación permanente (valor aritmético, no logarítmico).

N = número de aplicaciones de carga.

S = pendiente de la porción lineal, de la relación logarítmica.

Es difícil utilizar el parámetro de tasa de creep (S) como un parámetro de especificación puesto que es un parámetro experimental que se ve afectado por pocos atributos de ensayo como esfuerzo, tiempo de carga y número de ciclos. Una mejor elección para especificar un parámetro es utilizar modelos reológicos que combinen comportamientos fundamentales para entender el desempeño del material. El modelo de "cuatro parámetros" (Burgers) ha demostrado una buena representación del comportamiento del ligante.

Este modelo es una combinación del Modelo Maxwell y un Modelo Voigt. La deformación total a cortante en el tiempo se expresa de la siguiente manera:

$$\gamma(t) = \gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 = \frac{\tau_0}{G_0} + \frac{\tau_0}{\tau_1} (1 - e^{-t/\tau_1}) + \frac{\tau_0}{\eta_0} t \quad \text{Ecuación 3}$$

normalizando la deformación al esfuerzo aplicado, se puede definir la siguiente ecuación de “creep compliance”, $J(t)$, en términos del componente elástico (J_e), el elástico retardado (J_{de}) y el componente viscoso (J_v):

$$J(t) = J_e + J_{de} + J_v \quad \text{Ecuación 4}$$

2.3.2. Parámetro para fatiga

A pesar de que hay distintos modos de carga que pueden ser usados en los ensayos de fatiga, un indicador de daño por fatiga debería ser independiente del modo de carga. Debería dar un indicador consistente del nivel y el progreso de daño en el material, en términos de cambios en el comportamiento mecánico bajo cualquier condición de carga.

La definición de falla por fatiga usada comúnmente en mezclas asfálticas es la pérdida del 50% de la rigidez inicial. Esta definición es arbitraria, sin embargo, no permite la evaluación del mecanismo mediante el cual un material responde a la entrada de energía durante la historia de carga para diferentes tipos de carga. Por tanto, los investigadores se han enfocado en utilizar el concepto de energía disipada para explicar el daño por fatiga en mezclas asfálticas. Por muchas décadas los investigadores han utilizado la pérdida de módulo como indicador de la resistencia a la fatiga por la relación entre este módulo ($G^* \text{sen} \delta$) y la energía disipada por ciclo. El éxito de este acercamiento ha sido cuestionado, sin embargo, este parámetro brinda diferentes resultados para distintas condiciones de carga. Avances en la investigación de la fatiga han demostrado que un mejor indicador es la tasa de cambio de energía disipada por ciclo de carga.

2.3.2.1. Tasa de cambio de energía disipada

Ghuzlan y Carpenter definen la tasa de energía disipada como:

$$\frac{\Delta DE}{DE} = \frac{W_i - W_{i+1}}{W_i} \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde,

W_i = energía total disipada en el ciclo i .

W_{i+1} = energía total disipada en el ciclo $i+1$.

Graficando los valores de la tasa de energía disipada contra los ciclos de carga, dan una curva que puede ser utilizada para determinar la vida a fatiga (N_p) identificando el cambio brusco en esta tasa. El problema con este enfoque es que los puntos están muy dispersos, por lo que se hace difícil determinar un valor de N_p .

2.4. Zero shear viscosity (ZSV):

El uso del ZVR como parámetro de especificación es un parámetro mucho más fundamental que $G^*/\text{sen} \delta$ puesto que evalúa el desempeño de los ligantes asfálticos modificados con mayor precisión. ZVR muestra que para ligantes modificados con elastómeros, el grado del ligante puede ser subestimado hasta 2 grados en comparación con otros ligantes. Para evaluar la calidad de estos ligantes modificados, las agencias han empezado a especificar parámetros tales como ángulo de fase y recuperación elástica en lo que se ha venido a conocer como las especificaciones SHRP.

2.4.1. Determinación de la temperatura alta “verdadera” de grado de desempeño

La determinación de la “verdadera” temperatura alta del grado de desempeño involucra la determinación del ZVR a incrementos de temperatura de 6 grados centígrados. Usando interpolación se determina la “verdadera” temperatura alta del grado de desempeño. Conceptualmente, el marco de la especificación es idéntico al utilizado en los procedimientos actuales, con la excepción que en vez de evaluar una única frecuencia, se usa una respuesta completa a la frecuencia.

2.4.2. Conclusiones de estudios del ZSV

- La determinación del ZSV de ligantes asfálticos puede realizarse de distintas maneras. Sin embargo, un procedimiento que involucre el análisis de η' contra ω permite un enfoque fácil al problema.

Figura 6

Polímero EGA



•Parámetros de especificación equivalentes a ZVR corresponden a 100 P-s y 250 Pa-s para las condiciones original y RTFO.

3. Caracterización de polímeros

3.1. Polímero tipo EGA:

El polímero tipo EGA es del tipo Etilen Glicidil Acrilato, el cual se incorporó directamente al asfalto y se mezcló durante 2 horas a 150°C. Luego de esto, se dejó en el horno a 150°C por 24 horas.

Se dosificó al 1.5% del peso del asfalto. La figura 6 muestra al polímero citado.

3.2. Elastómero:

Se utilizó un elastómero del tipo SBS (estireno, butadieno, estireno). El fabricante recomienda que la temperatura normal de operación deber ser entre 157 y 163°C y debe tenerse agitación ya sea mecánica o con bombas de recirculación. No se debe permitir que la temperatura de almacenaje exceda los 204°C y no debe exceder de 193°C por más de dos horas.

3.3. Plastómero:

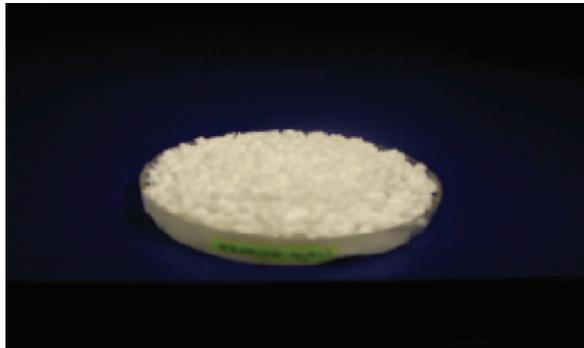
El plastómero utilizado es un olefin. Fue diseñado para usarse como un modificador de alta temperatura. Tiene baja viscosidad, facilita la trabajabilidad de la mezcla, y es compatible con un alto grado de asfaltos. La funcionalidad de este polímero radica en que forma asociaciones moleculares polares con las moléculas del asfalto. La temperatura de ignición súbita es superior a 204°C.

El proceso de mezclado consiste en añadir el asfalto a 150°C, y se deja en recirculación durante 2 horas y 30 minutos.

3.4. Látex:

Este látex corresponde a un SBR aniónico, cuyas principales características se indican a continuación:

Contenido de sólidos	69
pH, (+/- 0.5)	10.0
Viscosidad (Brookfield)	1500



El proceso de mezclado consiste en añadir el látex lentamente a una temperatura de 150°C al polímero, Este proceso tarda unas 2 horas para 9 kg de asfalto. Luego se debe dejar en recirculación durante un período no menor de 3 horas y 30 minutos. Se debe tener cuidado al añadir por estar el látex diluido en una solución acuosa.

3.5. Negro de humo:

El negro de humo es un compuesto utilizado para incrementar resistencia, durabilidad y desempeño en general de ligantes asfálticos.

Comparación de resultados de grado de desempeño

Tabla 1

Polímero	Grado de desempeño resultante	Temperatura alta real	Temperatura intermedia real
AC-30 base	40-13	72.52	12.09
EGA	76-19	79.16	15.28
SBS	76-22	78.78	20.51
Plastómero	76-	79.94	-
Látex	70-22	74.94	18.14
Negro Humo	88-	92.79	-
Asfaltita	76-22	78.07	19.48

Está formado principalmente de componentes de petróleo. El aceite es bombeado a un horno especialmente diseñado, donde es calentado por encima de 2000°F. Este proceso quiebra el aceite para producir un flujo de gas con polvo negro de carbón. El gas pasa a través de una serie de filtros, donde el negro de humo es separado de los gases. El polvo negro de carbón es luego unido a agua para crear gránulos de mayor tamaño, los cuales son pasados a través de una secadora y posteriormente empacados.

Figura 8 Comparación de Creep en ligantes modificados

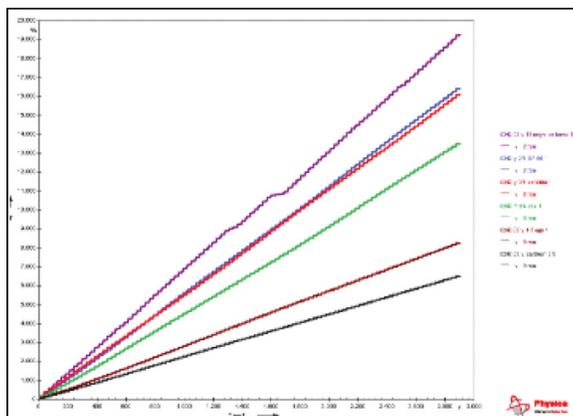


Figura 9 Comparación de fatiga en ligantes modificados

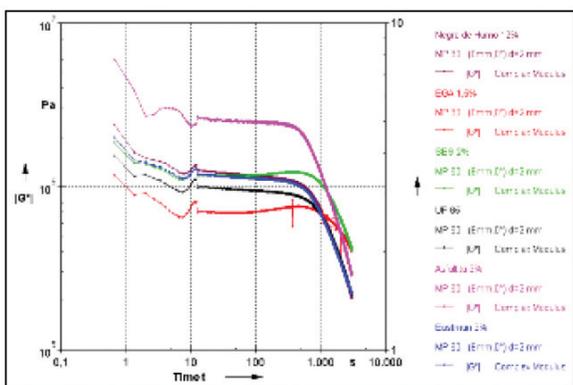


Tabla 2 Comparación de recuperación elástica para ligantes modificados

Asfalto base	Modificante	Ciclos para la falla	Deformación Acumulada (uS)
AC-30	Asfaltita 3%	700	15.8
AC-30	Negro Humo 12%	600	19.4
AC-30	Plastómero 2,0%	800	6.4
AC-30	EGA 1,5%	1100	7.6
AC-30	Látex 2,0%	900	16.5
AC-30	SBS 2,0%	1000	12.8

3.6. Asfaltita:

La asfaltita es una roca de color mate, perteneciente a la variedad grahamita, que contiene un 50 – 60 % de bitumen y su carga mineral no sobrepasa del 40%. La

composición química de la parte orgánica es la siguiente (% en peso):

Asfaltenos	60 – 65
Resinas	20 – 25
Aceites	10 – 20

4. Caracterización del ligante asfáltico

4.1 Comparación de resultados entre todos los polímeros:

De la tabla anterior se puede concluir que la mayoría de los polímeros analizados generan grados de desempeño superior de 76, salvo el UP-70. Lo cual es una mejora importante a las cualidades originales del ligante asfáltico base AC-30 analizado.

En el caso del negro de humo, el empleo de un porcentaje de modificador del 12%, se hizo como una primera aproximación. Dicho porcentaje deberá reducirse en el futuro, para determinar exactamente cuál es el porcentaje que determina la obtención de un PG-70 y un PG-76.

5. Resultados de ensayos de creep, fatiga, recuperación elástica y viscosidad de corte cero (ZSV)

De acuerdo con los protocolos de ensayo indicados, se efectuó el análisis de cada ligante, con base en los nuevos ensayos reológicos que propone NCHRP 9-10.

5.1. Resultado de ensayo de creep:

Vease figura 8.

5.2. Resultado del ensayo de fatiga:

Vease figura 9.

5.3. Comparación de resultados de los ensayos de fatiga y creep:

De la tabla 2 se muestra que el EGA y el SBS, presentan un comportamiento a fatiga mayor. En cuanto al ensayo de deformación permanente los asfaltos modificados con mejor desempeño son el Plastómero y el EGA, al haber obtenido las deformaciones menores.

En cuanto al ensayo de deformación elástica es notorio que el EGA, tiene una capacidad de deformación elástica muy superior a la de los otros polímeros.

5.4 *Ensayo de viscosidad de corte cero (ZSV):*

Los resultados de ensayo de viscosidad de corte cero se presentan en la figura 10 para la asfaltita. El ensayo se hizo en todos los ligantes analizados.

5.5 *Ensayo de viscosidad de corte bajo (LSV):*

De la figura 11 se puede concluir que hay una significativa ventaja en el uso del nuevo criterio para determinar la temperatura de mezclado y compactación en laboratorio para asfaltos modificados, pues se logra bajar de 185 grados Celsius a 149 grados Celsius.

6. Conclusiones

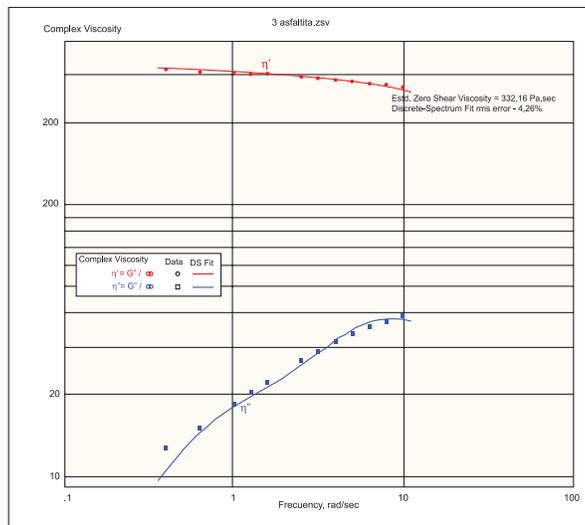
- De los resultados obtenidos se ha podido demostrar, que la clasificación de ligantes asfálticos modificados por el método de grado de desempeño no es suficiente para determinar, cuál tendrá un mejor desempeño en el proyecto, dadas las condiciones de tránsito y temperaturas propias de éste.
- La implementación de los ensayos de desempeño ha sido exitosa para determinar, en el caso particular de los ensayos de creep y fatiga, cuáles ligantes tienen un mejor desempeño. Sin embargo, en el caso particular del ensayo de fatiga se debe realizar el cálculo de la energía disipada por ciclo de carga, efectuar el gráfico correspondiente y calcular el valor N_p .
- De momento, el ligante que está determinando un mejor desempeño en los ensayos estudiados en el polímero tipo EGA.
- Para finalizar esta primera etapa, se debe determinar el valor G_v y la curva de viscosidades de corte cero para cada polímero analizado.
- Con base en los resultados de ensayo, se deben analizar mezclas asfálticas patrón para determinar el efecto de las propiedades de desempeño de los ligantes asfálticos estudiados, respecto de las propiedades de la mezcla asfáltica. Con base en este otro experimento, se podrán calibrar modelos de desempeño a fatiga y deformación permanente, de mezclas asfálticas, modificadas con diversos polímeros.

7. Bibliografía

1. Bahia et al., Development of binder specification parameters based on characterization of damage behavior. University of Wisconsin, 2000.
2. D'Angelo, John. Innovations in testing. FHWA, 2003.
3. Visscher et al., Practical test methods for measuring the zero shear viscosity of bituminous binders. Zurich, 2003.
4. Gaspar-Rosas, Abel. Reología de ligantes asfálticos. LANAMME, 2002.

Resultado del ensayo de ZSV para la asfaltita

Figura 10



Curva de viscosidad para determinar las temperaturas de compactación y mezclado para ligantes modificados

Figura 11

