

ANÁLISIS REOLÓGICO DE FATIGA EN ASFALTOS A TEMPERATURAS INTERMEDIAS DE SERVICIO

Rafael Ernesto Villegas-Villegas¹, Alejandra Baldi-Sevilla²,
José Pablo Aguiar Moya³, Luis Guillermo Loria-Salazar⁴

¹ LANAMME Universidad de Costa Rica, Ciudad de la Investigación, rafael.villegas@ucr.ac.cr

² LANAMME Universidad de Costa Rica, Ciudad de la Investigación, alejandra.baldi@ucr.ac.cr

³ LANAMME Universidad de Costa Rica, Ciudad de la Investigación, iose.aguiar@ucr.ac.cr

⁴ LANAMME Universidad de Costa Rica, Ciudad de la Investigación,
luis.loriasalazar@ucr.ac.cr

Resumen

Actualmente, los software de simulación, modelación y los experimentos a escala real están diseñados a condiciones de esfuerzo controlado, de tal forma que se introduce una carga y se observa la respuesta del material (ej. deformación). En contraste, en el laboratorio los ensayos de mezcla (ej. viga de fatiga) y asfaltos (ej. curvas de fatiga y LAS) se realizan a deformación controlada, introduciendo en las mediciones respuestas de relajación del asfalto, por lo que se hace difícil la modelación y correlación de estos ensayos a fatiga con la realidad de las carreteras. Basado en lo anterior, se propone el estudio reológico a esfuerzo controlado de la fatiga en asfaltos. Para el caso de temperaturas intermedias se debe contemplar la influencia de tres áreas esenciales que determinan la respuesta del material: modo de falla, temperatura de prueba y el cambio en la composición química del asfalto. Para este fin se realizó una revisión bibliográfica y una evaluación de los protocolos de ensayos a fatiga recomendados internacionalmente. En el artículo se propone un parámetro de evaluación de asfaltos en fatiga, que permite capturar fractura a temperaturas donde se espera exista únicamente deformación en el caso de asfaltos oxidados.

Palabras Clave: Reología, Fatiga, Temperaturas Intermedias, Oxidación, Viscoelasticidad.

1. Introducción

La forma en que se concibe la fatiga del asfalto en los países que proponen las normativas internacionales, está ligado a condiciones de temperatura muy baja. El concepto de fatiga a temperaturas intermedias de servicio no es aceptado por la mayoría, pero es una realidad que este fenómeno esté presente las carreteras Latinoamericanas, incluso en países con clima tropical.

Este estudio se basa en la revisión de protocolos de ensayo de fatiga en ligantes asfálticos junto a una revisión bibliográfica de los parámetros actuales utilizados en la determinación del efecto de la fatiga en el desempeño.

Con el presente trabajo se pretende tener un mayor entendimiento del fenómeno de la fatiga a temperaturas intermedias de servicio. Adicionalmente, se plantea una nueva forma de evaluar el comportamiento de los asfaltos desde el punto de vista reológico, por lo que puede representar una herramienta útil en la toma de decisiones referentes a la elección del material y a la planeación e intervención de proyectos de infraestructura vial.

2. Marco teórico

En el año 2004, Soenen, De la Roche y Redelius [1] determinaron leyes de fatiga de asfaltos con el reómetro de corte dinámico (DSR, por sus siglas en inglés). Se evaluaron muestras de 8 mm de diámetro y 2 mm de alto a deformación controlada, utilizando como criterio de falla la disminución del 50% del módulo inicial del material. Sin embargo, este ensayo no da una evidencia de daño por fractura del asfalto.

Otros autores como Di Benedetto han propuesto que el comportamiento del módulo complejo durante los ensayos de fatiga a deformación controlada consta de tres fases [2]. En la fase I, se da una disminución del módulo complejo, lo cual es asociado a un aumento en la temperatura de la mezcla asfáltica por liberación de energía durante la prueba, una adaptación

inicial y un cambio dependiente del tiempo de la viscosidad, también conocido como tixotropía [2]. La tixotropía es una disminución de la viscosidad de un material cuando se le incide al flujo y una recuperación en el tiempo cuando cesa la carga [3]. Los asfaltos experimentan este fenómeno y ha sido ampliamente estudiado. Por otra parte, en la fase II, el módulo permanece constante o disminuye linealmente con el número de ciclos. En esta etapa, Di Benedetto y colaboradores afirman que la fatiga produce daños en forma de micro-grietas durante esta etapa [2]. Finalmente, en la fase III, el módulo complejo cae repentinamente, dando lugar al fallo de la muestra. Lo que se cree que sucede en tal fase es que en algún momento las micro-fisuras generadas en la fase II se interconectan produciendo la falla [2].

Es importante observar la aparición del término tixotropía, el cual está relacionado con la fluencia de los materiales. De acuerdo a Barnes [4], todos los líquidos con microestructura (partículas floculadas, alineación de fibras, distribución espacial de partículas o gotas, densidad de asociaciones moleculares en polímeros, entre otros) pueden mostrar tixotropía, puesto que ésta solamente refleja el tiempo necesario para pasar de un estado de la microestructura a otro y viceversa, desde diferentes estados de flujo hacia o desde el reposo.

Como se mencionó anteriormente, la tixotropía hace que se reduzcan tanto el módulo como la viscosidad conforme se aplica carga y se restablezcan cuando se elimina la carga [5,6]. De acuerdo con lo tratado, surge la incógnita de si verdaderamente se producen microgrietas en la fase II, pues sin un cambio en la composición química o una disminución abrupta de la temperatura, el efecto de la tixotropía de la fase I no puede desaparecer en la fase II, dado que se tendría un material donde la componente viscosa domina sobre la elástica, haciéndolo susceptible al flujo. En este sentido, resulta necesario plantearse si los ensayos a deformación controlada muestran verdaderamente un daño a fatiga o si, por el contrario, el material experimenta relajación a estas condiciones de carga, haciéndolo susceptible al flujo por su comportamiento tixotrópico.

3. Objetivo

La presente investigación pretende analizar la forma en que se ha venido considerando el fenómeno de fatiga a lo largo del tiempo. Adicionalmente, se realizó una revisión de los factores implicados en la respuesta a la fractura de los asfaltos a temperaturas intermedias de servicio, tales como el efecto de la temperatura, el modo y la velocidad de carga y la influencia de la composición química.

4. Materiales utilizados

Los materiales utilizados en el estudio fueron asfaltos de Costa Rica, Bolivia, El Salvador, Nicaragua y Guatemala. Los detalles de estos materiales se detallan en la Tabla 1. Los asfaltos fueron sometidos a procedimientos de envejecimiento térmico en el horno rotatorio de película delgada (RTFO, por sus siglas en inglés) y en el horno de envejecimiento a presión (PAV, por sus siglas en inglés). Adicionalmente, las muestras fueron sometidas hasta 5 ciclos consecutivos de PAV, con el objetivo de lograr una oxidación más severa en el material.

Tabla 1. Asfaltos utilizados en el estudio

Identificación	Grado de viscosidad
Guatemala 1	AC-20
Guatemala 2	AC-30
Nicaragua	AC-30
Bolivia	AC-30
Costa Rica 1	AC-30
Costa Rica 2	AC-40

5. Descripción de métodos de ensayo

Las propiedades mecánicas de los asfaltos se midieron con un reómetro de corte dinámico (DSR, por sus siglas en inglés). Para encontrar el rango de temperatura por debajo del cual el asfalto es susceptible a la fractura, a las muestras se les realizó un barrido de temperatura desde los 5 a 65°C, con una tasa de calentamiento de 0,5 °C/min, con velocidades angulares variables y con mediciones al 1% de deformación contralada. Se utilizó una geometría de 8 mm y 2mm de espesor de la muestra. En el caso de las pruebas de fatiga se realizó una calibración de la carga a utilizar a una velocidad de 10 rad/s a diversas temperaturas según el comportamiento de la muestra, utilizando las geometrías previamente indicadas.

6. Resultados y análisis

El estudio de la fatiga en los asfaltos a temperaturas intermedias de servicio es dinámico y debe contemplar tres áreas esenciales. A saber, el comportamiento sol-gel del asfalto, el modo de carga y la composición química. Las tres áreas aportan elementos de peso en la respuesta del material y a la vez brindan herramientas para a dilucidar el comportamiento del asfalto en condiciones propensas a fatiga.

6.1. Influencia de la Temperatura y la Velocidad de Carga sobre la Fatiga a Temperaturas Intermedias

Los ensayos de fatiga en mezcla asfáltica se realizan a $20.0 \pm 0.5^\circ\text{C}$, temperatura a la cual muchos de los asfaltos no son susceptibles a fatigarse. Esta condición generalizada en el ensayo se basa en la comodidad de alcanzar y controlar dicha temperatura, generando situaciones particulares cuando se realiza el ensayo. Por ejemplo:

- De acuerdo a la norma AASHTO T321-14 los especímenes de mezcla asfáltica se fallan a una sola temperatura (20°C), sin considerar la temperatura intermedia de desempeño del asfalto obtenida previamente en el DSR.
- Tanto en el DSR como en la viga de fatiga de mezcla asfáltica, no se tiene certeza de si la temperatura escogida para el ensayo refleja fielmente fatiga o si más bien se observa una deformación permanente en el espécimen.
- Cuando se comparan diferentes asfaltos a fatiga en el DSR es de suma importancia realizar el ensayo a una temperatura donde se tenga la certeza de que todas las muestras se fatiguen.

Con base en lo anterior, antes de realizar un ensayo de fatiga a temperaturas intermedias es necesario considerar el comportamiento del ligante asfáltico con la temperatura, para saber si el material es susceptible a la deformación o a la fractura. Por lo tanto, para encontrar el rango de temperaturas en el cual el asfalto experimenta fatiga a temperaturas intermedias, se realizó el barrido de temperatura en el DSR desde los 5 a 65 °C, con una tasa de calentamiento de 0,5 °C/min, con velocidad angular 10 rad/s y con deformación de 1%, utilizando una geometría de 8 mm y un espesor de muestra de 2mm, con el fin de conocer la Región Sol-Gel donde el asfalto es susceptible fractura. El estado Sol es líquido, comprendido por una suspensión coloidal de partículas sólidas con tamaños muy pequeños. La Gel es sólida constituida por al menos dos fases, con una líquida inmovilizada y atrapada por la fase sólida (Figura 1).

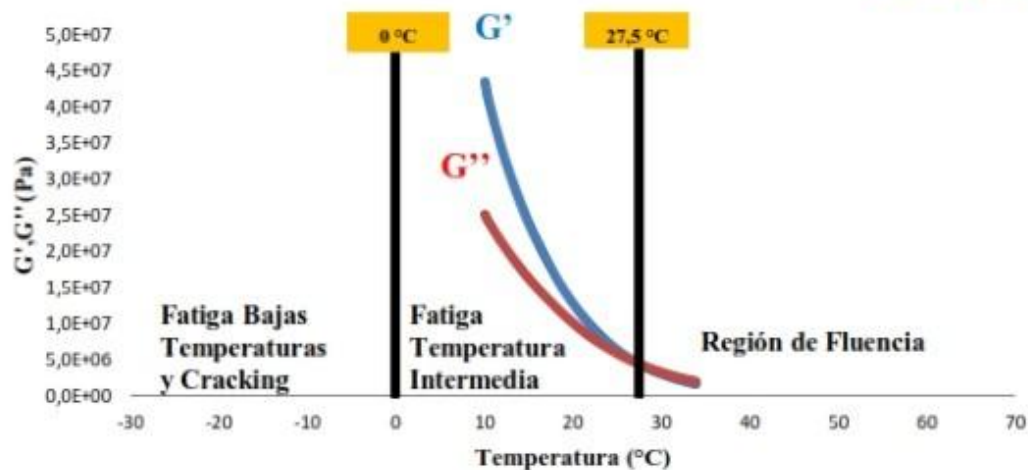


Figura 1. Influencia de la temperatura en el comportamiento a la fatiga del asfalto Costa Rica 2 oxidado en PAV

En la Figura 1, el inicio de la región Sol-Gel se da a la temperatura a la cual $G'=G''$, en esta región el módulo del material es bajo pero está asociado a la influencia de la componente elástica y cuando la carga es aplicada el material es susceptible a la fractura. Conforme la temperatura disminuye, el módulo aumenta brindando al material mayor capacidad de soporte hasta un punto donde su resistencia es máxima. Al seguir disminuyendo la temperatura cada vez más la estructura se tensiona y la movilidad molecular es baja, puesto que se reduce el volumen libre de las moléculas, al punto que con un pequeño esfuerzo aplicado, o de forma espontánea, el material se fractura. Cabe resaltar que la ubicación de la región Sol-Gel es dependiente de la temperatura, la carga y la composición química del material. Además, a temperaturas por debajo de esta región, la estructura molecular del material no puede pasar de un estado gel a un estado sol y por ende la única forma de disipar energía es fracturándose.

Tabla 2. Temperatura de Sol-Gel de muestras de asfaltos a diferentes niveles de oxidación

Asfaltos	T ($^{\circ}C$) ($G''>G'$)			Clasificación
	Original	RTFO	PAV	
Guatemala 1	< $10^{\circ}C$	12,1	22,5	AC-20
Guatemala 2	< $10^{\circ}C$	13,1	25,1	AC-30
Nicaragua	< $10^{\circ}C$	13,2	22,5	AC-30
Bolivia	< $10^{\circ}C$	17,2	27,9	AC-30
Costa Rica 1	< $10^{\circ}C$	12,5	25,5	AC-30
Costa Rica 2	< $10^{\circ}C$	16,4	27,7	AC-40

Otro aspecto importante a considerar es que el asfalto es un material derivado del petróleo, de composición heterogénea y su comportamiento es viscoso o elástico dependiendo de la temperatura. A temperaturas bajas se comporta como un sólido y conforme esta incrementa su comportamiento es líquido [7]. Lo anterior refleja que el comportamiento del asfalto a fatiga no es estático, por lo tanto, no está asociado a una temperatura única. Esto puede relacionarse a que las fracciones del asfalto tienen consistencias distintas a distintas temperaturas, por lo que su comportamiento debe ser dinámico y ligado a la velocidad de carga. Por lo tanto, resulta importante analizar la influencia de la velocidad de carga sobre el comportamiento a fatiga a temperaturas intermedias de los asfaltos. Para lograr lo anterior se realizó un barrido de temperatura de 5 a $65^{\circ}C$ similar al mostrado en la Figura, el cual se realizó a una frecuencia de 10 rad/s, que corresponde a una velocidad de tráfico de $3,2$ km/h [8][9]. Sin embargo, en carretera los vehículos no circulan a una sola velocidad, por el contrario, podrían encontrarse desde velocidades cuasi-estáticas hasta muy altas. Por esta razón, es necesario caracterizar el

comportamiento a fatiga del ligante asfáltico sometido a todas estas velocidades. Para ello, se eligieron dos frecuencias, una que representa una velocidad cuasi-estática y otra que representa la velocidades máxima de diseño de la carretera (Figura 2). Se utilizó la ecuación de Barsksdale [8,9] para la transformación de velocidad de carga a frecuencia en rad/s (o Hz), tal que pudiesen utilizarse como variables en el DSR (Tabla 2).

Tabla 2. Velocidades de carga aplicadas en el DSR según la ecuación de Barsksdale

Velocidad	Rad/s	Hz	Tipo
0,28 Km/h	1	0,159	Condición cuasi estática del asfalto
3,2 Km/h	10	1,59	Frecuencia utilizada por SuperPave
110 Km/h	295,30	47	Velocidad máxima de diseño

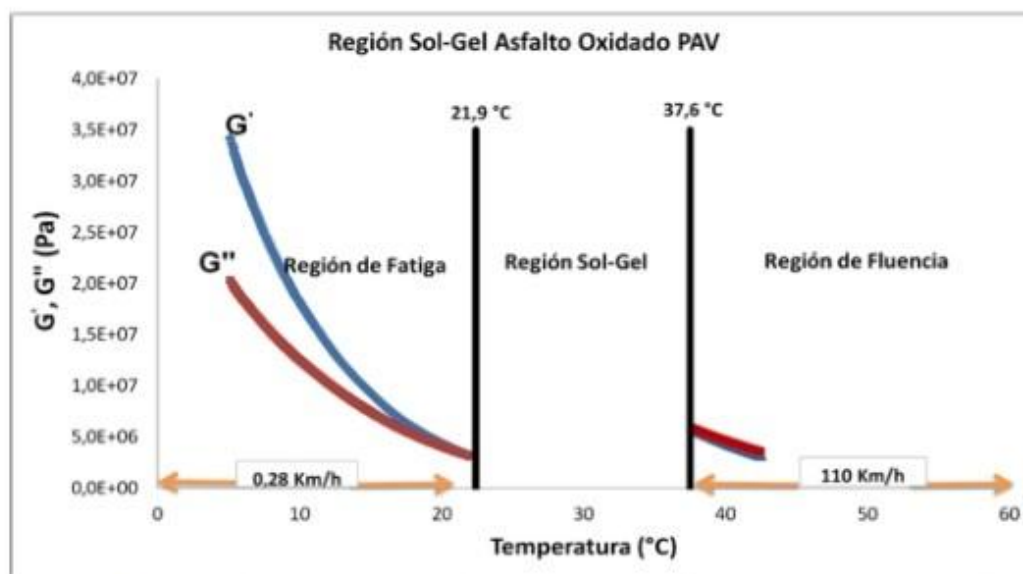


Figura 2 Influencia de la velocidad de carga sobre la región Sol-Gel del asfalto Costa Rica 2 PAV

En la Figura 2 se muestra el ámbito de la región Sol-Gel, la cual está comprendida entre $21,9-37,6^{\circ}\text{C}$ para uno de los asfaltos evaluados. Los límites de esta región corresponden a las temperaturas a las cuales $G'=G''$ a las velocidades de $0,28\text{ km/h}$ ($21,9^{\circ}\text{C}$) y de 110 km/h ($37,6^{\circ}\text{C}$). El comportamiento a fatiga en la región Sol-Gel es dependiente de la velocidad de carga: a carga constante, una alta velocidad de aplicación de carga favorece la fatiga del material, mientras que una baja velocidad de aplicación favorece la deformación. En la Región de Fluencia que está por encima de los $37,6^{\circ}\text{C}$ en donde, se espera que el asfalto exhiba una deformación, siempre que la velocidad de carga no supere los 110 Km/h . Por otro lado, en la Región de Fatiga por debajo de los $21,9^{\circ}\text{C}$ el asfalto es más propenso cada vez a la fatiga, sin importar la velocidad de carga. Nótese que, en general, altas velocidades de carga rigidizan el asfalto y la probabilidad de fatiga se da a temperaturas más altas, por el contrario, bajas velocidades de carga favorecen la deformación del asfalto

6.2. El Modo de Falla

Las pruebas de fatiga en el asfalto están diseñadas generalmente a deformación controlada, puesto que generan formas de medir relativamente cómodas para el usuario, a considerar: La fácil comparación de mediciones de ligantes de módulos muy distintos y la simplificación de ajustes reométricos en el ensayo.

- La nula calibración de la carga que se le aplica al asfalto para obtener un número de ciclos de carga pertinentes para observar la respuesta del material.

Por otro lado, los ensayos a deformación permanente tienen sus limitaciones importantes y no reflejan la respuesta del material a fatiga, algunos aspectos a considerar son:

- Se induce al material a un nivel de deformación el cual no está relacionada con el efecto de la carga sobre el mismo.

Para inducir en el material un nivel de deformación determinado, la carga aplicada es variable de acuerdo a la respuesta propia del material. Para ligantes con una diferencia marcada de sus módulos, la prueba no es equitativa, pues para el material de mayor módulo el reómetro aplica una carga mayor que para el otro asfalto de menor módulo. Esto para lograr el nivel de deformación deseado, pues el asfalto presenta un comportamiento pseudoplástico ya que la viscosidad o el módulo disminuyen conforme aumenta el esfuerzo de corte.

- En los cálculos de diseño se controla la carga y se calcula la respuesta del material, que en dado caso puede ser una deformación. Por ende, los ensayos a fatiga realizados a deformación controlada muchas veces no son consistentes con los cálculos de diseño, puesto que la carga aplicada es muy dependiente de la capacidad de deformación que tenga el ligante asfáltico.

- El efecto de la deformación controlada y la velocidad de corte constante provoca una respuesta de relajación en el asfalto que lo inducen a un comportamiento tixotrópico.

Históricamente, el método más utilizado para evaluar la fatiga en el DSR consiste en aplicar una deformación controlada del 10%, a una frecuencia de 10rad/s con una geometría de 8mm y un espesor de muestra de 2mm. La temperatura a utilizar queda al criterio del usuario. El criterio de falla mayormente utilizado es considerar que existe una reducción del 50% del módulo inicial. En la Figura 3 se ilustra un ensayo bajo estas condiciones, realizado al asfalto Costa Rica 2.

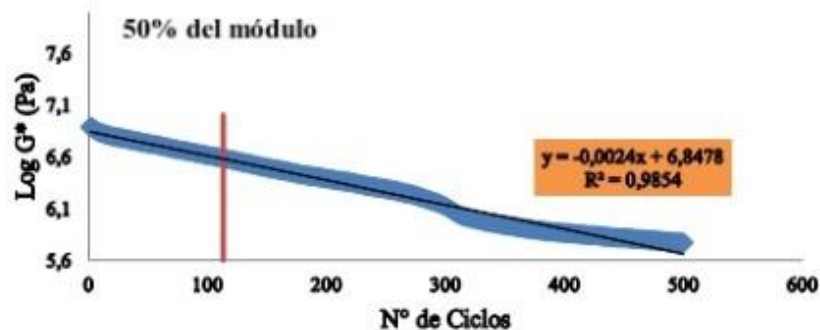


Figura 3 Ensayo clásico de fatiga para el asfalto (Costa Rica 2) en el DSR

De acuerdo a la Figura 3, se destaca que el comportamiento del material es log-lineal como lo demuestra su coeficiente de correlación. Por otro lado, en la región donde el material pierde el 50% de su módulo, aún se aprecia un alto grado de linealidad en su respuesta. Lo anterior evidencia que con cada ciclo de carga el módulo disminuye linealmente, producto de que en cada ciclo de deformación el material continuamente se relaja y entra en flujo. Para que el material fatigue es necesario un cambio significativo del valor del módulo entre un ciclo y el anterior, lo cual no se observa en la Figura 3. Cuando tal caída abrupta sucede el material difícilmente recupera su módulo. Es bueno pensar que para que un material se fatigue su comportamiento debe ser pseudo-sólido, en el caso de los asfaltos la componente elástica (G') debe ser dominante a la viscosa (G''). Es importante notar en este punto que la fatiga es un fenómeno que produce una ruptura en el material y que producto de la separación producida en el asfalto, éste ni de manera espontánea ni fácil se puede unir, pues se necesita mucha energía

para revertir ese proceso. Para ilustrar que en el ensayo convencional mostrado en la Figura 3 no se da la fatiga del material, se realizó una prueba de recuperación sobre el asfalto Costa Rica 2. La prueba consistió en realizar el ensayo de fatiga convencional y luego de que la muestra alcanzó el 50% del módulo inicial, se dejó reposar durante una hora para volver a realizar el ensayo. Los resultados se muestran en la Figura 4.

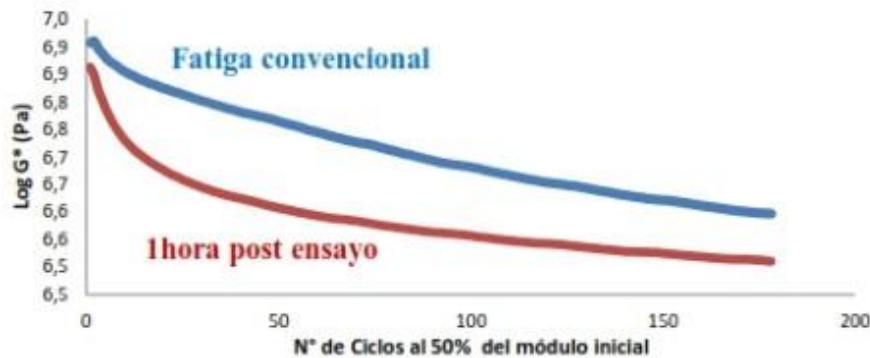


Figura 4 Recuperación de módulo luego de una hora de reposo tras el ensayo de fatiga convencional.

Nótese en la Figura 4 que hay una recuperación del módulo de un 90%. Por otra parte, la caída más abrupta del módulo en la segunda aplicación del ensayo puede ser explicada en primera instancia, por el cambio dimensional de la muestra, producto de los ciclos de deformación y a la memoria de las cargas aplicadas en el primer ensayo. Por tanto que el asfalto pueda recuperar el módulo hace pensar que no se ha dado verdaderamente una fatiga en el material.

Por otro lado, cuando se realiza un ensayo a esfuerzo controlado en el DSR, la respuesta del material es completamente diferente a los resultados obtenidos a deformación controlada, pues se observa la caída abrupta del módulo en la Figura 5.

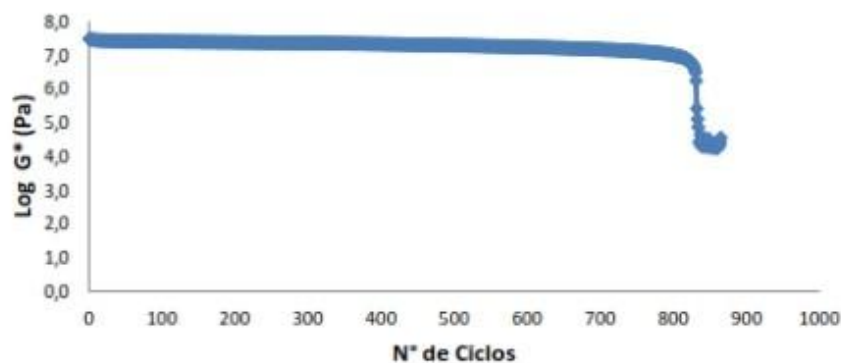


Figura 5 Ensayo de Fatiga a Esfuerzo Controlado

Como se observa en la figura el material exhibe una pequeña disminución en su módulo producto de una deformación en su estructura, pero en aproximadamente 800 ciclos de carga se presenta una caída drástica en el módulo evidenciando fatiga en el ligante asfáltico. Por tanto, el fenómeno de fatiga a temperaturas intermedias según los resultados obtenidos es un proceso donde el material se deforma levemente en los ciclos iniciales del ensayo, pero experimenta una caída abrupta del módulo en pocos ciclos de carga y no lo vuelve a recuperar.

Otro parámetro fundamental para describir el comportamiento de los materiales es el ángulo de fase. Este parámetro no solo muestra la respuesta del asfalto a la deformación permanente o la fatiga, si no también ayuda a determinar la capacidad de recuperación del ligante. En la

Figura 6 se muestra la respuesta del ángulo de fase durante el ensayo de fatiga a esfuerzo controlado.

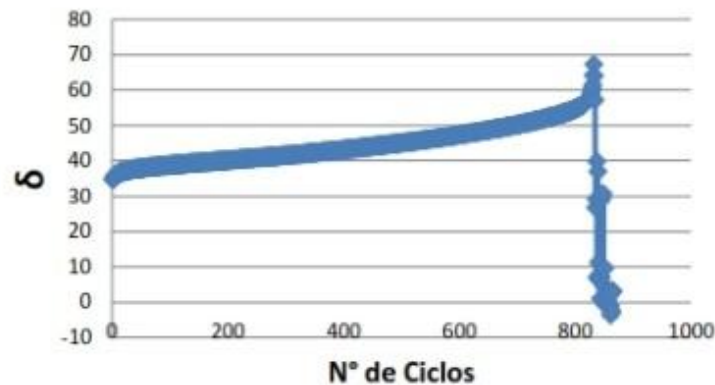


Figura 6 Respuesta del ángulo de fase durante el ensayo de Fatiga a Esfuerzo Controlado para el asfalto Costa Rica 2

De acuerdo a la Figura 6 es posible observar en primer lugar que al inicio de la prueba el ángulo de fase es menor a 45° , lo que indica que la componente elástica (G') impera sobre la viscosa (G''). Conforme aumentan los ciclos de carga el asfalto experimenta deformación, lo cual se observa con el incremento en el ángulo de fase antes de los 800 ciclos. A partir de los 800 ciclos, este parámetro experimenta una caída abrupta, lo que confirma que a partir de este número de ciclos sí existe un falla por fatiga en el material. Como se observa en la Figura 7 las muestras ensayadas a esfuerzo controlado evidentemente se fracturan y su estructura completamente se destruye.



Figura 7 Muestra de asfalto fracturada luego del ensayo de Fatiga a Esfuerzo Controlado

Cuando se analizan los dos métodos de ensayo a fatiga tanto en deformación como en esfuerzo controlado, es importante observar cómo es el comportamiento de sus componentes elástica (G') y viscosa (G'') y cómo influyen en la respuesta del asfalto. En las Figura 8a y 8b se comparan los resultados obtenidos al evaluar el asfalto Costa Rica 2 a fatiga tanto a deformación controlada (10%) como a esfuerzo controlado (0.6MPa), a una temperatura de 20°C y a una frecuencia de 10 rad/seg.

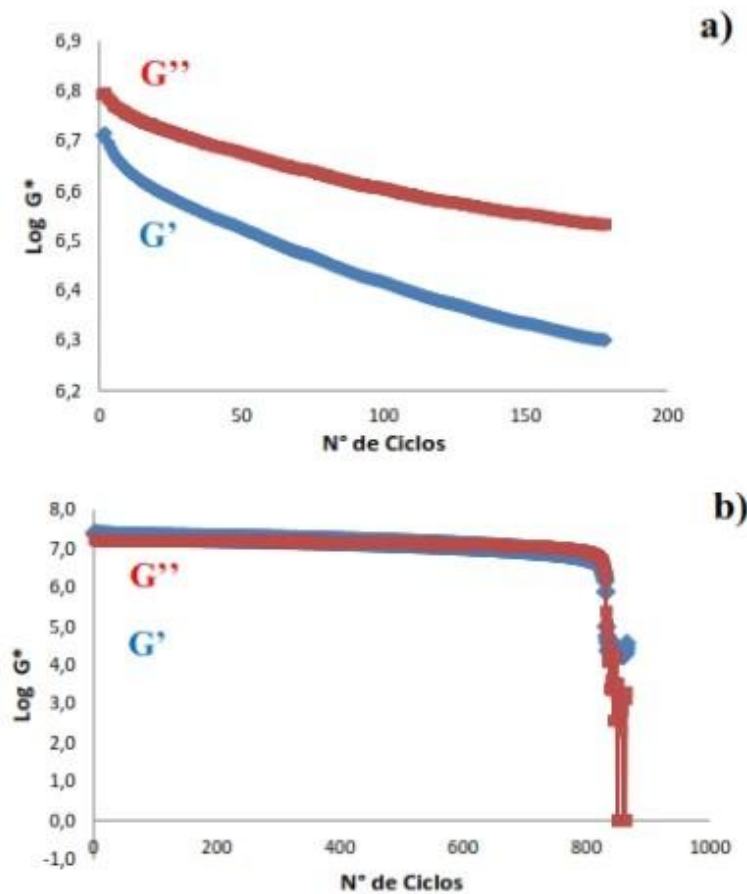


Figura 8 Comparación del comportamiento de las componentes elástica, G' y viscosa, G'' en el ensayo de Fatiga a deformación controlada (a) y a esfuerzo controlado (b) del asfalto Costa Rica 2

Como se observa en el ensayo a deformación controlada (Figura 8a), la componente viscosa (G'') desde los primeros ciclos domina sobre la componente elástica (G') y el dominio se acentúa conforme aumenta el número de ciclos. Este fenómeno evidencia una susceptibilidad a la deformación del asfalto a lo largo del ensayo. Cuando se realiza el ensayo a esfuerzo controlado (Figura 8b) la respuesta del material es completamente diferente, pues las componentes elástica y viscosa compiten por el dominio del comportamiento del ligante. En este caso, durante los primeros ciclos de carga la componente elástica domina el comportamiento del asfalto. Sin embargo, a medida que los ciclos de carga van en aumento existe una influencia cada vez mayor de la componente viscosa, la cual hace que el material tienda ligeramente al flujo, hasta que finalmente se rompe y ambas componentes caen en unos pocos ciclos de carga. Nótese que la componente elástica trabaja para recuperar el módulo, pero la viscosa se encuentra completamente descompensada, por lo que no existe posibilidad de recuperación, esto evidencia fatiga.

Los resultados demuestran que el ensayo de Fatiga a Esfuerzo Controlado simula mejor el fenómeno de fatiga en asfaltos. Sin embargo, es necesario tomar en cuenta que se debe calibrar la carga a aplicar tal que proporcione un número de ciclos pertinentes para poder describir el comportamiento del material. La carga necesaria dependerá de la rigidez del material. Por ejemplo, en la Figura 9 se muestra la calibración de la carga para la muestra de asfalto Costa Rica 2, donde se observa que la carga de 0,6 MPa es la óptima para obtener un número de ciclos

adecuados para medir y comparar el comportamiento a fatiga. Cargas inferiores harían que el tiempo de ensayo sea extremadamente largo o que la muestra no fatigue. Cargas superiores generan un número muy escaso de ciclos de carga, lo cual no conviene porque brinda muy poca información del comportamiento de los asfaltos y dificulta comparar varios ligantes.

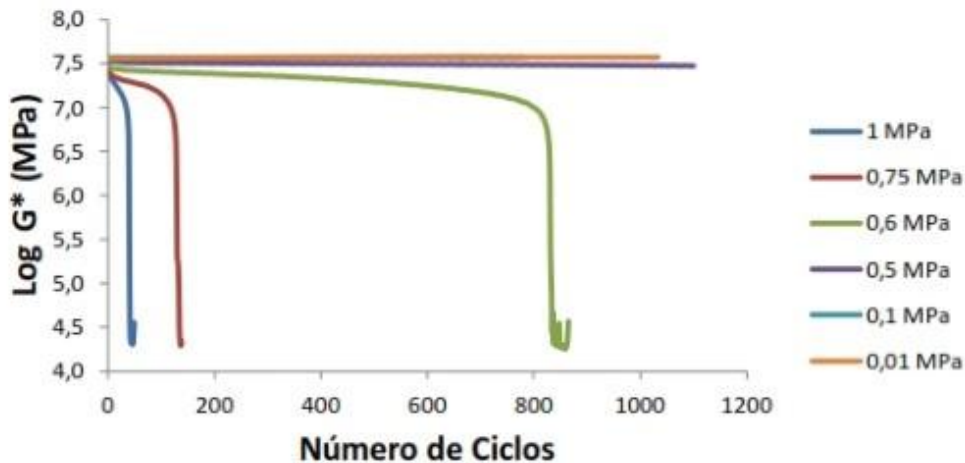


Figura 9 Calibración de la carga en el ensayo de Fatiga a Esfuerzo Controlado

6.3. La Composición Química

Adicional a lo anterior, es importante observar que la $G^*=G''$ se desplaza a temperaturas más altas conforme más oxida el asfalto. Para resaltar este fenómeno, se realizó una oxidación del asfalto Costa Rica 2, hasta 5 ciclos de PAV, los resultados se muestran en la Figura 10:



Figura 10 Temperatura $G^*=G''$ en asfalto Costa Rica 2, sometido a 5 ciclos de PAV

Nótese que en asfaltos sumamente oxidados el fenómeno se da a temperaturas donde se espera que el asfalto falle por deformación permanente. Esto evidencia que en proyectos de carretera en los cuales el asfalto se encuentre en un grado de oxidación elevado, la temperatura a la cual se puede empezar a agrietar el material es considerable.

La oxidación del ligante de asfáltico se produce durante dos etapas: 1) durante la refinación, la producción de HMA, la compactación en carretera, y 2) durante la vida útil de HMA (Huang & Grimes, 2010) [10]. Las reacciones que se producen durante estas etapas dependen en gran medida de la composición química del asfalto [11] [12].

Una de las dudas asociadas al análisis de fatiga en mezclas asfálticas surge, de que SuperPave propone un método de oxidación de asfaltos normado, el PAV (AASHTO R-28), este método de condicionamiento dista mucho del estado del asfalto en la viga de fatiga (AASHTO T321-

14), lo que genera una inconsistencia entre el reporte brindado en el laboratorio de asfaltos y la preparación de muestras en el laboratorio de mezclas asfálticas, según se aprecia en la Figura 11:

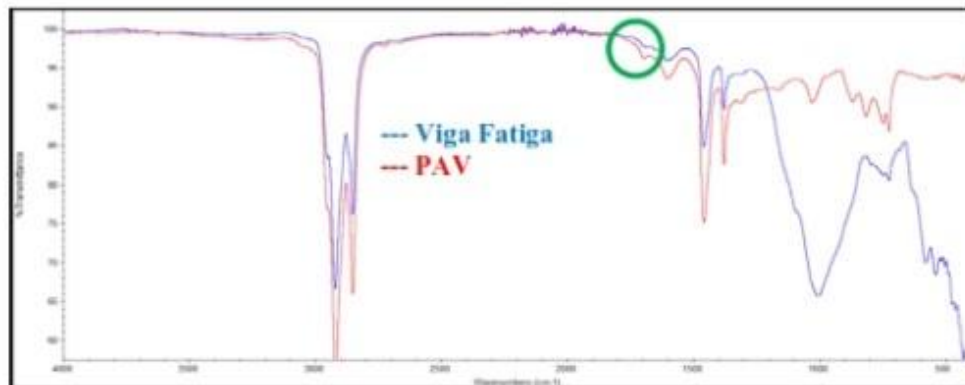


Figura 11 Análisis Químico (FTIR) asfalto de viga de fatiga según norma AASHTO T321-14 y asfalto oxidado en PAV AASHTO R-28

Nótese de la Figura 11, en el área demarcada en verde (en donde se encuentran los carbonilos, alrededor de 1700) se observa que el nivel de oxidación del asfalto oxidado en PAV (rojo), es mucho mayor que el del asfalto de la viga de fatiga (azul), lo que evidencia que el estado del asfalto en la viga de fatiga no se encuentra en un nivel de oxidación acorde al PAV. Esto introduce dudas en la respuesta del material en la viga de fatiga y denota inconsistencias entre las norma AASHTO T321-14 y AASHTO R-28.

7. Conclusiones

Cuando se quiere describir el comportamiento a fatiga a temperaturas intermedias es importante asegurarse que el ensayo se realice a una temperatura a la cual el asfalto sea susceptible a la fractura. Cuando se trabaja a temperaturas bajas la probabilidad que el asfalto fracture es mayor conforme desciende la temperatura. Además de la temperatura la velocidad de carga influye directamente en el desempeño a fatiga de los asfaltos, conforme la velocidad de carga aumenta el asfalto se rigidiza y eleva el intervalo de la temperaturas donde la fatiga se puede presentar. Bajas velocidades de carga aumentan las propiedades de flujo del material favoreciendo la deformación.

La relación entre G'' y G' como parámetro de control de los ligantes es un método fácil de realizar, interpretar y con un equipamiento más común en los laboratorios de asfaltos. Los ensayos realizados en el reómetro dinámico de cortante son consecuentes con los el cambio en las propiedades reológicas del material sometido a envejecimientos y oxidaciones en métodos normados internacionalmente como el RTFO y el PAV.

Los ensayos a deformación controlada inducen al material a relajarse y por lo tanto deformarse, el hecho que el asfalto pueda recuperar el módulo en el tiempo, indica que el fenómeno de fatiga no se presentó en el ensayo. Los modelos más convencionales para el comportamiento a la fatiga no consideran que si existe la tixotropía no podemos hablar de fatiga, puesto que este fenómeno está ligado al flujo de materiales. Si el fenómeno de tixotropía aparece en los primeros ciclos de carga, no puede desaparecer a menos que ocurra un cambio en la composición química o una disminución abrupta de la temperatura. Otro hallazgo encontrado en cuanto a los ensayos de deformación permanente, es que conforme aumenta el número de ciclos la magnitud de la componente viscosa se hace cada vez mayor que la elástica, es poco probable la aparición de microgrietas y grietas, pues conforme el dominio de la componente viscosa es mayor, la capacidad de fluir del asfalto es más evidente. Por tanto, para hablar de fatiga es imprescindible concebir el material con un comportamiento pseudo-sólido.

El fenómeno de fatiga a esfuerzo controlado, según los resultados obtenidos, es un proceso donde el material se deforma de forma leve en los ciclos iniciales del ensayo, pero experimenta una caída abrupta del módulo en pocos ciclos de carga y no lo vuelve a recuperar.

Niveles altos de oxidación del asfalto favorecen que este material sea susceptible a fatiga a temperaturas cada vez más elevadas, incluso a temperaturas donde se espera que la respuesta del material sea a deformación permanente.

Los métodos de fatiga en mezcla asfáltica y ligantes asfálticas tienen diferencias consistentes en cuanto al condicionamiento del asfalto. Lo anterior infiere en análisis no compatibles y resultados que poco reproducen el comportamiento del ligante asfáltico a la fatiga.

8. Referencias

- [1] Soenen, H., De la Roche, C., Redelius, R., Predict mix fatigue test from binder fatigue properties, measured with a DSR., 3th Euroasphalt & Eurobitume congress, Vienna, 2004.
- [2] (Di Benedetto H, Soltani AA, Chaverot P. Fatigue damage for bituminous mixtures. In: Mechanical tests for bituminous materials; 1997).
- [3] Mewis J, Wagner NJ. Thixotropy: colloids, polymers and surfactants. Special issue in honour of Brian Vincent. *Adv Colloid Interf Sci*, 2009.
- [4] Howard A. Barnes. Thixotropy a review. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*; Volume 70, Issues 1-2, 1997.
- [5] D. Lesueur, J.F. Gérard, P. Claudy, J.M. Létoffé, D. Martin, J.P. Planche, Relationships between the structure and the properties of paving grade asphalt cements, *J. Assoc. Asphalt Paving Technol*, 1997.
- [6] L. Shan, Y. Tan, S. Underwood, Y.R. Kim, Application of thixotropy to analyse fatigue and healing characteristics of asphalt binder, *J. Transp. Res. Board* 2179, 2010.
- [7] Rafael Ernesto Villegas-Villegas, Luis Guillermo Loria-Salazar, José Pablo Aguiar-Moya, Wilmar Darío Fernández-Gómez, Fredy Alberto Reyes-Lizcano. "Recycling of banana production waste bags in bitumens: A green alternative", *Eurobitumen*, Istanbul (Turquía), 2012.
- [8] Barksdale, Richard D, Compressive stress pulse times in flexible pavements for use in dynamic testing, *Highway Research Board*, 1973.
- [9] Huang, Y. H. *Pavement analysis and design*. ,1993.
- [10] Huang, Shin-Che, and Will Grimes. "Influence of aging temperature on rheological and chemical properties of asphalt binders." *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2179, 2010.
- [11] Branthaver JF, Petersen JC, Robertson RE, Duvall JJ, Kim SS, Harnsberger PM, Mill T, Ensley EK, Barbour FA, Schabron JF. "Binder Characterization and Evaluation", vol. 2: Chemistry, SHRP-A-368. Washington, DC: National Research Council, 1993.
- [12] Shin-Che Huang and Will Grimes. "Influence of Aging Temperature on Rheological and Chemical Properties of Asphalt Binders", *Transportation Research Record*, 2010.