

ANÁLISIS CUALITATIVO DEL ASFALTO Y SUS FASES CON MICROSCOPIA DE LUZ POLARIZADA

Fabricio Leiva Villacorta¹, Ernesto Villegas Villegas, José Pablo Aguiar Moya³, Luis Guillermo Loría Salazar⁴

¹ Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica, San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica. fabricio.leiva@ucr.ac.cr

² Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica, San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica. rafael.villegas@ucr.ac.cr

³ Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica, San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica. jose.aguiar@ucr.ac.cr

⁴ Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica, San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica. luis.loriasalazar@ucr.ac.cr

Resumen

La técnica de microscopía de luz polarizada (PLM) es de uso generalizado en áreas del conocimiento como la petrografía, la metalurgia, la biología, la medicina y la química. Consiste en un sistema óptico con filtros de polarización de la luz que permite evaluar propiedades micro-mecánicas, estructurales e inclusive químicas de materiales. Con este estudio se pretende estudiar de forma cualitativa el asfalto y sus principales fases (asfaltenos y maltenos).

Para analizar la aplicabilidad de la técnica, se evaluaron dos asfaltos que han sido distribuidos en Costa Rica en distintos momentos (AC-30 y AC-40). Bajo la condición original, no se lograron observar variaciones en las imágenes PLM. No obstante, al someter las muestras a procesos de envejecimiento en RTFO y PAV si se observaron cambios claros (índice de refracción), que a la vez pueden ser correlacionados con cambios en propiedades reológicas del material.

El fenómeno también pudo ser demostrado a nivel de fracciones del asfalto (asfaltenos vs. maltenos). Los resultados de esta técnica fueron comparados con el análisis tradicional mediante reología para validación. Basado en esta comparación se determinó que los cambios observados en las imágenes PLM correlacionan con propiedades fundamentales del material como lo es el módulo dinámico de cortante $|G^*|$.

Palabras Clave: Asfalto, envejecimiento, luz polarizada, microscopía

1 Introducción

Hoy en día existe un gran interés en poder entender con detalle las propiedades micro-mecánicas y el comportamiento químico del asfalto. Lo anterior con la intención de poder modelar y predecir con mayor grado de confianza el desempeño de las mezclas asfálticas durante su vida útil [1]. A pesar que el asfalto corresponde a un pequeño porcentaje de la mezcla asfáltica, variaciones en la distribución molecular y el arreglo micro-mecánico de las estructuras que lo conforman tienen un efecto muy significativo sobre el desempeño de la mezcla asfáltica. Todo lo anterior va asociado a que pequeñas variaciones en la composición química y estructural de la matriz asfáltica implican cambios considerables en el comportamiento reológico y termoplástico del material [1].

Sin embargo, una adecuada caracterización química y del arreglo micro-mecánico del asfalto es difícil debido a que, inclusive dentro de una misma fuente, existe variabilidad considerable. Esto se debe a que el asfalto está compuesto por diferentes fases o tipos de estructuras. No obstante, el número de fases que varía entre 4 y 6, es muy específico a cada tipo de asfalto [2, 3, 4, 5]. Esto se vuelve aún más crítico cuando se consideran varias fuentes de asfalto [4], condición que es muy típica de Costa Rica donde no siempre es posible identificar la fuente de proveniencia del asfalto, la cual típicamente varía con la temporada.

Por esta razón, existe una gran gama de técnicas que han sido utilizadas para caracterizar la composición química y morfología del asfalto: microscopía electrónica (SEM), espectroscopía infrarroja de transformada de Fourier (FTIR), espectroscopía Raman, difracción de rayos X, cromatografía de gases acoplado a espectroscopía de masas (MS), espectrofotometría UV/visible, cromatografía líquida de alto desempeño (HPLC), cromatografía de columna o de capa fina, espectrofotometría de plasma acoplado inductivamente con detección de masas (ICP-MS) y análisis térmico como termogravimetría (TGA) y calorimetría de barrido diferencial (DSC). De la misma forma, hay una amplia gama de técnicas que pueden ser utilizadas para analizar el comportamiento micro-mecánico de la estructura del asfalto: reómetro dinámico de cortante (DSR), análisis mecánico dinámico (DMA) y microscopía de fuerza atómica (AFM) [6]. Adicionalmente, las técnicas previas suelen evaluarse en conjunto con herramientas que permitan realizar análisis térmico para poder entender de manera integral el comportamiento del material [7].

No obstante, las técnicas enumeradas pueden ser complejas, requieren de equipos costosos e interpretación y análisis de resultados, lo que a la fecha significa que el uso de los mismos no es factible a la hora de llevar procesos de control de calidad y verificación de calidad en campo. Por tanto, el objetivo del siguiente artículo es la introducción de la técnica de microscopía de luz polarizada (PLM por sus siglas en inglés), como un ensayo o verificación que se puede realizar en tiempo real a muy bajo costo y que brinda información cualitativa o cuantitativa del estado del asfalto o la incorporación de aditivos.

2 Microscopía De Luz Polarizada

La microscopía de luz polarizada (PLM) puede abarcar toda una gama de análisis de microscopía que utilizan luz polarizada. La polarización de la luz consiste en especificar la orientación del campo eléctrico de las ondas de luz en una ubicación específica en el espacio, para un período dado de oscilación [8].

El principio se fundamenta en el hecho que la luz es un tipo de radiación electromagnética y como tal contiene moléculas con capacidad de emitir fotones (luz). Cuando la orientación de los campos eléctricos producidos por los emisores de luz es aleatorio, o no están correlacionados, se dice que la luz es no polarizada. Conforme aumenta el grado de correlación entre las ondas, la luz pasa de no polarizada a polarizada (Figura 1).

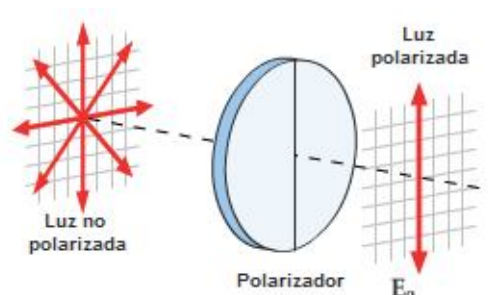


Figura 1 Onda electromagnética (a) no polarizada y (b) polarizada lineal

En general, cuando la luz viaja en el espacio, típicamente se propaga como una onda transversal (partículas de energía vibran perpendicularmente al desplazamiento de la onda). Bajo esta condición, el campo eléctrico de la luz puede ser orientado en una única dirección (polarización lineal) o rotar cuando se desplaza la onda (polarización circular o elíptica) [9].

Con base en este principio, se requiere de un sistema óptico de campo claro con filtros para modificación la luz para poder tomar imágenes de la luz polarizada sobre un material a escalas reducidas. A dicho equipo se le conoce como microscopio de luz polarizada (PLM) (Figura 2). Inicialmente, la tecnología fue enfocada en áreas como la petrografía y la metalurgia. No obstante, actualmente su uso se ha extendido a muchas otras áreas (ej. biología, medicina, química y recientemente materiales para la construcción).



Figura 2 Equipo PLM (fuente: Lanotec, 2013)

Este microscopio puede trabajar en dos modalidades de iluminación, ya sea por luz transmitida o mediante luz incidente. De esta forma la luz de la fuente de iluminación se propaga en todas direcciones debido a vibración, interactuando con la muestra. Posteriormente, la luz continúa su paso a través del sistema óptico y un filtro polarizador de ondas. El filtro busca dejar pasar la luz que vibra únicamente en un plano determinado (eje de polarización) [10].

Los materiales, independientemente de su complejidad, tienen sus moléculas distribuidas en el espacio de forma tridimensional y su arreglo estructural siempre buscará ser el más estable. Materiales de mayor pureza cuentan con estructuras simétricas muy uniformes, y por tanto con las mismas propiedades ópticas en cualquier dirección que se mida. Cuando la luz atraviesa dichos materiales, la velocidad es la misma en todas direcciones y por tanto se denominan isotrópicos o sustancias isotrópicas. De no ser este el caso (ej. estructuras no cristalinas de

arreglos estructurales complejos), los materiales se clasifican como anisotrópicos pues la velocidad de la luz es asimétrica y variables en las distintas direcciones.

Cuando se estudia el comportamiento de un material en un microscopio de luz polarizada los materiales anisotrópicos evidencian distintos índices de refracción en relación a la dirección del haz de luz. En el caso de los materiales isotrópicos mantienen un índice de refracción constante en toda la muestra analizada [11].

El PLM facilita la evaluación de las propiedades ópticas de materiales siendo ideal para observar, fotografiar e inclusive grabar video en alta resolución del comportamiento de muestras y diferencias en sus cambios estructurales que sean visibles después de pasar por un filtro polarizado y gracias a la anisotropía del material en estudio. Es importante aclarar que hay una variedad de filtros que pueden ser utilizados, sin los cuales no sería posible analizar las muestras pues sin los mismos no es posible detectar cambios de intensidad en la luz polarizada. Esto permite obtener imágenes del comportamiento estructural de los materiales: realizar comparaciones entre asfaltos de diferentes fuentes, asfaltos envejecidos de forma controlada, asfaltos modificados mediante la adición de aditivos como polímeros y fases del asfalto obtenidas por separación mediante cromatografía de columna. Dependiendo de las condiciones de la imagen y cómo la misma fue obtenida es posible identificar la morfología del asfalto, anisotropía y textura. Adicionalmente, si se aplican condiciones de esfuerzo externo es posible medir parámetros correlacionados con fragilidad o elasticidad, estado de esfuerzos, punto de fusión e indicadores de deformación acumulada [12]. En cualquier caso de los anteriores es posible obtener información cualitativa, e inclusive cuantitativa, con base en las imágenes del PLM.

3 Caracterización de materiales y Procedimiento Experimental

Los asfaltos evaluados en este estudio corresponden a dos tipos de asfalto clasificados como AC-30 y AC-40. El AC-30 es típicamente utilizado en Costa Rica para la construcción de carreteras. Este asfalto ha sido modificado de forma controlada en laboratorio para analizar su comportamiento mediante PLM. Entre las modificaciones se encuentran envejecimientos RTFO, RTFO+PAV, modificaciones con polímeros que inicialmente son materiales de desecho, como oleofinas termoplásticas para búmer de vehículos, bolsa de desecho para cubrir banano (polietileno), poliestireno, polvo de hule de llanta y modificaciones con el polímero comercial SBS (estireno-butadieno-estireno). Adicionalmente, se han considerado mediciones de la separación del asfalto en dos fracciones mediante cromatografía de columna: la fracción insoluble en n-hexano (asfaltenos) y la fracción soluble en el solvente, posterior a la evaporación del mismo (maltenos).

Para las muestras en condición original, envejecidas de forma controlada y fracciones cromatográficas, se colocó una pequeña gota en un vidrio porta-objeto a una temperatura aproximadamente cercana a 135 °C para garantizar su fluidez. Inmediatamente se coloca un vidrio cubre-objeto y se permite que la muestra entre los dos vidrios permanezca en el horno por cinco minutos para que el espécimen fluya dejando una capa delgada translúcida entre los dos vidrios para ser medida en el PLM. Estos materiales son sólidos o semisólidos a temperatura ambiente y en esa condición se tomaron las imágenes con un microscopio Motic BA300-POL.

4 Resultados

Este estudio se basa en mediciones cualitativas del cambio de color del asfalto, cuando el mismo es sometido a la luz polarizada, bajo diferentes grados de envejecimiento u oxidación. El primer paso en el estudio consistió en medir la respuesta de asfaltos originales a la radiación de la luz polarizada: La Figura 3 muestra la respuesta ante la luz polarizada para el asfalto AC-30 y AC-

40. Nótese que la coloración de ambas muestras es similar con diferentes tonalidades de café. A manera de referencia, el asfalto AC-30 tiene un módulo complejo de cortante $|G^*|$ de 892 Pa y el AC-40 tiene un $|G^*| = 1.212$ Pa. La diferencia en $|G^*|$ es de aproximadamente 36%, sin embargo no se ve reflejada en las imágenes y en el índice de refracción de las muestras.

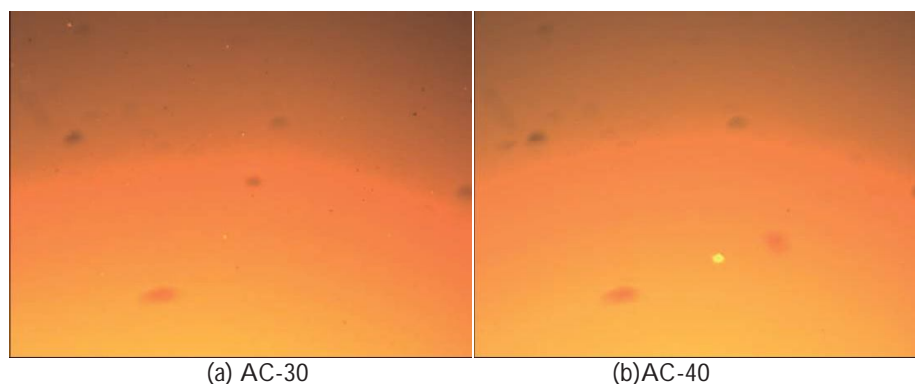


Figura 3 Comparación entre asfaltos originales

El asfalto AC-40 se sometió al proceso de envejecimiento-oxidación en los equipos RTFO y PAV, obteniendo las imágenes mostradas en la Figura 4. Aunque este asfalto por su alta viscosidad (AC-40) es poco susceptible a la pérdida de volátiles, se nota un cambio de color en la muestra de PAV: la diferencia en refractividad de la muestra se ve reflejada en tonos más amarillos.

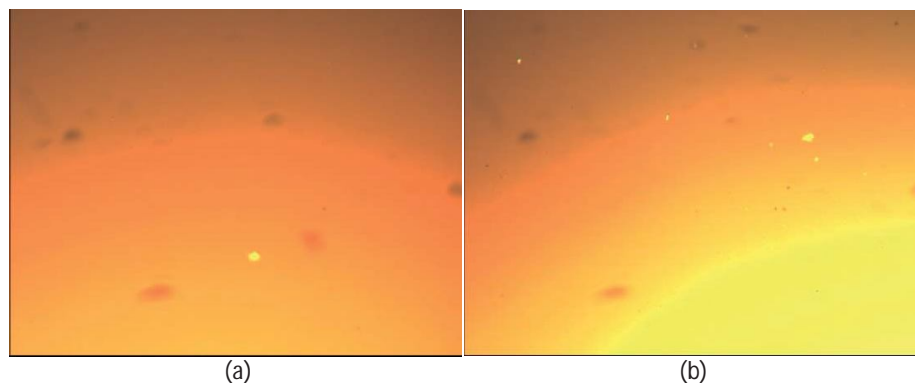


Figura 4 Comparación entre estados (a) original y (b) PAV para asfalto AC-40

Un proceso similar se aplicó al asfalto AC-30, el cual se envejeció en el RTFO y en el PAV. Las imágenes de luz polarizada se muestran en la Figura 5. Se observa el cambio en la coloración de la emisión del material producto del cambio en la estructura molecular del mismo, como respuesta al tratamiento térmico y de presión. El color café-rojizo a tonos verde-amarillo es indicativo de una estructura más tensionada. Este fenómeno es producto de cambios en la composición química del material y del arreglo estructural en las fases, por otro lado se puede relacionar con el incremento en los módulos de los materiales como se indica en la Tabla 1. La razón G''/G' fue incluida como indicador de comportamiento dominante. Valores por encima de 1.0 indican que el material se comporta más del lado viscoso mientras que valores menores a 1.0

indican comportamientos predominantemente elásticos. De igual forma el parámetro $|G^*|/\sin(\delta)$ fue incorporado como medida de rigidez y resistencia a la deformación permanente.

Los módulos medidos en el reómetro dinámico de cortante (DSR) se calcularon con una geometría de 40 mm pues como se observará posteriormente, el ámbito de consistencias de las muestras es muy amplio. Nótese el incremento en la rigidez de material conforme ha sido expuesto las condiciones propias de envejecimiento-oxidación del asfalto y como el cambio en la coloración de este en particular es notorio a partir del envejecimiento en RTFO. Se observa que los cambios en índice de refracción y tonalidad de las imágenes puede ser directamente correlacionado al módulo del material en las distintas condiciones de envejecimiento. Se podría decir que conforme el material se envejece, incrementa el porcentaje relativo de materiales cristalinos y por tanto que tan amorfo es el asfalto.

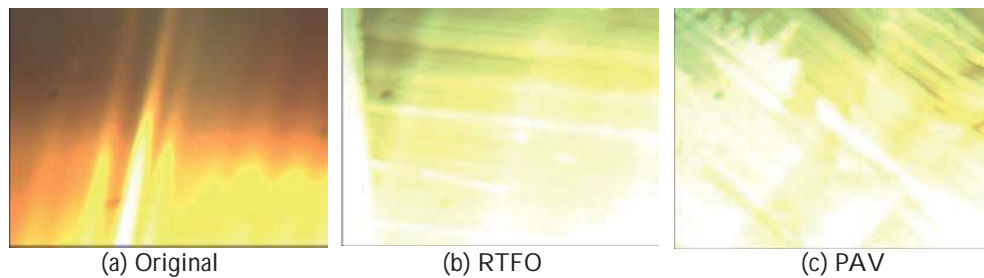


Figura 5 Respuesta del asfalto AC-30 a diferentes condiciones de envejecimiento

Tabla 1. Parámetros de desempeño del asfalto AC-30

Condición	$ G^* $ (Pa)	G' (Pa)	G'' (Pa)	G''/G'	$\delta, ^\circ$	$ G^* /\sin(\delta)$
Original 64 °C	1974	164.6	1968	11.96	85.22	1.981
RTFO 64 °C	5335	884.9	5261	5.95	80.45	5.41
PAV 19 °C	6749000	5157000	4353000	0.84	40.17	4353

Para complementar las mediciones previas, y considerando el modelo coloidal del asfalto, se separó el asfalto AC-30 en asfaltenos y maltenos para poder estudiar la respuesta de estas fracciones ante distintas condiciones de envejecimiento (RTFO y PAV). Este asfalto está compuesto por 14.1% asfaltenos y 85.9% de maltenos. Las Figuras 6 y 7 muestran los resultados del análisis PLM llevado a cabo sobre estos componentes. Al igual que en el caso del asfalto, se observa el cambio en la coloración de la emisión del material producto del cambio en la estructura molecular del mismo, como respuesta al tratamiento térmico y de presión. El color café-rojizo a tonos verde-amarillo es indicativo de una estructura más tensionada o mayor rigidez como en el caso de los asfaltenos donde predomina el verde oscuro.

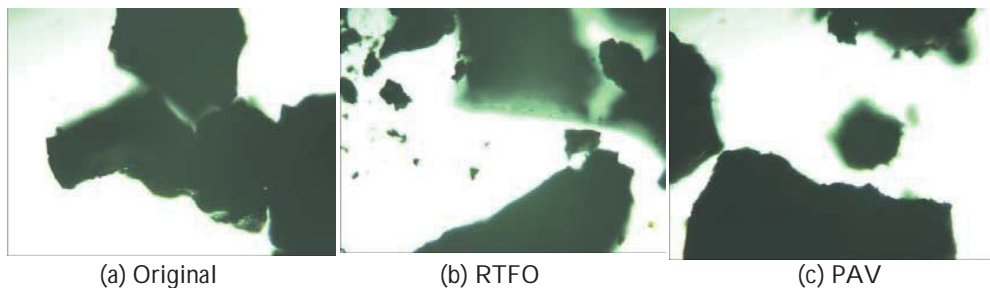


Figura 6 Respuesta de los asfaltenos a diferentes condiciones de envejecimiento

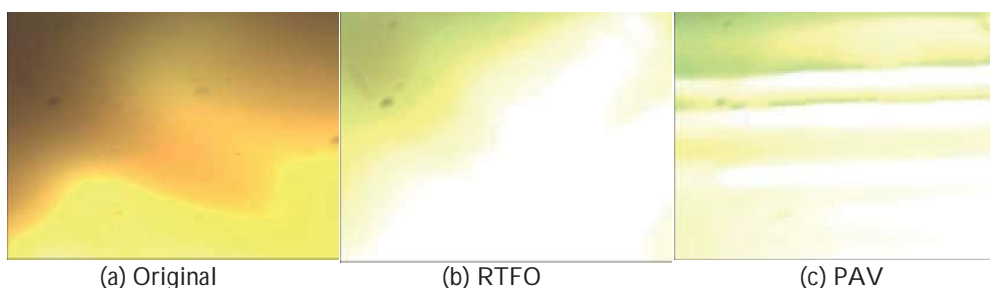


Figura 7 Respuesta de los maltenos a diferentes condiciones de envejecimiento

De la misma se puede observar un cambio claro en la coloración de la imagen del café claro al verde para los maltenos, conforme la muestra se envejece y oxida. Se observa que los asfaltenos a temperatura ambiente presentan la consistencia de un sólido. Adicionalmente, se observa la coloración verde del material ante luz, brindando información de dureza amparada por la magnitud del modulo. Esta coloración confirma que la transición de colores claros a verdes es indicativo de una rigidización del asfalto y de una transición de los componentes más aceitosos a fases de consistencia similar a las de los asfaltenos (componentes cristalinos).

Estos cambios también fueron medidos en el DSR con una geometría de 40 mm; los resultados se muestran en la Tabla 2. Como se esperaba, los resultados evidenciaron un aumento en el módulo complejo a cortante y una disminución del ángulo de fase con el envejecimiento. De igual forma los maltenos a 25 °C mostraron valores más bajos de G^* , ángulos de fase más altos y valores de $|G^*|/\sin(\delta)$ más bajos que el asfalto. Esto debido a que los maltenos son responsables por el comportamiento viscoso del asfalto. También se mantuvo la tendencia relativa con la condición de envejecimiento: incremento en rigidez y reducción en el ángulo de fase con un aumento en el envejecimiento de los maltenos.

Por su parte, los asfaltenos mostraron resultados opuestos, lo que confirma que los asfaltenos son responsables por el comportamiento elástico y brinda rigidez al asfalto. Aunque el análisis PLM fue desarrollado a temperatura ambiente (21 °C) y se observó una correlación con los parámetros de reología, se realizaron pruebas a la temperatura alta de desempeño del asfalto para observar los cambios debido al cambio de temperatura. Se observó una tendencia opuesta en el caso de los maltenos con valores de G^* disminuyendo con el estado de envejecimiento. Este comportamiento fue atribuido principalmente a la baja viscosidad de los maltenos a la temperatura de ensayo y las limitaciones del equipo DSR para medir parámetros reológicos en esas condiciones. Por otro lado, los asfaltenos tuvieron un comportamiento más viscoso a 64°C con razones de G''/G' mayores a 1.0. En el caso de los asfaltenos se realizó a

medición del modulo complejo de la fase en condición original únicamente, ya que en las condiciones RTFO y PAV no se logró conformar un espécimen de ensayo en el DSR por la alta rigidez.

Tabla 2. Reología de los componentes

Condición	$ G^* $ (Pa)	G' (Pa)	G'' (Pa)	G''/G'	$\delta, ^\circ$	$ G^* /\sin(\delta)$
Asfalto a 25°C						
Original	469500	100600	458600	4.56	77.63	480.7
RTFO	898500	306900	844400	2.75	70.03	956
PAV	1190000	735300	935000	1.27	51.82	1513
Maltenos a 25°C						
Original	1465	198.6	1451	7.31	82.21	1.478
RTFO	683.1	174.5	660.5	3.79	75.2	0.7065
PAV	427.9	147.7	401.6	2.72	69.81	0.4559
Asfaltenos 25°C						
Original	1358000	1350000	142500	0.11	6.025	12930
Asfalto a 64°C						
Original	994.3	203.6	973.2	4.78	78.18	1.016
RTFO	2986	624.1	2920	4.68	77.94	3.054
PAV	9929	3241	9385	2.9	70.95	10.5
Maltenos a 64°C						
Original	161.4	155.9	41.72	0.27	14.98	0.6243
RTFO	129.5	122.2	43.01	0.35	16.12	0.3901
PAV	109.3	98.93	46.46	0.47	25.15	0.2571
Asfaltenos a 64°C						
Original	19190	9906	16440	1.66	58.93	22.41

Datos más recientes de este tipo de medición han indicado dos tendencias: los asfaltenos prácticamente no varían su módulo y los maltenos pierden viscosidad con la temperatura y la frecuencia de carga. La Figura 8 muestra como los maltenos son altamente susceptibles a cambios de temperatura y el cambio en la frecuencia de carga, mientras que los asfaltenos presentan valores de módulo similares ante en cambio de temperatura y frecuencia. De igual forma se observa que la rigidez de los asfaltenos se mantiene muy por encima de los maltenos a cualquier temperatura y frecuencia por lo que se consideran térmicamente estables. adicionalmente los resultados de G^* para los maltenos pueden ser ajustados dentro de la teoría de superposición de curvas para generar una curva maestra como se muestra en la Figura 8, mientras que los asfaltenos se mantienen de forma prácticamente constante.

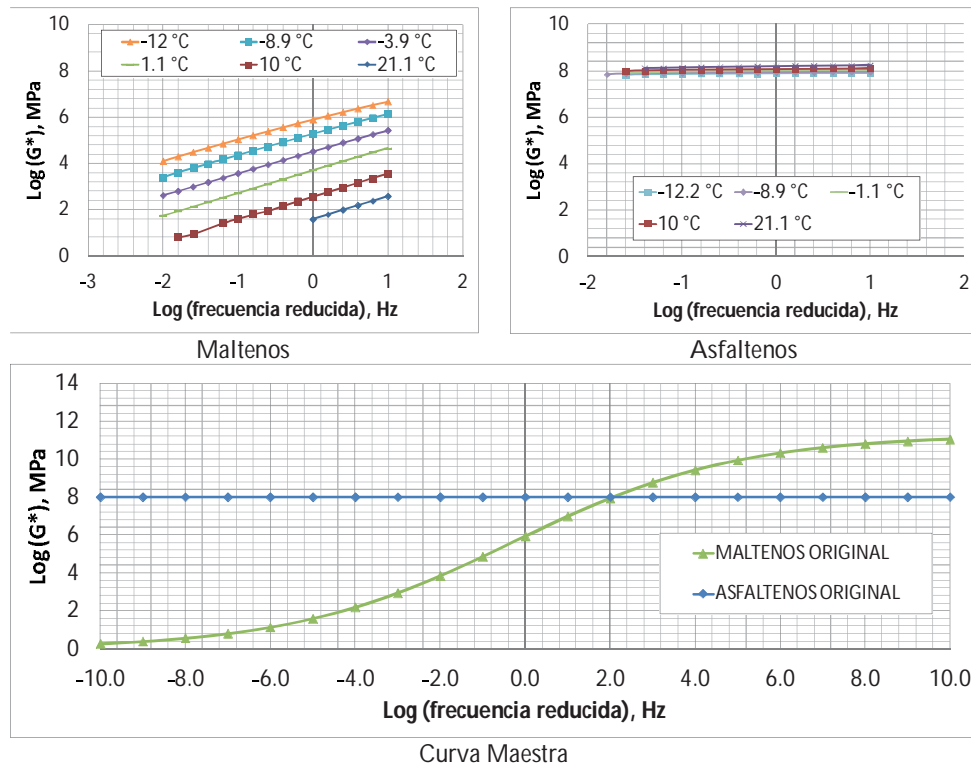


Figura 8 Barrido de temperatura y frecuencia en componentes del asfalto

En cuanto a la transición de colores claros a verdes como indicativo de una rigidización del asfalto y de una transición de los componentes más aceitosos a fases de consistencia similar a las de los asfaltenos se realizó un análisis de cromatografía de capa delgada para observar el cambio en composición. La Figura 9 muestra la distribución de componentes SARA para el asfalto original y las 2 condiciones de envejecimiento aplicadas. Para la condición original del asfalto se obtuvo 5.2% de Saturados, 54.9% de Aromáticos, y 25.8% de Resinas, dejando el 14.1% de asfaltenos. Si se compara con la condición original, los asfaltenos presentaron el menor cambio en composición relativa con 3% en condición RTFO y 18% en PAV. Por otra parte, las resinas presentaron el mayor cambio en composición con el envejecimiento aumentando su composición relativa en 33% en condición RTFO y 119% en PAV. Finalmente, los resultados indicaron que el cambio en composición relativa de las resinas está asociada al alto cambio en composición de los aromáticos. Esto sugiere que los aromáticos podrían generar partículas similares a las resinas y no tanto partículas similares a los asfaltenos con el envejecimiento del asfalto.

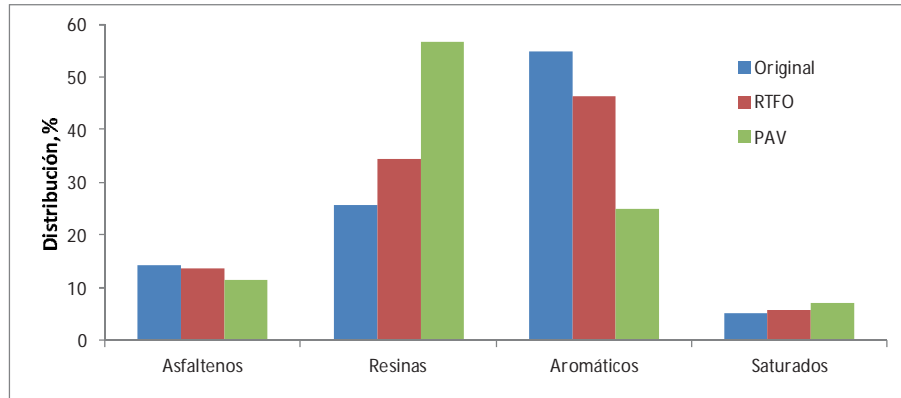


Figura 9 Cromatografía de capa delgada (latroscan)

Un Análisis Infrarrojo con Espectroscopía de Transformada de Fourier (FTIR) fue también realizado para corroborar el estado de envejecimiento de los componentes del asfalto y al asfalto mismo. Este análisis permite determinar el espectro infrarrojo de un material, obteniendo información sobre la estructura molecular de la muestra. Típicamente, se compara la información obtenida con una base de datos de espectros de materiales similares para determinar la naturaleza de la muestra analizada, o preferiblemente, se realiza un análisis de bandas para interpretarlo por parte de personal con conocimiento adecuado en la interpretación de FTIR [13]. En la Figura 10 se muestra el asfalto en sus condiciones de envejecimiento sujeto a un proceso de oxidación térmica. Se observa productos de la oxidación por la formación de grupos polares entre las bandas 805 a 1260 cm^{-1} . En el caso de los maltenos y asfaltenos la aparición o intensificación de productos se observó únicamente en el estado PAV en la banda 1700 cm^{-1} y levemente para los maltenos en las bandas 805 y 1260 cm^{-1} en condiciones RTFO y PAV. Estos resultados van de la mano con las imágenes mostradas en la Figura 7 donde los maltenos presentan colores verdes indicativos de una rigidización/oxidación del asfalto desde su condición RTFO. Mientras que para los asfaltenos, el análisis de las imágenes no es tan conclusivo.

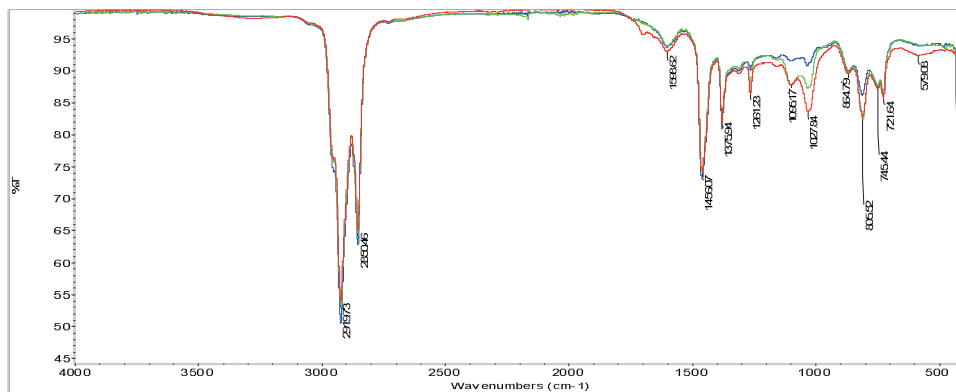


Figura 10 FTIR Análisis del asfalto AC30. (Azul = original, Verde = RTFO, Rojo = PAV).

Para finalizar, se buscó evaluar el efecto de la adición de un modificante al asfalto, cuando la muestra es analizada con PLM. Para este propósito, se modificó el asfalto AC-30 con 2,5% masa en masa de SBS. Para el asfalto AC-30, el valor del módulo medido con la geometría de 8 mm a 22°C fue de $|G^*| = 5.710.000$ Pa. EL asfalto modificado presentó un módulo de $|G^*| = 9.270.000$ Pa. La Figura 11 muestra las imágenes de PLM para el asfalto AC-30 y el asfalto AC-30+2,5% SBS. Se puede notar una coloración más amarilla en el asfalto modificado, producto de una mayor tensión en su estructura. Por otra parte es importante observar que las tonalidades verdes no aparecen, lo cual valida la hipótesis que la tonalidad verde está asociada a un incremento en rigidez del asfalto debido al proceso de envejecimiento u oxidación, y no a un efecto asociado a la incorporación de aditivos. Adicionalmente, se observa que el aditivo SBS presenta tonalidades blancas. Esto se debe a que los polímeros son materiales amorfos e isotrópicos y como tales no se ven afectados por la luz que los atraviesa [13].

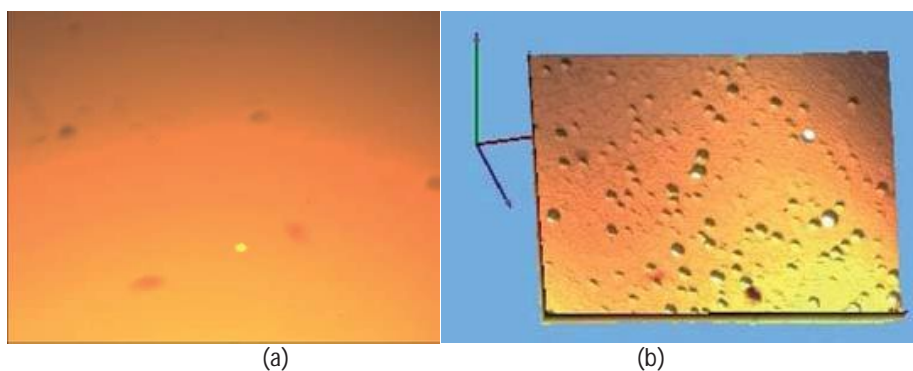


Figura 11 Comparación entre asfalto (a) AC-30 original y (b) AC-30+2,5% SBS

4 Conclusiones

Con el artículo se pretende introducir una técnica de fácil implementación que puede llegar a ser utilizada para caracterizar asfaltos desde el punto de vista micro-mecánico, estructural y químico. Se observó que el uso de la microscopía de luz polarizada (PLM) es capaz de distinguir los efectos del envejecimiento, diferencias morfológicas entre las distintas fases del asfalto y adición e incorporación de modificantes dentro de la matriz asfáltica. Esta primera etapa corresponde a un análisis meramente cualitativo. Sin embargo, es evidente que los cambios observados en las imágenes correlacionan con propiedades fundamentales del material como lo es el módulo dinámico de cortante $|G^*|$.

De forma específica se puede concluir que:

- Los asfaltenos presentaron el menor cambio en la respuesta a la luz polarizada con el envejecimiento.
- A temperaturas intermedias (ambiente), los asfaltenos son responsables por la mayoría del comportamiento elástico y rigidez del asfalto, mientras que los maltenos son responsables por la mayoría del comportamiento viscoso del asfalto.
- A temperaturas altas no está claro cual componente es mayormente responsable por el comportamiento elástico o viscoso.
- El análisis microscopia de luz polarizada indicó que parte de los maltenos se transformaron en partículas similares a los asfaltenos.

5 Referencias

- [1] Allen, R.G. Structural characterization of micromechanical Properties in asphalt using atomic force microscopy. M.Sc. Thesis. College Station, TX. 2010.
- [2] José P. Aguiar-Moya, Jorge Salazar-Delgado, Vivian Bonilla-Mora, Ellen Rodríguez-Castro, Fabricio Leiva-Villacorta & Luis Loría-Salazar, Morphological analysis of bitumen phases using atomic force microscopy, Road Materials and Pavement Design, Volume 16, Supplement 1, 2015, pages 138-152.
- [3] Jäger, A., Lackner, R., Eisenmenger-Sittner, C., Blab, R. Identification of Microstructural Components of Bitumen by Means of Atomic Force Microscopy (AFM). Proc. Appl. Math. Mech., Vol. 4, Rev. 1, pg. 400–401. 2004.
- [4] Masson, J.F., Leblond, V., and Margeson, J. Bitumen morphologies by phase-detection atomic force microscopy, Journal of Microscopy., Vol. 221, Issue 1, pg. 17–29. 2006.
- [5] Masson, J.F., Leblond, V., Margeson, J. Low-temperature Bitumen Stiffness and Viscous Paraffinic Nano- and Micro-Domains by Cryogenic AFM and PDM. Journal of Microscopy, Vol. 227, Rev. 3, pp. 191-202. 2007.
- [6] Aguiar-Moya, J.P., Salazar-Delgado, J., Bonilla-Mora, V., Rodríguez-Castro, E., Leiva-Villacorta, F., Loría-Salazar, L.G. Morphological Analysis of Asphalt Phases Using Atomic Force Microscopy. Artículo enviado para consideración al la 93va Reunión Anual del Transportation Research Board. 2013.
- [7] Leiva-Villacorta, F., Villegas-Villegas, R.E., Aguiar-Moya, J.P., Salazar-Delgado, J., Loría-Salazar, L.G. Effect of aging on rheological, chemical and thermodynamic properties of asphalt components. Artículo enviado para consideración al la 93va Reunión Anual del TransportationResearchBoard. 2013.
- [8] Goldstein, D.H. Polarized Light, Third Edition. CRC Press, LLC. Diciembre, 2010.
- [9] Collet, E. Polarized light. Fundamentals and applications. Optical Engineering, Volume 36. CRC Press, LLC. Diciembre, 1992.
- [10] Kapitza, H.G. Microscopy from the very beginning, Second Edition. Carl Zeiss, Dipl.Bibl. Susanne Lichtenberg.1997.
- [11] Dorransoro-Díaz, C., Dorransoro-Díaz, B., Dorransoro-Fernández, C., García-Navarro, A. Mineralogía óptica. Estudio de los minerales con el microscopio petrográfico. Congreso UNIMAC. Website accesado 07/08/2013. <http://edafologia.ugr.es/optmine/index.htm>
- [12] Delly, J.G. Essentials of Polarized Light Microscopy, Fifth Edition. College of Microscopy. 1998.
- [13] Claudy, P., Letoffe, J.M., Rondelez, F., Germanaud, L., King, G., Planche, J.P. A New Interpretation of Time-Dependent Physical Hardening in asphalt Based on DSC and Optical Thermoanalysis. Asphalt Paving Technology, Vol. 62. 1993.
- [14] Kuptsov, A.H. (1994). Applications of Fourier Transform Raman Spectroscopy in Forensic Science. Journal of Forensic Sciences, JFSCA, Vol. 39, No. 2, pp. 305-318, Marzo 1994.