

ANÁLISIS FACTORIAL DE LA INCIDENCIA DE LAS CONDICIONES AMBIENTALES SOBRE LA OXIDACIÓN DE ASFALTOS PARA DIFERENTES CLIMAS DE LATINOAMÉRICA

Rafael Ernesto Villegas-Villegas¹, Alejandra Baldi-Sevilla², Patricia Velásquez-Garnica³, Shirley Velásquez-Garnica⁴, José Pablo Aguiar Moya⁵, Luis Guillermo Loria-Salazar⁶

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

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

³CICYT Escuela Militar de Ingeniería, U.A. La Paz - Bolivia, patty.c.v.g@gmail.com

⁴CICYT Escuela Militar de Ingeniería, U.A. La Paz - Bolivia, velasquezshir@gmail.com

⁵LANAMME Universidad de Costa Rica, Ciudad de la Investigación, jose.aguiar@ucr.ac.cr

⁶LANAMME Universidad de Costa Rica, Ciudad de la Investigación, luis.loriasalazar@ucr.ac.cr

Resumen

La oxidación del asfalto se simula en laboratorio mediante procesos térmicos. Sin embargo, durante su vida útil la oxidación del ligante es un proceso que involucra otras transformaciones químicas, debido a que éste se encuentra expuesto a condiciones reales. Por tanto, es necesario tomar en cuenta el efecto de ciertas variables climáticas sobre las propiedades fundamentales del ligante. En este sentido, la investigación concerniente a los factores ambientales que influyen la oxidación del ligante es muy limitada. De esta manera, la caracterización de la oxidación del asfalto se ha limitado a la utilización de oxidación térmica, dejando de lado ciertos factores, como humedad y radiación ultravioleta, a los que el asfalto es sometido en campo. Para investigar a fondo esta problemática, se plantea exponer muestras de asfalto en diversas regiones de Latinoamérica, con el fin de generar una base de datos que permita analizar la incidencia del clima sobre la oxidación.

En consecuencia, este proyecto busca establecer un grupo de investigación internacional en fatiga y daño por humedad, en miras a resolver los problemas serios que se dan en la infraestructura Latinoamericana, y proveer a la comunidad científica de conocimiento técnico pertinente en la toma de decisiones.

Palabras Clave: Reología, Análisis Factorial, FTIR, Oxidación de asfalto, Condiciones Ambientales.

1 Introducción

La calidad y durabilidad de las vías inciden en el crecimiento de la economía del país y la calidad de vida de los ciudadanos [1, 2], un gran porcentaje de las vías se construyen a partir de mezclas asfálticas, donde el ligante asfáltico es parte fundamental en el desempeño del pavimento a construir.

El conocimiento del comportamiento químico y reológico del ligante asfáltico permite asegurar que tenga un buen desempeño en su uso para pavimentación. Las condiciones ambientales tienen un efecto importante en este análisis, dado que generan efectos que inciden en el comportamiento y las propiedades del ligante asfáltico [3]. Diferentes ensayos de laboratorio procuran predecir estas condiciones, sin embargo, estudios anteriores han demostrado que es necesario calibrar adecuadamente éstas condiciones para representar adecuadamente los fenómenos que ocurren durante la oxidación del ligante asfáltico en campo [4]. Por tanto, es importante calibrar los procedimientos y modelos que se utilicen adecuados a las condiciones ambientales propias de los lugares donde se emplean los materiales. Así mismo, realizar validaciones y ajustes correspondientes con base en resultados experimentales

obtenidos. Para esto es necesario en este trabajo incentivar a investigadores en el área de los asfaltos a unirse a esta iniciativa y así poder con un grupo de trabajo comprometido, ubicando estaciones experimentales en diversas zonas climáticas del continente, que propicien conclusiones contundentes sobre el fenómeno de fatiga y el daño por humedad.

El proyecto que se presenta forma parte de una línea de investigación en pavimentos flexibles para el análisis de la oxidación de los ligantes y mezclas asfálticas sometidas a las condiciones del medio ambiente. El análisis de estos efectos permitirá una mejor comprensión de los fenómenos que ocurren en los pavimentos y la generación de especificaciones que permitan garantizar una mayor vida útil de los pavimentos.

Se espera a partir de este documento introductorio formar un equipo de trabajo multinacional que estudie el fenómeno de la oxidación y sus implicaciones en la fatiga y el daño por humedad, con miras a presentar el primer informe en el CILA de 2019.

1. Objetivos

El objetivo del presente estudio es analizar el efecto de la oxidación ambiental a partir de las transformaciones químicas y reológicas que se producen en el ligante asfáltico. Para ello, varias muestras de asfalto fueron colocadas en diferentes regiones climáticas en Costa Rica, Bolivia y Canadá. Además, se pretende unir esfuerzos con grupos de investigación presentes en el CILA 2017 a realizar estudios en diversas zonas del continente y fuera de él, para que de manera exhaustiva se investigue a fondo el daño por humedad y la fatiga en ligantes asfálticos y mezcla. El estudio también pretende dotar a la comunidad científica del CILA de mejores herramientas que sirvan en la caracterización y diseño de pavimentos más durables.

2. Metodología

4.1. Preparación de las muestras

La presente investigación se utilizará Cemento Asfáltico Convencional de uso en pavimentación en Costa Rica y Bolivia, mismo que no ha sido sometido a ningún tipo de modificación. Las muestras se sometieron al envejecimiento a corto plazo mediante el tratamiento en el horno rotatorio de película delgada (RTFO, por sus siglas en inglés). Lo anterior se realizó con el objetivo de simular los procesos de envejecimiento que le ocurren al asfalto en planta, previo a su colocación en la carretera. Posteriormente, el asfalto RTFO se colocó en moldes no-adhesivos de manera que se produjera una película de 1mm de espesor (Figura 1). Los moldes fueron colocados en las distintas estaciones experimentales descritas en la Tabla 1.



Figura 1 Preparación de muestras de asfalto para la oxidación a la intemperie

Las primeras estaciones experimentales se ubicaron en regiones climáticas muy diferentes entre sí. En la Figura 2 se muestran los mapas térmicos de las estaciones experimentales vigentes en el proyecto. La diversidad de climas en las estaciones ayuda a variar las condiciones a las cuales el asfalto se oxida (Figura 3).

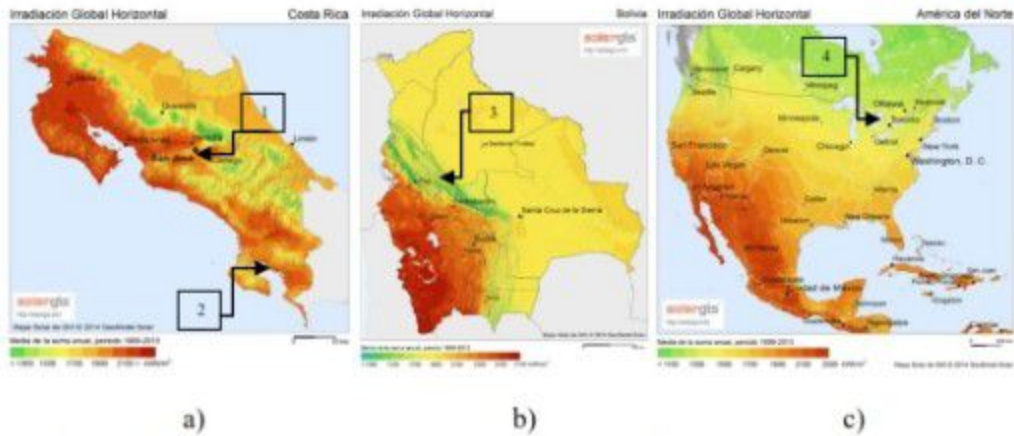


Figura 2 Mapa térmico Estaciones experimentales para la oxidación a la intemperie: a) Estación 1 (San Pedro de Montes de Oca) y Estación 2 (Golfito, Puntarenas) en Costa Rica. b) Estación 3 (Ciudad de La Paz, Murillo, Departamento de La Paz, Bolivia), c) Estación 4 (Kingston, Ontario, Canadá)

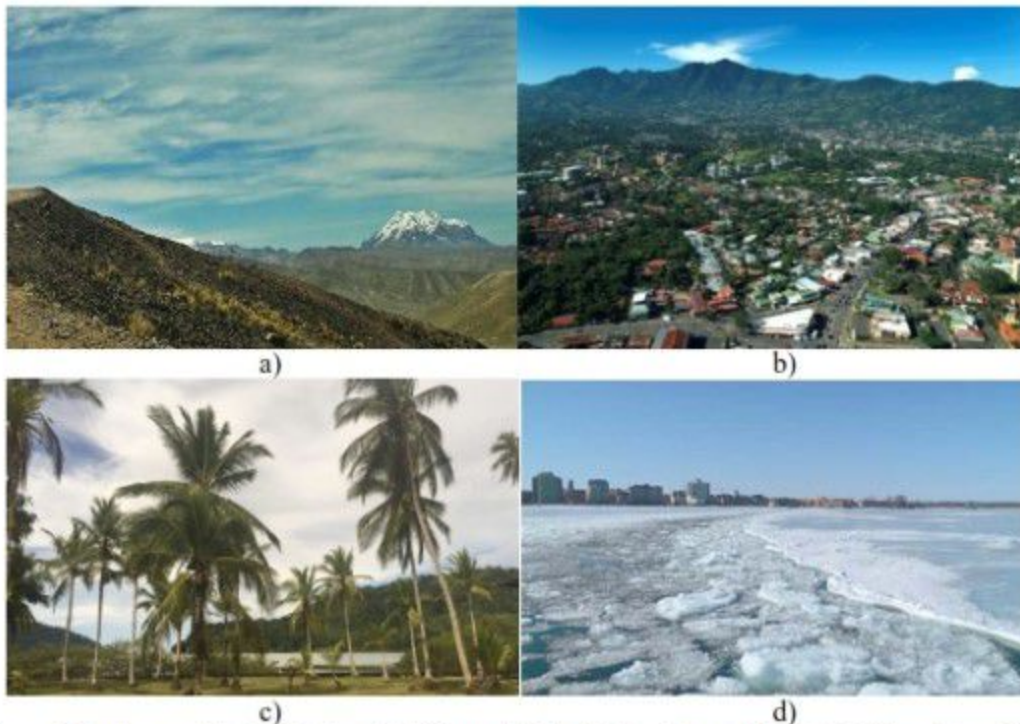


Figura 3 Imágenes del a) Altiplano Boliviano, b) San Pedro, Costa Rica, c) Golfito, Costa Rica d) Kingston Ontario, Canadá,

Tabla 1. Características ambientales de las estaciones experimentales

Estación	Ubicación	Altura (msnm)	Temp. media (°C)	Temp. mínima (°C)	Temp. máxima (°C)	Humedad relativa (%)
1. Costa Rica	San Pedro de Montes de Oca, Provincia de San José	1205	20.1	15.6	26.3	76.8
2. Costa Rica	Golfito, Provincia Puntarenas	6	26.3	23.2	30.1	88.3
3. Bolivia	Ciudad de La Paz, Provincia Murillo, Dpto.	3576	12.8	-2.9	19.8	52.2

La Paz
 4. Canadá Kingston, Ontario 70 6.85 -12.6 25.5 68

Las muestras de ligante asfáltico oxidado en la intemperie fueron analizadas de acuerdo al esquema mostrado en la Figura 4. Algunos de los equipos que se estarán utilizando se muestran en la Figura 5.



Figura 4 Análisis de Asfaltos

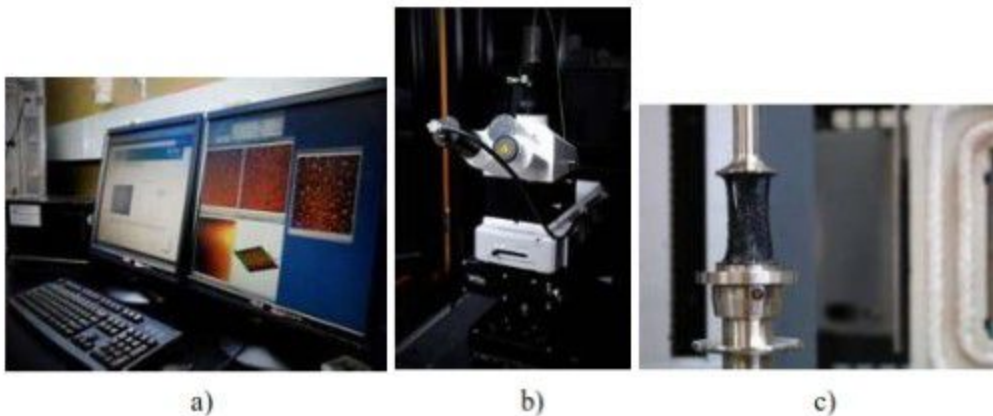


Figura 5 Equipos a utilizar durante la ejecución del proyecto a) y b) Microscopio de Fuerza Atómica, c) Reómetro de Corte Dinámico

El análisis del asfalto es una parte importante en la caracterización de las mezclas asfálticas. Por lo tanto, el comportamiento ante la oxidación del asfalto incide directamente en el comportamiento de las mezclas asfálticas. En consecuencia, es necesario cuantificar la incidencia de los asfaltos oxidados en el desempeño de las mezclas tanto preparadas en el laboratorio como en mezclas de proyectos reales de infraestructura. Para este fin, se colocó el primer tramo experimental en el proyecto Construcción Pavimento J.V. Nuevos Horizontes de la Ciudad de Oruro, Bolivia (Figura 6). La mezcla asfáltica utilizada es una mezcla asfáltica en caliente, densa de granulometría continua producida con cemento asfáltico convencional, el espesor colocado es de 9 cm en dos capas la primera de 5 cm y la segunda de 4 cm.



Figura 6 Pavimentado J. V. Nuevos Horizontes, Oruro

Se propone que la mezcla asfáltica, tanto la de planta, como la de carretera y las futuras mezclas a colocar, sea evaluada de acuerdo al esquema de la Figura 7. Las evaluaciones de las mezclas en proyecto se realizarán una vez al año. En el caso del primer tramo experimental, éste tiene 6 meses de colocado, por lo que no se ha alcanzado el período mínimo para iniciar los análisis.

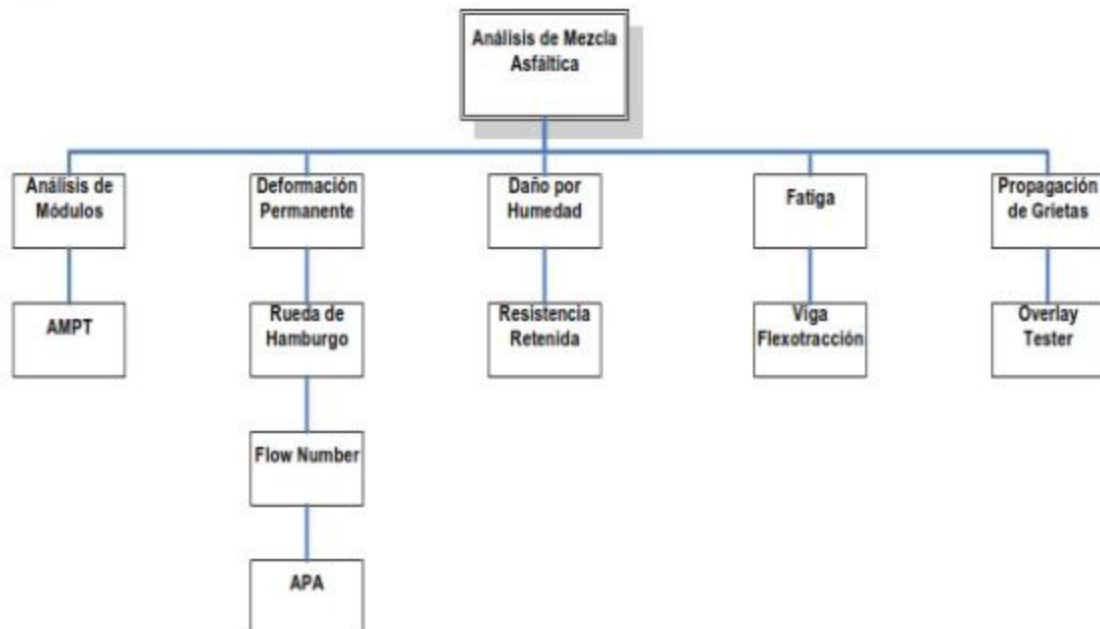


Figura 7 Análisis propuestos a realizar en Mezclas Asfálticas

4 Análisis de Resultados

4.1. Análisis químico

Los cambios químicos que se producen en el asfalto debido a la oxidación son estimados mediante espectrometría de absorción en el infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR, por sus siglas en inglés) [5-7]. Tales cambios se cuantifican a partir de las áreas de las señales de relacionadas con la oxidación del material, tales como compuestos oxigenados (3500 cm^{-1} , hidroxilo; 1700 cm^{-1} , carbonilo y 1030 cm^{-1} , sulfóxido), compuestos aromáticos e insaturados (3050 cm^{-1} y 1600 cm^{-1} , respectivamente) y compuestos saturados (2800 y 2900 cm^{-1}) [8-11]. En la Figura 8 se muestra a manera de ejemplo un espectro infrarrojo del asfalto, luego de ser sometido a oxidación térmica en el horno PAV.

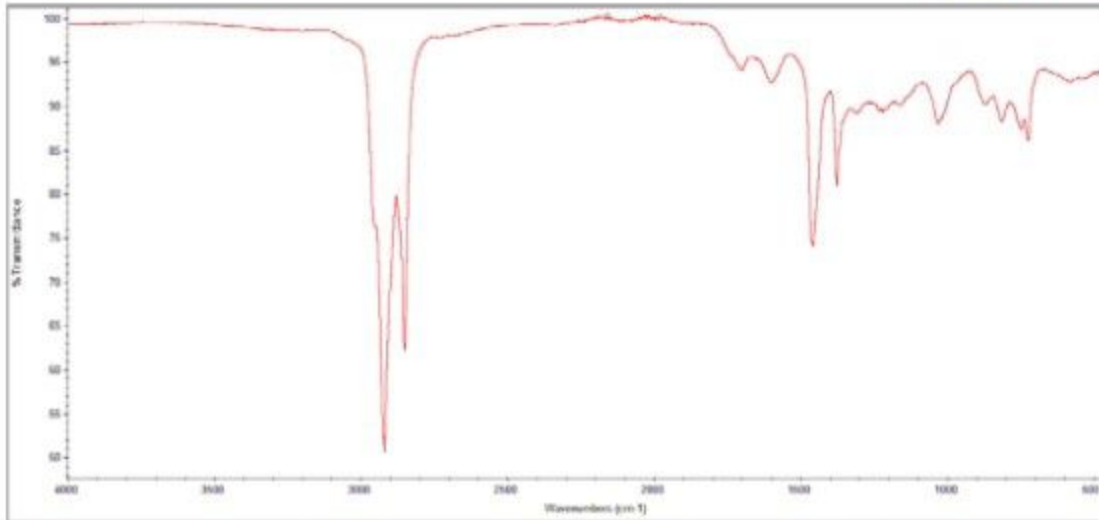


Figura 8 Espectro de infrarrojo del asfalto oxidado en PAV

Se espera que luego de la exposición a la intemperie, el asfalto experimente un aumento en las bandas relacionadas con la oxidación y que, por lo general, aportan rigidez a las moléculas del material. Simultáneamente, se espera que haya una disminución en las bandas relacionadas a enlaces más flexibles, como lo son los enlaces C-C, cuantificados indirectamente a partir de las bandas 2800 y 2900 cm^{-1} .

Como parte del análisis, se pretende cuantificar los cambios químicos en las fracciones SARA del asfalto (saturados, aromáticos, resinas y asfaltenos). Lo anterior se logra mediante Análisis elemental con Rayos X. Esta técnica permite cuantificar aproximadamente el contenido de elementos tales como oxígeno, sulfuro y metales, entre otros. La cuantificación de estos elementos podría relacionarse al nivel de oxidación del material. En la Figura 9 se muestra a manera de ejemplo el análisis llevado a cabo a una muestra de asfaltenos oxidados en PAV. De acuerdo a la Figura 9, se observa un mayor contenido en sulfuro y paladio en la muestra.

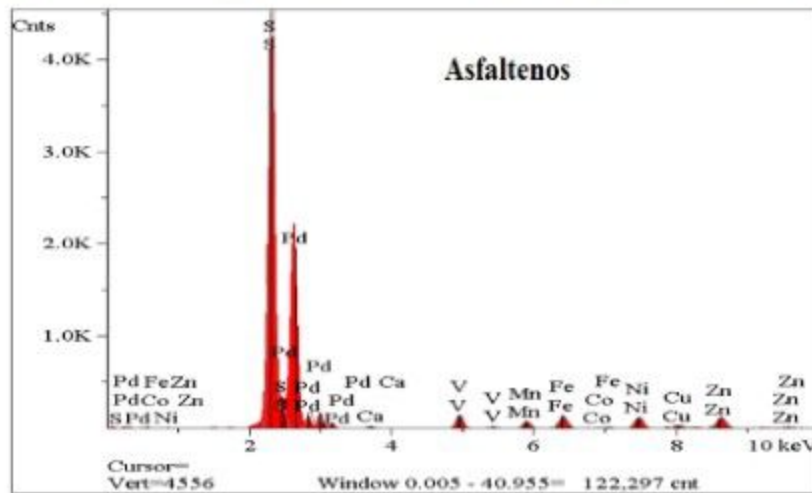


Figura 9 Análisis Elemental Rayos X - FTIR

4.2. Reología

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, lo cual a su vez tiene como consecuencia un aumento en la rigidez del material. El asfalto puesto en carretera se oxida de forma inminente y, por tanto, es importante saber la temperatura a la cual este se fatiga. Por lo tanto, analizar la propensión a la fatiga del asfalto mediante barridos de temperatura es de gran importancia. Lo anterior responde a que mediante un análisis de este tipo es posible evaluar el estado de un asfalto a la hora de su aceptación, por lo que se tendría una idea de la condición del material que se va a utilizar en determinado proyecto. En consecuencia, este método, logrado con ayuda de un reómetro de corte dinámico, podría servir para delucidar posibles envejecimientos u oxidaciones producto de un inadecuado proceso de refinación o almacenamiento del asfalto.

Es importante notar que un cambio evidente en la composición química del ligante asfáltico incide en un aumento en la temperatura a la cual la componente viscosa (G'') del asfalto supera a la componente elástica (G'), y viceversa. Un asfalto es más susceptible a la fatiga conforme la mayor sea la temperatura a la cual se tiene que la componente elástica supera a la viscosa, es decir, $G' > G''$. De esta forma, se espera que por debajo de tal temperatura la manera en que el material disipa energía esté cada vez más ligada a la fractura. Estas observaciones se resumen en la Figura 10.

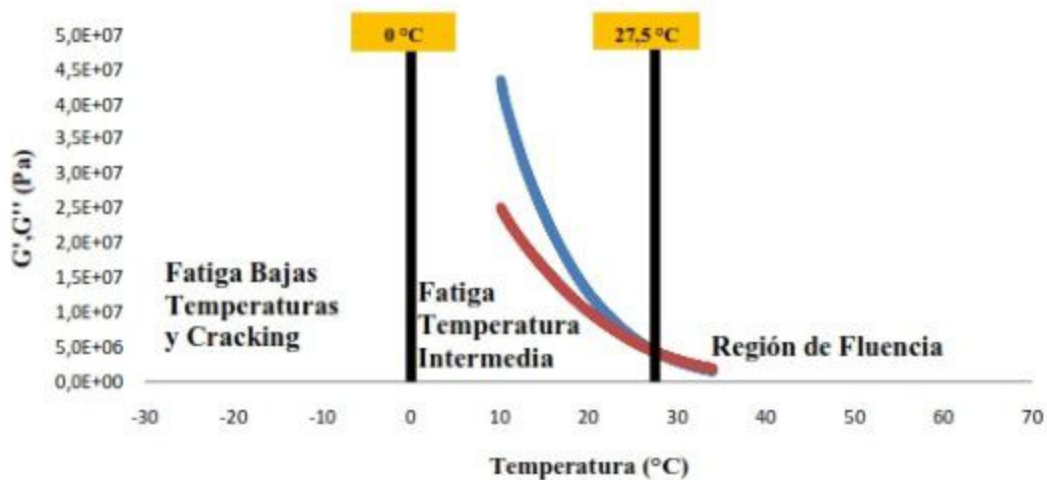


Figura 10 Influencia de la temperatura en el comportamiento a la fatiga del asfalto oxidado en PAV. La componente elástica, G' se muestra en azul y la componente viscosa, G'' en rojo.

4.3. Microscopía

La microscopía electrónica de barrido (SEM, por sus siglas en inglés) es una herramienta que permite analizar los cambios morfológicos que le suceden al asfalto conforme avanza el proceso de oxidación. En la Figura 11, se observa la fotografía de la superficie de una película de asfalto luego de ser expuesta a la intemperie durante un año. De acuerdo a la Figura 11, se observan las fisuras presentes en la superficie del ligante. Esta técnica permite cuantificar las dimensiones de las fisuras, así como los cambios morfológicos según la profundidad de las mismas. Adicionalmente, es posible contar con un análisis elemental en la zona de interés, por lo que se puede conocer la concentración aproximada de ciertos elementos a lo largo de la fisura.

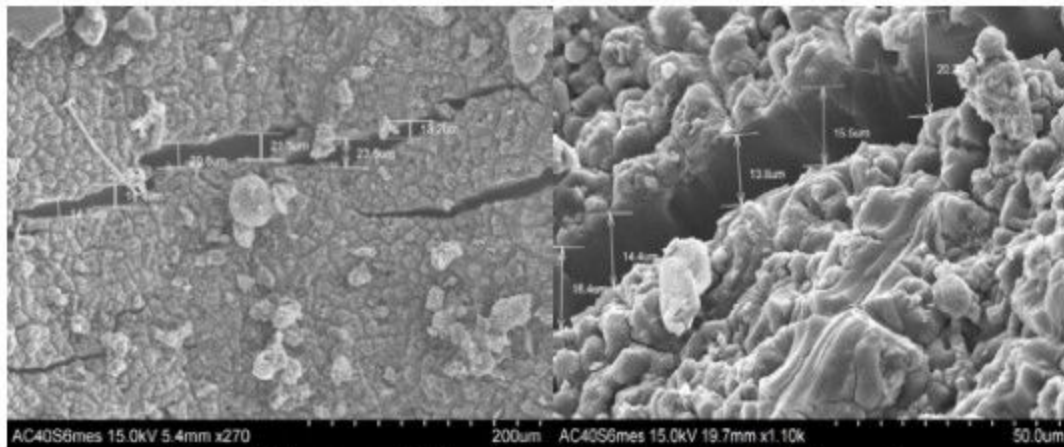


Figura 11 Imágenes SEM asfaltos Oxidados 1 año a la Intemperie

Por otro lado, otra de las técnicas a emplear es la Microscopía de Fuerza Atómica, con la cual se obtienen imágenes topográficas de la muestra, así como una evaluación de la rigidez y la adhesividad del ligante. Por lo tanto, la importancia de esta técnica para el presente estudio, es que permite monitorear los cambios en estas propiedades producto de la oxidación en el material [12]. En la Figura 12 se muestra la evolución de las fases del asfalto conforme éste se oxida. Se observa además, una diferencia muy marcada entre la topografía de la muestra oxidada en PAV y a la oxidada en la intemperie, lo cual a su vez incide en la adhesividad del asfalto. Lo anterior se evidencia en los valores de adhesión colocados al lado de cada imagen de la Figura 12.

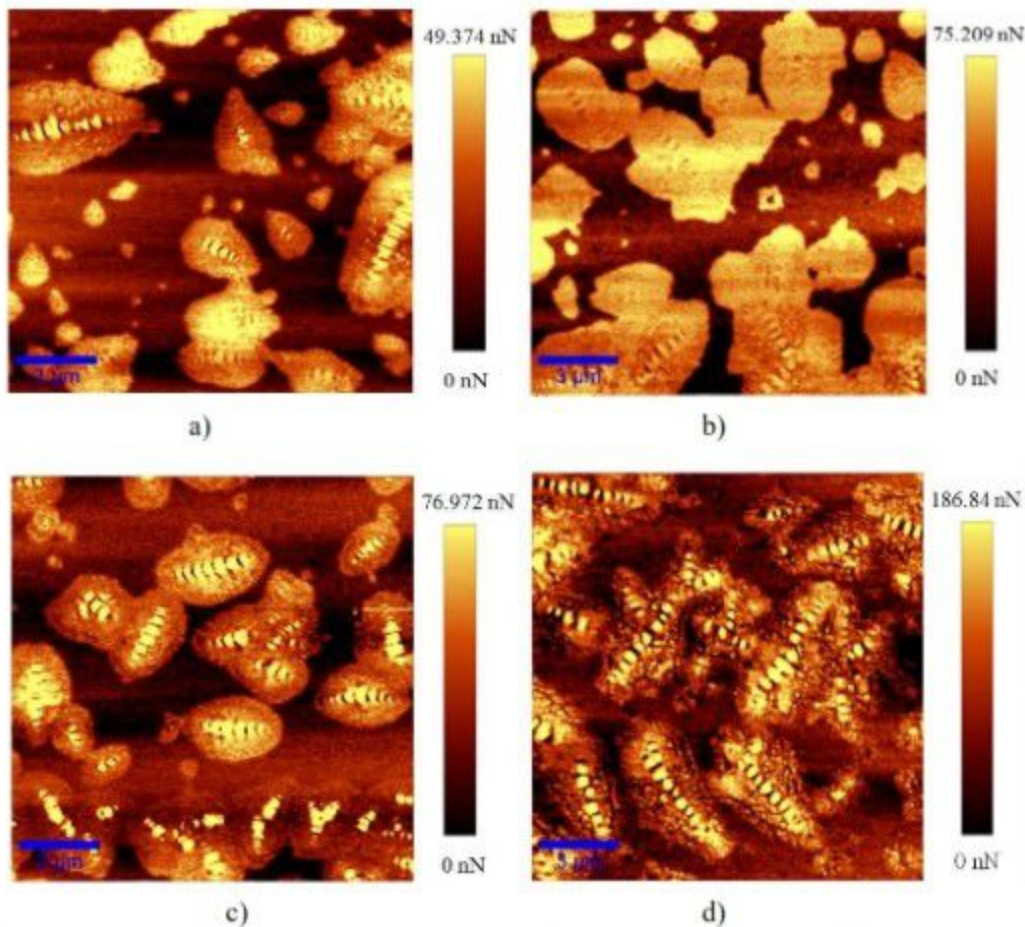


Figura 12 Microscopía de fuerza Atómica Efecto de la Oxidación sobre la adhesión de asfaltos, a) asfalto original, b) asfalto envejecido en RTFO, c) asfalto oxidado en PAV, d) asfalto oxidado a la intemperie

4.4. Evaluación de la susceptibilidad al desnudamiento del asfalto

La formación de la interfaz asfalto-agregado es un proceso fisicoquímico que involucra la interacción de las superficies de ambos materiales. Por esta razón, la ES del asfalto y del agregado es utilizada en la estimación de parámetros como la adhesión y la susceptibilidad al desplazamiento del asfalto (desnudamiento) por efecto del agua. La adhesión se estima a partir del cálculo del trabajo de adhesión (W_{AB}) según la Ec. 1.

$$W_{AB} = \gamma_A + \gamma_B - \gamma_{AB} \quad \text{Ec. 1}$$

donde γ_A es la energía superficial del agregado, γ_B es la energía superficial del asfalto y γ_{AB} es la energía de la interfaz agregado-asfalto.

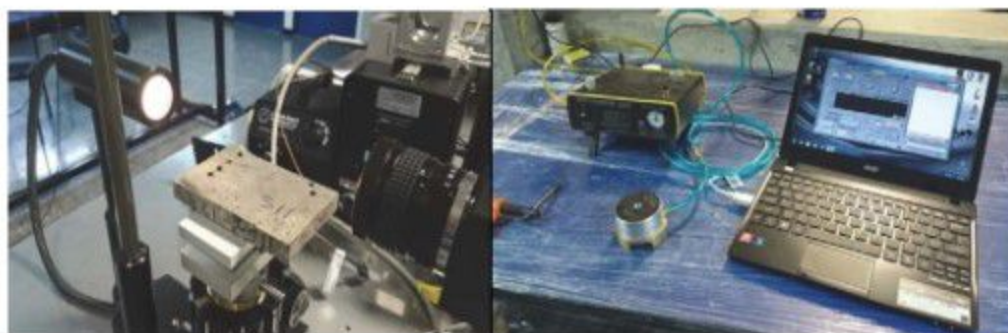
Por otro lado, el desplazamiento por efecto del agua (W_{ABW}^{wet}) se calcula según la Ec. 2 y es una estimación de la facilidad con la que la humedad alcanza la interfaz y desplaza al asfalto de la superficie del agregado.

$$W_{ABW}^{wet} = \gamma_{AW} + \gamma_{BW} - \gamma_{AB} \quad \text{Ec. 2}$$

Los procesos de adhesión y desplazamiento ocurren de manera simultánea en la mezcla asfáltica, los mismos están relacionados por el parámetro Razón de Energía (ER, por sus siglas en inglés) (Ec. 3).

$$ER = \frac{W_{AB}}{W_{ABW}^{wet}} \quad \text{Ec. 3}$$

El ER sirve como criterio en la evaluación de las combinaciones asfalto-agregado puesto que establece que el valor de W_{AB} sea tan alto y el valor de (W_{ABW}^{wet}) tan bajo que permitan la obtención de un de ER superior a 0,8 [13] De esta forma, la combinación asfalto-agregado se considera resistente al daño por humedad. Los parámetros anteriormente mencionados se obtienen mediante la medición de ángulos de contacto con un goniómetro (Figura 14a). Las interacciones entre el asfalto y el agregado pueden medirse de manera mecánica con ayuda del P.A.T.T.I., del inglés Pneumatic Adhesion Tensile Tester Instrument (Figura 14b), el cual mide la presión requerida para separar el asfalto de la superficie del agregado, tanto a condiciones húmedas como secas. Lo anterior representa la fuerza de la adhesión entre ambos materiales. El presente estudio pretende evaluar el efecto fisicoquímico de la oxidación sobre la susceptibilidad al desnudamiento del asfalto. Se ha encontrado que la oxidación influencia las propiedades de superficie del ligante, por lo que se espera observar estos cambios [14].



a)

b)

Figura 14 a) Goniómetro, b) P.A.T.T.I.

5 Conclusiones

La investigación que pretende llevarse a cabo pretende ser un aporte importante no solo en la generación de conocimiento relativo a la oxidación en campo de los ligantes asfálticos, sino también como punto de partida en el establecimiento de especificaciones que se apeguen a las condiciones del clima latinoamericano. En este sentido, es de gran importancia conocer el desempeño del material cuando es sometido a las condiciones climáticas propias de la región. Finalmente, al lograr la cooperación de diversos grupos de investigación en el desarrollo de métodos de ensayo y normativas para la evaluación de los materiales para pavimentos, se lograría un avance importante en esta temática, además de transferencia de conocimiento con la comunidad científica.

6 Referencias

- [1] Baldi-Sevilla, A.B., Aguiar-Moya, J.P., Vargas- Nordebeck, A., Loria-Salazar, L. "Effect of aggregate-bitumen compatibility on moisture susceptibility of asphalt mixtures". Road Materials and Pavement Design, Vol. 18:sup2, pp. 318-328, 2017.
- [2] Villegas-Villegas, R.E., Loria-Salazar, L.G., Aguiar-Moya, J.P., Fernández-Gómez, W.D., Reyes-Lizcano, F.A. "Recycling of banana production waste bags in bitumens: A green alternative", Eurobitumen, Istanbul, 2012.
- [3] Baldi-Sevilla, A.B, Villegas-Villegas, R. E.; Aguiar-Moya, J. P., Salazar-Delgado, J., Rodríguez-Castro, E., Loria-Salazar, L. G. "Estudio del proceso físico-químico de la oxidación y su incidencia en el daño por humedad de asfaltos. LM-PI-UMP-056-R3". San José, Costa Rica: Programa Infraestructura del Transporte (PITRA), LanammeUCR, 2016.
- [4] Petersen, J. C. "A Review of the Fundamentals of Asphalt Oxidation". Transportation research circular E-C140. Washington D. C.: Transportation Research Board, 2009.

- [5] Loria-Salazar, L. G. "Evaluación de asfaltos modificados en laboratorio con distintos polímeros", *Infraestructura Vial*, Vol. 17, 46-53. 2007.
- [6] Liu, M., Lunsford, K. M., Davidson, R. R., Glover C. J., & Bullin, J. A. "The kinetics of carbonyl formation in asphalt". *American Institute of Chemical Engineers Journal*, Vol. 42, pp. 1069-1076. 1996.
- [7] Lui, M., Ferry, M. A., Davidson, R. R., Glover, C. J., & Bullin, J. A. "Oxygen Uptake As Correlated to Carbonyl Growth in Aged Asphalts and Asphalt Corbett Fractions", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 37, pp. 4669-4674. 1998.
- [8] Lamontagne, J., Dumas, P., Mouillet, V., & Kister, J. "Comparison by Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy of different ageing techniques: application to road bitumens", *Fuel*, Vol. 80, pp. 483-488. 2001.
- [9] Mouillet, V., Lamontagne, J., Durrieu, F., Planche, J. P., & Lapalu, L. "Infrared microscopy investigation of oxidation and phase evolution in bitumen modified with polymers", *Fuel*, Vol. 87, pp. 1270-1280. 2008.
- [10] Yao, H., You, Z., Li, L., Goh, S. W., Lee, C. H., & Yap, Y. K. "Rheological properties and chemical analysis of nanoclay and carbon microfiber", *Construction and Building Materials*, Vol. 38, pp. 327-337. 2013.
- [11] Yang, X., You, Z., & Mills-Beale, J. "Asphalt Binders Blended with a High Percentage of Biobinders: Aging Mechanism Using FTIR and Rheology", *Journal of Materials in Civil*, Vol. 27, pp. 04014157. 2015.
- [12] Aguiar-Moya, J. P., Salazar-Delgado, J., García, A., Baldi-Sevilla, A., Bonilla-Mora, V., Loria-Salazar, L.G. "Effect of ageing on micromechanical properties of bitumen by means of atomic force microscopy". *Road Materials and Pavement Design*, Vol. 18sup2, pp: 203-215, 2017.
- [13] Bhasin, A., Masad, E., Little, D. & Lytton, R. "Limits on Adhesive Bond Energy for Improved Resistance of Hot Mix Asphalt to Moisture Damage". *Transportation Research Record*: 1970, pp. 3-13, 2006.
- [14] Baldi-Sevilla, A., Montero, M. L., Aguiar-Moya, J. P., & Loria-Salazar, L. "Influence of nanosilica and diatomite on the physicochemical and mechanical properties of binder at unaged and oxidized conditions". *Construction and Building Materials*, Vol. 127, pp. 176-182, 2016.

