

ESTUDIO DEL ENVEJECIMIENTO Y OXIDACIÓN DE ASFALTOS CON FTIR Y SU RELACIÓN CON LOS PARÁMETROS REOLÓGICOS.

Rafael Ernesto Villegas-Villegas¹, José Pablo Aguiar-Moya², Luis Guillermo Loria-Salazar³

¹Programa de Infraestructura del Transporte, Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica, rafael.villegas@ucr.ac.cr

²Programa de Infraestructura del Transporte, Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica, jose.aguiar@ucr.ac.cr

³Programa de Infraestructura del Transporte, Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica, luis.loriasalazar@ucr.ac.cr

Resumen

La comprensión del fenómeno de oxidación de los asfaltos es clave para el entendimiento de cómo se va a desempeñar el ligante durante su vida de diseño. La forma en la cual el asfalto se oxida es vital para el ingeniero que diseña pues influye en las propiedades fisicoquímicas, lo implica puede resultar en una mayor susceptibilidad al agrietamiento.

La oxidación es un fenómeno producto de la combinación de muchos factores tanto ambientales como de producción. Para muchos, los términos oxidación y envejecimiento son prácticamente iguales, esto conlleva a no tener una visión completa del fenómeno y por ende, no se diseña con todas las consideraciones que deberían plantearse para asegurar la durabilidad del material.

Investigaciones anteriores sugieren que en el asfalto los compuestos de carbonilo se forman a una tasa que es función de la presión parcial de oxígeno y la temperatura a la cual se exponga el material. Para cuantificar la presencia de los grupos carbonilos, así como otros relacionados con el proceso, se utilizó el FTIR. Esto para poder determinar la presencia del proceso de oxidación en el asfalto. Por tanto, en este estudio se sometió el asfalto a procesos de envejecimiento en RTFO, variando el método para considerar procesos más extensos de envejecimiento, así como cambios en la temperatura, para tratar de simular si verdaderamente se oxida el asfalto en planta y cual factor facilita el envejecimiento durante la producción de la mezcla asfáltica. El asfalto también fue sometido a varios ciclos de PAV con la intención de poder ver la capacidad de oxidación del ligante. A partir de los datos de FTIR obtenidos se buscó correlacionar los contenidos de los compuestos asociados a la oxidación con el comportamiento reológico del material.

Palabras clave: FTIR, Oxidación, Fatiga, Reómetro Dinámico de Cortante, Viscoelasticidad.

1 Introducción

El asfalto es un material derivado del petróleo compuesto por largas cadenas de hidrocarburos en donde su comportamiento es viscoso o viscoelástico dependiendo de la temperatura. A temperaturas bajas se comporta como un sólido y conforme esta incrementa su comportamiento es líquido [1].

La oxidación es un fenómeno inminente en el asfalto. Por tanto, es de esperar que el material presente problemas asociados a este fenómeno. Durante años se ha culpado al asfalto de la mayoría de los problemas de la mezcla y por ende del comportamiento de la carpeta asfáltica. Muchas veces se escuchan expresiones como que el asfalto esta envejecido u oxidado, en algunas ocasiones el término es indistinto para el que lo usa porque prácticamente es lo mismo a su entender.

Los métodos RTFO (Horno de envejecimiento en película delgada rotacional) y PAV (Cámara de envejecimiento por presión) causan cambios en las propiedades reológicas de los asfaltos, los cuales se rigidizan elevando sus módulos, minando su capacidad de recuperación y cambiando la forma en que el material se adhiere al agregado [2].

Si se quiere tener certeza de oxidación asfáltica el método más eficaz es el Análisis Infrarrojo con Transformada de Fourier (FT-IR). No obstante, la tecnología no es accesible a la gran mayoría de los laboratorios de control de calidad, por lo que se requiere un método de mayor acceso en cuanto a disponibilidad de equipo se refiere, de dominio general y de fácil implementación.

Consecuente y considerando la necesidad del sector de carreteras el LanammeUCR ha estudiado diversos tipos de asfaltos con FTIR, evaluando varios tipos de asfaltos a distintos condicionamientos térmicos, con el fin de ponderar su condición ya sea de envejecidos u oxidados. Una vez identificada la condición de cada uno de los ligantes y de acuerdo a una base de datos de aproximadamente de 15 años analizando reológicamente los asfaltos de Costa Rica, se procede con el Reómetro Dinámico de Cortante (DSR) a analizar cada muestra, generando un método de identificación de asfaltos originales, envejecidos y oxidados, útil en el laboratorio y avalado por comparación directa con el FTIR.

2 Marco teórico

La oxidación asfáltica es de importancia pragmática porque conduce al endurecimiento del asfalto, resultando en un deterioro de las propiedades físicas deseables. En las carpetas asfálticas la oxidación contribuye significativamente a la fragilización del pavimento, lo que genera excesivo agrietamiento [3].

Cuando se suscitaba una sospecha de que un asfalto estaba envejecido u oxidado se recurría a las pruebas que en ese momento se tenían a mano. En el caso de la penetración los resultados de prueba no son lo suficientemente sensibles para predecir con exactitud la condición del ligante. Por otro lado la viscosidad resulta en un rango de medición muy abierto. Por ejemplo un asfalto cumple con ser AC-30 si su rango de viscosidades está entre 2400-3600 Poises, en consecuencia mientras no exceda ese rango difícilmente se le puede imputar defecto alguno. Otro modo de evaluación es por la medición indirecta del asfalto en la mezcla, lo cual es mucho más complejo pues tiene variables involucradas tales como almacenamiento del ligante, agregados, diseño de mezcla y proceso de mezclado.

Es importante considerar que los asfaltos a analizar provienen ya sea de la refinera o están sujetos almacenamiento en planta, lo cual es un período considerablemente corto de tiempo en comparación a la vida útil que el ligante va a asumir en carretera. Huang y Grimes [4] hacían alusión a diferentes autores los cuales coinciden en dos etapas claves para en el proceso de oxidación: 1) La primera es una etapa en la que los cambios en el ligante asfálticos son muy rápidos y se produce por el almacenamiento en planta, pero sobre todo por el proceso de mezclado. 2) La segunda etapa es más lenta y ocurre a temperaturas más bajas durante la vida del pavimento.

En ciencia de polímeros es sabido que la flexibilidad de los polímeros amorfos se puede asociar a reducciones en el estado vítreo. Adicionalmente, esta reducción se puede relacionar con estructuras básicas como:

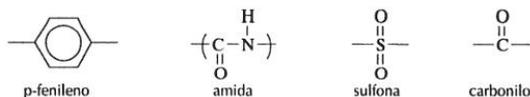


Figura 1. Grupos funcionales que rigidizan la estructura de los materiales poliméricos [5].

Para tener claro lo que le sucede al asfalto es necesario tener una visión acertada del material. Peterson [6] aducía que tres factores principales que causan endurecimiento al asfalto son: la pérdida de volátiles, cambios en la composición química por reacción con el oxígeno y la forma en que se estructuran las moléculas que producen efectos tixotrópicos por endurecimiento estérico.

El FTIR es un método efectivo para medir y cuantificar grupos funcionales que denoten oxidación asfáltica. Las bandas de 1705 cm^{-1} se deben a C=O en compuestos carbonilos tales como cetonas, ácidos y anhídros carboxílicos, mientras que a 1030 cm^{-1} corresponden a S=O de compuestos sulfóxidos. Para poder ponderar la concentración de estos grupos en el asfalto se debe calcular el área de los picos en las longitudes de onda antes mencionada y la magnitud en la formación de estos grupos durante el proceso de envejecimiento y oxidación térmica. Dicho fenómeno es dependiente de la composición química de cada asfalto [7].

El mecanismo de oxidación es muy complejo, en donde se podría dar que por la oxidación de metileno, la degradación de los insaturados y los anillos nafténicos del benceno conllevan a la formación de cetonas y ácidos carboxílicos respectivamente. Por otro lado también promueven la oxidación de tio-éteres a sulfóxidos. Adicionalmente puede ocurrir un rompimiento de cadenas en la aromatización durante el envejecimiento oxidativo, pudiendo no haber incorporación de oxígeno en el asfalto [7][8].

Dada la química del asfalto, la cual es específica y da a cada material una respuesta viscoelástica única, si no se desea que el asfalto oxidado tenga problemas a fatiga es necesario tener una incidencia adecuada de la componente viscosa capaz de proporcionarle al ligante relajación ante los esfuerzos dinámicos relacionados a cargas [4].

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 rigidez como indicador de la resistencia a la fatiga por la relación entre este y la energía disipada por ciclo de carga. El éxito de este acercamiento ha sido cuestionado, sin embargo, este parámetro brinda diferentes resultados para distintas condiciones de carga [9].

Desde el punto de vista de las características del flujo del material necesarias para una adecuada disipación de la energía del mismo, se ha comprobado que conforme el material se oxida su respuesta deja de ser newtoniana, comportamiento en el cual la temperatura provee la mayor aportación de la capacidad de fluir del material. Según la ecuación de Arrhenius se obtiene:

$$\eta = \tau_{ho} e^{Q/RT} \quad (1)$$

Donde τ_{ho} es una constante del material, R es la constante de los gases ideales, Q es la energía de activación de movimiento de las capas del material y T es la temperatura absoluta. Cuando el material se oxida y su comportamiento se pudiese tornar no newtoniano, siendo este es más complejo, pues aun manteniendo la temperatura constante factores como esfuerzo cortante, tasa de corte y el tiempo toman una gran relevancia [10].

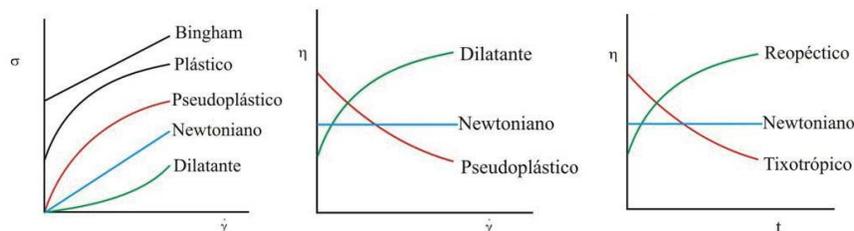


Figura 2. Comportamiento reológico de los materiales. Fuente: TA Instruments.

Cuando se hacen mediciones dinámicas en el reómetro, el esfuerzo y la deformación varían armónicamente con el tiempo, por tanto, cuando el material se somete a esfuerzo su respuesta natural se traduce en una deformación. El ángulo de fase y la amplitud del radio de esfuerzo en relación a la deformación dependen de las propiedades de los materiales y aunque varíen con la frecuencia, aportan información sobre las propiedades del material.

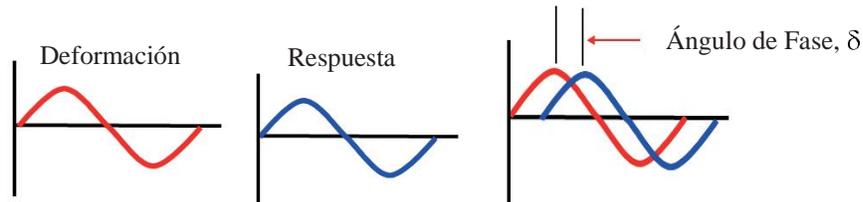


Figura 3. Respuesta esfuerzo-deformación y su relación con el ángulo de fase.
Fuente: TA Instruments.

El ángulo de fase es un parámetro importante en la determinación de propiedades viscoelásticas del asfalto y por ende es un indicador de la capacidad de fluir del material [11].

Huang y Grimes [4] modificaron el modelo logístico convencional para establecer una relación entre el modulo complejo y el ángulo de fase:

$$G^* = \frac{G_g^*}{[1 + \exp^{-\beta^*(\delta - \gamma)}]} \quad (1)$$

En donde G^* es el modulo cortante, G_g^* es el modulo complejo vítreo, β es la forma de la curva (dimensional), δ es el ángulo de fase en grados a la frecuencia dada y γ es la constante de correlación.

Como en el modelo anterior, muchos autores estudian propiedades reológicas desde el punto de vista del cambio en el módulo cuando el asfalto comienza a tener un comportamiento vítreo, Como resultado de la oxidación, conforme su temperatura baja su comportamiento es como un sólido elástico, pudiendo fracturarse incluso a cortos periodos de carga. En este sentido la contribución de la componente elástica (G') a bajas temperaturas llega a ser en algunos casos determinante, pudiendo determinar casi por completo el comportamiento reológico del material, anulando cada vez más la componente viscosa (G'') que es la que le da fluidez al ligante. Bajo estas condiciones:

$$G^* = \sqrt{G'^2 + G''^2} \approx G' \quad (2)$$

En donde estas dos componentes G' y G'' tienen una estrecha relación con el ángulo de fase anteriormente descrito:

$$\delta = \tan^{-1}(G''/G') \quad (3)$$

De la ecuación anterior se deduce que cuando $G'' = G'$ el ángulo de fase (δ) es igual a 45° , esto significa que si se cumplen las condiciones anteriores y el G' comienza a dominar el comportamiento del material, conforme $\delta \rightarrow 0^\circ$ el comportamiento es como un sólido ideal. Las relaciones entre sus componentes deben ser:

$$G' > G'' \text{ ó } (G''/G') \rightarrow 0^+ \quad (4)$$

Lo anterior evidencia en el comportamiento mecánico de los asfaltos está totalmente influenciado por la temperatura y la composición, o el cambio en la composición química del asfalto. Esto hace que conforme se cumplen las condiciones antes mencionadas la capacidad de fluencia del material va decreciendo considerablemente, siendo la fractura la forma en que el material disipa energía. Tanto la oxidación como las bajas temperaturas rigidizan el asfalto, lo que conlleva a un aumento significativo de G' y una disminución de G'' , siendo esta una consideración de peso para determinar el desempeño del ligante a temperaturas intermedias y bajas [7].

3 Objetivo

A partir de análisis de asfaltos envejecidos y oxidados en el FTIR, se busca crear una herramienta eficaz de análisis en el DSR (Reómetro Dinámico de Cortante) que pueda predecir si durante el proceso de refinación o almacenamiento, el ligante asfáltico ha sufrido daño debido a la exposición térmica a la que se ha expuesto. De esta metodología se infiere parámetros reológicos que son de mayor facilidad de obtención, comprensión y acceso a equipo que el FTIR, pero que en sí mismos no buscan reemplazar los análisis químicos, si no dotar de un instrumento útil para decisiones de compra del material.

4 Materiales utilizados

Los materiales utilizados en el estudio fueron tres asfaltos AC-30 como único tipo de asfalto de Costa Rica utilizado, puesto que la Refinería Costarricense de Petróleo (RECOPE) distribuye únicamente este tipo de asfalto. Adicionalmente, se analizó un AC-20, un AC-10 y un AC-5. Los asfaltos fueron sometidos a diferentes temperaturas y tiempos en el RTFO, además de varios ciclos de PAV en algunas de las muestras.

5 Descripción de métodos de ensayo

El estudio consistió en caracterizar los ligantes tratados térmicamente mediante FTIR con ATR (Reflexión Total Atenuada), calculando el incremento en los carbonilos y sulfóxidos y su incidencia en las propiedades mecánicas del material. Las propiedades mecánicas de los asfaltos se midieron con un DSR. Se consideró en el método de medición reológica que el parámetro a considerar es el daño por fatiga del bitumen a temperaturas intermedias de servicio en carreteras comunes en la mayoría de países de Centroamérica. Para este propósito se realizó un barrido de temperatura desde los 10 a 34 °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.

6 Resultados y análisis

6.1 Estudio de diferentes tipos de asfaltos

En el proceso de compra de asfalto es difícil dilucidar el estado en que este se encuentra. Se busca determinar si el asfalto está en óptimas condiciones o si está envejecido u oxidado, lo cual tiene serias implicaciones en la vida útil del material, acortando tiempo en que el material llegue a un estado de oxidación tal que se fatigue. Desde el punto de vista del FTIR se realizaron mediciones a los tipos de asfaltos originales de diferentes grados de viscosidad.

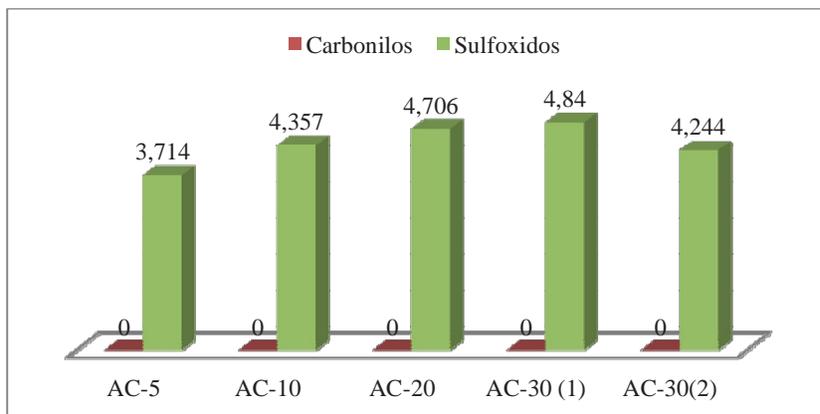


Figura 4. Análisis FTIR asfaltos originales.

Es notable en la figura anterior que para ninguno de los asfaltos evaluados en el FTIR se detecto la presencia de carboxilos y la diferencia de los valores calculados de los sulfóxidos no evidencia mecánicamente diferencias en la rigidez del material.

A los diferentes tipos de asfaltos utilizados se les trato térmicamente en el RTFO y el PAV. Estos asfaltos tanto originales como con tratamiento térmico se les realizaron análisis de infrarrojo (FTIR) en donde se cuantificó los sulfóxidos y los carbonilos presentes en las muestras analizadas.

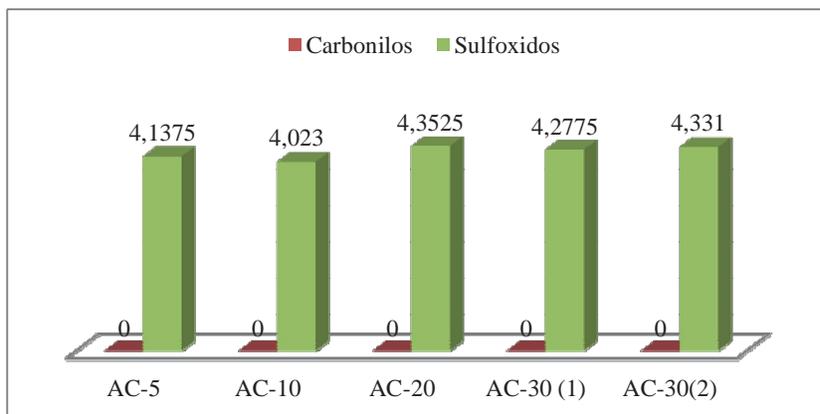


Figura 5. Análisis FTIR asfaltos RTFO.

En el caso de los asfaltos condicionados en RTFO el cual simula el envejecimiento en planta y la compactación en carretera, sucede algo parecido al comportamiento en el FTIR de asfaltos originales; no se detectan carbonilos bajo el método utilizado. En el caso de los sulfóxidos no se visualiza una relación directa entre la reología del material y el área obtenida en los picos del FTIR. En el caso de los asfaltos oxidados en el PAV se observan resultados más útiles para la toma de decisiones.

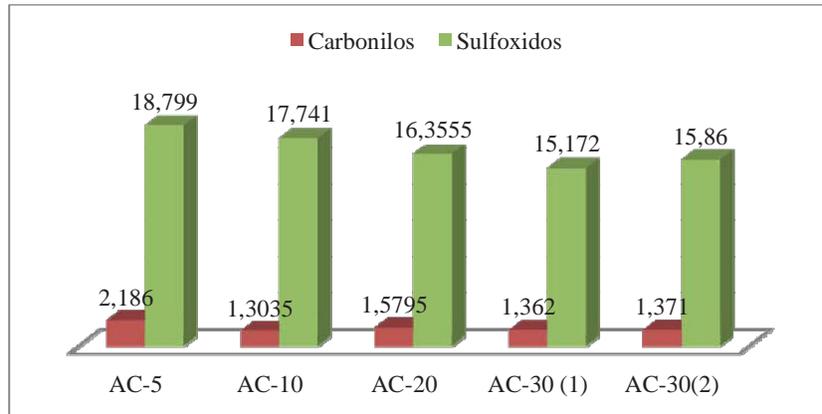


Figura 6. Análisis FTIR asfaltos PAV.

Nótese que para los asfaltos oxidados en el PAV, los cuales reflejan el estado del material entre los 7 y los 10 años de estar en carretera, el grupo carbonilo está presente en el ligante. Esta es una certeza de que el material se encuentra oxidado. Por otro lado los sulfóxidos ya presentan una tendencia acorde a las propiedades reológicas del material.

A partir de los datos arrojados por la mediciones realizadas en el FTIR producto del cálculo en las áreas de las bandas, en donde a 1705 cm^{-1} se deben a $\text{C}=\text{O}$ en compuestos carbonilos, mientras que a 1030 cm^{-1} corresponden a $\text{S}=\text{O}$ de los picos de compuestos sulfóxidos. ¿Cómo saber a la hora de la compra de un asfalto si este está envejecido y en qué grado de envejecimiento se encuentra?. Este hallazgo es primordial a la hora de tomar una decisión en la compra del ligante, ya que el grado de envejecimiento del asfalto lo hace más susceptible a la oxidación y esto no es un factor a considerar en los controles de calidad del material.

Para poder determinar si un asfalto esta en claro grado de envejecimiento o se encuentra oxidado, se recurrió a datos obtenidos en el historial de mediciones de asfaltos del LanammeUCR, que consta de mediciones a clientes nacionales e internacionales por más de 15 años. La base de datos constata que el PG intermedio de un asfalto AC-20 y AC-30 oxidado en el PAV en más de un 95% las veces no alcanza una temperatura inferior a $19\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Es importante considerar que a temperaturas intermedias inferiores a los $19\text{ }^{\circ}\text{C}$, los asfaltos oxidados tienden a la fractura. Basado en los parámetros reológicos fundamentales es de esperar que para que este fenómeno se pueda realizar $G' > G''$, y para que esto suceda $\delta < 45^{\circ}$. En base a lo anterior se realizo un barrido de temperatura el cual se contrastó con análisis infrarrojo de los asfaltos en condición original, envejecido y oxidado.

Se definió el rango de temperatura a utilizar entre los 10 y 34°C tomando como consideración las temperaturas intermedias en donde el asfalto es susceptible al daño por fatiga. Como se observa no son detectables los carbonilos y en los sulfóxidos se aprecia un área representativa. Tomando en cuenta el barrido de temperatura realizado se observa que en todo el rango de análisis $G'' > G'$, lo cual es un indicativo de que el material no está envejecido, esto se corrobora con la medida de su ángulo de fase, el cual para todo el intervalo de medición es $\delta > 45^{\circ}$.

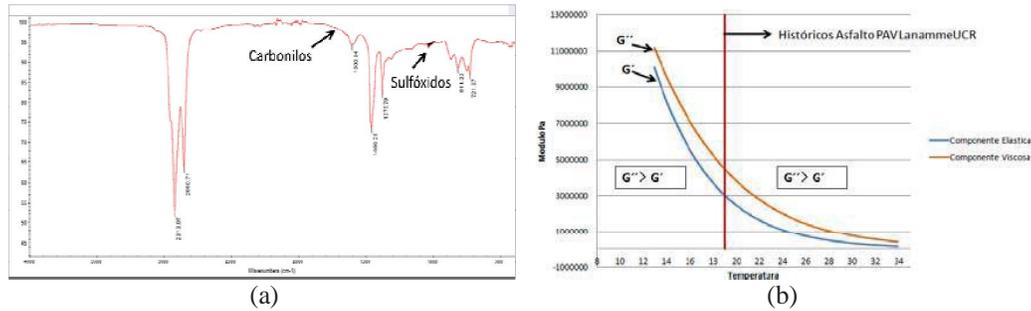


Figura 7. (a) Análisis FT-IR y (b) Análisis Reológico de asfalto original.

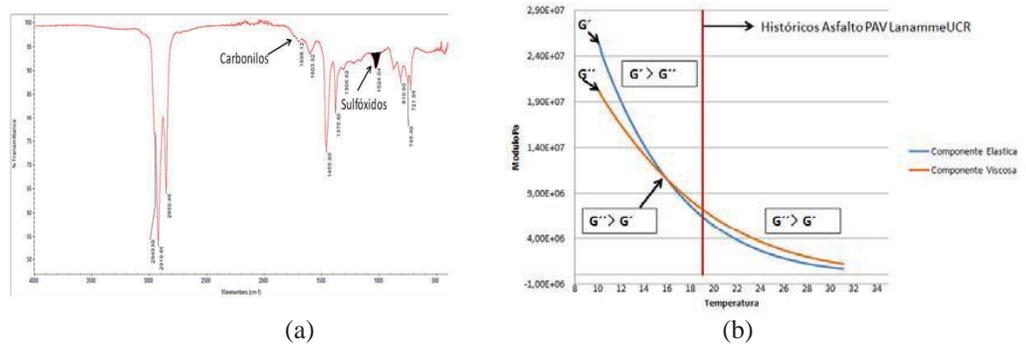


Figura 8. (a) Análisis FT-IR y (b) Análisis Reológico de asfalto RTFO.

Para el asfalto RTFO igualmente los carbonilos no son detectables y es más evidente el pico de sulfóxidos que en el asfalto original. Por otro lado la relación $G'' > G'$ se mantiene a temperaturas superiores a 19°C . Conforme disminuye esta temperatura aumenta la probabilidad de que la componente elástica sea mayor que la viscosa ($G' > G''$), siendo la aparición de este fenómeno en el rango de temperaturas comprendidas entre los 10 y 34°C evidencia de envejecimiento en el asfalto.

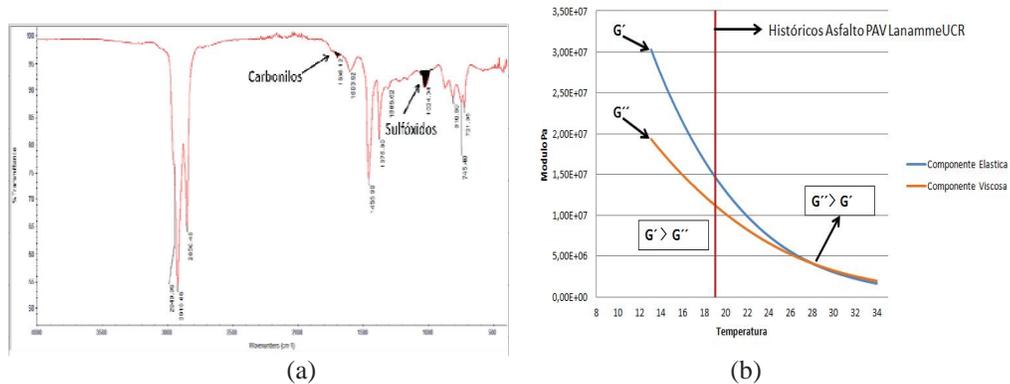


Figura 9. (a) Análisis FT-IR y (b) Análisis Reológico de asfalto PAV.

En el caso de los asfaltos provenientes del PAV es evidente un pico en los carbonilos y un área más extensa en los sulfóxidos que en el asfalto original y RTFO. Es importante observar que la

relación $G' > G''$ se mantiene siempre a temperaturas inferiores a los 19 °C y por encima de esta temperatura es donde la componente viscosa comienza a regir el comportamiento del ligante. Conforme más alta sea la temperatura a la cual se inicie este comportamiento, más susceptible a la fatiga es el material.

Cuando se evalúan diferentes tipos de asfalto de diferentes consistencias el método aplicado toma resultados consistentes y arroja datos interesantes.

Tabla 1. Curvas Reológicas de diferentes asfaltos según envejecimiento en RTFO y PAV.

Clasificación Asfaltos	Original	RTFO	PAV
	T (°C) ($G'' > G'$)	T (°C) ($G'' > G'$)	T (°C) ($G'' > G'$)
AC-5	< 10 °C	< 10 °C	18,2
AC-10	< 10 °C	< 10 °C	19,2
AC-20	< 10 °C	12,1	22,5
AC-30 (1)	< 10 °C	16,4	28
AC-30 (2)	< 10 °C	12,5	25,5
AC-30(3)	< 10 °C	13,1	25,1

Este barrido de temperatura resulta útil para sondear el estado de un asfalto a la hora de su aceptación y tener una idea de la condición del material que se va a utilizar en el proyecto, siendo un método para dilucidar posibles envejecimientos u oxidaciones producto de un inadecuado proceso de refinación o almacenamiento del asfalto.

6.2 Influencia del tiempo de ensayo en el RTFO

Una de las preocupaciones fundamentales en la forma en que envejecen u oxidan los asfaltos es el tiempo de exposición del material a un determinado proceso térmico. El asfalto se sometió a diferentes tiempos de en RTFO, distintas a los 85 minutos normados según el método.

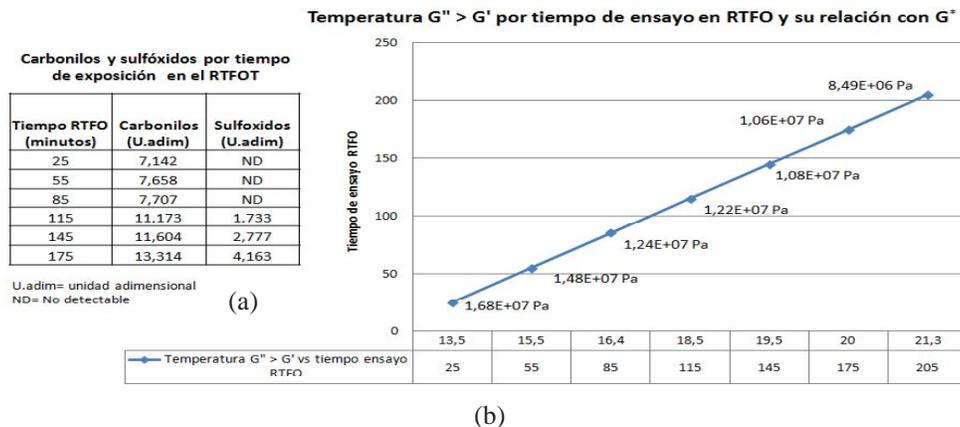


Figura 10. (a) Análisis FT-IR asfalto por tiempo en RTFO y (b) Análisis Reológico de asfalto según tiempo de envejecimiento en RTFO.

Es importante notar que un cambio evidente en la composición química del ligante asfáltico incide en un aumento en la temperatura donde $G'' > G'$. Esta rigidez paulatina del material lo modifica conforme más se exponga este al proceso. En un asfalto más susceptible a la fatiga pues

conforme la relación $G' > G''$ crezca, la forma en que el material disipa energía estaría cada vez más ligada a la fractura. Por otro lado se observa que el valor del módulo no solo depende del cambio en la composición química del material, si no que está muy referido al efecto de la temperatura sobre el asfalto.

6.3 Influencia de la temperatura de ensayo en el RTFO

En todo proceso de mezclado en planta es importante el control de temperatura al cual se ve sometido el asfalto. Un aumento en la temperatura incide directamente en un aumento en la velocidad de reacción de los asfaltos y un aumento en la rigidez del material. El asfalto fue sometido al tiempo de prueba estándar del RTFO de 85 minutos, pero se vario la temperatura del proceso de los 150 a 190 °C.

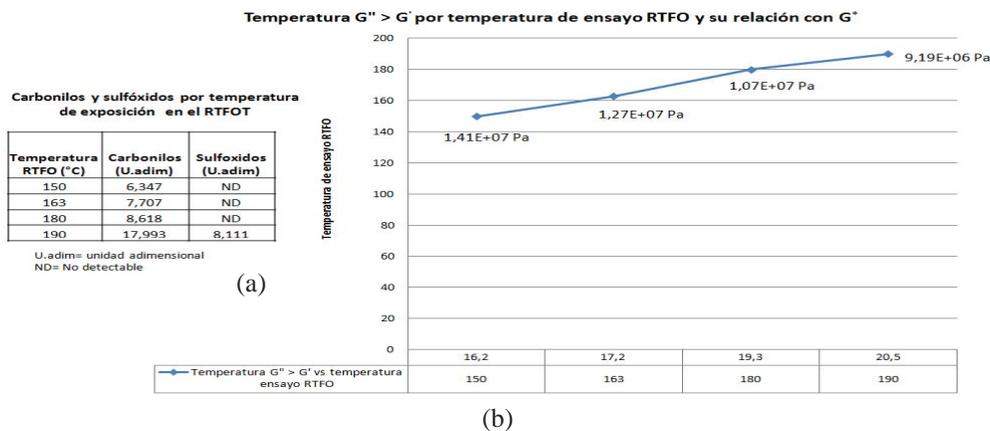


Figura 8. (a) Análisis FT-IR y (b) Análisis Reológico de asfalto según temperatura de envejecimiento en RTFO.

Si se observa el comportamiento del asfalto en relación a la temperatura, a partir de 180 °C los parámetros reológicos del ligante asfáltico son parecidos a las de un asfalto oxidado en el PAV. Prueba de ello es que a partir de esta temperatura $G'' > G'$, supera el histórico de 19 °C. Esta situación pone en evidencia que el trabajar el material a altas temperatura tiene un efecto severo en rigidizar el asfalto, pero que a partir de los 163 °C, los cambios en las propiedades del material apuntan no solo a envejecerlo, si no a una alta probabilidad de oxidarlo.

Conclusiones

La metodología utilizada en el barrido de temperaturas y la relación entre G'' y G' como parámetro de control de los ligantes para su eventual aceptación, 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.

Para la poder obtener una temperatura de referencia para las relaciones G'' y G' es necesario tener un historial importante de mediciones realizadas.

La consideración esencial en la evaluación de los asfaltos es que cuando $G'' > G'$ en el intervalo de 10 a 34 °C, el asfalto no presenta problemas de envejecimiento u oxidación. Si el dominio de

G" se hace presente entre los 10 y 19 °C el asfalto está envejecido, pero si esto ocurre a temperaturas superiores a los 19 °C el asfalto está oxidado.

Para asfaltos originales y envejecidos en el RTFO los valores obtenidos en el FT-IR no muestran parámetros de decisión a la hora de tomar una decisión en la compra del asfalto. Cuando el asfalto está oxidado hay una evidencia en los resultados del FTIR, por lo que para este tipo de condición los resultados son concluyentes.

El cálculo de sulfóxidos y carbonilos en el asfalto por el área del pico generado por el FTIR es un método a trabajar para poder hacer más sensible las mediciones y obtener datos más finos y precisos.

Referencias

- [1] Rafael Ernesto Villegas-Villegas, Luis Guillermo Loría-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).
- [2] Aguiar-Moya, José P, Salazar-Delgado, Jorge, Baldi-Sevilla, Alejandra, Leiva-Villacorta, Fabricio, Loria-Salazar, Luis. "Effect of Aging on Adhesion Properties of Asphalt Mixtures Using Bitumen Bond Strength and Surface Energy Measurement Tests", TRB 2015.
- [3] J. Claine Petersen. "A Review of the Fundamentals of Asphalt Oxidation", TRC E-C140.
- [4] Shin-Che Huang and Will Grimes. "Influence of Aging Temperature on Rheological and Chemical Properties of Asphalt Binders", Transportation Research Record 2010.
- [5] Raimond B. Seymour, Charles E. Carraher. "Introducción a la química de los polímeros", College of Science Florida Atlantic University.
- [6] Chris A. Bell. "Aging of Asphalt-Aggregate Systems", Report SR-OSU-A-003A-89-2, Oregon USA.
- [7] Xiaohu Lu, Ulf Isacson. "Effect of ageing on bitumen chemistry and rheology", Construction and Building Materials, Volume 16, 2002.
- [8] 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.
- [9] Luis Guillermo Loría Salazar. "Evaluación de asfaltos modificados en laboratorio con distintos polímeros", Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR), Revista Infraestructura Vial N°17.
- [10] Stroup-Gardiner, M. "The Significance of Phase Angle Measurements for Asphalt Cements", Journal of Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 65, 1996, pp. 321–356).