

Evaluación técnica de un aditivo de ligantes bituminosos para mezclas asfálticas

Technical evaluation of a bituminous binder additive for asphalt mixtures

Ana Paula ANDRINO-GONZÁLEZ¹, Luis Ernesto NÚÑEZ-GONZÁLEZ^{1,*} & Gamaliel Giovanni ZAMBRANO-RUANO¹

¹Centro de Procesos Industriales y Departamento de Ingeniería Química, Universidad del Valle de Guatemala, GUATEMALA

Correspondencia: L.E. Núñez-González: (lenunez@uvg.edu.gt)

Recibido: 23/IX/2024; Aceptado: 29/VI/2025

Resumen: El asfalto desempeña un papel fundamental en la pavimentación de carreteras por sus propiedades físicas de durabilidad y adhesión, que lo convierten en un material versátil y confiable. La mejora de estas características es posible mediante el uso de aditivos asfálticos, agentes potenciadores que contribuyen a elevar las características de calidad, como adherencia e impermeabilidad, de las mezclas asfálticas. En este estudio se evaluó técnicamente el efecto del aditivo promotor de adherencia UNOBOND® en las características físicas de un asfalto tipo AC30 y su desempeño en la mezcla asfáltica, por lo que es de gran interés para la industria y no se cuenta con estudios previos. Para el asfalto se llevaron a cabo los ensayos de penetración, viscosidad, punto de ablandamiento y espectroscopía infrarroja con Transformada de Fourier, tanto en condiciones originales como envejecidas para simular la oxidación del asfalto colocado en el pavimento mediante la prueba de Película Delgada en Horno Rotatorio. Asimismo, se midieron las tres concentraciones de aditivo de 0.03%, 0.05% y 0.08% (m/m) recomendadas por la empresa comercializadora de asfaltos UNO Guatemala. A la mezcla asfáltica se le realizaron los análisis de hervido y de Relación en la Resistencia a la Tensión Indirecta (TSR). Los resultados obtenidos indicaron que la adición de aditivo ofrece protección contra la oxidación y mejora la resistencia al ablandamiento térmico y la fluidez del asfalto tanto original como envejecido. El análisis de hervido indicó que la concentración del 0.08% (m/m) de aditivo maximiza la adherencia al mostrar un 97% agregado recubierto, respaldado por un valor de TSR del 95.3%, demostrando una mayor resistencia al desprendimiento y agrietamiento en condiciones de humedad.

Palabras clave: adhesión, asfalto, durabilidad, envejecimiento, trabajabilidad.

Abstract: Asphalt plays a critical role in road paving due to its physical properties of durability and adhesion, making it a versatile and reliable material. These characteristics can be improved through the use of asphalt additives, which act as enhancers to increase the quality attributes of asphalt mixtures such as adhesion and impermeability. Here, we technically evaluated the effect of the adhesion promoter additive UNOBOND® on the physical properties of an AC30 type asphalt and its performance in the asphalt mix, which is of great interest to the industry, especially given the lack of previous studies. For asphalt, we evaluated penetration, viscosity, softening point, and infrared spectroscopy with Fourier transform, both in its original state and after aging, to simulate the oxidation of asphalt in pavements using the Thin Film Test in Rotary Kiln. Additionally, three additive concentrations (0.03%, 0.05% and 0.08% (m/m)), recommended by the asphalt marketing company UNO Guatemala were tested. The asphalt mixture was subjected to boil tests and Indirect Tensile Strength Ratio (TSR) analyses. The results indicated that the addition of the additive provides protection against oxidation and improves resistance to thermal softening as well as flow properties of both original and aged asphalt. The boil analysis revealed that the 0.08% (m/m) additive concentration maximized adhesion, achieving a 97% coated aggregate, supported by a TSR value of 95.3%, demonstrating greater resistance to stripping and cracking under moisture conditions.

Keywords: adhesion, aging, asphalt, durability, workability.

INTRODUCCIÓN

El asfalto, conocido también como bitumen o ligante bituminoso, es una mezcla de hidrocarburos derivados del petróleo que se obtiene de la fracción más pesada del proceso de destilación fraccionada del petróleo. Se utiliza principalmente en mezclas asfálticas con agregados pétreos para la pavimentación de carreteras por sus características de consistencia, aglutinación y ductilidad, fundamentales para resistir las condiciones climáticas y efectos adversos del envejecimiento (Al-Mohammedawi & Mollenhauer 2022).

Antes de colocar la mezcla asfáltica en el pavimento, se realiza una serie de pruebas físicas en el asfalto para asegurar que el material pueda cumplir con las especificaciones de calidad, por ejemplo, adherencia, impermeabilidad, estabilidad térmica, entre otros. El proceso consiste en ensayos estandarizados, por ejemplo, de viscosidad, punto de inflamación y peso específico. No obstante, la exposición a las condiciones ambientales severas, como lluvia y calor, así como la carga del tráfico, afectan la calidad y durabilidad del asfalto, principalmente la adhesividad entre partículas (Leiva 2018).

La tecnología ha permitido desarrollar aditivos asfálticos, los cuales son promotores de una característica específica del asfalto, por ejemplo, la resistencia a las fluctuaciones de temperatura. Asimismo, son útiles para reducir los costos de operación, garantizar la calidad del asfalto y de esta manera cumplir con los principios básicos de durabilidad, adhesión, cohesión y capacidad de soportar cierto peso de tráfico (Ávila Parra & Velasco 2021). Sin embargo, en Guatemala no se cuenta con estudios técnicos para la evaluación de aditivos asfálticos, que permitan evaluar sus propiedades y brindar a la industria local la información para su potencial aplicación.

Debido a las propiedades incrementales al utilizar aditivos, la industria se interesa por contar con evaluaciones técnicas detalladas, que permitan el entendimiento de lo que sucede cuando un aditivo es empleado en el asfalto. Partiendo de dicha necesidad, el objetivo de este trabajo fue evaluar técnicamente las características fisicoquímicas del asfalto al colocarle el aditivo AC30 en condiciones originales y envejecidas para verificar su potencial aplicación. En el estudio se utilizaron pruebas normadas localmente para evaluar el efecto de tres concentraciones del aditivo mejorador de adherencia en la mezcla asfáltica, las cuales consisten en el análisis de hervido, una prueba cualitativa que evalúa la adherencia del asfalto a los agregados mediante el calentamiento de la muestra y el análisis de Relación en la Resistencia a la Tensión Indirecta (TSR), una prueba cuantitativa, para obtener la medida indirecta del aditivo con respecto a su adherencia y resistencia a la humedad.

MATERIALES Y MÉTODOS

Caracterización fisicoquímica del asfalto AC30 en condiciones originales. Se caracterizó físicamente el ligante bituminoso AC30 en condiciones originales con las pruebas normadas de penetración (American Society for Testing and Materials (ASTM) D5, 2020a), viscosidad a 60°C (ASTM D4402, 2023) y punto de ablandamiento (ASTM D36, 2020b). En el ensayo de penetración se empleó un penetrómetro marca Precisión Modelo 73515 y un baño de agua Fisher Scientific a 25°C. Primero, se preparó el baño de agua a 25°C y se introdujo la muestra de asfalto. Luego, se colocó la muestra en el penetrómetro y se aplicó una aguja con una carga de 100 gramos. La aguja penetró verticalmente en la muestra durante cinco segundos y se midió la distancia penetrada. En el ensayo de viscosidad a 60°C se utilizó el viscosímetro dinámico Brookfield DV-I Prime. La muestra se colocó en el viscosímetro, se estableció una velocidad de 0.8 rpm y luego se midió el valor de la viscosidad. En el ensayo de punto de ablandamiento se colocó la muestra de asfalto en dos anillos de latón y se posicionaron bolas de acero encima. Luego, se introdujo en el sistema un beaker de 800 mL dentro un baño de agua Fisher Scientific a 4°C. Después, se colocó el sistema sobre una estufa ThermoScientific Cimarec + SP88857105 y se calentó. La temperatura a la cual la bola de acero, recubierta de asfalto, tocó el fondo del beaker se registró como la temperatura de punto de ablandamiento. Por otra parte, se caracterizó químicamente el asfalto por medio de la espectroscopía infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR) utilizando el espectrofotómetro Perkin Elmer Frontier FT-IR UATR + Software. Primero se realizó una corrida de fondo para calibrar el equipo y se limpió el lente de emisión de luz infrarroja con etanol absoluto. Posteriormente, se colocó aproximadamente 1 cm³ de muestra con una espátula en el sensor del espectrofotómetro. Finalmente, se presionó el botón "Play" y se obtuvo el espectro infrarrojo (IR) con el software Perkin Elmer Spectrum.

Caracterización fisicoquímica del asfalto AC30 en condiciones envejecidas. Para caracterizar el asfalto AC30 en condiciones envejecidas, se sometió a la prueba de Película Delgada en Horno Rotatorio (RTFOT) (ASTM- D2872, 2022). Primero, se calentó la muestra dentro de un horno que no excediera los 150°C para garantizar que estuviera completamente fluida. Luego se revolvió la muestra manualmente evitando incorporar burbujas de aire. Después se vertieron 35 ± 0.5 g de la muestra en vasos de vidrio, esparciendo en las paredes para formar una película delgada. Luego, se colocaron los vasos en el carro del horno Cox & Sons Modelo CS325 y se configuró el equipo a 15 ± 0.2 rev/min durante 85 min a 163 ± 0.5°C. Al finalizar se retiró cada vaso de muestra y se transfirió su contenido a los recipientes respectivos para los análisis de penetración, viscosidad a 60°C, punto de ablandamiento y FTIR descritos anteriormente.

Análisis de aditivo en mezcla asfáltica. Para realizar el análisis de hervido (ASTM D3625, 2024a) y de relación en la Resistencia a la Tensión Indirecta (TSR) (ASTM D4867, 2024b) en la mezcla asfáltica, se utilizó una piedra caliza como agregado y el mismo asfalto AC30 en condiciones originales como ligante. Además, se eligieron tres concentraciones de aditivo (0.03%, 0.05%, 0.08% (m/m)) con base en los dos límites y el valor intermedio del rango utilizados por UNO Guatemala (UNO Bitumen 2015). Para el análisis de hervido de la muestra control, se vertió agua destilada en un recipiente limpio a la mitad y se calentó hasta alcanzar una temperatura entre 85 y 95°C. Luego, se colocó aproximadamente 250 g de la mezcla de agregados revestidos con asfalto en el agua hirviendo y se mantuvo la ebullición durante 10 min $\pm$ 15 s. Se retiró el recipiente de la fuente de calor y se vació la mezcla húmeda sobre una toalla de papel blanca. Finalmente, se observó el agregado (grueso y fino) para el recubrimiento bituminoso retenido. Cualquier área delgada, marrón y translúcida se consideró completamente recubierta. Se siguió el mismo procedimiento para las tres muestras restantes con las concentraciones de aditivo respectivas.

Por otro lado, para el análisis TSR, se compactaron un total de seis muestras a 6 - 8% de espacios de aire, tres sujetas a un acondicionamiento de humedad y tres sin acondicionar. Las tres primeras se acondicionaron con 50 - 80% de saturación al vacío por 3 a 5 min y luego se almacenaron en una bolsa cerrada con 10 mL de agua dentro de un freezer por 16 a 20 horas. Posteriormente se colocaron en un baño térmico a 60°C por 24 horas y después se transfirieron a otro baño térmico a 25°C por 2 horas. Simultáneamente, las tres muestras sin acondicionamiento se colocaron dentro de una bolsa cerrada y se sumergieron dentro del baño térmico a

25°C por 2 horas. Finalmente, se midió la resistencia a la tracción indirecta máxima con la mordaza de Lottman del marco de carga Gilson, Karol-Warner Modelo MS-87.

Caracterización fisicoquímica del asfalto AC30 con las tres dosificaciones de aditivo. Se caracterizó el asfalto AC30 con las tres dosificaciones de aditivo (0.03%, 0.05% y 0.08% (m/m)) con las pruebas descritas anteriormente de penetración (ASTM D5, 2020a), viscosidad a 60°C (ASTM D4402, 2023) y punto de ablandamiento (ASTM D36, 2020b) y FTIR, tanto en condiciones originales como envejecidas. Cada una de las mezclas se agitó por 30 min en un rango de temperatura de 50 a 110°C para asegurar la homogeneidad y evitar que las fluctuaciones de temperatura influyeran en las propiedades físicas.

RESULTADOS

Caracterización fisicoquímica del asfalto AC30. En Cuadro 1 se muestran los resultados de las pruebas realizadas de acuerdo con la ASTM para el asfalto AC30 estudiado en su estado inicial y luego de ser sometido a condiciones de envejecimientos. Estos resultados muestran la tendencia incremental de viscosidad y punto de ablandamiento, y de reducción de la penetración con el envejecimiento de las muestras.

Los resultados del análisis FTIR mostraron (Fig. 1) que tanto el asfalto original como envejecido exhibieron los picos distintivos asociados a alcanos en la región de 3,000 a 2,840 cm^{-1} , alquenos a 1,600 cm^{-1} , alquil aril éter en el rango de 1,275 a 1,020 cm^{-1} y compuestos aromáticos a partir de 880 cm^{-1} en adelante.

Cuadro 1. Resultados promedio de los ensayos de penetración, viscosidad y punto de ablandamiento para asfalto AC30 original y envejecido.

Table 1. Average values of penetration, viscosity and softening point tests for AC30 asphalt in original and aged conditions.

Ensayo	Asfalto original	Asfalto envejecido
Penetración (dmm)	63.83 $\pm$ 0.913	34.90 $\pm$ 1.095
Viscosidad a 60°C (P)	2,875.50 $\pm$ 0.707	8,683.00 $\pm$ 1.414
Punto de ablandamiento (°C)	48.45 $\pm$ 0.574	52.875 $\pm$ 0.433

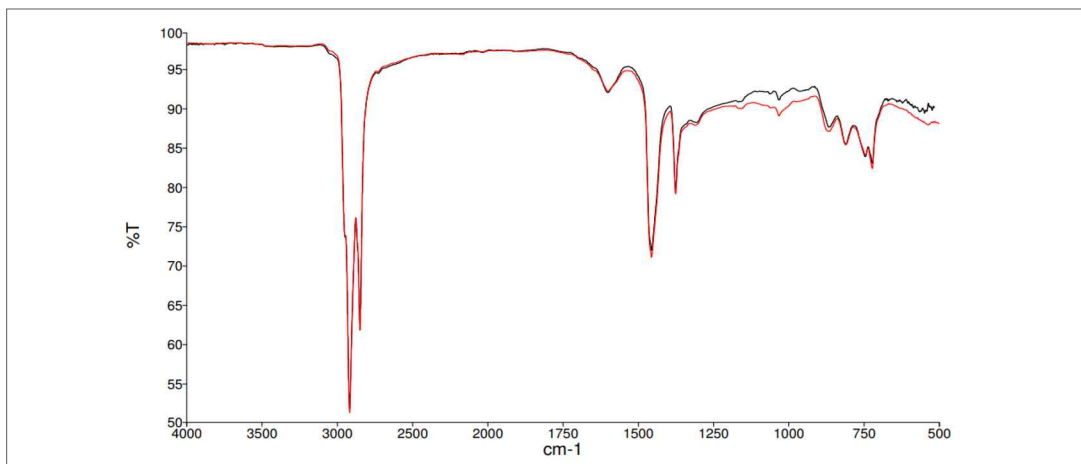


Figura 1. Comparación de espectros infrarrojo del asfalto AC30 en condiciones originales (línea negra) y envejecidas (línea roja). El eje y presenta el porcentaje de transmitancia y el eje x la frecuencia analizada en cm^{-1} .

Figure 1. Comparison of infrared spectra of AC30 asphalt in original (black line) and aged (red line) conditions. The y-axis shows the percentage of transmittance and the x-axis shows the frequency analyzed in cm^{-1} .

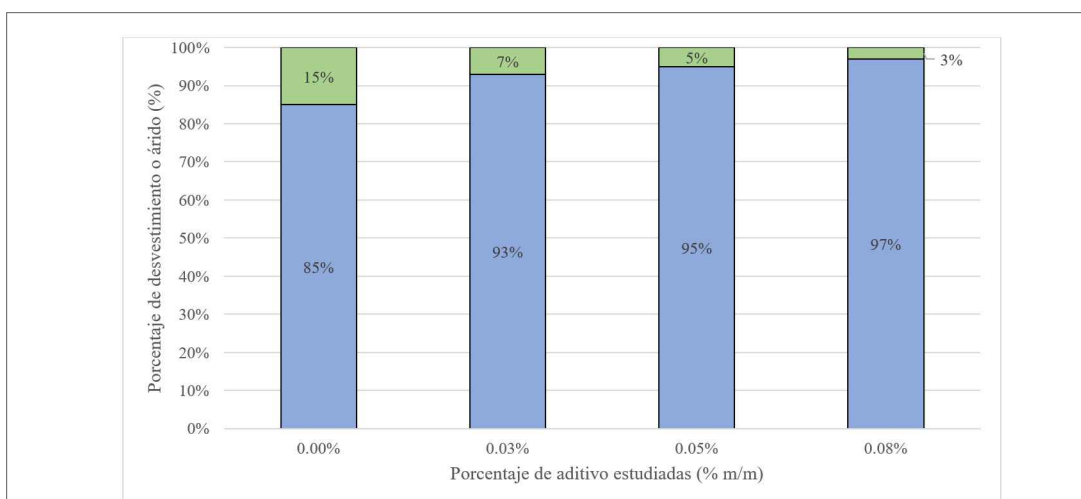


Figura 2. Porcentajes de desvestimiento (verde) y árido recubierto (azul) para el asfalto AC30 con las tres concentraciones de aditivo analizadas.

Figure 2. Percentages of uncoated (green) and coated (blue) aggregate for AC30 asphalt with the three additive concentrations tested.

Análisis de aditivo en la mezcla asfáltica

En Fig. 2 se muestran los porcentajes de desvestimiento y el valor complementario de porcentaje árido recubierto para diferentes porcentajes de aditivo probados en el asfalto. Estos se complementan con el resultado del Cuadro 2, en donde se evidencia el incremento de la resistencia a la tensión indirecta al utilizar el aditivo estudiado en el estudio. Ambos resultados demuestran el efecto del aditivo sobre propiedades fundamentales del asfalto.

En los ensayos para la mezcla asfáltica según las normas ASTM D3625-96 (2024a) y ASTM D 4867 (2024b), el análisis

de hervido mostró que la concentración de 0.08% (m/m) de aditivo maximiza la adherencia en la mezcla asfáltica, reduciendo notablemente el desvestimiento desde un 15% a un 3% (Fig. 2). El porcentaje de áridos recubiertos aumenta proporcionalmente (85%, 93%, 95% y 97%) a la concentración de aditivo (0.00%, 0.03%, 0.05% y 0.08% (m/m), respectivamente)). Asimismo, el porcentaje de desvestimiento, es decir, la pérdida de la capa de asfalto que recubre los agregados en la mezcla asfáltica disminuye (15%, 7%, 5% y 3%, respectivamente) conforme la concentración de aditivo aumenta.

Cuadro 2. Resultados del ensayo de Resistencia a la Tracción Indirecta para el asfalto AC30 sin aditivo y con la concentración de aditivo que maximiza la adherencia entre partículas de agregado pétreo.

Table 2. Indirect Tensile Strength test results for AC30 asphalt without additive and with the additive concentration that maximizes the adhesion between aggregate particles.

Concentración de aditivo	Relación de Resistencia a la Tensión Indirecta
0.00% (m/m)	78.3%
0.08% (m/m)	95.3%

Cuadro 3. Resultados promedio de los ensayos de penetración, viscosidad y punto de ablandamiento para asfalto AC30 en condiciones originales y envejecidas con las tres concentraciones de aditivo analizadas.

Table 3. Average results of penetration, viscosity and softening point tests for AC30 asphalt in original and aged conditions with the three additive concentrations analyzed.

Ensayo	Aditivo al 0.03% (m/m)	Aditivo al 0.05% (m/m)	Aditivo al 0.08% (m/m)
Condiciones originales			
Penetración (dmm)	59.33 ± 1.826	61.08 ± 1.646	61.92 ± 1.307
Viscosidad a 60°C (P)	2,850.50 ± 3.536	2,984.50 ± 4.950	3,048.00 ± 2.828
Punto de ablandamiento (°C)	48.88 ± 0.328	50.10 ± 0.469	51.75 ± 0.866
Condiciones envejecidas			
Penetración (dmm)	35.83 ± 1.155	37.67 ± 1.155	38.67 ± 1.163
Viscosidad a 60°C (P)	8,821.50 ± 2.121	8,836.50 ± 4.950	8,828 ± 2.828
Punto de ablandamiento (°C)	54.60 ± 0.849	55.875 ± 0.456	56.025 ± 0.218

Caracterización fisicoquímica del asfalto AC30 con las tres dosificaciones de aditivo

Los resultados obtenidos muestran las propiedades originales y envejecidas como medio de comparación del efecto del aditivo utilizado (Cuadro 3). Para la evaluación de las tres dosificaciones de aditivo elegidas de 0.03%, 0.05% y 0.08% (m/m), los resultados del ensayo de penetración muestran que la adición de aditivo incrementa la dureza del asfalto original, pero disminuye la del asfalto envejecido. En el ensayo de punto de ablandamiento, se observa un aumento directamente proporcional con la concentración de aditivo, tanto en el asfalto original como en el envejecido. En cuanto a la viscosidad a 60°C, esta aumenta con la concentración de aditivo. El asfalto

envejecido aditivado a las tres concentraciones aumenta su dureza a 25°C, se vuelve más viscoso a 60°C y mantiene esta dureza hasta alcanzar temperaturas más altas antes de comenzar a ablandarse (Cuadro 3).

Figura 3 muestra los gráficos de caja y bigotes de las diferentes pruebas realizadas al asfalto en condiciones originales y envejecidas, lo que evidencia no solamente la tendencia general de cada propiedad con las diferentes concentraciones probadas, sino además permite la comparación de variabilidades de las pruebas realizadas, con lo que se valida de manera gráfica la significancia de las diferencias encontradas para los porcentajes probados.

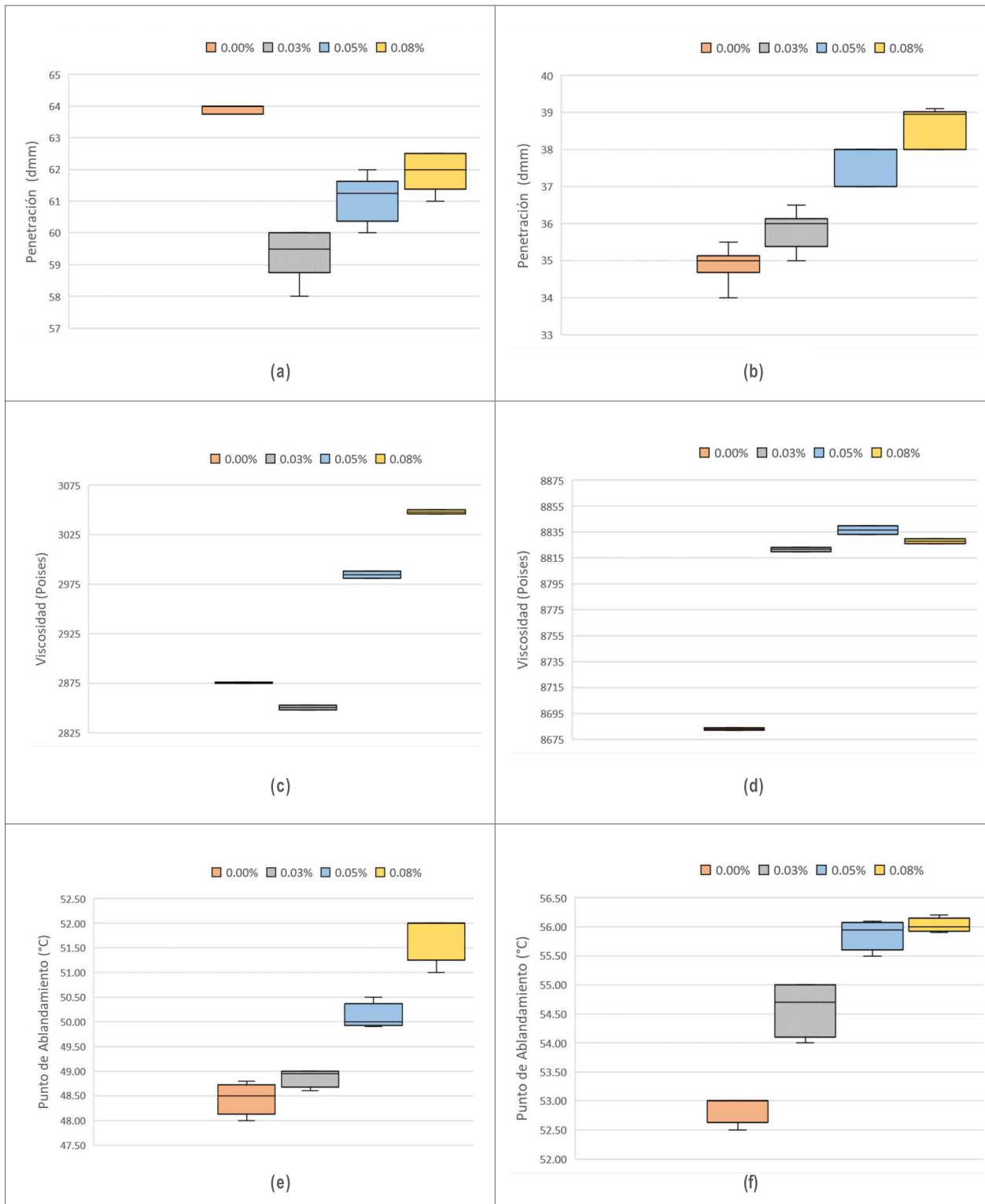


Figura 3. Diagrama de caja y bigotes para el ensayo de penetración del asfalto AC30 en condiciones originales (a) y envejecidas (b); ensayo de viscosidad a 60°C del asfalto AC30 en condiciones originales (c) y envejecidas (d); ensayo de punto de ablandamiento del asfalto AC30 en condiciones originales (e) y envejecidas (f). Los porcentajes representan el porcentaje másico de aditivo estudiado en cada uno de los análisis efectuados.

Figure 3. Box-and-whisker plot for penetration test of AC30 asphalt in original (a) and in aged conditions (b); viscosity test at 60°C of AC30 asphalt in original (c) and in aged conditions (d); softening point test of AC30 asphalt in original (e) and in aged conditions (f). The percentages represent the mass percentage of additive evaluated in each of the analyses performed.

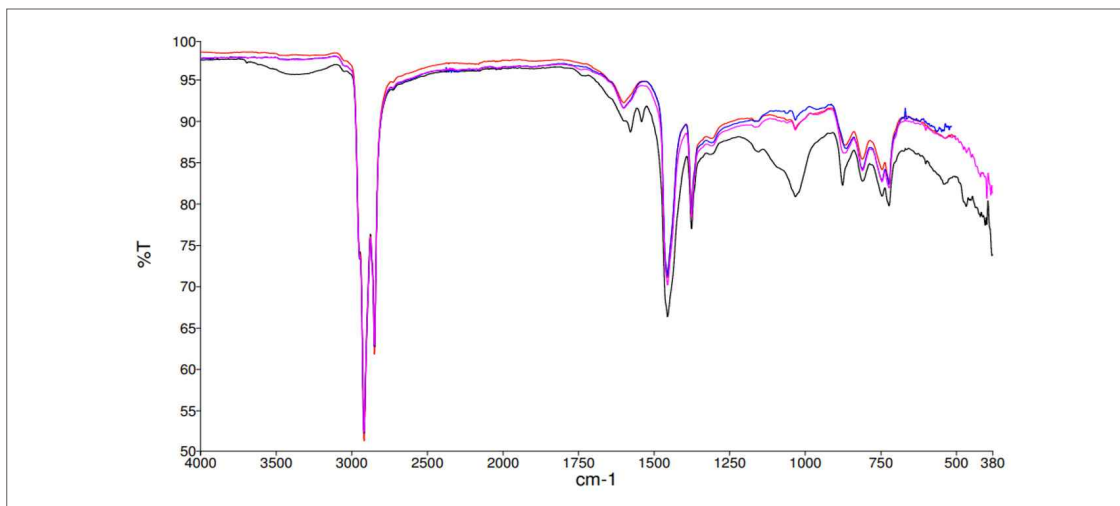


Figura 4. Comparación de espectros infrarroja del asfalto AC30 en condiciones originales con las tres concentraciones de aditivo. La línea azul indica el espectro del asfalto sin aditivo, mientras que la roja se refiere a la concentración de 0.03% (m/m), la negra a la concentración de 0.05% (m/m) y la morada a la de 0.08% (m/m). El eje y presenta el porcentaje de transmitancia y el eje x la frecuencia analizada en cm^{-1} .

Figure 4. Comparison of infrared spectra of AC30 asphalt in original conditions with the three additive concentrations. The blue line indicates the spectrum of the asphalt without additive, while the red, black, and purple lines refers to 0.03% (m/m), 0.05% (m/m), and 0.08% (m/m) additive concentrations, respectively. The y-axis shows the percentage of transmittance and the x-axis shows the frequency analyzed in cm^{-1} .

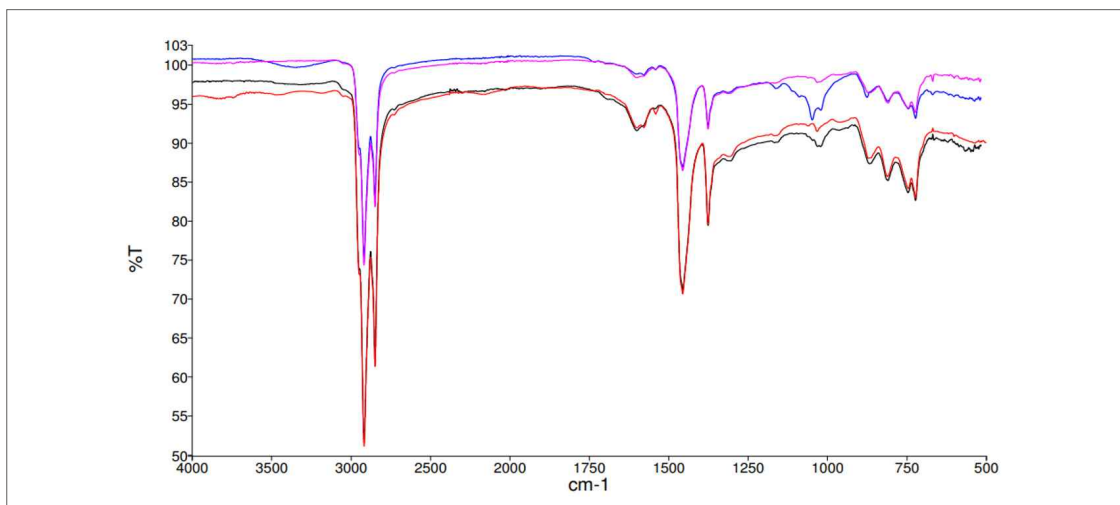


Figura 5. Comparación de espectros infrarroja del asfalto AC30 en condiciones envejecidas con las tres concentraciones de aditivo. La línea morada indica el espectro del asfalto sin aditivo, mientras que la azul se refiere a la concentración de 0.03% (m/m), la negra a la concentración de 0.05% (m/m) y la roja a la de 0.08% (m/m). El eje y presenta el porcentaje de transmitancia y el eje x la frecuencia analizada en cm^{-1} .

Figure 5. Comparison of infrared spectra of AC30 asphalt in aged conditions with the three additive concentrations. The purple line indicates the spectrum of the asphalt without additive, while the blue, black and red lines refers to 0.03% (m/m), 0.05% (m/m) and 0.08% (m/m) additive concentrations, respectively. The y-axis shows the percentage of transmittance and the x-axis shows the frequency analyzed in cm^{-1} .

DISCUSIÓN

Caracterización fisicoquímica del asfalto AC30

De los resultados obtenidos, se infiere que el asfalto envejecido aumenta su dureza a una temperatura ambiente de 25°C, experimenta una mayor viscosidad a 60°C y retiene su dureza hasta alcanzar los 53°C antes de mostrar signos de ablandamiento. Por lo tanto, el envejecimiento produce un efecto de endurecimiento ante la combinación de factores que son medidos con las pruebas estándar ASTM D5-06 (2020a), ASTM D4402-02 (2023), ASTM D36-95 (2020b) y ASTM D2872-97 (2022).

Los picos asociados a alcanos, alquenos, alquinos, aril éter y compuestos aromáticos concuerdan con los obtenidos en el estudio realizado por Leiva (2018) para asfalto virgen AC30. Sin embargo, difieren en la presencia de benceno sustituido en la región de 500 cm^{-1} , el cual está ausente en el asfalto en condiciones originales. Los picos correspondientes a los aromáticos y sulfóxidos son más pronunciados en el asfalto envejecido, lo cual puede ser la causa de la tendencia del asfalto envejecido a endurecerse según los ensayos de penetración, viscosidad y punto de ablandamiento discutidos anteriormente. El mecanismo de oxidación promueve la formación de benceno, así como de carbonilos ($\text{C} = \text{O}$) y sulfóxidos ($\text{S} = \text{O}$) que corresponden a las bandas de 1,705 cm^{-1} y 1,030 cm^{-1} .

No obstante, no hubo presencia de la banda del ácido carboxílico en los espectros obtenidos. De acuerdo con un estudio realizado por Villegas-Villegas (2015), el asfalto AC30 analizado en condiciones envejecidas por el método RTFOT tampoco evidenció la presencia de este compuesto debido a que se simula la oxidación a corto plazo en planta y compactación en carretera. Cuando el asfalto se envejeció con el método PAV, que simula el estado del material entre los siete y los diez años de estar en carretera, el grupo carbonilo si estuvo presente (Villegas-Villegas 2015). Esto indica que, a un mayor tiempo de envejecimiento, la presencia de grupos sulfóxidos aumenta. En conclusión, la ausencia de picos característicos de benceno sustituido en el asfalto en condiciones originales, en contraste con su presencia en el asfalto envejecido, demuestra que es un producto de la degradación del asfalto debido a la exposición a factores ambientales adversos.

Análisis de aditivo en la mezcla asfáltica

El hecho de que la mezcla sin aditivo presentó un 15% de desvestimiento (Fig. 2) puede deberse a que la piedra caliza empleada como agregado presentó una baja porosidad que redujo la adherencia entre las superficies de las partículas de agregado y el asfalto. Por la composición de la piedra que consiste mayormente en cal, el agregado es propenso al desvestimiento. En contraste, la mezcla con un 0.08% (m/m)

de aditivo mostró un drástico descenso en el desvestimiento relacionado con la capacidad del aditivo de modificar químicamente la superficie apolar de los agregados (ver Fig. 2), lo que reduce la tendencia a la separación. Además, se determinó que esta concentración de aditivo (0.08% (m/m)) obtuvo un valor del ensayo de Resistencia a la Tensión Indirecta de 95.3% que refleja una mayor resistencia al desprendimiento y agrietamiento de la mezcla en condiciones de humedad que la mezcla sin aditivo con un TSR del 78.3% (Cuadro 2). Estos datos son aceptables ya que el valor mínimo TSR sugerido para el ensayo con mordaza de Lottman es 80% (Larrea 2015). Asimismo, los resultados refuerzan que una concentración del 0.08% (m/m) de aditivo mejora la adherencia bajo efectos de humedad, con una diferencia entre ambos del 17%. Esto indica que el aditivo evita el daño por humedad en la mezcla asfáltica que se fundamenta en una pérdida de resistencia y se refleja en el pavimento como agrietamientos, deformaciones o desprendimientos (Larrea 2015).

Los resultados de Larrea (2015) se correlacionan con los obtenidos en el presente estudio, a pesar del uso de un asfalto con grado de penetración 60-70 y agregados de río, presentan para los porcentajes de 0.08% (m/m) y 0.05% (m/m) los mejores resultados. En el estudio de Larrea (2015) se determinó que, para el ensayo TSR, la adición de aditivos como cal hidratada y grano de caucho reciclado en las mezclas presentó un mejor desempeño en condiciones húmedas y una mayor unión entre agregados. Este resultado refleja la posibilidad de un efecto lubricante para concentraciones arriba de 0.08% (m/m) de aditivo UNOBOND®. En conclusión, la concentración de 0.08% (m/m) de aditivo asfáltico mostró una mayor adherencia y resistencia a la humedad en la mezcla asfáltica. Sin embargo, no se encontraron diferencias claras con la concentración de 0.05% (m/m), por lo que analizar ambas opciones económicamente es recomendable.

Caracterización fisicoquímica del asfalto AC30 con las tres dosificaciones de aditivo

Para la evaluación de las tres dosificaciones de aditivo elegidas, los resultados del ensayo de penetración muestran que el aditivo ayuda a reducir la oxidación, genera una mayor resistencia a la deformación con concentraciones altas de aditivo, y mejora la fluidez del asfalto. El asfalto envejecido aditivado a las tres concentraciones aumenta su dureza a 25°C, se vuelve más viscoso a 60°C y mantiene esta dureza hasta alcanzar temperaturas más altas antes de comenzar a ablandarse (Cuadros 3). Esto concuerda con el comportamiento teórico del asfalto y, comparando con los valores del asfalto envejecido sin aditivo (Cuadro 1), se infiere que la adición de aditivo ayuda a reducir el efecto del envejecimiento.

Los datos de las tres concentraciones de aditivo son generalmente simétricos, lo que demuestra su normalidad (Fig. 3). Asimismo, la longitud de los bigotes es estrecha, lo cual

indica una menor dispersión de los resultados, y el único dato atípico observado se encuentra en Fig. 3a para el ensayo de penetración en el asfalto original sin aditivo. Esta variabilidad en la distribución de los valores en torno a la media, principalmente para los ensayos de penetración y punto de ablandamiento, se atribuyen al error humano durante la lectura de los resultados.

Las penetraciones medias de los cuatro grupos fueron distintas (ver Figs 3a y 3b). Con ello se deduce que añadir aditivo al asfalto original aumenta su dureza, mientras que la del asfalto envejecido disminuye cuando la concentración de aditivo aumenta. Esto indica que el aditivo contribuye a que el asfalto se esté oxidando menos. Por otro lado, el punto de ablandamiento aumentó a medida en que las concentraciones de aditivo incrementaban (Figs 3e y 3f). Este comportamiento directamente proporcional indica que el asfalto tanto en condiciones originales como envejecidas es menos susceptible a fluir y ablandarse con la temperatura con una mayor dosificación de aditivo.

No se encontraron investigaciones del mismo tipo realizadas para asfalto tipo AC30. Sin embargo, en la Universidad Piloto de Colombia en 2016 se realizó un estudio sobre el efecto de la lignina en el envejecimiento de un asfalto 80-100 (Ávila & Velasco 2021). En este caso, el asfalto en condiciones envejecidas modificado con concentraciones bajas de lignina (5%) mostró un punto de ablandamiento mayor que el asfalto en condiciones originales, pero menor con concentraciones altas (entre 10 y 20%). También el asfalto en condiciones originales modificado con lignina presentó siempre una penetración mayor que el asfalto en condiciones envejecidas y en ambos casos se alcanzó una penetración máxima con la concentración de 15%. El comportamiento fue distinto con el obtenido en este trabajo debido a las diferencias en la clasificación del asfalto y al aditivo empleado, pero en general se relaciona con la tendencia del asfalto envejecido a volverse más blando con la adición de aditivo.

El asfalto en condiciones originales sin aditivo mostró una viscosidad mayor comparado con aditivo al 0.03% (m/m), pero menor a las viscosidades obtenidas con aditivo al 0.05% y 0.08% (m/m) (Figs 3c y 3d). El asfalto en condiciones envejecidas mostró que la viscosidad aumentó proporcionalmente hasta llegar a un valor máximo con aditivo al 0.05% (m/m) y luego disminuyó con aditivo al 0.08% (m/m). A partir de ello se infiere que se alcanza una mayor fluidez y, por tanto, mayor trabajabilidad en el asfalto original al añadir una concentración de aditivo de 0.08% (m/m), mientras que para el asfalto envejecido se alcanza con 0.05% (m/m). Estos resultados muestran que el aditivo tiene un efecto en las propiedades físicas del asfalto, lo que puede ser útil para ajustar las características según las necesidades de diseño y aplicación específica en la construcción de carreteras.

El análisis FTIR mostró que la adición del aditivo en concentraciones del 0.05% y 0.08% (m/m) tiene un impacto en la composición química del asfalto por la inhibición de la formación de aromáticos en la región de 500 cm^{-1} y la presencia de benceno sustituido y alcohol (Fig. 5). Para el primer caso del asfalto en condiciones originales, las concentraciones de 0.05% y 0.08% (m/m) mostraron picos más pronunciados debajo de 500 cm^{-1} que corresponde al benceno sustituido, es decir, a grupos aromáticos en general que no estuvieron presentes en el asfalto sin aditivo. Asimismo, únicamente la concentración de 0.05% (m/m) presentó un pico ancho que corresponde al alcohol. Esto puede deberse a la composición química del aditivo UNOBOND® y a la posible contaminación de la muestra con el etanol absoluto utilizado como solvente en la realización de las pruebas.

Por otro lado, el asfalto envejecido con una concentración de 0.05% y 0.08% (m/m) mostraron picos más pronunciados debajo de 500 cm^{-1} que corresponden al contacto con el aire que causa una leve oxidación. La presencia de contaminantes en las muestras (como polvo o solvente), el ruido de fondo del espectrómetro y la posible contaminación del sistema óptico o la falta de alineación, son errores que pueden explicar que solo el porcentaje de 0.05% (m/m) obtuviera picos considerables en los espectros.

Las concentraciones de 0.05% y 0.08% (m/m) muestran un menor cambio en el porcentaje de transmitancia para los alcanos en la región de $3,000 - 2,840\text{ cm}^{-1}$, alquenos en $1,600\text{ cm}^{-1}$, alquil aril éter en $1,275 - 1,020\text{ cm}^{-1}$ y aromáticos en 880 cm^{-1} en adelante (Fig. 5). Se evidencia una posible contaminación con el solvente que causó un pico ancho leve para el asfalto envejecido con un 0.03% de aditivo. Asimismo, las tres concentraciones mostraron picos debajo de 500 cm^{-1} correspondientes a aromáticos, los cuales son menos pronunciados que en el asfalto aditivado en condiciones originales (Fig. 4), lo que indica que la adición de aditivo impide la formación de aromáticos debido a la oxidación y, debido a que estos compuestos varían de viscosidad con la temperatura. Esto puede ser la causa de que el asfalto envejecido muestre una menor variación de viscosidad cuando contiene aditivo (ver Fig. 3d).

La fluidez del asfalto es una propiedad deseable durante la fase de mezclado y colocación de mezcla asfáltica en carreteras ya que facilita la manipulación y la aplicación. Ello permite una distribución uniforme sobre los agregados para formar una superficie cohesiva y duradera. Sin embargo, es importante encontrar un equilibrio basado en las pruebas físicas realizadas, puesto que una fluidez excesiva podría conducir a problemas como la segregación de los agregados. En conclusión, la adición de las tres concentraciones de aditivo tiene un efecto notable en las propiedades físicas del asfalto, principalmente las concentraciones de 0.05% y 0.08% (m/m) en la dureza según el ensayo de penetración, fluidez a 60°C de acuerdo

con el ensayo de viscosidad. Por lo tanto, la concentración de 0.08% (m/m) se considera cómo la opción más favorable para mejorar la adherencia de la mezcla asfáltica, especialmente en condiciones envejecidas.

AGRADECIMIENTOS

Nuestro profundo agradecimiento se dirige al Departamento de UNO Bitumen de la empresa UNO Guatemala, al laboratorio de la misma empresa en Puerto Cortés, Honduras, al laboratorio de la empresa Serpin, y al Instituto del Asfalto de Guatemala (IAG).

REFERENCIAS

- Al-Mohammedawi, A. & Mollenhauer, K. 2022. Current research and challenges in bitumen emulsion manufacturing and its properties. *Materials* 15(6): 2026. <https://doi.org/10.3390/ma15062026>
- ASTM (American Society for Testing and Materials) International. (2020a). ASTM D36-D95M-14: *Standard test method for softening point of bitumen (ring-and-ball apparatus)* [<https://www.astm.org/Standards/D36.htm>]. Accesado: 31 de marzo 2025.
- ASTM International. (2020b). ASTM D5/D5M-20: *Standard test method for penetration of bituminous materials*. [<https://www.astm.org/Standards/D5.htm>]. Accesado: 31 de marzo 2025.
- ASTM International. 2022. ASTM D2872-22: *Standard test method for effect of heat and air on a moving film of asphalt (rolling thin-film oven test)*. [<https://www.astm.org/Standards/D2872.htm>]. Accesado: 31 de marzo 2025.
- ASTM International. (2023). ASTM D4402-D4402M-23: *Standard test method for viscosity determination of asphalt at elevated temperatures using a rotational viscometer*. [<https://www.astm.org/Standards/D4402.htm>]. Accesado: 31 de marzo 2025.
- ASTM International. 2024a. ASTM D3625/D3625M-20: *Standard practice for effect of water on asphalt-coated aggregate using boiling water*. [<https://www.astm.org/Standards/D3625.htm>]. Accesado: 31 de marzo 2025.
- ASTM International. 2024b. ASTM D4867/D4867M-22e1: *Standard test method for effect of moisture on asphalt mixtures*. [<https://www.astm.org/Standards/D4867.htm>]. Accesado: 31 de marzo 2025.
- Avellán, M. 2007. *Asfaltos modificados con polímeros*. Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
- Ávila Parra, J. S. & Velasco Díaz, E. F. 2021. *Evaluación experimental de diferentes aditivos aplicados en una mezcla MDC - 19*. Facultad de Ingeniería, Programa de Ingeniería Civil, Universidad Católica de Colombia, Colombia.
- Larrea, S. 2015. *Estado del arte en el estudio de la adherencia entre el asfalto y el agregado mineral*. Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Ecuador.
- Leiva, B. 2018. *Caracterización de bitúmenes asfálticos vírgenes y modificados, utilizando la técnica de Espectroscopía Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR)*. Tesis de Licenciado en Ingeniería Química, Universidad del Valle de Guatemala, Guatemala.
- UNO Bitumen. 2015. *La búsqueda de un asfalto mejor*. Hoja técnica No.12-CA, V1-02 de UNOBOND®. Documento técnico propiedad de UNO Bitumen®.
- Villegas-Villegas, R. E., Aguiar-Moya, J. P. & Loria-Salazar, L. G. 2015. Estudio del envejecimiento y oxidación de asfaltos con FTIR y su relación con los parámetros reológicos. *Memorias XVIII CILA*: 209-219.