



REPORTE DE INVESTIGACIÓN LM- PI - PV- IN- 18 – 02 B

Análisis reológico de asfaltos modificados mediante el protocolo NCHRP 9-10

INFORME PARCIAL

FASE 2

Investigador principal

Ing. Guillermo Loría

Investigador asociado

Quím. Luis Diego Moreira

Ing. José Pablo Aguiar

Agosto 2004

EVALUACIÓN DE ASFALTOS MODIFICADOS EN LABORATORIO CON DISTINTOS POLÍMEROS

1. INTRODUCCIÓN

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 modificante 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 de la carretera mayor.

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).

1.1. OBJETIVOS

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

1.2. ESQUEMA METODOLÓGICO

A continuación se presenta el esquema metodológico de la segunda fase del proyecto:

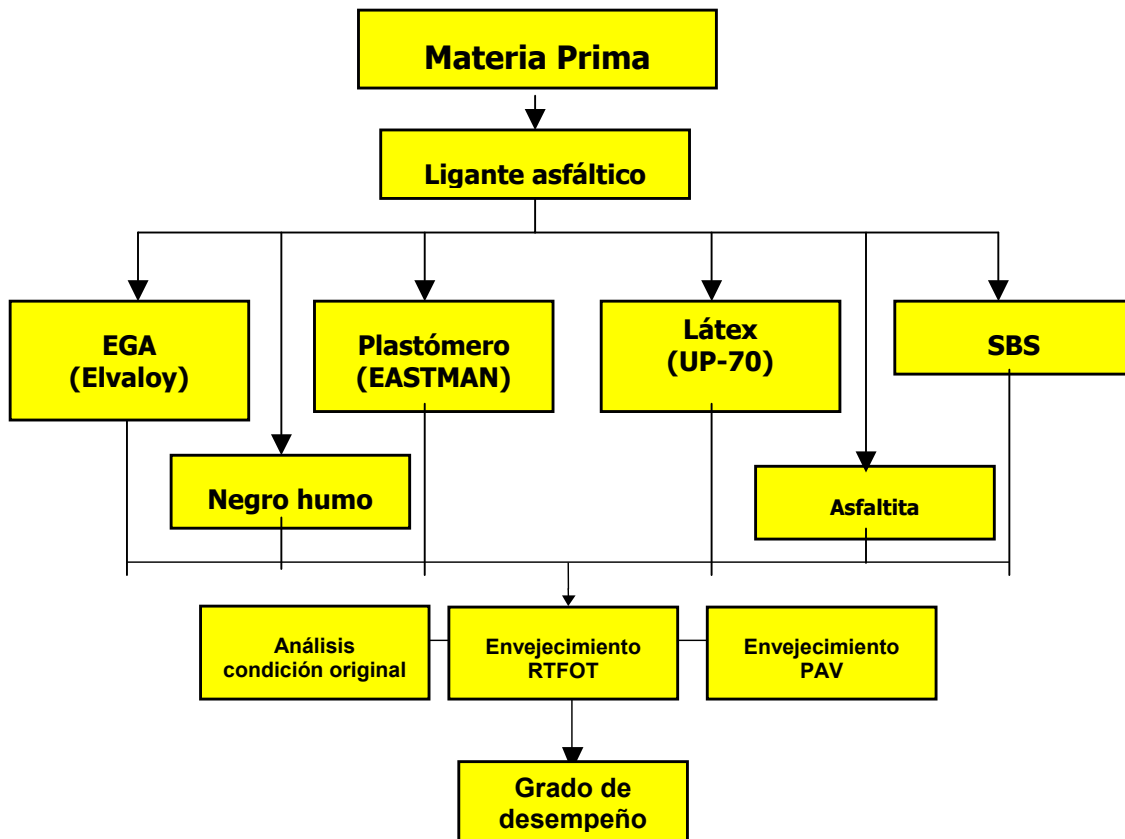


Figura 1: Esquema metodológico

Posteriormente, se efectuará el siguiente análisis:

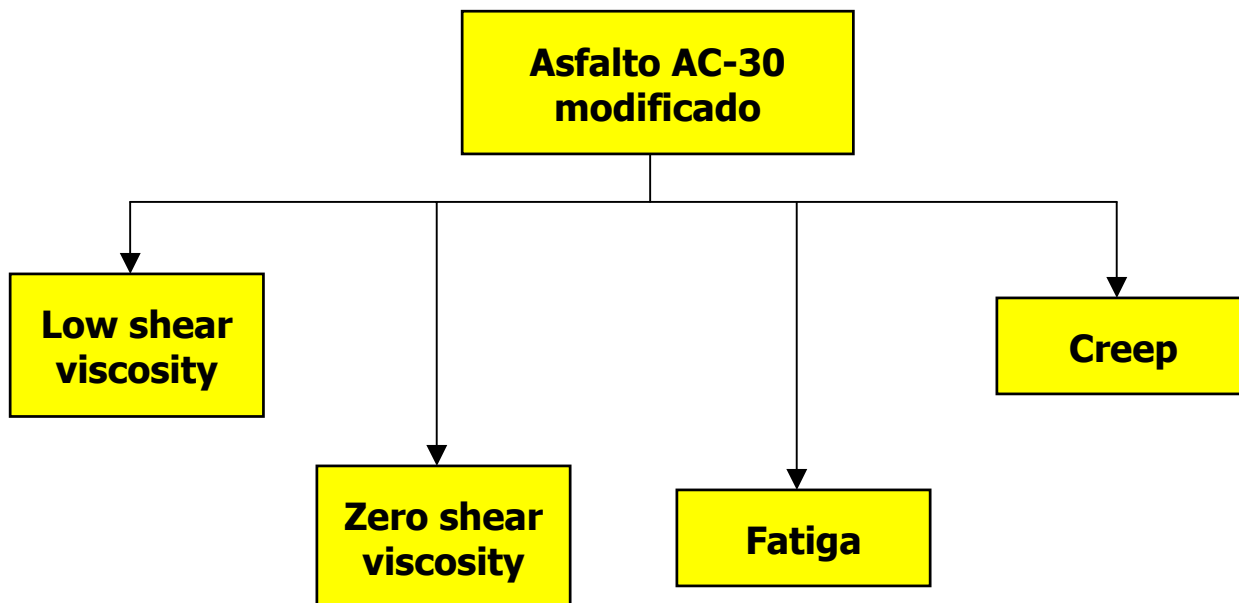


Figura 2: Esquema metodológico para la segunda etapa del proyecto

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% EASTMAN, AC 30 + 2.0% UP70, 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.

1.3. UBICACIÓN DE AVANCE DEL PROYECTO

La etapa experimental No. 2 del proyecto se encuentra totalmente finalizada. Solo restan algunos cálculos adicionales.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. FACTORES DE IMPORTANCIA EN REOLOGÍA DE LIGANTES ASFÁLTICOS

Viscosímetro rotacional (RV)

El viscosímetro rotacional se usa en Superpave para determinar la viscosidad del ligante asfáltico a temperaturas de construcción (arriba de 100°C), para asegurar que el ligante es lo suficientemente fluido para bombearlo y mezclar. La mayoría de los ligantes asfálticos tienen un comportamiento newtoniano y tienen una respuesta viscosa a altas temperatura. Una medida de viscosidad es suficiente para representar la trabajabilidad del ligante. El RV es más recomendable para ligantes modificados en comparación con los viscosímetros capilares porque los últimos se pueden tapar impidiendo el flujo.

La viscosidad rotacional se determina midiendo el torque requerido para mantener una velocidad rotacional constante de 20 RPM de una propela, mientras está sumergida en el ligante asfáltico a una temperatura constante. El torque medido es directamente relacionado con la viscosidad del ligante, el viscosímetro determina y muestra este valor.

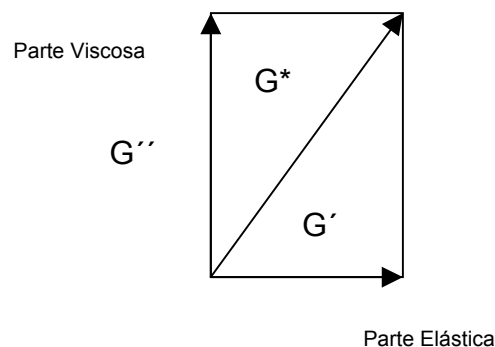
Para utilizar el principio de equiviscosidad para mezcla y compactación, se puede determinar la viscosidad para más de una temperatura y trazar la curva de temperatura-viscosidad.

Reómetro dinámico de cortante (DSR)

El reómetro dinámico de cortante se usa para caracterizar el comportamiento viscoso y elástico de ligantes asfálticos a temperaturas alta e intermedias de servicio. El DSR mide el módulo complejo de cortante G^* y ángulo de fase (δ) de ligantes asfálticos a la temperatura y frecuencia de carga.

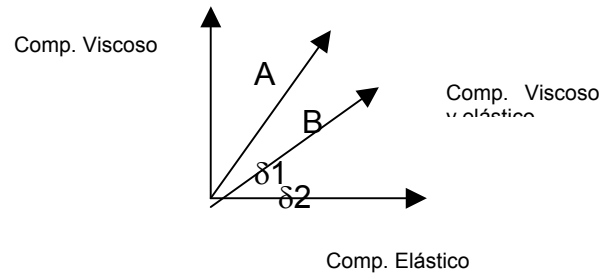
El módulo G^* se puede considerar como la resistencia total del ligante a la deformación cuando es sometido repetidamente a un esfuerzo cortante. El módulo G^* consiste de dos componentes: (a) módulo de almacenamiento G' o la parte elástica, y (b) módulo de pérdida G'' o la parte viscosa.

Ambos temperatura y frecuencia de carga afectan significativamente los valores de G^* y δ para los ligantes asfálticos. Ligantes asfálticos se comportan como sólidos elásticos a temperaturas bajas. Representado por la línea horizontal.



En otro caso, ligantes asfálticos se comportan como líquidos viscosos a temperaturas altas, mayores que las temperaturas de pavimentos, representado por la línea vertical.

Sin embargo a la temperatura normal de servicio la mayoría de los ligantes asfálticos se comportan como materiales visco-elásticos.



Cuando los materiales visco-elásticos son cargados, parte de la deformación es elástica (recuperable), y parte es viscosa (no recuperable). El DSR da una idea completa del comportamiento de los ligantes asfálticos a temperaturas del servicio midiendo ambos G^* y δ .

Se puede observar que el ligante B va a mostrar mayor deformación elástica y menor deformación viscosa que el ligante A, sin embargo ambos tienen el mismo G^* que es la longitud de la diagonal. Así se demuestra que es necesario el ángulo de fase para caracterizar a los ligantes asfálticos.

Parámetro de deformación plástica (rutting)

Para resistencia a la deformación plástica, se prefiere un alto módulo complejo G^* y un bajo ángulo de fase. Entre más alto el valor de G^* , más rígido es el ligante por lo que es más resistente a la deformación plástica. Entre más bajo sea el valor de δ , más elástico va a ser el ligante asfáltico.

El aumento de elasticidad hace que el ligante asfáltico sea más resistente a la deformación permanente. Las mediciones de alta temperatura para roderas son hechas en las muestras originales y envejecidos en el RTFO.

Los especímenes envejecidos en el RTFO representan al ligante asfáltico en las etapas tempranas de su vida, inmediatamente después de colocado y antes de que empiece el envejecimiento por oxidación de largo plazo. Como el envejecimiento de largo plazo aumenta la rigidez del ligante, continúa incrementando la resistencia a la deformación plástica. Por esto es crítica las pruebas antes del envejecimiento de largo plazo.

Se considera que la deformación plástica como un fenómeno de esfuerzo controlado y de carga cíclica para determinar el parámetro de deformación plástica para considerar para especificaciones. Con cada ciclo de carga de tránsito, se

hace trabajo para deformar la superficie del pavimento. Parte del trabajo es recuperado por el rebote elástico mientras que otro es disipado en la forma de deformación y calor. Para minimizar la deformación permanente, se tiene que minimizar la cantidad de trabajo disipado en cada ciclo de carga. Matemáticamente esto es:

$$W_c = \pi \times \sigma_o^2 / (G^* \sin \delta)$$

Donde,

W_c = trabajo disipado por ciclo de carga

σ_o = esfuerzo aplicado durante el ciclo de carga

G^* = módulo complejo

δ = ángulo de fase

Esto indica que el trabajo disipado por ciclo de carga es inversamente proporcional a $G^* \sin \delta$. Por esto ese parámetro fue escogido como la especificación de ligante asfáltico para Superpave. Entre más rígido más resistente a la deformación plástica, además al disminuir el ángulo de fase al ligante se vuelve más elástico incrementando su resistencia a la deformación plástica.

Parámetro de fatiga

Como la falla por fatiga se presenta principalmente en pavimentos delgados, se determina que se tiene que considerar como un fenómeno controlado por deformación unitaria. Matemáticamente el trabajo disipado por ciclo de carga se expresa:

$$W_c = \pi \times \epsilon_o^2 \times (G^* \sin \delta)$$

Donde ϵ es la deformación unitaria y las otras variables, como se explican anteriormente. Si G^* disminuye, el ligante se vuelve menos rígido y así se puede deformar sin producir grandes esfuerzos. También ligantes con ángulos de fase bajos van a ser más elásticos y así pueden volver a su posición original sin disipar trabajo. Entre menos la cantidad de energía disipada por ciclo, la menor posibilidad de que aparezca falla por fatiga. Por esto se utiliza el parámetro de $G^* \sin \delta$ para la especificación de Superpave.

Muestras envejecidas en el PAV se someten a pruebas en el DSR para probar la habilidad del ligante a resistir la falla por fatiga. Entre más se envejezca el ligante en su vida se vuelve más rígido, volviéndose más susceptible a la falla por fatiga. Entonces la muestras envejecidas en el PAV son sometidas a pruebas para determinar la condición más crítica del servicio.

Actualmente, la deformación permanente y el agrietamiento por fatiga son las principales formas en que fallan los pavimentos debido al incremento en el volumen de tránsito al que están sometidos los pavimentos. Para la predicción de estos efectos, generalmente se investiga el desempeño de la mezcla asfáltica, pero, a pesar de esto, estos tipos de daño se deben principalmente a deformación o deterioro del ligante asfáltico, lo cual ha sido menos estudiado.

En la especificación actual, el parámetro $G^* \sin \delta$ es usado para cuantificar la resistencia del ligante a la fatiga, mientras que $G^*/\sin \delta$ es usado para medir la resistencia a la deformación permanente. Estos parámetros se escogieron basándose en el concepto de energía disipada, aplicado al rango visco-elástico lineal. Sin embargo, es poca la información sobre el rol de la composición y propiedades reológicas del ligante en cuanto al daño bajo cargas aplicadas cíclicamente. Además, hay que considerar que el estudio de estos parámetros se realizó utilizando ligantes no modificados, por lo que su validez en ligantes modificados es dudosa.

2.2. EVALUACIÓN DE PARÁMETROS DE COMPORTAMIENTO DE LIGANTES ACTUALES

2.2.1. 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).

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

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 $G^*/\text{sen}\delta$.

2.2.2. 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.

2.3. DESARROLLO DE NUEVOS ENSAYOS PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LOS LIGANTES

2.3.1. ENSAYO DE DEFORMACIÓN PERMANENTE

Con el 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 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.

Ninguno de los ensayos de cargas cíclicas reversibles mostraron un adecuado potencial para diferenciar entre ligantes y correlacionar adecuadamente al desempeño de la mezcla. Por esto, se revisó el concepto de energía disipada y se inició con la obtención de nuevos parámetros. Se encontró que a pesar de que los métodos de carga cíclica reversible se pueden utilizar para estimar la energía total disipada durante en ciclo de carga, para materiales visco-elásticos que combinan deformación permanente y elasticidad retardada, este tipo de ensayo no permite una distinción entre los dos tipos de energía disipada. Como se muestra en la Figura 3, durante la carga cíclica reversible únicamente la energía total disipada puede ser estimada.

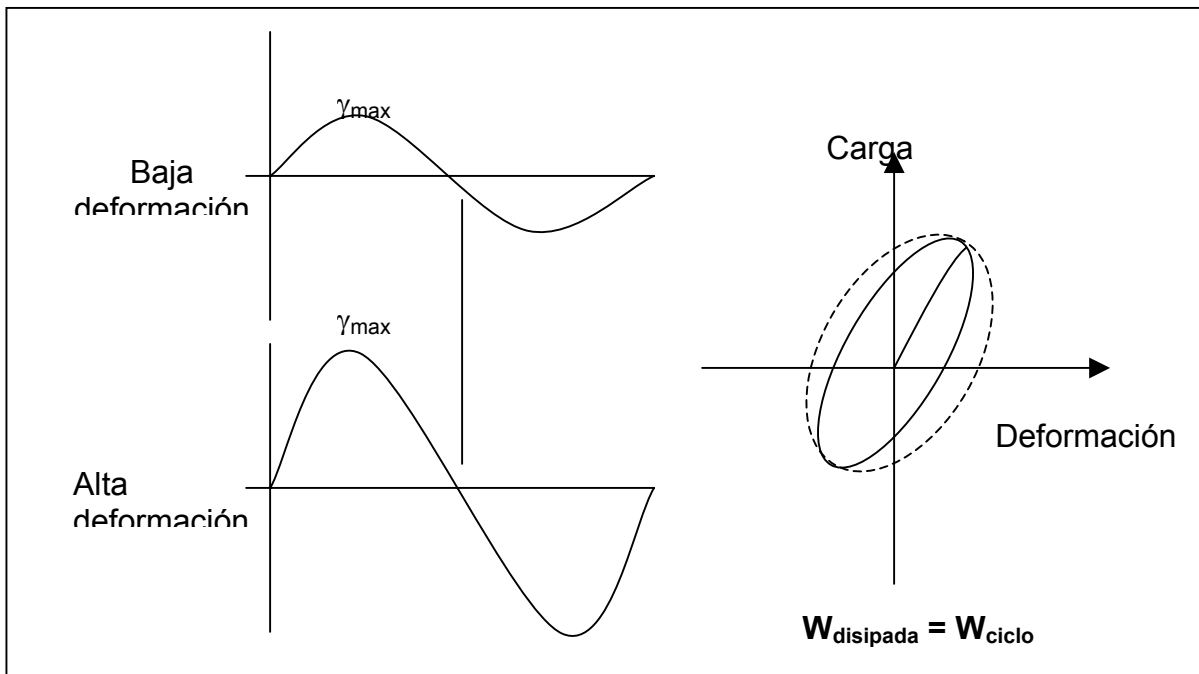


Figura 3. Concepto utilizado en la derivación de $G^*/\text{sen}\delta$.

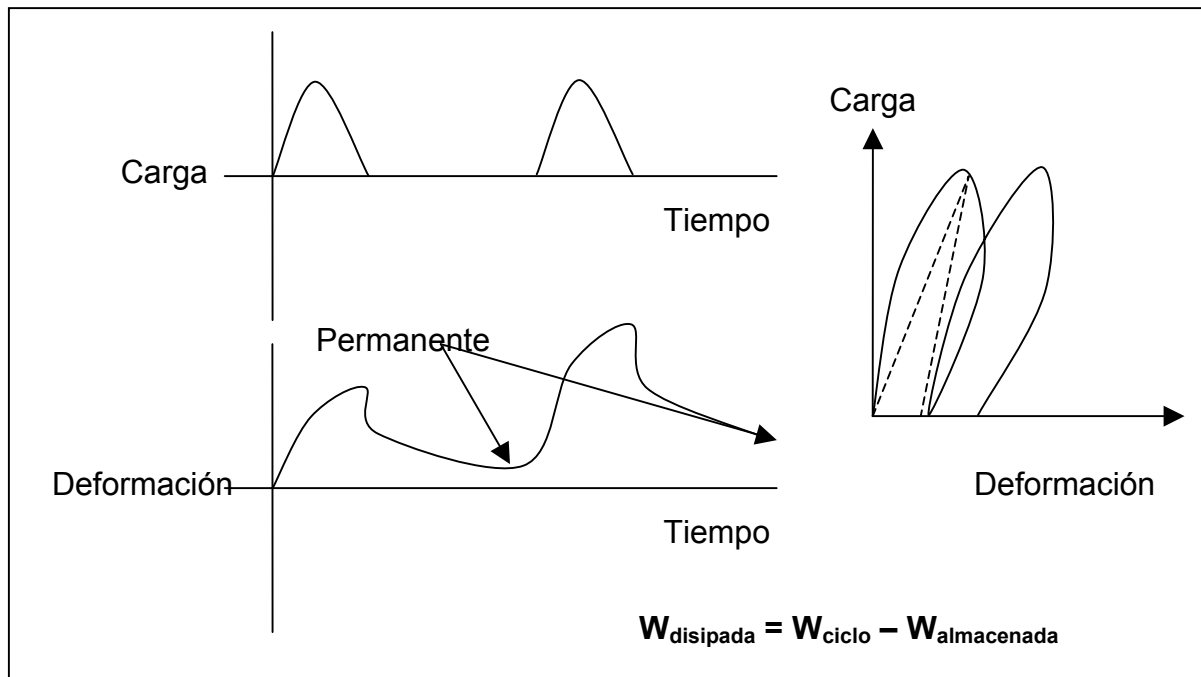


Figura 4. Concepto mejorado de energía disipada.

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 creó 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.

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.

2.3.2. 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 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.

2.4. SELECCIÓN DE NUEVOS PARÁMETROS

2.4.1. 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).

A pesar 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.

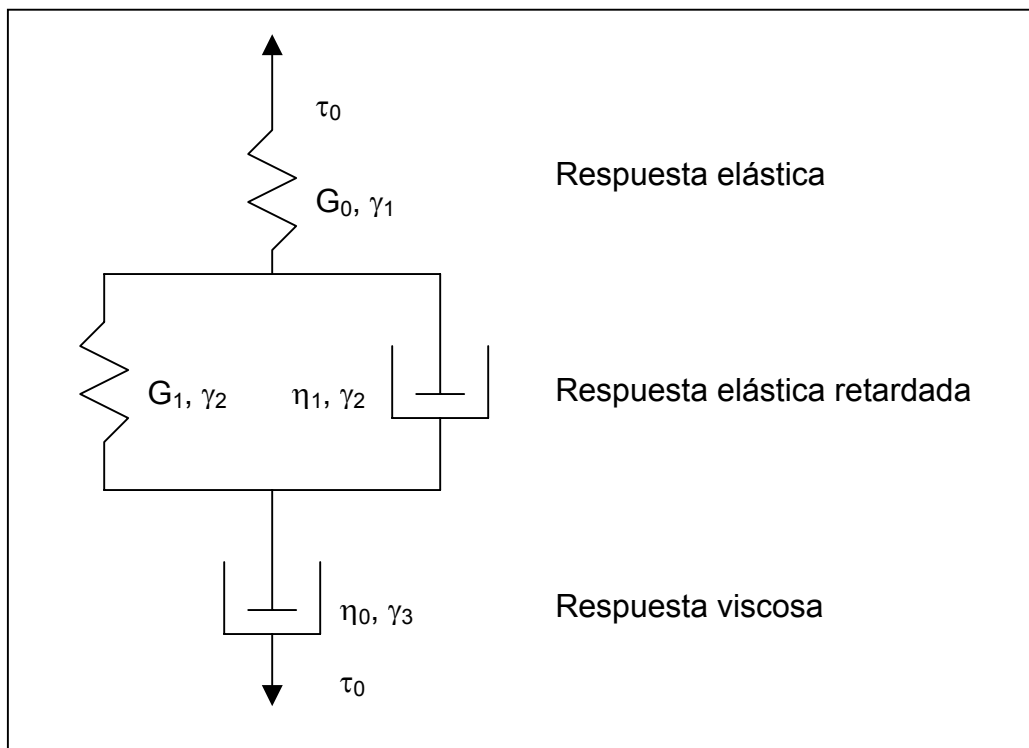


Figura 5. Cuatro elementos del Modelo Burgers y su respuesta.

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:

$$\gamma(t) = \gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 = \frac{\tau_0}{G_0} + \frac{\tau_0}{G_1} (1 - e^{-t/\tau}) + \frac{\tau_0}{\eta_0} t \quad (\text{Ecuación 3})$$

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):

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

El componente viscoso es inversamente proporcional a la viscosidad (η_0) y directamente proporcional al esfuerzo y al tiempo de carga. Basándose en esta separación de la respuesta al creep, el creep compliance podría usarse como un indicador de la contribución de los ligantes a la resistencia a la deformación permanente. En vez de usar el compliance (J_v), que está en unidades 1/Pa, y para ser compatibles con el concepto de rigidez introducido por SHRP, se puede utilizar el inverso del compliance (G_v). “ G_v ” se define como el componente viscoso de la rigidez al creep.

Esto implica que la deformación permanente acumulada es función de la viscosidad, carga y tiempo de carga.

$$\gamma_1 = f(\eta, \tau, t) \quad (\text{Ecuación 5})$$

$$S = f(\eta, \tau, t) \quad (\text{Ecuación 6})$$

Escogiendo un esfuerzo de ensayo apropiado (τ) y un adecuado tiempo de carga (t), el componente viscoso de la rigidez (G_v) puede ser relacionado directamente con la tasa de acumulación de deformación permanente (S) y por tanto utilizada como un indicador fundamental de la resistencia de los ligantes a la deformación permanente.

2.4.2. 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 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 ($G \cdot \sin \delta$) y la energía disipada por ciclo. El éxito de este acercamiento ha sido cuestionado, sin embargo, pues 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.

2.4.2.1. TASA DE CAMBIO DE ENERGÍA DISIPADA

Ghuzlan y Carpenter definen la tasa de energía disipada como:

$$\frac{\Delta DE}{DE} = \frac{W_i - W_{i+1}}{W_i} \quad (\text{Ecuación 7})$$

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 .

2.4.2.2. TASA ACUMULATIVA DE ENERGÍA DISIPADA

Pronk define la tasa de energía disipada como:

$$\text{Tasa de energía disipada} = \frac{\sum_{i=1}^n W_i}{W_n} \quad (\text{Ecuación 8})$$

Donde,

$\sum_{i=1}^n W_i$ = suma total de la energía disipada hasta el ciclo n .

W_n = energía disipada en el ciclo n .

También se puede observar que la pendiente de la relación entre la tasa de energía y el número de ciclos a la falla es igual a 1,0 cuando el material no está experimentando daño por fatiga como se indica por la consistencia de la energía disipada por ciclo. Esto se puede obtener de la Ecuación 8 asumiendo que W_i es constante e igual a W_n :

$$\sum_{i=1}^n W_i = N \cdot W_n \quad (\text{Ecuación 9})$$

Basándose en esto, se puede introducir un entendimiento de la curva de fatiga. Se asume que la primera porción representa la etapa durante la cual la energía por ciclo se disipa en amortiguamiento visco-elástico con poco daño. En la siguiente etapa, se inicia el agrietamiento que consume una cantidad de energía adicional más allá del amortiguamiento visco-elástico. En la tercera etapa, la propagación de grietas se inicia y un incremento notorio en la energía disipada por ciclo se observa. Por tanto, se asume que esta es la etapa más crítica, durante la cual el daño por ciclo es tan alto que es difícil que ocurra una recuperación.

2.5. 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+.

2.5.1. 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 frecuencia.

2.5.2. CAMBIO DE GRADO DE DESEMPEÑO

Relacionando los valores de módulo viscoso (G_v) con ZVR, se puede considerar calcular el G_v como:

$$G_v = \frac{\eta_0}{t} \quad (\text{Ecuación 10})$$

Donde,

η_0 = zero shear viscosity

t = tiempo de carga

Si se adopta el enfoque de necesitar un valor mayor de G_v para tránsitos lentos y volúmenes altos, se necesita idear un acercamiento para elegir el grado de desempeño que funcione de manera similar al actual. Se puede deducir que el valor de ZVR requerido para lidiar con tránsitos lentos es:

$$\eta_{0\text{requerido}} = G_v \cdot t \quad (\text{Ecuación 11})$$

El tiempo de carga puede obtenerse de la velocidad del tráfico y de las relaciones que existen para aproximar el parámetro. Sin embargo, dado que esta es una relación lineal, se puede considerar la condición de flujo libre para ser representativa de condiciones normales y reducir la velocidad del tráfico para ser relacionada con un porcentaje de la condición de flujo libre. Además, dado que el ZVR es una propiedad lineal, la deformación que ocurre al aumentar la magnitud del esfuerzo también puede ser tratada con un ajuste lineal. El doble de la magnitud de carga resultará en el doble de la contribución requerida por el ligante.

La pendiente de la relación entre ZVR y la temperatura en la zona crítica entre 100 Pa-s y 10000 Pa-s permanece relativamente constante. Se puede entonces determinar una relación de la forma:

$$\log(ZVR) = k - n \log T \quad (\text{Ecuación 12})$$

Donde,

k y n = parámetros de regresión

T = temperatura en grados Kelvin

2.5.3. 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.
- Parámetros de especificación equivalentes a ZVR corresponden a 100 P-s y 250 Pa-s para las condiciones original y RTFO.
- Puesto que ZVR se mide en condiciones cercanas a la especificación actual de $G^*/\text{sen}\delta$, se puede utilizar el equipo de ensayo existente para determinar la información necesaria.
- Se recomienda el procedimiento de ensayo para la determinación de G^* y el ángulo de fase a 21 frecuencias.
- Se deben obtener errores menores a 1C, según el procedimiento anterior.
- Los procedimientos de determinación de grado de desempeño y aceptación involucran cambiar el requisito de $G^*/\text{sen}\delta$ en la especificación actual por el de ZVR.

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.



Figura 6: Polímero EGA

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.



Figura 7: Elastómero SBS

3.3. PLASTÓMERO (EASTMAN)

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 funcionabilidad 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 2:30 min.

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 el polímero, este proceso tarda unas 2 horas para 9 kg de asfalto. Luego se debe dejar en recirculación durante un período no menor de 3,30 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.

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.

3.6. ASFALTITA

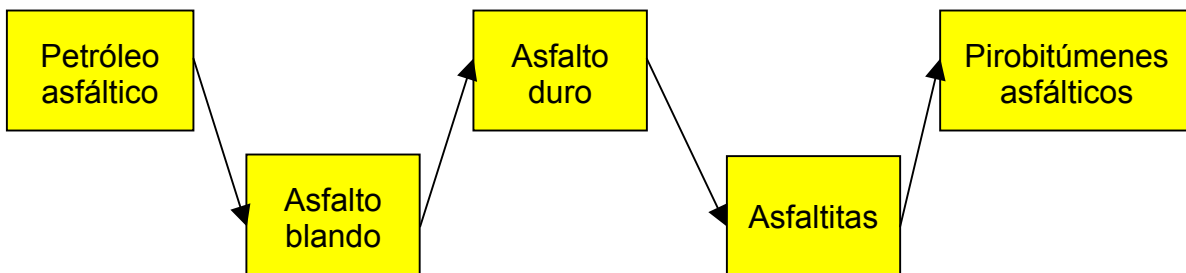
La asphaltita es una roca de color mate, perteneciente a la variedad grahamita, que contiene un 50 – 60 % de bitumen y su carga mineral no sobrepasa del 40%. La composición química de la parte orgánica es la siguiente (% en peso):

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

y la composición química de las cenizas es (% en peso):

SiO₂	52 – 60
Al₂O₃	18 – 25
Fe₂O₃	5 – 10
CaO	5 – 10
MgO	5 – 10

Las asfaltitas están dotadas de un punto de fusión elevado, superior a 110° C. Su origen es debido a la metamorfosis de un petróleo asfáltico que, debido a cambios de temperatura y presión creciente, seguiría los pasos siguientes:



La incorporación de la asfaltita al ligante asfáltico convencional, del tipo comúnmente empleado en mezclas asfálticas en caliente para pavimentación de calles y rutas, produce importantes mejoras de sus propiedades. Entre estas, se puede citar:

- Un considerable aumento de la viscosidad del ligante modificado a altas temperaturas, sin que se vean afectadas sus propiedades a bajas temperaturas, por lo que disminuye el ahuellamiento.
- Aumento de la estabilidad Marshall: del orden del 40% en las mezclas asfálticas.
- Aumento de la resistencia al agua de las mezclas.
- Aumento del módulo de elasticidad dinámico de la mezcla, siendo más resistentes a las deformaciones permanentes bajo el accionar de cargas lentas.

4. PROTOCOLOS DE ENSAYO

4.1. DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE DE LIGANTES ASFÁLTICOS SOMETIDOS A CREEP REPETIDO (RC) USANDO UN REÓMETRO DINÁMICO DE CORTANTE (DSR)

4.1.1. ENFOQUE

Este método de ensayo está diseñado para determinar la resistencia del ligante asfáltico a deformación permanente bajo cargas de creep repetido simulando las cargas del tránsito. El ensayo usa el Reómetro Dinámico de Cortante para realizar ensayos de creep a cortante bajo condiciones de carga y temperatura típicas de las condiciones de campo.

Este método brinda un procedimiento de modelación detallado para determinar la rigidez viscosa al creep del ligante asfáltico de resultados de ensayo usando el modelo de Burgers o “cuatro elementos”.

4.1.2. RESUMEN DEL MÉTODO

Muestras de ligante asfáltico son ensayadas usando el DSR. La muestra es sometida a una secuencia de carga y descarga a un esfuerzo constante de cortante. La deformación respuesta es función del tiempo de medición. Los resultados del ensayo son analizados utilizando el modelo de Burgers o “cuatro elementos”. Basándose en este análisis, la rigidez viscosa al creep bajo condiciones dadas es calculada como un indicador de resistencia del ligante asfáltico a la deformación permanente.

4.1.3. SIGNIFICANCIA DEL ENSAYO

El ahuellamiento en los pavimentos asfálticos es causado por acumulación de deformación permanente bajo cargas repetidas de tránsito. Para poder evaluar la contribución del ligante asfáltico a la resistencia al ahuellamiento de la mezcla asfáltica, se utiliza creep repetido en este ensayo. Escogiendo cuidadosamente los tiempos de carga y descarga del ensayo, la velocidad de tránsito puede ser simulada adecuadamente. Eligiendo un rango dado de esfuerzos, se puede simular las condiciones de carga. La deformación permanente acumulada durante cada ciclo brinda información valiosa para evaluar la resistencia a la deformación permanente del ligante asfáltico.

La rigidez viscosa al creep resultante es un indicador de la resistencia a la deformación permanente del ligante asfáltico. Puede ser usada en clasificación, evaluación y elección de ligantes asfálticos.

4.1.4. CONDICIONES DE ENSAYO

- Temperatura de ensayo – temperatura máxima de diseño según MP1.
- Nivel de esfuerzos – el esfuerzo a cortante en el borde externo del plato no debe ser inferior a 25 Pa y no más de 300 Pa. El criterio usado para escoger el esfuerzo en conjunto con tiempos de carga y descarga es el de escoger el menor esfuerzo que resulte en una deformación recuperable 20 veces mayor que la resolución de deformación del reómetro.
- Tiempos de carga y descarga – basándose en los estudios de campo y considerando las limitaciones del equipo, el tiempo de carga es de 1 segundo. Los tiempos de carga de 2 y 3 segundos también pueden ser usados en caso que la tasa de adquisición de datos del reómetro no sea suficiente para 1 segundo de carga. La razón entre los tiempos de carga y descarga es de 1:9. como resultado, los tiempos de descarga serán de 9, 18 y 27 segundos, para los tiempos de carga de 1, 2 y 3 segundos.
- Número de puntos medidos – durante el creep, se debería evaluar al menos 10 puntos, mientras que durante el proceso de descarga, se debería evaluar al menos 20 puntos.
- Número de ciclos de carga – el número total de los ciclos de carga es de 100.

4.1.5. PROCEDIMIENTO

- Debido a las limitaciones del DSR, ensayos de prueba son necesarios para determinar el adecuado tiempo de carga para obtener lecturas precisas.
- Utilizando el tiempo de carga y descarga determinado anteriormente, fijar el número de repeticiones al número de ciclos de carga deseados (99). Si el número máximo de repeticiones permitidas por el DSR es inferior a 99, usar la función de flujo de labores para alcanzar el número deseado de ciclos.
- Iniciar el ensayo.

4.1.6. MEDICIONES Y CÁLCULOS

- El tiempo se determina sumando los tiempos de carga y descarga, multiplicados por los ciclos de carga.

- Use la información de deformación y tiempos recolectada para los ciclos 50 y 51 para adaptar el modelo de Burgers:

$$\begin{aligned}
 \gamma(t) &= J(t)\tau_0 \\
 &= J_e\tau_0 + J_{de}(t)\tau_0 + J_v(t)\tau_0 \\
 &= \gamma_e + \gamma_{de}(t) + \gamma_v(t) \\
 &= \frac{\tau_0}{G_0} + \frac{\tau_0}{G_1} \left(1 - e^{-tG_1/\eta_1}\right) + \frac{\tau_0}{\eta_0} t
 \end{aligned}$$

- El componente viscoso de la rigidez se define de la siguiente manera:

$$G_v(t) = \frac{\eta_0}{t} = \frac{1}{J_v(t)}$$

4.2. DETERMINACIÓN DE LA VIDA A FATIGA DE LIGANTES ASFÁLTICOS SOMETIDOS A CICLOS REPETIDOS DE CARGA (RCL) USANDO UN REÓMETRO DINÁMICO DE CORTANTE (DSR)

4.2.1. ENFOQUE

Este método de ensayo está diseñado para determinar la resistencia del ligante asfáltico a fatiga bajo repetidas oscilaciones de simulación de tránsito. El ensayo usa el Reómetro Dinámico de Cortante para realizar ensayos de a cortante repetido bajo condiciones de carga y temperatura típicas de las condiciones de campo.

Este método brinda un procedimiento de modelación detallado para determinar la vida a fatiga del ligante asfáltico a partir de resultados de ensayo utilizando la tasa de energía disipada.

4.2.2. RESUMEN DEL MÉTODO

Muestras de ligante asfáltico son ensayadas usando el DSR. La muestra es sometida a una secuencia de carga a un esfuerzo cíclico de cortante bajo esfuerzo o deformación constante. El módulo complejo G^* y el ángulo de fase δ son funciones del número de ciclos de carga medidos. Los resultados del ensayo son analizados utilizando el concepto de energía disipada. Basándose en este análisis, la vida a fatiga bajo condiciones dadas es estimada como un indicador de la resistencia del ligante asfáltico a la fatiga.

4.2.3. SIGNIFICANCIA DEL ENSAYO

El agrietamiento por fatiga de los pavimentos asfálticos ocurre cuando el número de repeticiones de carga del tránsito exceden la capacidad del material asfáltico de resistir el daño acumulado. Para evaluar la contribución del ligante asfáltico a la resistencia a la fatiga, se utilizan esfuerzos a cortante constante o deformación constante bajo condiciones de carga cíclicas. Escogiendo cuidadosamente los niveles de esfuerzo y deformación en que se evalúa el ligante asfáltico, se logra una mejor simulación de las condiciones de carga del tráfico. El cambio en el módulo complejo G^* y el cambio en el ángulo de fase δ brindan información útil para evaluar la resistencia a fatiga del ligante asfáltico.

Durante cada ciclo de carga del tráfico, una cierta cantidad de energía se utiliza para deformar la capa superficial del pavimento. Debido a la naturaleza visco-elástica del material, parte de esta energía es recuperada en el rebote elástico, mientras que el resto se disipa a través de trabajo mecánico, generación de calor o daño al material. Las investigaciones han indicado que existe una fuerte relación entre la tasa de cambio en la energía disipada y el número de ciclos de carga para la falla.

La vida a fatiga derivada es un indicador de la resistencia del ligante asfáltico a la fatiga. Puede ser utilizado en clasificación, evaluación y selección de ligantes asfálticos.

4.2.4. CONDICIONES DE ENSAYO

- Temperatura de ensayo – es la temperatura intermedia de diseño del pavimento, la cual es el promedio de las temperaturas altas y bajas de diseño según MP1.
- Frecuencia – la frecuencia de oscilación escogida es de 10 rad/s y 100 rad/s.
- Niveles de esfuerzo ó deformación a cortante – los esfuerzos a cortante escogidos son de 500 kPa a 10 rad/s y 1000 kPa a 100 rad/s. Las deformaciones a cortante escogidas son 10% a 10 rad/s y 5% a 100 rad/s.
- Número de ciclos de carga – el número total de los ciclos de carga no debe exceder 4500 a una frecuencia de 10 rad/s y 45000 a una frecuencia de 100 rad/s. Como resultado, el tiempo de ensayo debe ser de aproximadamente 3000 segundos o 50 minutos.

4.2.5. PROCEDIMIENTO

- Iniciar el ensayo de esfuerzo constante.

- Iniciar el ensayo de deformación constante. El ensayo de deformación constante es similar al de esfuerzo constante. La diferencia consiste en que la deformación a constante deberá ser fija y la oscilación continua y auto deformación deberán estar encendidos.

4.2.6. MEDICIONES Y CÁLCULOS

- El número de ciclos (N) se determina multiplicando la frecuencia por el tiempo de carga.
- Usar la información del módulo complejo y el ángulo de fase para calcular la energía disipada para el ciclo N como sigue:

$$\begin{aligned}
 W_N &= \pi \tau_N N \gamma_N \sin \delta_N \\
 &= \pi \frac{\tau_0^2}{G^*_N} \sin \delta_N \\
 &= \pi G^*_N \gamma_0^2 \sin \delta_N
 \end{aligned}$$

Donde τ_0 y γ_0 son el esfuerzo o la deformación constante, respectivamente.

- La tasa de energía disipada (DER) al ciclo N está definida por:

$$DER = \frac{\sum_{i=1}^N W_i}{W_N}$$

- Aproximar la DER como una función del número de ciclos usando la siguiente ecuación:

$$R_{de} = R_c + a_1(N - N_c) + S(a_2 - a_1) \ln\{1 + \exp[(N - N_c)/S]\} \text{ (esfuerzo constante)}$$

$$N = N_c + b_1(R - R_c) + T(b_2 - b_1) \ln\{1 + \exp[(R - R_c)/T]\} \text{ (deformación constante)}$$

Donde R_{de} ó R representan la DER.

- Determinación de la vida a fatiga:
 - Bajo condiciones de esfuerzo constante, la vida a la fatiga N_p se define como el número de ciclos de carga para los que se de igualdad entre N y DER (intersección entre ambas curvas).

- Bajo condiciones de deformación constante, la vida a la fatiga N_p se define como el número de ciclos de carga para los que se de igualdad entre N , DER y la asíntota superior (intersección entre las curvas). La asíntota superior está dada por:

$$N = b_2(R - R_c) - N_c$$

5. CARACTERIZACIÓN DEL LIGANTE ASFÁLTICO

5.1. LIGANTE ASFÁLTICO VIRGEN

Tabla 1. Caracterización de ligante asfáltico virgen.

Parámetro	Unidades	Condición original		TFO		RTFO		PAV	
		Promedio	Desv. Est.	Promedio	Desv. Est.	Promedio	Desv. Est.	Promedio	Desv. Est.
Visc. Absoluta	Poise	4097	11	7885	5	9815	144	-	-
G*/senδ a 58°C	kPa	5.720	-	10.970	-	13.290	-	-	-
G*/senδ a 70°C	kPa	5.450	-	2.450	-	3.130	-	-	-
G*/senδ a 82°C	kPa	3.930	-	0.680	-	0.860	-	-	-
G* senδ a 16°C	MPa	-	-	-	-	-	-	3.556	-
G* senδ a 22°C	MPa	-	-	-	-	-	-	1.925	-
G* senδ a 28°C	MPa	-	-	-	-	-	-	1.065	-
Grado de desempeño		70		70		70		13	
Grado de desempeño final		70 (13)							

5.2. LIGANTE ASFÁLTICO + EGA

Tabla 2. Caracterización de ligante asfáltico modificado con 1,5% EGA.

Parámetro	Unidades	Condición original		RTFO		PAV	
		Promedio	Desv. Est.	Promedio	Desv. Est.	Promedio	Desv. Est.
Visc. Absoluta	Poise	5769	106	14575	14	-	-
G*/senδ a 58°C	kPa	7.300	-	19.820	-	-	-
G*/senδ a 70°C	kPa	2.360	-	6.030	-	-	-
G*/senδ a 82°C	kPa	0.850	-	2.060	-	-	-
G* senδ a 16°C	MPa	-	-	-	-	5.203	-
G* senδ a 22°C	MPa	-	-	-	-	2.821	-
G* senδ a 28°C	MPa	-	-	-	-	1.583	-
Grado de desempeño		76		76		19	
Grado de desempeño final		76 (19)					

5.3. LIGANTE ASFÁLTICO + SBS (ELASTÓMERO)

Tabla 3. Caracterización de ligante asfáltico modificado con 2,0% SBS.

Parámetro	Unidades	Condición original		RTFO		PAV	
		Promedio	Desv. Est.	Promedio	Desv. Est.	Promedio	Desv. Est.
Visc. Absoluta	Poise	6741	3	18892	9	-	-
G*/senδ a 58°C	kPa	8.470	-	26.830	-	-	-
G*/senδ a 70°C	kPa	2.230	-	6.760	-	-	-
G*/senδ a 82°C	kPa	0.680	-	1.900	-	-	-
G* senδ a 16°C	MPa	-	-	-	-	8.635	-
G* senδ a 22°C	MPa	-	-	-	-	4.757	-
G* senδ a 28°C	MPa	-	-	-	-	2.704	-
Grado de desempeño		76		76		22	
Grado de desempeño final		76 (22)					

5.4. LIGANTE ASFÁLTICO + EASTMAN (PLASTÓMERO)

Tabla 4. Caracterización de ligante asfáltico modificado con 3,0% EASTMAN.

Parámetro	Unidades	Condición original		RTFO		PAV	
		Promedio	Desv. Est.	Promedio	Desv. Est.	Promedio	Desv. Est.
Visc. Absoluta	Poise	6192	101	-	-	-	-
G*/senδ a 58°C	kPa	8.150	-	-	-	-	-
G*/senδ a 70°C	kPa	2.230	-	-	-	-	-
G*/senδ a 82°C	kPa	0.810	-	-	-	-	-
G* senδ a 16°C	MPa	-	-	-	-	-	-
G* senδ a 22°C	MPa	-	-	-	-	-	-
G* senδ a 28°C	MPa	-	-	-	-	-	-
Grado de desempeño		76		-		-	
Grado de desempeño final		76					

5.5. LIGANTE ASFÁLTICO + UP-70 (LÁTEX)

Tabla 5. Caracterización de ligante asfáltico modificado con 2,0% UP-70.

Parámetro	Unidades	Condición original		RTFO		PAV	
		Promedio	Desv. Est.	Promedio	Desv. Est.	Promedio	Desv. Est.
Visc. Absoluta	Poise	4970	20	12604	7	-	-
G*/senδ a 58°C	kPa	6.400	-	17.000	-	-	-
G*/senδ a 70°C	kPa	1.680	-	4.360	-	-	-
G*/senδ a 82°C	kPa	0.510	-	1.260	-	-	-
G* senδ a 16°C	MPa	-	-	-	-	6.875	-
G* senδ a 22°C	MPa	-	-	-	-	3.723	-
G* senδ a 28°C	MPa	-	-	-	-	2.085	-
Grado de desempeño		70		76		22	
Grado de desempeño final		70 (22)					

5.6. LIGANTE ASFÁLTICO + NEGRO DE HUMO

Tabla 6. Caracterización de ligante asfáltico modificado con 12,0% negro humo.

Parámetro	Unidades	Condición original		RTFO		PAV	
		Promedio	Desv. Est.	Promedio	Desv. Est.	Promedio	Desv. Est.
Visc. Absoluta	Poise	12300	0	-	-	-	-
G*/senδ a 58°C	kPa	13.280	-	-	-	-	-
G*/senδ a 70°C	kPa	5.170	-	-	-	-	-
G*/senδ a 82°C	kPa	1.910	-	-	-	-	-
G* senδ a 16°C	MPa	-	-	-	-	-	-
G* senδ a 22°C	MPa	-	-	-	-	-	-
G* senδ a 28°C	MPa	-	-	-	-	-	-
Grado de desempeño		82		-		-	
Grado de desempeño final		82					

5.7. LIGANTE ASFÁLTICO + ASFALTITA

Tabla 7. Caracterización de ligante asfáltico modificado con 3,0% Asfaltita.

Parámetro	Unidades	Condición original		RTFO		PAV	
		Promedio	Desv. Est.	Promedio	Desv. Est.	Promedio	Desv. Est.
Visc. Absoluta	Poise	8183	5	15050	247	-	-
G*/senδ a 58°C	kPa	8.420	-	20.320	-	-	-
G*/senδ a 70°C	kPa	3.680	-	4.990	-	-	-
G*/senδ a 82°C	kPa	1.160	-	1.490	-	-	-
G* senδ a 16°C	MPa	-	-	-	-	7.781	-
G* senδ a 22°C	MPa	-	-	-	-	4.31	-
G* senδ a 28°C	MPa	-	-	-	-	2.462	-
Grado de desempeño		82		76		22	
Grado de desempeño final		76 (22)					

5.8. Comparación de resultados entre todos los polímeros

Tabla 8. Comparación de resultados de grado de desempeño

Polímero	Grado de desempeño resultante
AC-30 base	76-13
SBS	76-22
EGA	76-13
UP-70	70-22
Asfaltita	76-22
Negro Humo	82-
Plastómero	76-

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 cual es el porcentaje que determina la obtención de un PG-70 y un PG-76.

6. 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.

6.1. RESULTADO DE ENSAYO DE CREEP

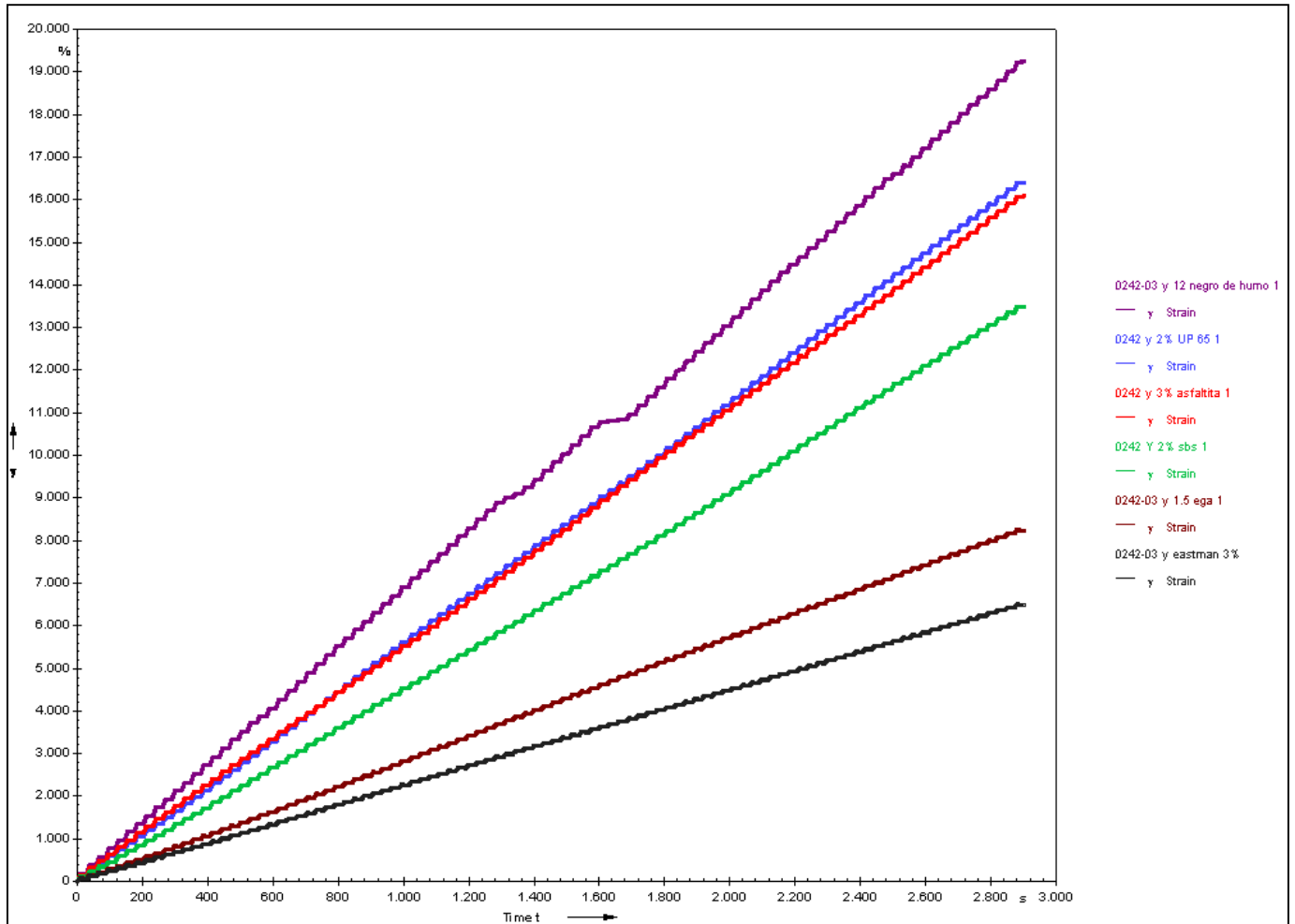


Figura 8. Comparación de creep en ligantes modificados.

6.2. RESULTADO DEL ENSAYO DE FATIGA

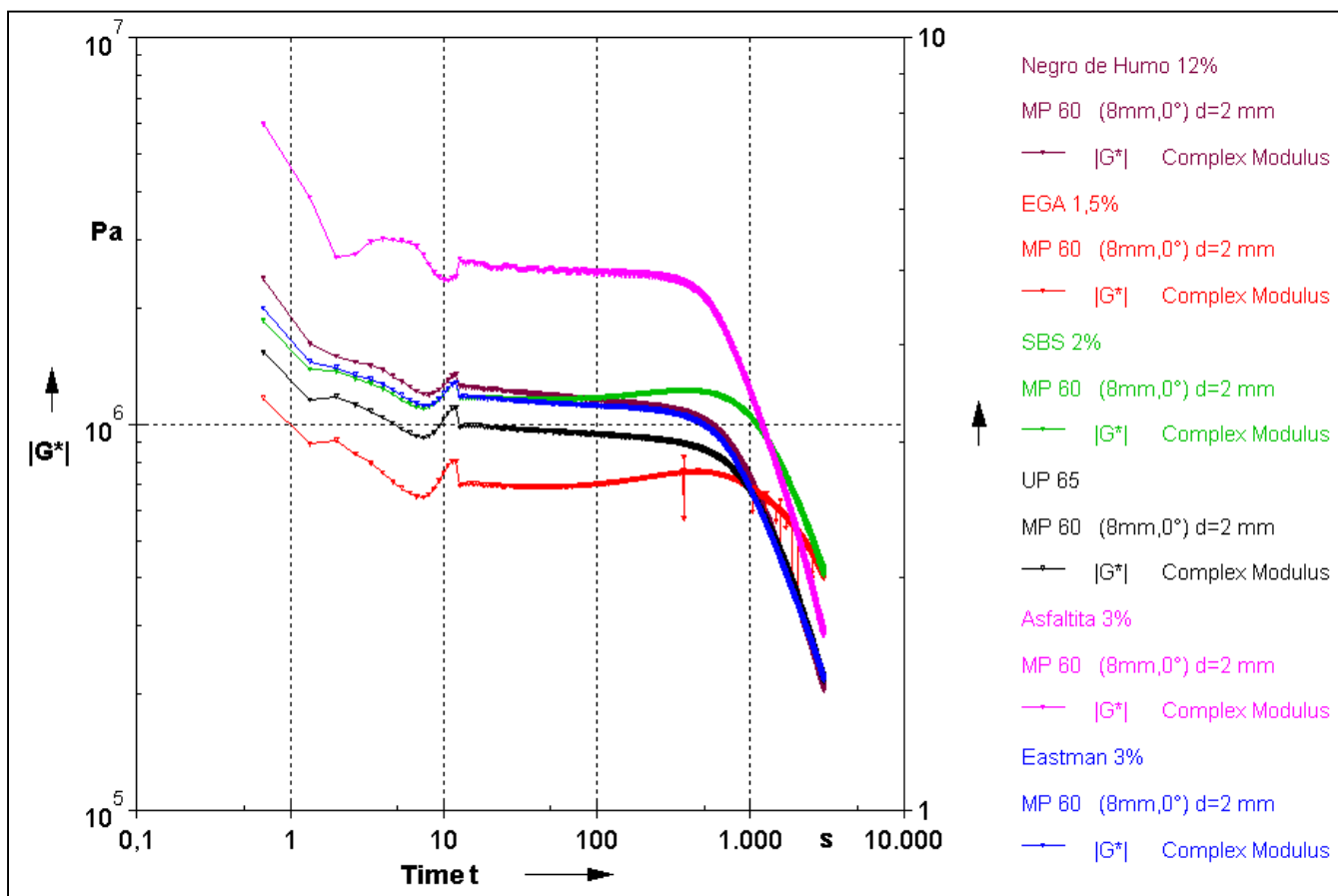


Figura 9. Comparación de fatiga en ligantes modificados.

6.3. COMPARACION DE RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE FATIGA Y CREP

Tabla 9. Comparación de recuperación elástica para ligantes modificados.

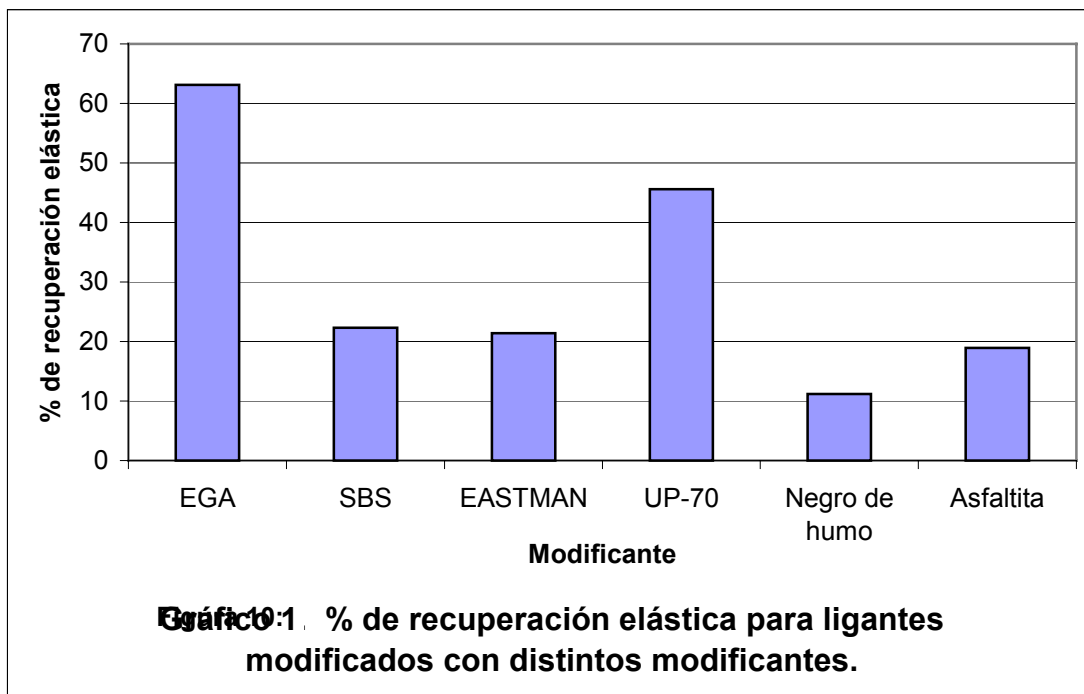
Asfalto base	Modificante	Ciclos para la falla	Deformación Acumulada (uS)
AC30	Asfaltita 3%	700	15.8
AC30	Negro humo 12%	600	19.4
AC30	eastman 2,0%	800	6.4
AC30	Elvaloy 1,5%	1100	7.6
AC30	UP 65 2,0%	900	16.5
AC30	SBS 2,0%	1000	12.8

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

6.4. COMPARACIÓN DE RECUPERACIÓN ELÁSTICA

Tabla 10. Comparación de recuperación elástica para ligantes modificados.

Modificante	% de Recuperación
EGA	63.1
SBS	22.3
EASTMAN	21.4
UP-70	45.6
Negro de humo	11.2
Asfaltita	18.9



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

6.5. ENSAYO DE VISCOSIDAD DE CORTE ZERO

Los resultados de ensayo de viscosidad de corte zero se presentan a continuación para la asfaltita y el negro de humo.

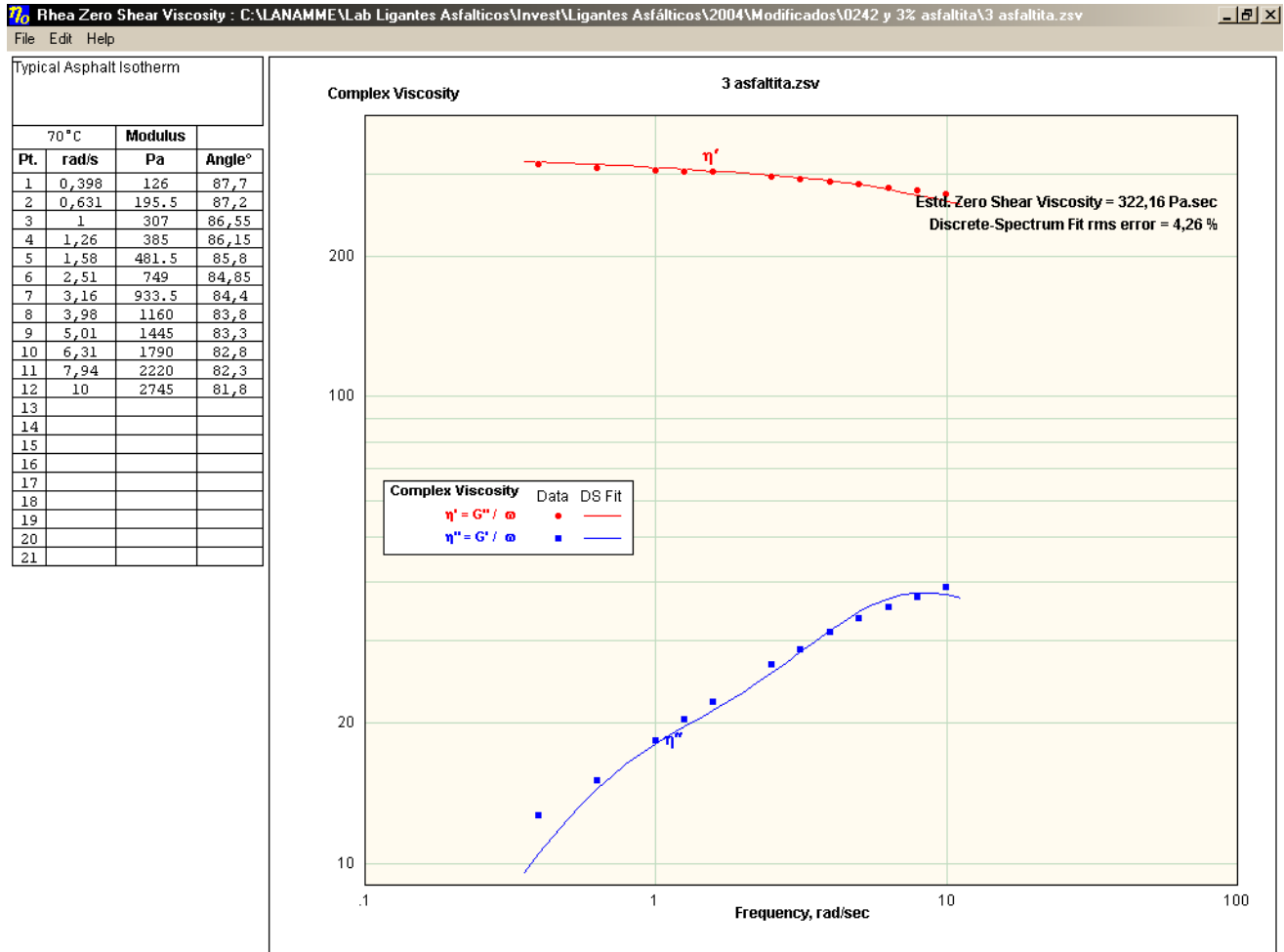


Figura 11. Resultado del ensayo de ZSV para la asfaltita

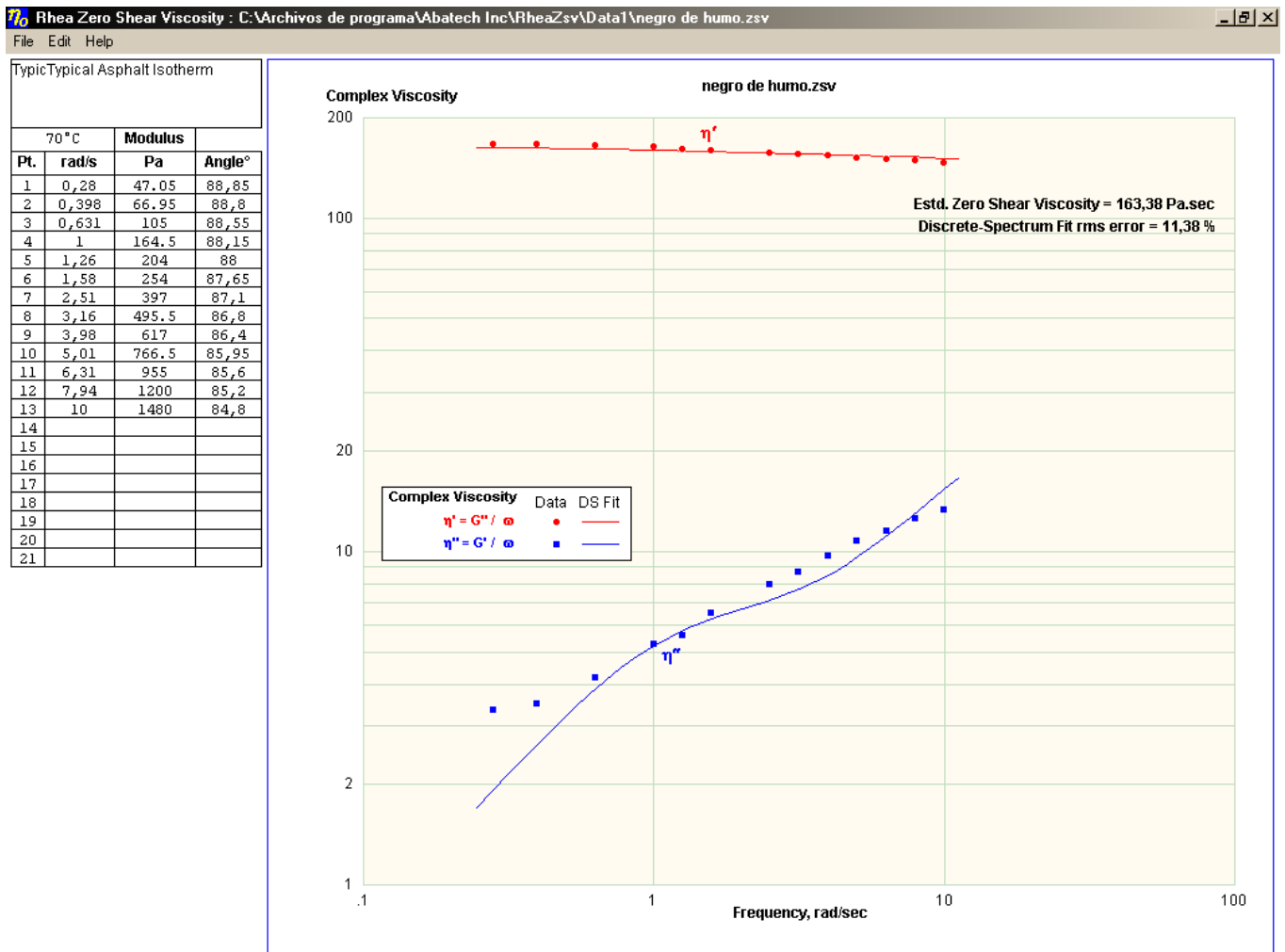


Figura 12. Resultado del ensayo de ZSV para el negro de humo

7. CONCLUSIONES

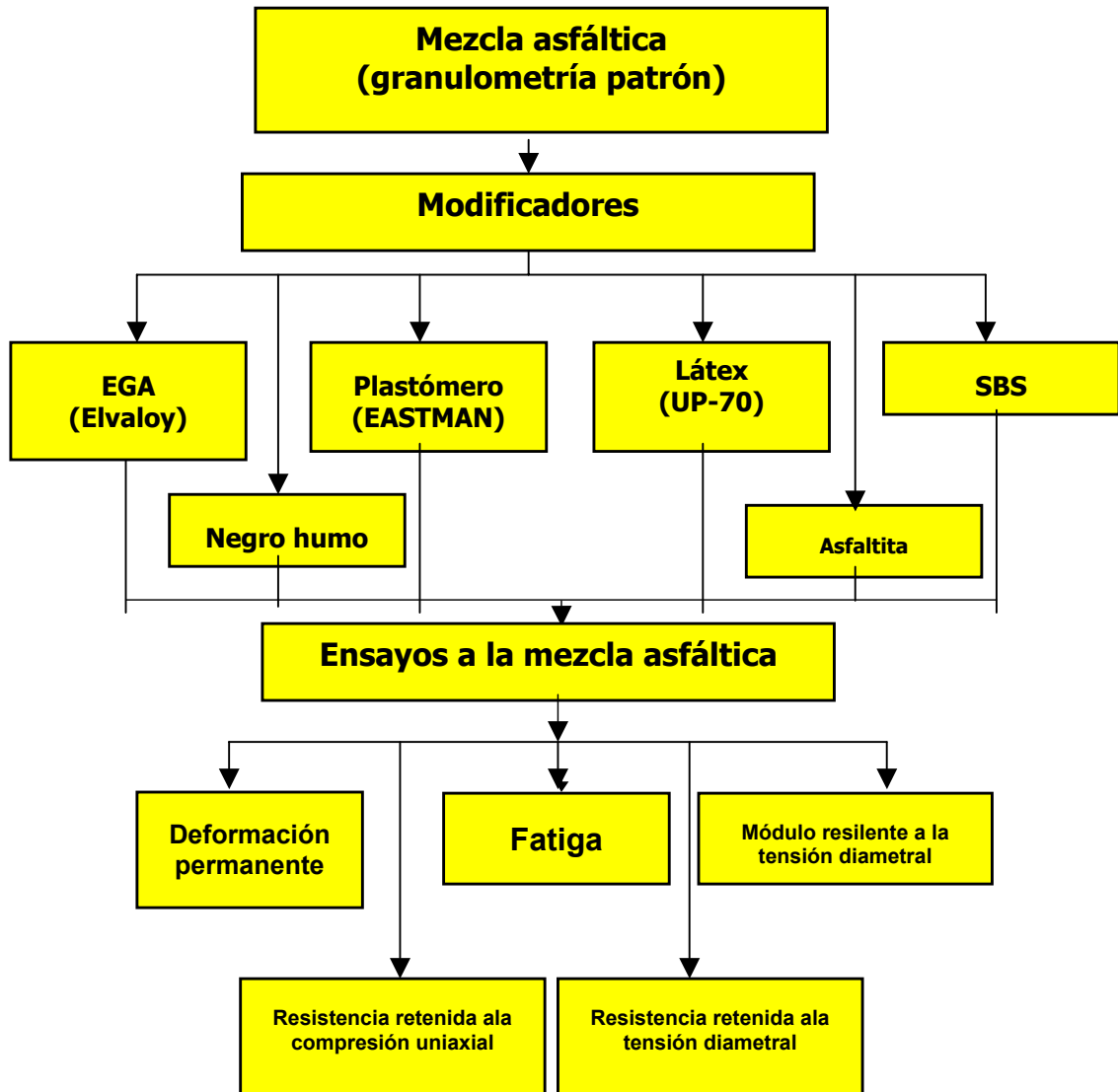
- De los resultados obtenidos se ha podido demostrar, que la clasificación de ligantes asfálticos modificados por el método de grado de desempeño no es suficiente para determinar, cual tendrá un mejor desempeño en el proyecto, dadas las condiciones de tránsito y temperaturas propias de éste.
- La implementación de los ensayos de desempeño ha sido exitosa para determinar, en el caso particular de los ensayos de creep y fatiga, cuales 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 meclas 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.

8. PLANTEAMIENTO DE LA SIGUIENTE ETAPA DEL PROYECTO

Dado que ya casi se completó el análisis de los 6 modificantes planteados originalmente, el siguiente paso de la investigación debe ser efectuar el análisis de fatiga y deformación permanente, en mezclas asfálticas patrón, elaboradas con los asfaltos modificados en esta segunda etapa experimental.

De los resultados experimentales obtenidos, se podrían determinar correlaciones entre fatiga y deformación permanente de ligantes asfálticos con las que se obtendrán en mezclas asfálticas fabricadas con dichos asfaltos modificados.

El nuevo esquema experimental se presenta a continuación:



El cronograma de trabajo propuesto se presenta a continuación:

ACTIVIDADES	agosto				setiembre					octubre				noviembre				diciembre		
	1	2	3	4	1	2	3	4	5	1	2	3	4	1	2	3	7	1	2	3
FINALIZACION DE ANALISIS DE RESULTADOS DE LA FASE 2	■																			
FASE 3	■				■															
INVESTIGACIÓN BIBLIOGRAFICA ADICIONAL	■																			
ENSAYOS DE DESEMPEÑO MEZCLA 1					RR					MR-APA										
ENSAYOS DE DESEMPEÑO MEZCLA 2							RR			MR-APA										
ENSAYOS DE DESEMPEÑO MEZCLA 3									RR	MR-APA										
ENSAYOS DE DESEMPEÑO MEZCLA 4										MR-APA	RR									
ENSAYOS DE DESEMPEÑO MEZCLA 5										MR-APA			RR							
ENSAYOS DE DESEMPEÑO MEZCLA 6										MR-APA					RR					

ACTIVIDADES	agosto				setiembre					octubre				noviembre				diciembre		
	1	2	3	4	1	2	3	4	5	1	2	3	4	1	2	3	7	1	2	3
INFORME FINAL FASE 3																				

RR: ensayos de resistencia retenida a la tensión diametral y compresión uniaxial

MR: ensayo de módulo resiliente a la tensión diametral

APA: Ensayo de deformación permanente en la pista a escala de laboratorio

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.