



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

EVALUACIÓN DE LOS ÍNDICES DE DESEMPEÑO DE ENVEJECIMIENTO DE CEMENTOS ASFÁLTICOS SOMETIDOS A DISTINTOS TIEMPOS DE ENVEJECIMIENTO OXIDATIVO

Daniel Mejía¹, Alexandra Ossa²

¹ Instituto de ingeniería, UNAM, Ciudad de México, México, DMejiaL@iingen.unam.mx

² Instituto de ingeniería, UNAM, Ciudad de México, México, AOssaL@iingen.unam.mx

Resumen

En este estudio se evaluaron las características físicas, químicas y reológicas de dos cementos asfálticos, uno de uso convencional y otro modificado con propiedades que retardan el envejecimiento. Ambos ligantes fueron envejecidos por oxidación a corto plazo por la prueba de horno rotatorio de película delgada (RTFO), y mediante la vasija de envejecimiento a presión (PAV) simulando el envejecimiento a largo plazo; con la finalidad de obtener sus índices de desempeño de envejecimiento. Para esto, se realizaron pruebas de penetración, viscosidad Saybol-Furol, punto de reblandecimiento y punto de inflamación como parte de la caracterización física. Para la parte reológica, se realizaron pruebas de viscosidad rotacional y la obtención de su grado de rendimiento PG en el reómetro de corte dinámico. Por último, se realizaron pruebas IR para obtener su caracterización química antes y después del envejecimiento. Los resultados obtenidos mostraron que el cemento asfáltico modificado con propiedades anti-envejecimiento presentó un mejor desempeño retardando su oxidación en comparación con el cemento asfáltico de uso convencional.

Palabras Clave: Cemento asfáltico, envejecimiento oxidativo, índices de desempeño.

1. Introducción

El uso del cemento asfáltico en la ingeniería de pavimentos se ha convertido en un importante aglomerante debido a su excelente viscoelasticidad. Este material es clave para la construcción de carreteras, autopistas y otras infraestructuras, gracias a su capacidad para soportar diversas cargas y adaptarse a diferentes condiciones de tráfico y clima. Sin embargo, las diferentes condiciones ambientales a las que suele estar sometido, junto con el aumento del volumen del tránsito, plantean importantes desafíos para el rendimiento y la durabilidad de los materiales asfálticos [1].

La exposición continua a factores ambientales como la radiación ultravioleta, la lluvia, la humedad y las fluctuaciones de temperatura puede acelerar el envejecimiento del cemento asfáltico. Este proceso de envejecimiento se manifiesta en la oxidación del material, lo que provoca un endurecimiento del ligante asfáltico y una pérdida de flexibilidad. Con el tiempo, estos cambios físicos y químicos pueden dar lugar a la formación de grietas, fisuras y otros tipos de deterioro superficial que afectan la integridad estructural y la vida útil del pavimento. En este sentido, la caracterización física, química y reológica de estos materiales es cada vez más importante. Dado que el cemento asfáltico es un material orgánico complejo susceptible al envejecimiento por oxidación debido a factores en el medio ambiente como el agua, la presencia de aire, los cambios de temperatura y humedad, es fundamental entender y mejorar sus propiedades para extender su durabilidad y rendimiento [2, 3, 4].



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

Para mitigar las afectaciones que generan las condiciones ambientales en el ligante asfáltico, se ha optado por la modificación de la matriz asfáltica mediante la adición de polímeros. Estos polímeros mejoran las propiedades viscoelásticas del asfalto, aumentando su estabilidad tanto a bajas como a altas temperaturas, y contribuyen a incrementar su rigidez y flexibilidad. Entre los polímeros más utilizados se encuentran el polietileno, el polipropileno y el caucho de neumáticos reciclados, cada uno aportando diferentes ventajas en términos de durabilidad y resistencia [5, 6].

No obstante, cuando el cemento asfáltico original comienza a oxidarse, el agente modificador también se degrada debido al envejecimiento, lo que provoca que el ligante se vuelva duro y quebradizo, perdiendo el efecto de la modificación. Además, bajo la acción de la carga y el agua, el pavimento de concreto asfáltico se vuelve vulnerable a un deterioro superficial temprano, manifestándose en problemas como el agrietamiento y el desprendimiento. Por ende, para resolver el problema de la insuficiente resistencia al envejecimiento de los cementos asfálticos modificados, muchas investigaciones han utilizado otros materiales, como nanomateriales, antioxidantes y absorbentes de rayos UV, para la modificación de compuestos con el fin de mejorar la durabilidad de un cemento asfáltico modificado. Los nanomateriales, por ejemplo, pueden ayudar a reforzar la matriz asfáltica a nivel molecular, proporcionando una barrera adicional contra la oxidación y el envejecimiento. Los antioxidantes y los absorbentes de rayos UV, por otro lado, pueden reducir la velocidad de degradación del cemento asfáltico al protegerlo de los efectos nocivos del oxígeno y la radiación solar [7, 8, 9, 10].

Sin embargo, poder caracterizar cualquier cemento asfáltico con un grado de envejecimiento desarrollado por las condiciones ambientales requiere de mucho tiempo, lo que lo vuelve poco factible en la práctica. Debido a esto, existen algunas pruebas de laboratorio como el horno rotatorio de película delgada (RTFO), que se encarga de simular el envejecimiento que se presenta durante la fabricación y el transporte de la mezcla asfáltica. Esta prueba expone el asfalto a altas temperaturas y flujo de aire para imitar las condiciones reales a las que se somete el material durante su aplicación. Por otro lado, la prueba de vasija de envejecimiento a presión (PAV) simula el envejecimiento a largo plazo, es decir, el que se desarrolla durante la vida en servicio de un pavimento asfáltico, mediante la exposición del material a temperaturas elevadas y presión durante un período prolongado [5, 11].

Por tanto, esta investigación se centró en la evaluación del envejecimiento mediante índices de desempeño de envejecimiento. Se evaluaron dos cementos asfálticos, uno de uso convencional y otro modificado con propiedades antienvjecimiento. Ambos ligantes fueron envejecidos por oxidación a corto plazo mediante la prueba de horno rotatorio de película delgada (RTFO) y a envejecimiento a largo plazo mediante la vasija de envejecimiento a presión (PAV). Los resultados mostraron que el cemento asfáltico modificado presentó un mejor desempeño, retardando su oxidación en comparación con el cemento asfáltico de uso convencional, lo que sugiere que la modificación implementada puede ser efectiva para mejorar la durabilidad y el rendimiento del pavimento en condiciones reales de servicio.

2. Materiales y métodos

Se empleó un cemento asfáltico de uso convencional (CA-Con), el cual fue modificado con nanopartículas de dióxido de titanio (TiO_2), respecto a la masa del ligante base para obtener el cemento asfáltico modificado con propiedades antienvjecimiento (CA-Mod), las propiedades del TiO_2 se presentan en la Tabla 1.



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

Tabla 1. Propiedades básicas del TiO_2

INFORMACIÓN GENERAL	
Apariencia	Estado físico, sólido (polvo)
Color	Blanco
Olor	Inodoro
INFORMACIÓN RELACIONADA CON LA SEGURIDAD Y MEDIO AMBIENTE	
pH	Aprox. 7.0 a 20 °C
Punto de fusión	> 1000° C (P. Atm. 1013 hPa)
Densidad	4.1 kg/L (20° C)
Densidad aparente	600 kg/ cm ³
Solubilidad	< 0.001 g/l (agua)
Inflamabilidad	No inflamable
Propiedad explosiva	No explosiva
Propiedad oxidante	No oxidante
Estabilidad química	Producto estable

2.1. Envejecimiento de cementos asfálticos

Se realizó un proceso de envejecimiento en laboratorio del cemento asfáltico convencional y del modificado mediante las pruebas de RTFO y PAV. Inicialmente, se empleó el horno rotatorio de película delgada (RTFO) simulando el envejecimiento del ligante asfáltico durante las etapas de producción, transporte y construcción de la mezcla asfáltica. En esta prueba, se introdujo una muestra fluida de 35 ± 0.5 g de cemento asfáltico en un frasco de vidrio, sometiéndola a una temperatura de 163° C con una presión de aire de 400 ml durante un periodo de 85 minutos, como se ilustra en la Figura 1.



Figura 1. Envejecimiento a corto plazo por horno rotatorio de película delgada, RTFO.

Posteriormente, se utilizó la vasija de envejecimiento a presión (PAV) para simular el envejecimiento del ligante durante el servicio del pavimento de concreto asfáltico. La prueba consistió en colocar 50 ± 0.5 g de cemento asfáltico previamente envejecido en el RTFO, vertiéndolo en charolas metálicas que se introdujeron en una cámara de presión a 2.1 ± 0.1 MPa a una temperatura de 100° C, Figura 2.



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.



Figura 2. Envejecimiento a largo plazo en la vasija de envejecimiento a presión, PAV.

2.2. Propiedades físicas

Se realizaron pruebas de caracterización física del cemento asfáltico convencional y modificado en su condición original (sin envejecimiento), los resultados se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Caracterización física de los cementos asfálticos en estudio

Prueba	Cemento asfáltico convencional	Cemento asfáltico modificado	ASTM Estándar
Penetración a 25° C, 100 g, 5 s; [10-1 mm]	68	55	D-2171
Punto de inflamación de Cleveland; °C.	296	308	D-92
Punto de reblandecimiento; °C.	51	53	D-1525
Viscosidad Saybol-Furol a 135° C; s.	188	230	4402

2.3. Propiedades reológicas

Se empleó un viscosímetro rotacional Brookfield y un reómetro de corte dinámico para la obtención de las propiedades reológicas de los dos cementos asfálticos en estudio. Las pruebas se realizaron en la condición original y envejecidas por RTFO y PAV. En la Tabla 3 se presentan los resultados de viscosidad a la temperatura de 135° C con base en la norma AASTHO T 316.

Tabla 3. Resultados de la prueba de viscosidad rotacional Brookfield

Condición de envejecimiento	CA-Con (Pa. s)	CA-Mod (Pa. s)
Original	0.346	0.468
RTFO	0.534	0.669
PAV	1.053	1.227



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

En la Figura 3, se presenta la carta de viscosidad de los cementos asfálticos estudiados, marcando con una línea roja la referencia de los 135° C donde se tomaron los valores de la viscosidad.

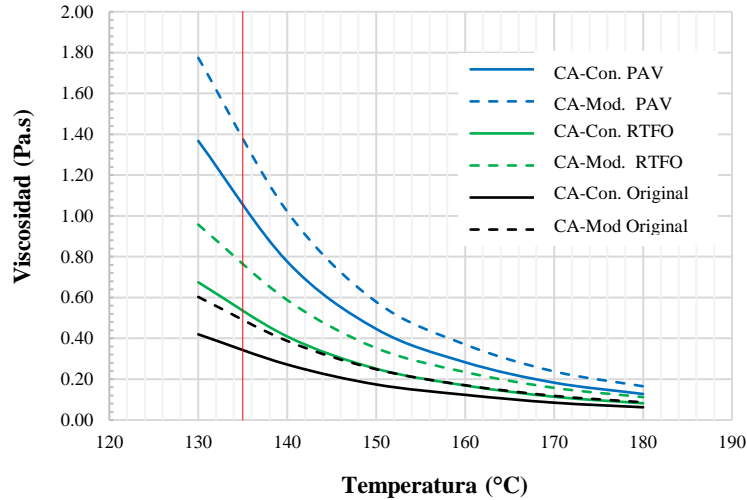


Figura 3. Carta de viscosidad para la condición original, RTFO y PAV del CA-Con y CA-Mod

La obtención del grado de rendimiento PG superior, se realizó mediante el uso del reómetro de corte dinámico (Figura 4), en la Tabla 4, se presentan los resultados de la caracterización reológica.

Tabla 4. Propiedades viscoelásticas de los cementos asfálticos en estudio.

Condición	Parámetro	Cemento asfáltico	
		CA-Con	CA-Mod
Original	G^* (Pa)	1397	2129
	δ (°)	86.69	86.13
RTFO	G^* (Pa)	3359	4217
	δ (°)	83.82	83.66
PAV	G^* (Pa)	7.1E+006	6.0E+006
	δ (°)	43.55	45.09
Grado de rendimiento PG obtenido		PG 64-22	PG 64-22



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.



Figura 4. Reómetro de corte dinámico, muestra de CA-Con, obtención del grado de rendimiento PG Superior.

La obtención del grado de rendimiento inferior no pudo realizarse debido a que el reómetro de viga a flexión no se encontraba disponible, por tanto, se conservó la clasificación del grado PG inferior reportada por el fabricante.

2.4. Barridos de infrarrojo por transformada de Fourier

Una vez realizada la caracterización física y reológica, se procedió a realizar la caracterización química de los dos cementos asfálticos en estudio. Para ello se realizaron pruebas de infrarrojo por transformada de Fourier en un Espectrómetro Thermo Scientific Nicolet 6700 FT-IR. El Objetivo de esta prueba fue examinar a detalle los cambios en los grupos funcionales durante el envejecimiento a corto y largo plazo de los cementos asfálticos. En la prueba se expusieron muestras de cemento asfáltico a radiación infrarroja en el espectrómetro. Dicha radiación atravesó cada muestra, determinando la fracción de radiación incidente absorbida a una energía específica. Cada pico de absorción en el espectro de absorbancia corresponde a la frecuencia de un grupo funcional particular [17, 18, 19, 20]. La Figura 5 se presenta los resultados de los espectros infrarrojos obtenidos, donde se observan las bandas correspondientes al estiramiento C-H con números de onda de 2920 cm^{-1} , 2850 cm^{-1} , 1455 cm^{-1} , 1376 cm^{-1} y para los aromáticos de 770 cm^{-1} a 685 cm^{-1} en todas las condiciones de envejecimiento, y del mismo modo para los estiramientos O-H con número de onda de 2365 cm^{-1} . Para las bandas asociadas al grupo de los carbonilos, se presenta un número de onda en 1693 cm^{-1} y para los sulfóxidos en 1030 cm^{-1} .

Posteriormente con los espectros de infrarrojo, se calcularon las áreas bajo los picos de absorción correspondientes a los grupos funcionales de los carbonilos y los sulfóxidos para la obtención de los índices $I_{\text{C=O}}$ e $I_{\text{S=O}}$, mediante las ecuaciones 1 y 2.



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

$$I_{C=O} = \frac{A_{C=O}}{\sum A_{650 \sim 3700}} \quad (1)$$

$$I_{S=O} = \frac{A_{S=O}}{\sum A_{650 \sim 3700}} \quad (2)$$

Donde $A_{C=O}$ es el área correspondiente al grupo funcional carbonilo, $A_{S=O}$ es el área correspondiente al grupo funcional sulfóxido y $A_{650 \sim 3700}$ corresponden a las áreas de los picos de absorción correspondientes al rango de onda de 650 a 3700 cm^{-1} .

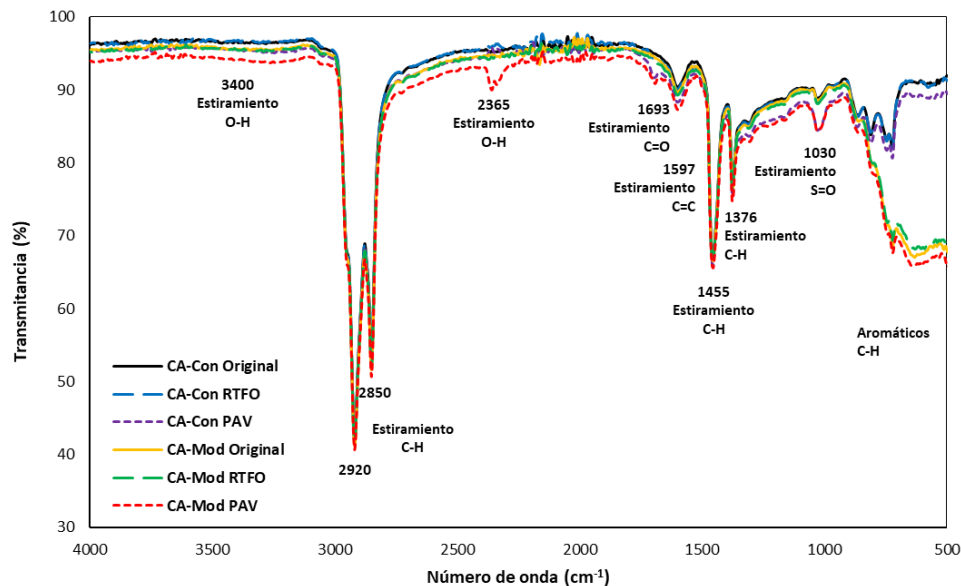


Figura 5. Resultados de la de espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier para la condición original, RTFO y PAV del CA-Con y CA-Mod

3. Índices de evaluación del desempeño de envejecimiento

Para evaluar las propiedades físicas, químicas y viscoelásticas antes y después del envejecimiento del CA-Con y CA-Mod, se calcularon sus índices de desempeño de envejecimiento. Con los resultados de la viscosidad rotacional Brookfield a 135° C se calculó el índice VAI, así mismo, se calculó el índice de envejecimiento del módulo de corte complejo (CMAI) y del ángulo de fase (PAI) para caracterizar el efecto del envejecimiento en las propiedades reológicas a la temperatura de 70° C, con la finalidad de evaluar un grado PG por arriba del obtenido en la caracterización. Finalmente, para evaluar el efecto del envejecimiento sobre los grupos funcionales del carbonilo y sulfóxido se emplearon los índices $CI_{C=O}$ y $CI_{S=O}$ respectivamente, las ecuaciones 4 a 8 corresponden a los índices evaluados [1].



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

$$VAI (\%) = \frac{V_{AA} - V_{BA}}{V_{BA}} * 100 \quad (4)$$

Donde V_{AA} es el valor de la viscosidad después del envejecimiento y V_{BA} es el valor de la viscosidad antes del envejecimiento.

$$CMAI (\%) = \frac{CM_{AA} - CM_{BA}}{CM_{BA}} * 100 \quad (5)$$

Donde CM_{AA} es el valor del módulo de corte complejo después del envejecimiento y CM_{BA} es el valor del módulo de corte complejo antes del envejecimiento.

$$PAI (\%) = Abs\left(\frac{PA_{AA} - PA_{BA}}{PA_{BA}}\right) * 100 \quad (6)$$

Donde PA_{AA} es el valor del ángulo de fase después del envejecimiento y PA_{BA} es el valor del ángulo de fase antes del envejecimiento.

$$CI_{C=O} (\%) = \frac{I_{C=O_{AA}} - I_{C=O_{BA}}}{I_{C=O_{BA}}} * 100 \quad (7)$$

Donde $CI_{C=O_{AA}}$ es el valor del índice carbonilo después del envejecimiento y $CI_{C=O_{BA}}$ es el valor del índice carbonilo antes del envejecimiento.

$$CI_{S=O} (\%) = \frac{I_{S=O_{AA}} - I_{S=O_{BA}}}{I_{S=O_{BA}}} * 100 \quad (8)$$

Donde $CI_{S=O_{AA}}$ es el valor del índice sulfóxido después del envejecimiento y $CI_{S=O_{BA}}$ es el valor del índice sulfóxido antes del envejecimiento.

Todos los índices de desempeño de envejecimiento se calcularon considerando la condición *Original vs RTFO* y la condición *Original vs PAV*.

4. Resultados y análisis

Los resultados obtenidos en el índice VAI%, correspondiente a la viscosidad rotacional, indican que los índices se incrementan casi en un 50% cuando el envejecimiento pasa de RTFO a PAV en ambos ligantes. No obstante, el CA-Mod presenta valores inferiores a los obtenidos con el CA-Con, lo cual sugiere que el agente modificador retardante del envejecimiento está cumpliendo su objetivo en términos de viscosidad. En la Figura 6 se presentan los resultados de forma gráfica.



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

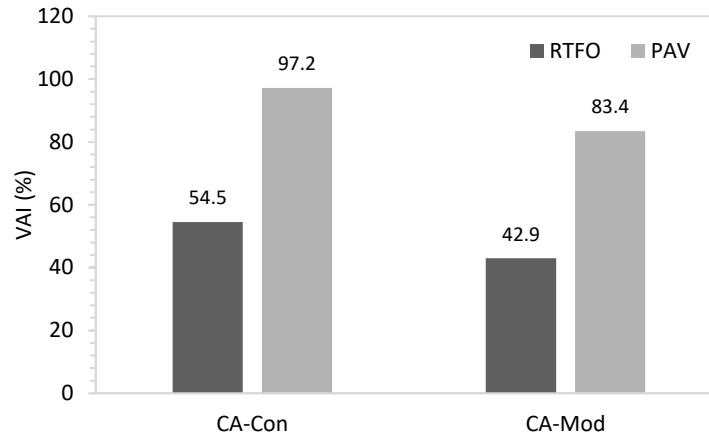


Figura 6. Resultados del índice VAI% de los ligante CA-Con y CA-Mod correspondientes al envejecimiento por RTFO y PAV

Los resultados del índice correspondiente al módulo de corte complejo (CMAI%) presentan el mismo comportamiento que el índice de la viscosidad (VAI%), por lo que se consideran consistentes (Figura 7). Sin embargo, los valores del CA-Con y del CA-Mod para el envejecimiento por PAV son muy similares, siendo apenas un poco inferiores los resultados del CA-Mod. En general, podemos decir que la oxidación afectó de manera similar las propiedades viscoelásticas de ambos ligantes, volviéndolos más rígidos. En este sentido, los resultados del índice PAI% obtenidos de los valores del ángulo de fase (Figura 8), muestran que ambos cementos asfálticos se envejecen de forma similar, pero en menor grado el ligante modificado.

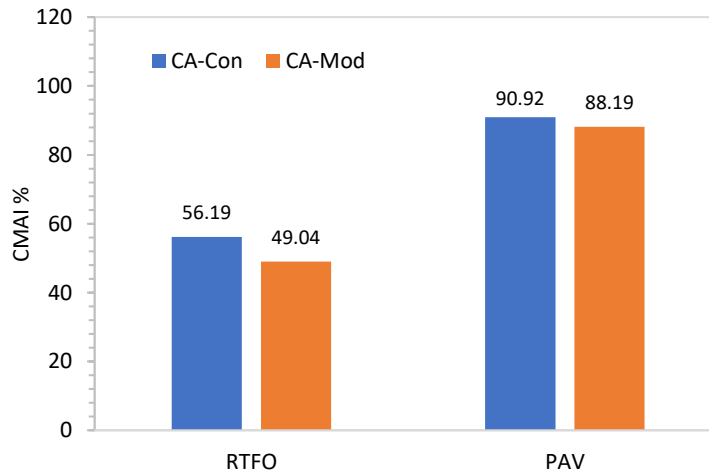


Figura 7. Resultados del índice CMAI% de los ligante CA-Con y CA-Mod correspondientes al envejecimiento por RTFO y PAV



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

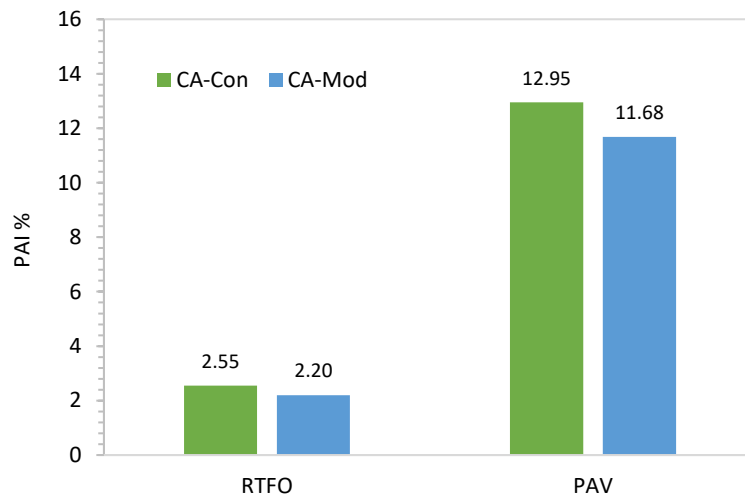


Figura 8. Resultados del índice PAI% de los ligante CA-Con y CA-Mod correspondientes al envejecimiento por RTFO y PAV

En las Figuras 9 y 10 se presentan los resultados de los índices de desempeño obtenidos mediante la caracterización química, utilizando pruebas de los barridos de infrarrojo por transformada de Fourier. En estas pruebas, los grupos funcionales de los carbonilos y sulfóxidos son los más afectados durante el envejecimiento del cemento asfáltico, evidenciando un estiramiento del grupo funcional correspondiente. No obstante, los resultados demuestran que tanto los carbonilos (Figura 9) y sulfóxidos (Figura 10) en el CA-Mod disminuyen sus índices entre un 30 y 35% en el envejecimiento a largo plazo en comparación con el CA-Con. Esto indica que la modificación cumple con el objetivo de retardar el envejecimiento del ligante modificado.

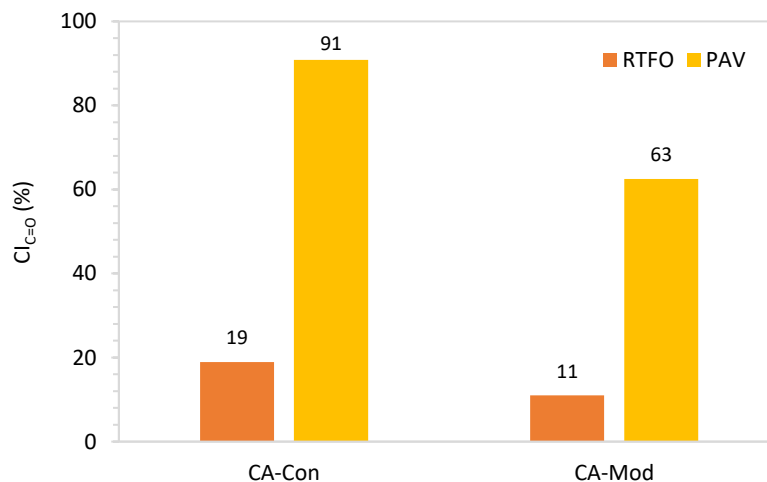


Figura 9. Resultados del índice Cl_{C=O} % de los ligante CA-Con y CA-Mod correspondientes al envejecimiento por RTFO y PAV



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

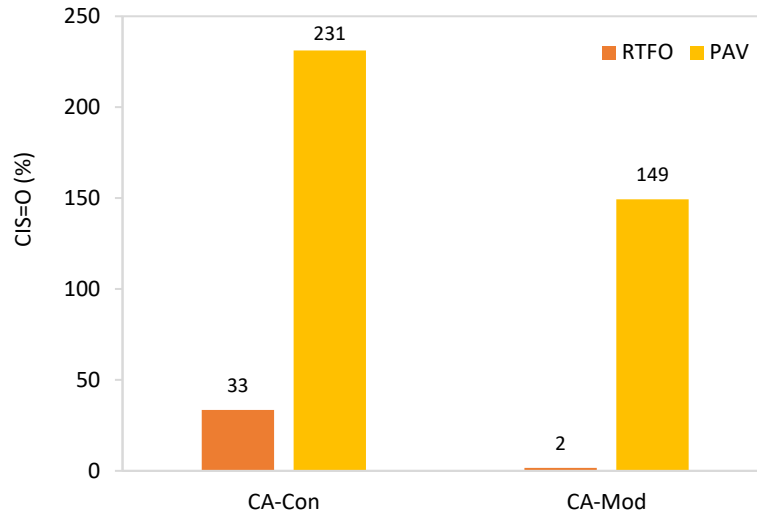


Figura 10. Resultados del índice $CI_{S=0}$ % de los ligante CA-Con y CA-Mod correspondientes al envejecimiento por RTFO y PAV

5. Conclusiones

En este estudio se evaluaron los índices de desempeño de envejecimiento de dos cementos asfálticos, el CA-Con y el CA-Mod. Estos ligantes se envejecieron a corto y largo plazo mediante las pruebas de laboratorio RTFO y PAV, respectivamente. Se realizó la caracterización física, química y reológica antes y después de las pruebas de envejecimiento. A partir de los resultados obtenidos se llegó a las siguientes conclusiones:

1. La caracterización de un cemento asfáltico para fines prácticos puede realizarse considerando únicamente la parte reológica. No obstante, cuando se realizan estudios de investigación, es necesario analizar el ligante de forma detallada y precisa, ya que los cambios en su estructura física y química permiten comprender su comportamiento viscoelástico a lo largo del tiempo, es decir, cómo sus propiedades reaccionaran ante el envejecimiento por oxidación.
2. Los resultados de los índices de desempeño de envejecimiento obtenidos de la caracterización física y reológica ($VAI\%$, $CMAI\%$ y $PAI\%$), mostraron que la modificación cumplió con el objetivo de retardar el envejecimiento. Sin embargo, los resultados del CA-Mod apenas se encontraron por debajo de los obtenidos con el CA-Con, lo cual no se percibió claramente hasta analizar la parte química.
3. Los resultados de los índices $CI_{C=0}$ y $CI_{S=0}$ fueron cruciales para visualizar el efecto de la modificación del cemento asfáltico, mostrando el CA-Mod un mejor desempeño en un rango de 30 a 35% respecto al CA-Con.
4. Finalmente, cabe destacar que esta investigación solo evaluó el desempeño ante el envejecimiento para altas temperaturas de las propiedades viscoelásticas. Un complemento sería verificar el desempeño en temperaturas inferiores a los 10°C , lo que permitiría obtener la evaluación en un rango más amplio.



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

6. Referencias

- [1] Zeng, G., Shen, A., Lyu, Z., Kang, C., Cui, H., Ren, G., & Yue, G. (2023). Research on anti-aging properties of POE/SBS compound-modified asphalt in high-altitude regions. *Construction and Building Materials*, 376, 131060.
- [2] Ogbon, W. A., Jiang, W., Yuan, D., Xing, C., & Xiao, J. J. C. (2023). Asphalt mixture performance deterioration in the salty environment based on theoretical calculation. *Construction and Building Materials*, 393, Article 132096. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132096>
- [3] Yuan, D., Jiang, W., Xiao, J., Tong, Z., Jia, M., Shan, J., & Ogbon, A. W. (2022). Assessment of the aging process of finished product-modified asphalt binder and its aging mechanism. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 34(8), Article 04022174. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0004330](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004330)
- [4] Lyu, L., Fini, E. H., Pei, J., & Poulidakos, L. D. (2023). Aging evolution and sustainability implications of crumb rubberized asphalt binder: A state-of-the-art. *Journal of Cleaner Production*, Article 140202. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140202>
- [5] Ye, W., Jiang, W., Li, P., Yuan, D., Shan, J., & Xiao, J. J. (2019). Analysis of mechanism and time-temperature equivalent effects of asphalt binder in short-term aging. *Construction and Building Materials*, 215, 823-838. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.197>
- [6] Behnood, A., & Gharehveran, M. M. (2019). Morphology, rheology, and physical properties of polymer-modified asphalt binders. *European Polymer Journal*, 112, 766–791.
- [7] Zhang, C., Wang, H. N., You, Z. P., Gao, J. F., & Irfan, M. (2019). Performance test on styrene-butadiene-styrene (SBS) modified asphalt based on the different evaluation methods. *Applied Sciences-Basel*, 9(3).
- [8] Zhu, C. Z., Zhang, H. L., Zhang, D. M., & Chen, Z. H. (2018). Influence of base asphalt and SBS modifier on the weathering aging behaviors of SBS modified asphalt. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(3).
- [9] Xu, X., Yu, J. Y., Xue, L. H., Zhang, C. L., He, B. Y., & Wu, M. (2017). Structure and performance evaluation on aged SBS modified bitumen with bi- or tri-epoxy reactive rejuvenating system. *Construction and Building Materials*, 151, 479–486.
- [10] Angius, E., Ding, H. B., & Hesp, S. A. M. (2018). Durability assessment of asphalt binder. *Construction and Building Materials*, 165, 264–271.
- [11] Ren, S., Liu, X., Lin, P., Jing, R., & Erkens, S. (2022). Toward the long-term aging influence and novel reaction kinetics models of bitumen. *International Journal of Pavement Engineering*, 1-16. <https://doi.org/10.1080/10298436.2021.2024188>
- [12] ASTM. (2018). Standard Test Method for Viscosity of Asphalts by Vacuum Capillary Viscometer. ASTM D2171 / D2171M-18. West Conshohocken, PA: ASTM.
- [13] ASTM. (2018). Standard Test Method for Flash and Fire Points by Cleveland Open Cup Tester. ASTM D92-18. West Conshohocken, PA: ASTM.
- [14] ASTM. (2017). Standard Test Method for Vicat Softening Temperature of Plastics. ASTM D-1525-17. West Conshohocken, PA: ASTM.
- [15] ASTM. (2012). Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer. ASTM 4402-06. West Conshohocken, PA: ASTM.
- [16] AASHTO. (2013). Viscosity Determination of Asphalt Binder Using Rotational Viscometer. AASHTO T 316-13.
- [17] Trujillo, M., Alcántar, B., Ramírez, R. M., & Ossa, A. (2021). Influence of aging on the physicochemical behavior of photocatalytic asphalt cements subjected to the natural environment. *Construction and Building Materials*, 295, 123597. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123597>
- [18] Ferreira, F., Franceschi, W., Menezes, B., Biagioni, A., Coutinho, A., & Cividanes, L. (2019). Chapter One - Synthesis, Characterization, and Applications of Carbon Nanotubes. *Carbon-Based Nanofillers and Their Rubber Nanocomposites Carbon Nano-Objects*, 1-45. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813248-7.00001-8>
- [19] Xu, T., & Huang, X. (2010). A TG-FTIR investigation into smoke suppression mechanism of magnesium hydroxide in asphalt combustion process. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 87(2), 217-223. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2009.12.008>
- [20] Xu, T., & Huang, X. (2010). Study on combustion mechanism of asphalt binder by using TG-FTIR technique. *Fuel*, 89(9), 2185-2190. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.01.012>