



Efecto del óxido de grafeno en la viscosidad del asfalto mexicano

Effect of graphene oxide on the viscosity of Mexican asphalt

Alberto Gaxiola^a, Alexandra Ossa-López^b, Paulette Gómez-López^c, Clemente G. Alvarado-Beltrán^a, Andrés Castro-Beltrán^{a*}

^aFacultad de Ingeniería Mochis, Universidad Autónoma de Sinaloa, Los Mochis, Sinaloa, México

^bInstituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México

^cFacultad de Medicina, extensión Los Mochis, Universidad Autónoma de Sinaloa, Los Mochis, Sinaloa, México

*Corresponding author: andres.castro@uas.edu.mx

Abstract— Asphalt is a widely used material for road construction around the world due to its physical characteristics; however, its performance is limited by weather conditions and traffic composition. In this context, various modifications have been explored to enhance its properties, including improvements in mechanical performance. One such modification involves the addition of graphene oxide, a nanomaterial known for its high mechanical strength as well as its electrical and thermal properties. This study analyzes the effect of graphene oxide on the viscosity of base PG 64-22 asphalt, following the AASHTO T 316 test method for determining mixing and compaction temperatures. Concentrations of 1 %, 3 %, and 4 % by weight of asphalt were used. The results showed that, due to proper dispersion and frictional interactions between the two materials, viscosity readings increased. Additionally, viscosity curves were developed for both the original and the graphene oxide–modified asphalt. These results indicated that the mixing and compaction temperatures for the modified asphalt increased compared to the original asphalt.

Keywords—Asphalt, Asphalt viscosity, Graphene Oxide.

Resumen— El asfalto es un material ampliamente utilizado para la construcción de carreteras en todo el mundo debido a sus características físicas, aunque su desempeño está limitado por las condiciones climáticas y la composición del tránsito vehicular. En este sentido, se ha buscado modificarlo con diferentes propósitos, entre los cuales se encuentra mejorar su desempeño mecánico. Una de las maneras de modificar el asfalto es con la adición de óxido de grafeno, un nanomaterial conocido por su elevada resistencia mecánica y sus propiedades eléctricas y térmicas.

En esta investigación se realizó un análisis sobre cómo el óxido de grafeno afecta la viscosidad de un asfalto original PG 64-22 de acuerdo a lo establecido en el método de prueba AASHTO T 316 para temperaturas de mezclado y compactación con porcentajes de 1 %, 3 % y 4 % en relación a la masa del asfalto. Los resultados mostraron que, debido a la correcta dispersión e interacciones de fricción entre ambos materiales, las lecturas de viscosidad se elevaron. Además, se determinó la carta de viscosidad para el asfalto original y el asfalto modificado con óxido de grafeno, dichos resultados determinaron que las temperaturas de mezclado y compactación para el asfalto modificado se incrementaron en relación al asfalto original.

Palabras Clave—Asfalto, Viscosidad del asfalto, Óxido de grafeno.

I. INTRODUCCIÓN

EL asfalto es un material de particular interés para el ingeniero porque es un aglomerante resistente, muy adhesivo, altamente impermeable y duradero. Este material se caracteriza por presentar una consistencia

semisólida a temperatura ambiente, pero tiende rápidamente a alcanzar el estado líquido al incrementarla, lo que lo convierte en un material termoplástico [1].

La calidad de un asfalto y de una mezcla asfáltica está regida por la susceptibilidad de estos materiales a presentar, principalmente, alguna de las siguientes fallas: deformación permanente,

daño por humedad, el agrietamiento por fatiga y el agrietamiento térmico [2]. En este sentido, el asfalto se ha sometido a diversos procesos de modificación para mejorar alguna o algunas de las características que rigen estas fallas [3], [4]. Recientemente, diferentes grupos de investigadores han reportado asfalto modificado con óxido de grafeno (GO), un nanomaterial que se obtiene a través de reducción química para la producción a gran escala de grafeno [5] con una estructura molecular similar [6].

Además, presenta un alto módulo de Young, y buena conductividad térmica y eléctrica [7]. La combinación de asfalto y GO ha demostrado retardar el envejecimiento del asfalto [8], mejorar significativamente la susceptibilidad al ahuellamiento (surcos) [9] y la estabilidad de almacenamiento [10], [11] de los diferentes asfaltos utilizados. Investigaciones recientes han mostrado que al añadir 0.05 % GO en mezclas asfálticas tibias y calientes, mejora significativamente la resistencia al daño por humedad, la resistencia a la formación de surcos a alta temperatura, el módulo elástico a la compresión de la mezcla asfáltica en tanto que compromete ligeramente su resistencia al agrietamiento a baja temperatura y elevan la viscosidad del asfalto [12]. Esta última es una medida de resistencia a fluir, y se da como resultado de la interacción y cohesión de sus moléculas [13]. Dicha relación depende del origen o tipo y grados de material asfáltico [1]. La viscosidad más conveniente para la aplicación depende de varios factores, como tipo de aplicación (mezcla o riego), características y granulometría de los agregados y condiciones atmosféricas. Aunque en la literatura se han presentado resultados de viscosidad del asfalto modificado con GO, aún se tienen dudas importantes sobre el método de elaboración e incorporación que los autores de diversos estudios han utilizado en la dispersión de este material en la matriz del asfalto [12].

En este sentido, este trabajo presenta los resultados de las pruebas de viscosidad en asfalto modificado con 1 %, 3 % y 4 % de GO, con respecto a la masa, utilizando un viscosímetro de Brookfield y aplicando el procedimiento ASTM D2493 [14] Se utilizó un método de dispersión mecánica (high shear, 16,000 rpm) con una alta potencia de mezclado, con la finalidad de homogenizar el GO que se añadió en polvo.

II. METODOLOGÍA

En el siguiente apartado se describen uno a uno los procedimientos realizados durante la presente investigación, en la cual se explica la síntesis del GO, el procedimiento empleado para la dispersión del GO en el asfalto procedente de la refinería mexicana de Tula, Hidalgo, y la determinación de la viscosidad del asfalto modificado con GO. Adicionalmente, se llevaron a cabo procedimientos para tratar de dispersar el precursor del GO en el asfalto, i.e., grafito, y verificar las diferencias en la viscosidad entre un material que se supone inerte y el GO.

II.1. Síntesis del GO

Para obtener el GO en polvo el procedimiento se dividió en dos partes: la primera, consistió en la síntesis del GO mediante el método de Tour [15], y la segunda es deshidratar y triturar el GO hasta obtener un polvo fino.

Se pesaron 5 g de grafito en un vaso precipitado de 50 ml, en un matraz Erlenmeyer se añadieron 200 ml de ácido sulfúrico (H_2SO_4), 40 ml de ácido fosfórico (H_3PO_4) y el grafito previamente pesado, dejándose por 10 minutos en agitación mecánica. Después, se agregaron 25 g de permanganato de potasio ($KMnO_4$), lentamente y cuidando que la temperatura no excediera los 55 °C. Y se dejó la mezcla en agitación por un período de 16 horas. Después se dejó enfriar a temperatura ambiente. Al mismo tiempo se preparó una solución de 600 ml de H_2O + 40 ml de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) al 30 % para neutralizar y eliminar el exceso de $KMnO_4$ de la reacción, dándole agitación mecánica durante 10 minutos. Posteriormente se agregó la reacción oxidada al peróxido y no al revés con la finalidad de evitar una reacción violenta. Se dejó reposar la reacción hasta precipitar el material y removiendo lo que fue decantado. El volumen retirado fue sustituido con agua desionizada y ácido clorhídrico (HCl) al 4 %, dejándose una vez más en reposo. Después, se pasó a dar lavados en centrífuga llenando a 40 ml los 6 tubos de la máquina centrifugadora agitándolos antes de ser colocados con el propósito de que la mezcla obtuviera nuevamente homogeneidad. El primer ciclo fue a 6000 rpm durante 5 minutos, retirando el líquido del sólido y reemplazándolo con agua desionizada para dar un segundo ciclo a 6000 rpm durante 10 minutos.

Una vez realizado el centrifugado, se barrió poco a poco con una espátula el GO adherido a las paredes de los tubos de plástico para ser colocado

en una caja Petri y posteriormente en un deshidratador a 40 °C durante 20 h.

Transcurrido el tiempo de deshidratación, se colocaron pequeñas muestras de GO en un crisol de porcelana para tritararlo hasta obtener la consistencia deseada: GO en polvo (Ver Figura 1).



Figura 1 GO después de 20 h en deshidratación a 40 °C.

II.2. Dispersión del GO y grafito en la matriz del asfalto

Se llevó la muestra de asfalto virgen de 500 ml a una plancha de calentamiento a 155 °C y 185 °C, con el objetivo de contrarrestar la pérdida de temperatura durante la dispersión. Mientras se alcanzaba la temperatura, en diferentes recipientes metálicos se añadía el porcentaje (1 %, 3 % y 4 %) en masa de GO y grafito correspondiente a 70 g de asfalto

El vástago del dispersador fue llevado al horno, previamente calentado, para evitar un choque térmico entre el equipo y la muestra de asfalto modificado.

Una vez que la muestra y el equipo alcanzaron las temperaturas requeridas, se colocó el vástago en el dispersor, en el recipiente metálico con la muestra de GO/grafito se agregaron 70 g de asfalto y finalmente se realizó la dispersión con el dispersador mecánico a 16,000 rpm durante dos minutos. El procedimiento se repitió para los porcentajes de cada material. La Figura 2 muestra fotografías de lo descrito en este apartado.

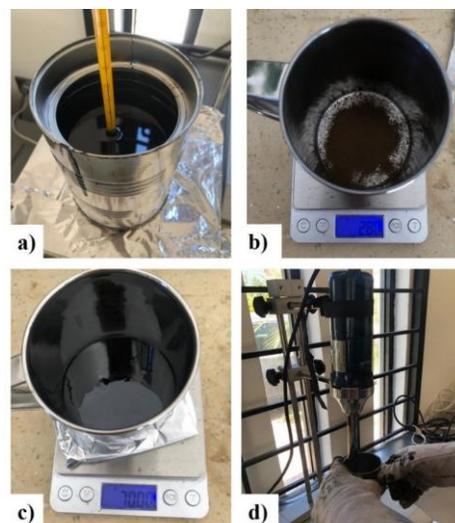


Figura 2 Procedimiento de dispersión del GO y grafito en la matriz del asfalto.

II.3. Determinación de la viscosidad del asfalto modificado con GO y grafito

La determinación de la viscosidad del asfalto modificado se hizo de acuerdo a las recomendaciones de la norma AASHTO T 316 *Viscosity Determination of Asphalt Binder Using Rotational Viscometer* [16]. Este método de prueba es utilizado para medir la viscosidad aparente del asfalto en temperaturas de aplicación.

La viscosidad se determina midiendo el esfuerzo de torsión requerido para mantener una velocidad rotacional constante de una espindola mientras está sumergida en una muestra de ligante asfáltico a una temperatura constante. Este esfuerzo de torsión está directamente relacionado con la viscosidad del asfalto, la cual el viscosímetro calcula automáticamente [17]. Se instaló y niveló el viscosímetro Brookfield, se encendió, calibró y precalentó a 135 °C o 165 °C según el caso. El tiempo de precalentado del termocontenedor fue proporcional al tiempo que se llevó a alcanzar la temperatura requerida. Usualmente, 30 minutos de acuerdo con SUPERPAVE [18].

De la misma manera que se hizo con el vástago del dispersador mecánico, se introdujeron la espindola y el tubo metálico en el termocontenedor 15 minutos antes de iniciar la prueba. Pasado este tiempo e inmediatamente después que el asfalto modificado haya sido homogenizado, se colocó el tubo metálico en una base sobre una balanza para pesar la cantidad de muestra requerida de asfalto modificado para cada espindola.

Una vez colocada la muestra en el termocontenedor nivelado, se tomaron lecturas cada 5 minutos hasta que la viscosidad se hizo

constante. Este procedimiento se repitió para los tres porcentajes de GO y grafito.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se reportan la caracterización del GO utilizado y los resultados de la viscosidad del asfalto modificado con GO a 135 °C y a 165 °C. Adicionalmente, se exponen las gráficas de viscosidad del asfalto con adiciones de grafito, con el objetivo de compararlas con los valores de viscosidad del asfalto modificado con GO. La discusión de cada uno de estos puntos se da enseguida.

III.1. Caracterización del GO

III.1.1. Espectroscopía ultravioleta-visible (UV-vis)

En la **Error! Reference source not found.** se muestra el espectro UV-vis del GO. En la gráfica se observan dos cambios significativos. El primero, la presencia de una banda de absorción característica a los 229 nm, debido a que el grado de conjugación entre enlaces dobles y sencillos está siendo interrumpido por la presencia de los grupos funcionales a base de oxígeno que se obtuvieron después de la oxidación de las hojuelas de grafito. El segundo, un pequeño hombro a los 302 nm resultado de las transiciones $n \rightarrow \pi^*$ de los enlaces de los grupos carbonilo (C=O).

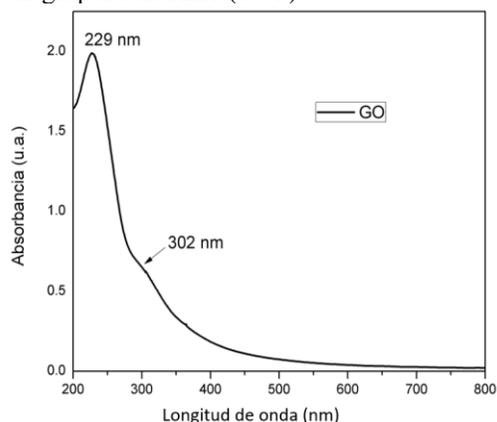


Figura 3 Espectro de absorción UV-vis del GO obtenido.

III.1.2. Espectroscopía de infrarrojo (FTIR)

En la Figura 4 se muestra la espectroscopía de infrarrojo del GO, en donde se puede observar la banda ancha a los 3217 cm^{-1} que se atribuye a las vibraciones de estiramiento de los grupos funcionales -OH que se encuentran en todo el plano basal de las hojas, así como a la presencia de agua.

También se pueden observar dos bandas a 1736 cm^{-1} y 1629 cm^{-1} que corresponden a las vibraciones de estiramiento de los enlaces del grupo carbonilo (C=O) y de los anillos aromáticos de las regiones de grafito sin oxidar (C=C). Además, la banda a los 1410 cm^{-1} es atribuida a la vibración de los enlaces -OH de los grupos carboxilos (-COOH) y una banda a los 1081 cm^{-1} que corresponde a los enlaces C-O. Este resultado nos confirma la presencia tanto de los grupos funcionales comúnmente asociados a la estructura del GO, como la presencia de la red de carbono sp^2 característica de este material, lo cual ayuda a comprobar la obtención exitosa del GO.

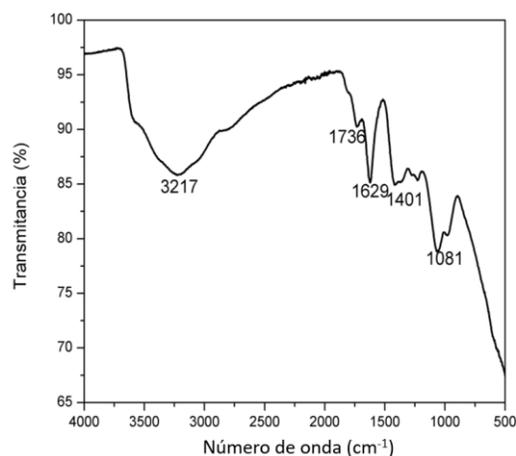


Figura 4 Espectro FTIR del GO obtenido.

III.1.3. Análisis Termogravimétrico (TGA)

En la Figura 5 se muestra el termograma del GO, donde se pueden observar tres pérdidas de peso características del material. En la primera se observa una pérdida de peso de 20 % a una temperatura alrededor de 100 °C, que es atribuida a moléculas de agua que se encuentran absorbidas en la superficie del material. Para la segunda se observa una pérdida de peso alrededor de 25 % en un rango de temperatura de entre los 200-230 °C, debida a la descomposición de los grupos carbonilos y carboxilos menos estables. Mientras que la última pérdida de peso se observa después de los 300 °C y se atribuye a la descomposición de

los grupos hidroxilos y epoxis que forman enlaces más estables con las hojas de grafeno

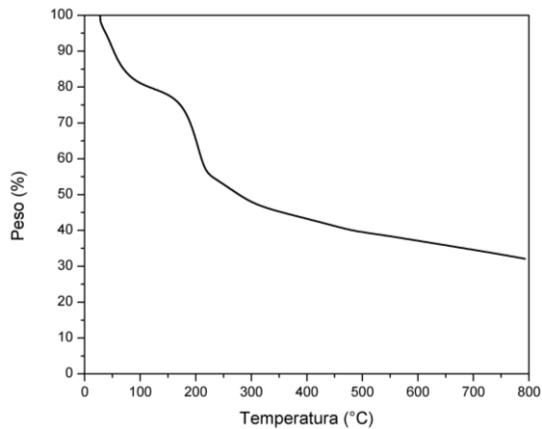


Figura 5 Termograma del GO obtenido.

III.1.4. Microscopía Electrónica de Transmisión (TEM)

En la Figura 6 se muestra la microscopía electrónica de transmisión utilizada para analizar la morfología y naturaleza del GO sintetizado. Se muestran micrografías de las hojas de GO a diferentes magnificaciones (Figura 6 a, b, c) y el patrón de difracción de electrones (Figura 6 d) de un área seleccionada de la muestra. En la Figura 6 a, se puede observar que las hojas tienen un tamaño en el orden de las micras, mientras que la Figura 6 b) y c) muestran que las hojas tienen una superficie extendida con algunos pliegues a lo largo de las hojas, lo cual es característico del material debido a la presencia de los grupos funcionales en la superficie de estas. Esto causa una repulsión electrostática que provoca el doblamiento de las hojas y la formación de arrugas en su superficie. Además, en la Figura 6 a) se puede observar por diferencia de contraste la presencia de regiones semitransparentes que son indicativas de hojas individuales, así como de regiones más oscuras, correspondientes a la presencia de hojas traslapadas en varias capas. Por otra parte, el patrón de difracción del GO en la Figura 6 d) muestra un patrón de puntos y anillos difusos, indicando una muestra policristalina. Esto se atribuye a la presencia de defectos en la estructura del GO generados durante la síntesis, así como a la interrupción de la red de carbono por los grupos funcionales enlazados a ella.

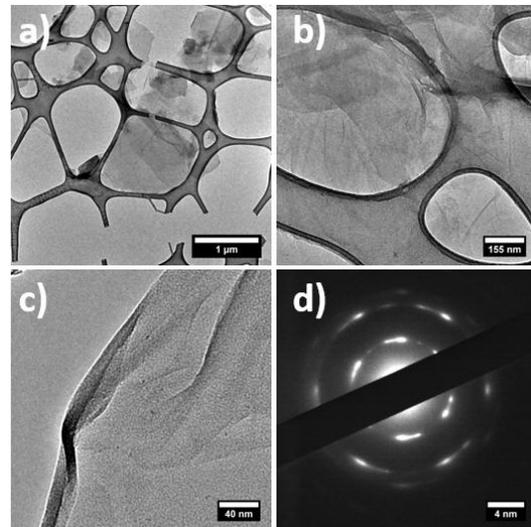


Figura 6 a), b), c) Micrografías TEM de las hojas de GO y d) patrón de difracción del GO obtenido.

III.2. Obtención de la carta de viscosidad del asfalto.

El procedimiento ASTM D2493 [14] indica las características que debe tener la carta viscosidad-temperatura para asfaltos originales, los cuales son ensayados siguiendo el procedimiento AASHTO T 316 [16]. Esta carta es adecuada para asfaltos originales y asfaltos que fueron sometidos a un proceso de envejecimiento en el laboratorio o recuperados de pavimentos existentes. La Tabla I resume estos resultados, mientras que los mismos se presentan gráficamente en la

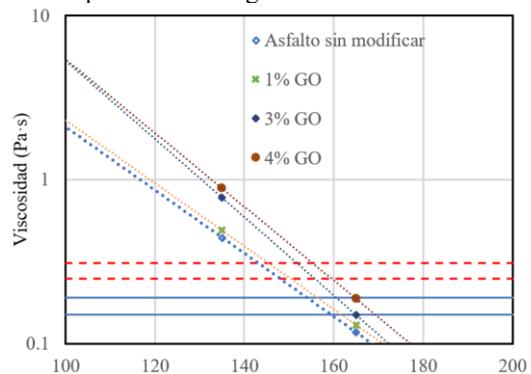


Figura 7.

TABLA I
RESULTADOS DE LA PRUEBA DE VISCOSIDAD
PARA EL ASFALTO ORIGINAL.

Temperatura (°C)	Viscosidad (Pa·s)	Espíndola	RPM
135°C	0.444	TR9	100
165°C	0.1175	TR8	70

Las temperaturas de mezclado y de compactación del asfalto original las establece SUPERPAVE [18].

Específicamente, el asfalto se debe mezclar a las temperaturas correspondientes a una viscosidad de 0.17 ± 0.02 Pa·s y compactar a las temperaturas en las que el material presente una viscosidad de 0.28 ± 0.03 Pa·s.

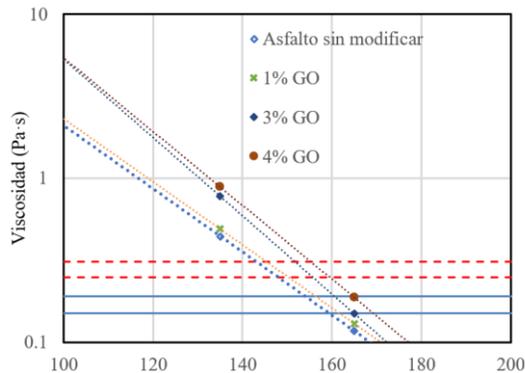


Figura 7 Carta viscosidad-temperatura para el asfalto sin modificar y modificado (ASTM D2493).

Luego de analizar la curva de regresión exponencial $y = 175.9689 e^{-0.0443x}$ para el asfalto original, donde x es la temperatura en grados Celsius y y es la viscosidad en Pa·s, se calcularon los rangos correspondientes a las temperaturas de mezclado y compactación. Estos resultados se muestran en la Tabla II.

TABLA II
TEMPERATURAS DE MEZCLADO Y
COMPACTACIÓN DEL ASFALTO ORIGINAL
(°C).

	Compactación	Mezclado
T_{min}	143.1	154.2
T_{max}	148.0	159.5

III.3. Obtención de la temperatura media de mezclado y compactación del asfalto modificado

Con base en la carta de viscosidad obtenida en el apartado anterior se analizaron las curvas de regresión exponencial de cada muestra de asfalto con distintos contenidos de GO y se calcularon las temperaturas medias de compactación y mezclado. Los resultados se muestran en la

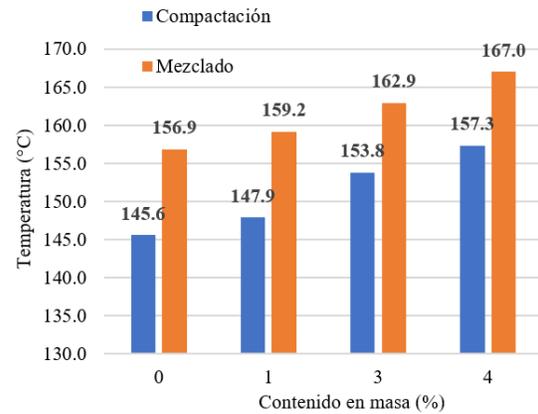


Figura 8, donde se observa que al añadir GO al asfalto se incrementan tanto la temperatura de mezclado como la de compactación. Específicamente, puede observarse que la temperatura de mezclado se incrementa 2.4 °C/% de GO mientras que la temperatura de compactación se incrementa 2.9 °C/% de GO.

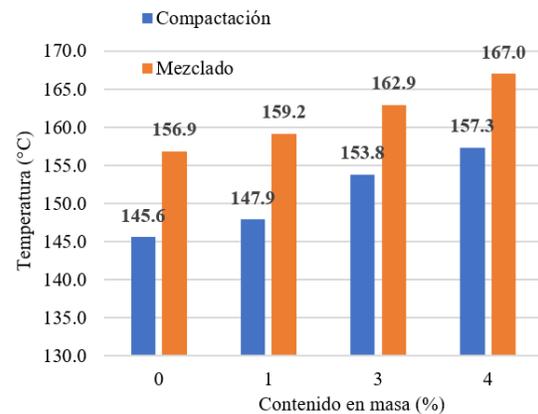


Figura 8 Temperatura media de mezclado y compactación del asfalto modificado con GO.

III.4. Asfalto modificado con GO y grafito

Los resultados de la viscosidad del asfalto en función del contenido de GO se muestran en las

figuras

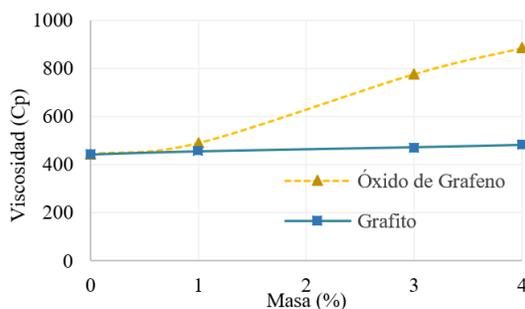


Figura 9

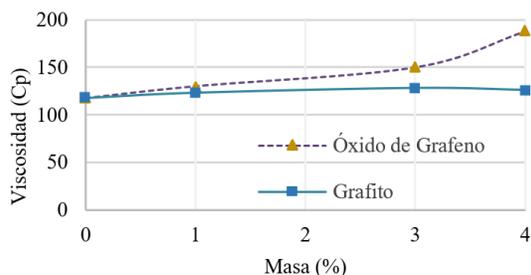


Figura 10.

Con respecto a la temperatura de 135 °C, la viscosidad del asfalto modificado con GO varió de manera continua desde los 0.444 Pa·s hasta los 0.886 Pa·s, para un contenido de GO desde 0 hasta 4 %.

Por otra parte, para la temperatura de 165 °C, el rango de viscosidad medida fue de 0.117 Pa·s a 0.188 Pa·s utilizando los mismos contenidos de GO que en la temperatura de 135 °C.

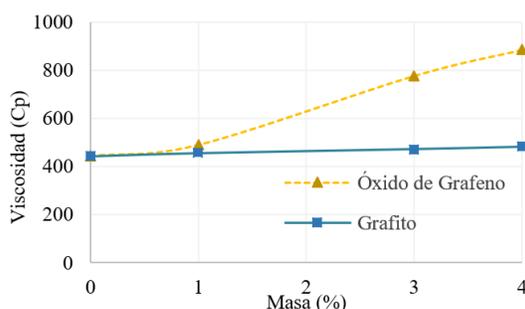


Figura 9 Viscosidad vs porcentaje de masa a 135 °C en asfalto modificado con GO y grafito.

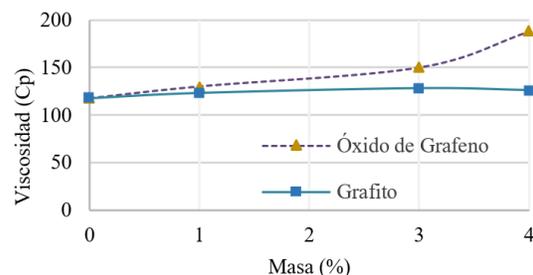


Figura 10 Viscosidad vs porcentaje de masa a 165 °C en asfalto modificado con GO y grafito.

En ambas temperaturas y con los tres diferentes porcentajes de GO en el asfalto se presentaron burbujas. Sin embargo, fue en la muestra con 4 % de GO la que mostró el mayor aumento de volumen y presencia de burbujas en un menor tiempo debido a la liberación de dióxido de carbono [11].

Tanto para la temperatura de 135 °C como para la de 165 °C se observó que la adición de grafito no provocó cambios significativos en la viscosidad del asfalto. De hecho, al retirar las muestras de asfalto con grafito del viscosímetro fue evidente que el grafito se precipitó durante la prueba, lo que demuestra que no hubo una buena dispersión. Por otra parte, la buena dispersión del GO en el asfalto provocó que se registraran valores de la viscosidad que se incrementaron continuamente en función del contenido de GO. Estos resultados refuerzan las conclusiones de Li *et al.* [11].

IV. CONCLUSIONES

Las temperaturas de mezclado y compactación del asfalto mexicano original, procedente de la refinería de Tula, Hidalgo, resultaron 154-159 °C y 143-148 °C, respectivamente.

La viscosidad del asfalto tanto a la temperatura de 135 °C como a la de 165 °C se incrementó continuamente en función del contenido de GO, específicamente, pudo observarse que la temperatura de mezclado se incrementa 2.4 °C/% de GO mientras que la temperatura de compactación se incrementa 2.9 °C/% de GO. Por otra parte, no se observó un cambio en la viscosidad del asfalto con adiciones del grafito utilizado como precursor del GO para esta investigación.

Debido a la interacción entre los grupos funcionales del GO (C-O-C, -OH y COOH-) y del asfalto, estos resultados sugieren una compatibilidad entre el GO y el asfalto. El que los

resultados de la viscosidad en función del contenido de grafito no presentaron variación y que estos mismos resultados obtenidos con las mismas adiciones de GO sí demuestran que el material disperso provocó interacciones de fricción elevando las lecturas de viscosidad. Lo que refuerza lo publicado por Yuayuan Li *et al.* [10], [11], donde se sugiere una buena estabilidad de almacenamiento.

REFERENCIAS.

- [1] The Asphalt Institute, "The Asphalt Handbook," 1989.
- [2] E. Castillo Santiago, "Propuesta de una mezcla templada tipo S.M.A con Viatop 66," 2014.
- [3] L. Picado-santos and J. Neves, "A Review of Nanomaterials Effect on Mechanical Performance and Aging of Asphalt Mixtures," *Appl. Sci.*, 2019.
- [4] S. Ren, X. Liu, W. Fan, H. Wang, and S. Erkens, "Rheological properties, compatibility, and storage stability of SBS latex-modified asphalt," *Materials (Basel)*, vol. 12, no. 22, 2019, doi: 10.3390/ma12223683.
- [5] Z. Wei *et al.*, "Nanoscale tunable reduction of graphene oxide for graphene electronics," *Science (80-.)*, vol. 328, no. 5984, pp. 1373–1376, 2010, doi: 10.1126/science.1188119.
- [6] M. Sabzevari, D. Cree, and L. Wilson, "Preparation And Characterization Of Graphene Oxide Cross-Linked Composites," vol. 2018, doi: 10.25071/10315/35427.
- [7] Y. Zhu *et al.*, "Graphene and graphene oxide: Synthesis, properties, and applications," *Adv. Mater.*, vol. 22, no. 35, pp. 3906–3924, 2010, doi: 10.1002/adma.201001068.
- [8] W. Zeng, S. Wu, L. Pang, Y. Sun, and Z. Chen, "The utilization of graphene oxide in traditional construction materials: Asphalt," *Materials (Basel)*, vol. 10, no. 1, 2017, doi: 10.3390/ma10010048.
- [9] K. Liu, K. Zhang, and X. Shi, "Performance evaluation and modification mechanism analysis of asphalt binders modified by graphene oxide," *Constr. Build. Mater.*, vol. 163, pp. 880–889, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.171.
- [10] Y. Li, S. Wu, and S. Amirkhanian, "Effects of graphene oxide on asphalt binders," in *Nanotechnology in Eco-efficient Construction: Materials, Processes and Applications*, Second Edi., Elsevier Ltd, 2018, ch. 10, pp. 203–226. doi: 10.1016/B978-0-08-102641-0.00010-4.
- [11] Y. Li, S. Wu, and S. Amirkhanian, "Investigation of the graphene oxide and asphalt interaction and its effect on asphalt pavement performance," *Constr. Build. Mater.*, vol. 165, pp. 572–584, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.01.068.
- [12] J. Zhu, K. Zhang, K. Liu, and X. Shi, "Performance of hot and warm mix asphalt mixtures enhanced by nano-sized graphene oxide," *Constr. Build. Mater.*, vol. 217, pp. 273–282, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.05.054.
- [13] G. S. Avila, *Hidráulica General Vol. 1*. 1997.
- [14] ASTM D 2493, "Standard Viscosity-Temperature Chart for Asphalts," pp. 1–5, 2001, [Online]. Available: <https://www.astm.org/standards/d2493>
- [15] D. C. Marcano *et al.*, "Improved synthesis of graphene oxide," *ACS Nano*, vol. 4, no. 8, pp. 4806–4814, 2010, doi: 10.1021/nn1006368.
- [16] AASHTO T316, "Standard Method of Test for Viscosity Determination of Asphalt Binder Using Rotational Viscometer," pp. 1–5, 2013.
- [17] The Asphalt Institute, *Performance Graded Asphalt Binder Specification and Testing. Superpave Series No. 1 (SP-1)*. U.S.A., 2003.
- [18] The Asphalt Institute, *Superpave Series No. 2 (SP-2)*. U.S.A., 2001.

Este estudio fue financiado por los autores. Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés.

Copyright © 2024 Alberto Gaxiola, Alexandra Ossa López, Paulette Gómez López, Clemente G. Alvarado Beltrán, Andrés Castro Beltrán



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Usted es libre para Compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y Adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales.

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen de licencia - Texto completo de la licencia](#)