

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Evaluación técnica de un aditivo de ligantes bituminosos para mezclas
asfálticas

Trabajo de graduación en modalidad de tesis presentado por
Ana Paula Andrino González para optar al grado académico de Licenciada en
Ingeniería Química

Guatemala,

2024

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Evaluación técnica de un aditivo de ligantes bituminosos para mezclas
asfálticas

Trabajo de graduación en modalidad de tesis presentado por
Ana Paula Andrino González para optar al grado académico de Licenciada en
Ingeniería Química

Guatemala,

2024

Vo. Bo.:

(f)  _____

Ing. Luis Ernesto Núñez González

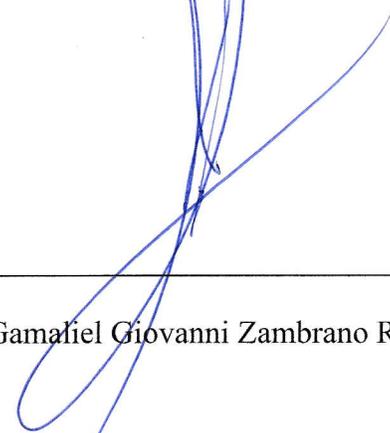
Tribunal Examinador:

(f)  _____

Ing. Luis Ernesto Núñez González

(f)  _____

Ing. Jose Andrés Lam Ceballos

(f)  _____

Ing. Gamaliel Giovanni Zambrano Ruano

Fecha de aprobación: Guatemala, 9 de enero de 2024

PREFACIO

Este trabajo de graduación es el cierre de la primera etapa en mi carrera profesional y, como los logros más grandes en mi vida, el mérito no es solo mío. Mi profundo agradecimiento se dirige hacia el Departamento de UNO Bitumen de la empresa UNO Guatemala por su valiosa colaboración en este proyecto. También expreso mi más sincero reconocimiento al laboratorio de la misma empresa en Puerto Cortés, Honduras, y al laboratorio de la empresa Serpin por su apoyo invaluable al recibirme y brindarme asistencia en la ejecución de las pruebas. Asimismo, agradezco al Instituto del Asfalto de Guatemala (IAG) por el respaldo recibido.

Agradezco a Dios por todas las bendiciones que me ha dado para llevar a cabo este trabajo, a mi asesor por apoyarme y guiarme y a mis catedráticos por compartirme sus conocimientos. Por último, no puedo pasar por alto la importancia del apoyo emocional brindado por mis familiares y amigos. Su aliento constante fue el motor que me impulsó a alcanzar este punto en mi camino académico. Finalmente, espero sinceramente que esta tesis sea de interés y utilidad para quienes la lean.

ÍNDICE

PREFACIO	i
LISTA DE CUADROS	v
LISTA DE FIGURAS	vii
RESUMEN	ix
I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS.....	2
A. General	2
B. Específicos.....	2
III. JUSTIFICACIÓN	3
IV. MARCO TEÓRICO	4
A. Definición de asfalto.....	4
B. Mezclas asfálticas	4
C. Uso y producción del asfalto	6
D. Composición del asfalto	7
1. Saturados	7
2. Aromáticos.....	7
3. Resinas	8
4. Asfaltenos	8
E. Clasificación	9
F. Propiedades y ensayos del asfalto.....	10
1. Ensayo de penetración	10
2. Ensayo de viscosidad a 60°C	11
3. Ensayo de punto de ablandamiento.....	11

4.	Película delgada en horno rotatorio (RTFOT)	11
5.	Envejecimiento acelerado PAV	11
G.	Espectroscopía infrarroja de Fourier	12
H.	Calidad del asfalto	12
I.	Ensayos de la mezcla asfáltica.....	13
1.	Relación de resistencia a la tracción	14
2.	Prueba de hervido	14
J.	Definición y beneficios del uso de aditivos	14
K.	Tipos de aditivos.....	15
1.	Polímeros	15
2.	Agentes antideslizantes (anti-stripping).....	16
3.	Fibras	16
L.	UNOBOND®	16
V.	ANTECEDENTES	18
VI.	METODOLOGÍA.....	20
A.	Equipo	20
B.	Reactivos	21
C.	Materiales	22
D.	Metodología.....	22
1.	Elección de las concentraciones de aditivo.....	22
2.	Caracterización fisicoquímica del asfalto AC30.....	22
3.	Análisis de aditivo en mezcla asfáltica	24
4.	Caracterización fisicoquímica del asfalto AC30 con las tres dosificaciones de aditivo	25
VII.	RESULTADOS	26
A.	Caracterización fisicoquímica del asfalto AC30.....	26
B.	Análisis de aditivo en la mezcla asfáltica	29

C.	Caracterización fisicoquímica del asfalto AC30 con las tres dosificaciones de aditivo	30
VIII.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	41
IX.	CONCLUSIONES	48
X.	RECOMENDACIONES	50
XI.	BIBLIOGRAFÍA	51
XII.	GLOSARIO	55
XIII.	ANEXOS	56
A.	Datos originales	56
B.	Datos calculados	63
C.	Análisis de error	76
D.	Equipo utilizado	80
E.	Resultados y normas ASTM	84

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Equipos	20
Cuadro 2. Propiedades de los reactivos	21
Cuadro 3. Toxicidades de los reactivos	21
Cuadro 4. Cristalería y materiales	22
Cuadro 5. Resultados promedio de los ensayos de penetración, viscosidad y punto de ablandamiento para asfalto AC30 original y envejecido	26
Cuadro 6. Presencia de los picos característicos de los espectros IR obtenidos para el asfalto AC30 en condiciones originales y envejecidas	27
Cuadro 7. 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	29
Cuadro 8. Resultados promedio de los ensayos de penetración, viscosidad y punto de ablandamiento para asfalto AC30 original con las tres concentraciones de aditivo analizadas	30
Cuadro 9. Resultados promedio de los ensayos de penetración, viscosidad y punto de ablandamiento para asfalto AC30 envejecido con las tres concentraciones de aditivo analizadas	30
Cuadro 10. Resultados de la prueba de Tukey para determinar la significancia de las parejas entre medias muestrales del ensayo de penetración	34
Cuadro 11. Resultados de la prueba de Tukey para determinar la significancia de las parejas entre medias muestrales del ensayo de viscosidad a 60°C	35
Cuadro 12. Resultados de la prueba de Tukey para determinar la significancia de las parejas entre medias muestrales del ensayo de punto de ablandamiento	36
Cuadro 13. Presencia de los picos característicos de los espectros IR obtenidos para el asfalto AC30 en condiciones originales con las tres concentraciones de aditivo elegidas	37
Cuadro 14. Presencia de los picos característicos de los espectros IR obtenidos para el asfalto AC30 en condiciones envejecidas con las tres concentraciones de aditivo elegidas	39
Cuadro 15. Mediciones realizadas para el ensayo de penetración en asfalto AC30 en condiciones originales	56
Cuadro 16. Mediciones realizadas para el ensayo de penetración en asfalto AC30 en condiciones envejecidas	57
Cuadro 17. Mediciones realizadas para el ensayo de viscosidad en asfalto AC30 en condiciones originales	57
Cuadro 18. Mediciones realizadas para el ensayo de viscosidad en asfalto AC30 en condiciones envejecidas	58
Cuadro 19. Mediciones realizadas para el ensayo de punto de ablandamiento en asfalto AC30 en condiciones originales	58

Cuadro 20. Mediciones realizadas para el ensayo de punto de ablandamiento en asfalto AC30 en condiciones envejecidas	59
Cuadro 21. Análisis estadístico y aceptabilidad de los datos para el ensayo de penetración en asfalto AC30 en condiciones originales	63
Cuadro 22. Análisis estadístico y aceptabilidad de los datos para el ensayo de penetración en asfalto AC30 en condiciones envejecidas	64
Cuadro 23. Análisis estadístico y aceptabilidad de los datos para el ensayo de viscosidad a 60°C en asfalto AC30 en condiciones originales	65
Cuadro 24. Análisis estadístico y aceptabilidad de los datos para el ensayo de viscosidad a 60°C en asfalto AC30 en condiciones envejecidas	66
Cuadro 25. Análisis estadístico y aceptabilidad de los datos para el ensayo de punto de ablandamiento en asfalto AC30 en condiciones originales	67
Cuadro 26. Análisis estadístico y aceptabilidad de los datos para el ensayo de punto de ablandamiento en asfalto AC30 en condiciones envejecidas	68
Cuadro 27. Análisis ANOVA de un factor para el ensayo de penetración del asfalto AC30 en condiciones originales	69
Cuadro 28. Análisis ANOVA de un factor para el ensayo de penetración del asfalto AC30 en condiciones envejecidas	69
Cuadro 29. Análisis ANOVA de un factor para el ensayo de viscosidad a 60°C del asfalto AC30 en condiciones originales	70
Cuadro 30. Análisis ANOVA de un factor para el ensayo de viscosidad a 60°C del asfalto AC30 en condiciones envejecidas	70
Cuadro 31. Análisis ANOVA de un factor para el ensayo de punto de ablandamiento del asfalto AC30 en condiciones originales	71
Cuadro 32. Análisis ANOVA de un factor para el ensayo de punto de ablandamiento del asfalto AC30 en condiciones envejecidas	71
Cuadro 33. Prueba de Tukey para el ensayo de penetración	72
Cuadro 34. Prueba de Tukey para el ensayo de viscosidad a 60°C	72
Cuadro 35. Prueba de Tukey para el ensayo de punto de ablandamiento.....	73
Cuadro 36. Comparación entre los resultados obtenidos de los ensayos físicos del asfalto AC30 en condiciones originales y envejecidas con los datos del laboratorio de UNO Bitumen®	74
Cuadro 37. Resultados obtenidos del asfalto 80-100 modificado con lignina.....	75

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Estructura de los saturados	7
Figura 2. Estructura de los aromáticos	8
Figura 3. Estructura de las resinas	8
Figura 4. Estructura de los asfaltenos	9
Figura 5. Comparación de espectros IR del asfalto AC30 en condiciones originales y envejecidas	28
Figura 6. Porcentajes de desvestimiento y árido recubierto para el asfalto AC30 con las tres concentraciones de aditivo analizadas	29
Figura 7. Diagrama de caja y bigotes para el ensayo de penetración del asfalto AC30 en condiciones originales	31
Figura 8. Diagrama de caja y bigotes para el ensayo de penetración del asfalto AC30 en condiciones envejecidas .	31
Figura 9. Diagrama de caja y bigotes para el ensayo de viscosidad a 60°C del asfalto AC30 en condiciones originales	32
Figura 10. Diagrama de caja y bigotes para el ensayo de viscosidad a 60°C del asfalto AC30 en condiciones envejecidas	32
Figura 11. Diagrama de caja y bigotes para el ensayo de punto de ablandamiento del asfalto AC30 en condiciones originales	33
Figura 12. Diagrama de caja y bigotes para el ensayo de punto de ablandamiento del asfalto AC30 en condiciones envejecidas	33
Figura 13. Comparación de espectros IR del asfalto AC30 en condiciones originales con las tres concentraciones de aditivo	38
Figura 14. Comparación de espectros IR del asfalto AC30 en condiciones envejecidas con las tres concentraciones de aditivo	40
Figura 15. Espectro IR correspondiente al asfalto AC30 en condiciones originales sin aditivo obtenido en el laboratorio de la Universidad del Valle de Guatemala	59
Figura 16. Espectro IR correspondiente al asfalto AC30 en condiciones originales con aditivo al 0.03% (m/m) obtenido en el laboratorio de la Universidad del Valle de Guatemala	60
Figura 17. Espectro IR correspondiente al asfalto AC30 en condiciones originales con aditivo al 0.05% (m/m) obtenido en el laboratorio de la Universidad del Valle de Guatemala	60
Figura 18. Espectro IR correspondiente al asfalto AC30 en condiciones originales con aditivo al 0.08% (m/m) obtenido en el laboratorio de la Universidad del Valle de Guatemala	61

Figura 19. Espectro IR correspondiente al asfalto AC30 en condiciones envejecidas sin aditivo obtenido en el laboratorio de la Universidad del Valle de Guatemala	61
Figura 20. Espectro IR correspondiente al asfalto AC30 en condiciones envejecidas con aditivo al 0.03% (m/m) obtenido en el laboratorio de la Universidad del Valle de Guatemala	62
Figura 21. Espectro IR correspondiente al asfalto AC30 en condiciones envejecidas con aditivo al 0.05% (m/m) obtenido en el laboratorio de la Universidad del Valle de Guatemala	62
Figura 22. Espectro IR correspondiente al asfalto AC30 en condiciones envejecidas con aditivo al 0.08% (m/m) obtenido en el laboratorio de la Universidad del Valle de Guatemala	63
Figura 23. Penetrómetro utilizado en el laboratorio certificado del Departamento de UNO Bitumen	80
Figura 24. Viscosímetro rotacional utilizado en el laboratorio certificado del Departamento de UNO Bitumen	80
Figura 25. Aparato de anillo y bola utilizado en el laboratorio certificado del Departamento de UNO Bitumen	81
Figura 26. Horno rotatorio de película delgada utilizado en el laboratorio certificado del Departamento de UNO Bitumen	81
Figura 27. Espectrofotómetro de haz infrarrojo con Transformada de Fourier (FTIR) utilizado en el laboratorio de la Universidad del Valle de Guatemala	82
Figura 28. Marco de carga MS-398 utilizado para el ensayo TSR en el laboratorio de la empresa Serpin	82
Figura 29. Mordaza de Lottman utilizado para el ensayo TSR en el laboratorio de la empresa Serpin	83
Figura 30. Agregado pétreo pintado con asfalto AC30 para prueba de hervido realizada en el laboratorio de la empresa Serpin.....	83
Figura 31. Mezcla asfáltica con asfalto AC30 durante la prueba de hervido sobre una estufa de gas del laboratorio de la empresa Serpin.....	84
Figura 32. Mezcla asfáltica con asfalto AC30 colocado sobre una superficie blanca tras la prueba de hervido realizada en el laboratorio de la empresa Serpin.....	84

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 optimización de estas características es posible mediante el uso de aditivos asfálticos, agentes potenciadores que contribuyen a elevar la calidad 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. Para el asfalto se llevaron a cabo los ensayos de penetración, viscosidad, punto de ablandamiento y espectroscopía infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR), 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 (RTFOT). Asimismo, se midieron las tres concentraciones de aditivo de 0.03%, 0.05% y 0.08% (m/m) más utilizadas por los clientes de la empresa comercializadora de asfalto UNO Guatemala. Por otro lado, a la mezcla asfáltica se le realizaron los análisis de hervido y de Relación en la Resistencia a la Tensión Indirecta (TSR). Se comprobó que el asfalto envejecido sin aditivo se vuelve más rígido a 25°C, muestra una mayor viscosidad a 60°C y retiene su dureza hasta los 53°C antes de ablandarse. Además, se obtuvo 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 FTIR reveló que el asfalto en ambas condiciones comparte picos característicos de alcanos, alquenos, alquil aril éter. Finalmente, el análisis de hervido indicó que la concentración del 0.08% (m/m) de aditivo optimiza 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.

I. 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 (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. 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 (Mohammedawi, Mollenhauer, 2022).

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, Velasco, 2021).

Este trabajo evalúa las características fisicoquímicas del asfalto tipo AC30 en condiciones originales y envejecidas mediante el análisis de espectroscopía infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR) y tres pruebas físicas estandarizadas por las normas ASTM: penetración, viscosidad a 60°C y punto de ablandamiento. Además, se propuso realizar pruebas normadas por la misma organización para evaluar el efecto de tres concentraciones de un aditivo mejorador de adherencia en la mezcla asfáltica, las cuales consisten en el análisis de hervido, una prueba cualitativa, 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.

II. OBJETIVOS

A. General

Evaluar técnicamente el efecto de un aditivo en las características físicas y químicas de un ligante bituminoso y su desempeño en la mezcla asfáltica.

B. Específicos

1. Caracterizar un ligante bituminoso AC30 por medio de pruebas fisicoquímicas para comparar el cambio en sus características por la adición de aditivo en condiciones originales y envejecidas, de acuerdo con las normas ASTM D5-06, ASTM D4402-02, ASTM D36-95 y ASTM D2872-97.
2. Realizar pruebas estandarizadas para evaluar la cantidad de aditivo que mejora la adherencia en la mezcla asfáltica en condiciones originales, de acuerdo con las normas ASTM D3625-96 y ASTM D 4867/D 4867M-09.
3. Caracterizar el ligante bituminoso AC30 con las proporciones de aditivo elegidas mediante pruebas fisicoquímicas en condiciones originales y envejecidas para determinar el efecto del aditivo en el asfalto.

III. JUSTIFICACIÓN

El asfalto es el material más utilizado para el pavimento de carreteras ya que proporciona bajo costo, alta durabilidad, capacidades superiores de impermeabilización y construcción rápida (Mohammedawi, Mollenhauer, 2022). Según el Informe de Negocios Estratégicos Globales de Asfalto realizado por la compañía Global Industry Analysts, bajo el nuevo ambiente económico post-COVID-19 se espera un incremento a 225,9 millones de toneladas para 2030. Asimismo, el segmento de pavimentación se espera que llegue a 192.6 millones de toneladas al finalizar el período de análisis (Global Industry Analysts, Inc., 2023). Por otro lado, se espera que el mercado mundial de aditivos para asfalto, estimado en \$3,300 millones en el año 2022, alcance los \$4,600 millones en 2030 (Global Industry Analysts, Inc., 2023).

Según el Ministerio de Energía y Minas, el asfalto en Guatemala se emplea principalmente en la pavimentación de carreteras. Este se produce comercialmente en la Refinería La Libertad, destinado para el consumo nacional y para exportación. La producción anual de asfalto en 2022 consistió en 828,221.97 barriles, mientras que la exportación anual fue de 500,068.42 barriles y el consumo anual fue de 423, 224.42 barriles (Ministerio de Energía y Minas, 2023). El mercado de asfalto en Guatemala lo constituyen diversas empresas productoras y comercializadoras como UNO Guatemala S.A.

La durabilidad del asfalto se refiere a qué tanto mantiene sus propiedades originales cuando se somete a los procesos habituales de desgaste y envejecimiento (Avellán, 2007). Para aumentarla, existe el interés local de compañías productoras de asfaltos en investigaciones que puedan mejorar la adhesividad entre el agregado y el asfalto. Sin embargo, no se encontró un reporte de investigación en esa línea, por lo que surge la necesidad de indagar el uso de aditivos, cuyo propósito es mejorar la operación, calidad y costo del asfalto desde la formulación (Ávila, Velasco, 2021). Es por esto por lo que en este trabajo se presenta la caracterización de un tipo de asfalto para comparar la variación en sus propiedades fisicoquímicas al añadir un aditivo para mezclas asfálticas, tanto en condiciones originales como envejecidas para simular la exposición a factores ambientales. Esto pretende abrir un campo nuevo de investigaciones cooperativas con compañías productoras y comercializadoras de asfalto para estudiar distintos aditivos y su efecto en las propiedades fisicoquímicas.

IV. MARCO TEÓRICO

A. Definición de asfalto

El asfalto, también llamado bitumen, ligante bituminoso o ligante asfáltico, es una sustancia cementante de color negro, semi- sólida a temperatura ambiente, natural o fabricada y está compuesta principalmente de hidrocarburos de alto peso molecular, siendo típicos los asfaltos, las breas o alquitranes, los betunes y las asfaltitas (Avellán, 2007). Es un derivado del petróleo que se obtiene mediante destilación fraccionada y procesos de refinamiento. El asfalto es un material hidrófobo, adherente y cohesivo, capaz de resistir altos esfuerzos instantáneos y fluir bajo la acción de cargas permanentes. Asimismo, presenta un comportamiento termoplástico, es decir, que a temperaturas elevadas (típicamente entre 100 y 200°C) actúa como un líquido viscoso y puede mezclarse con otros componentes y manipularse y formarse según se requiera; una vez enfriado, es un sólido inerte duradero e hidrofóbico (repele el agua).

La importancia del asfalto radica en proporcionar durabilidad, resistencia a la intemperie y flexibilidad a las superficies pavimentadas según su propósito (carreteras y aeropuertos). Además, tiene las propiedades ideales para la construcción de pavimentos cumpliendo las siguientes funciones:

- Impermeabilizar la estructura del pavimento, haciéndolo poco sensible a la humedad y eficaz contra la penetración del agua proveniente de la precipitación (Salazar, 2011).
- Proporciona una fuerte unión y cohesión entre agregados, capaz de resistir la acción mecánica de disgregación producida por las cargas de los vehículos. Igualmente mejora la capacidad portante de la estructura, permitiendo disminuir el espesor de la carpeta asfáltica (Salazar, 2011).

B. Mezclas asfálticas

A mediados del siglo XIX se intentó utilizar roca asfáltica procedente de yacimientos europeos para el pavimentado de carreteras y, a partir de ahí, se produjo un lento desarrollo del uso de productos naturales para este fin, seguido por la aparición del alquitrán de hulla y, más tarde, de betunes refinados fabricados a partir de crudo. Las mezclas asfálticas o bituminosas se componen de asfalto en menor proporción, el cual actúa como ligante, y agregados pétreos en mayor proporción de variado tamaño. Estos se fabrican de forma mecánica en puntos fijos (plantas) y puntos móviles (maquinaria) que se transportan, extienden y compactan en la obra (Hunter, *et al.*, 2015).

En la actualidad su uso se ha extendido a otro tipo de proyectos de infraestructura, como pistas deportivas o de aeropuertos, pero su principal uso es en la capa superior que conforma la estructura de pavimento en carreteras. El comportamiento de las mezclas asfálticas no solo depende de las magnitudes de carga que tienen que soportar, sino de otros factores como la reología o las propiedades de flujo (cómo cambia la mezcla por efecto de la temperatura y

velocidad de aplicación). Es importante conocerlos puesto que de estos parámetros depende el diseño de la mezcla (Hunter, *et al.*, 2015).

Las mezclas asfálticas se clasifican comúnmente según su colocación en el pavimento y el procedimiento de mezclado:

- Mezcla caliente: se fabrica a altas temperaturas, alrededor de 150°C, para que el asfalto pueda fluir y unirse con sus respectivos agregados. A la hora de colocarse en la obra, su temperatura debe ser mayor a la del ambiente, ya que de lo contrario pierde la capacidad de poder extenderse y compactarse adecuadamente. Se emplean en vías urbanas, autopistas y carreteras comunes; casi siempre se colocan como capa de rodadura (Ávila, Velasco, 2021), la cual soporta directamente el tráfico y transmite las cargas a las demás capas inferiores (Tomala, *et al.*, s.f).
- Mezcla fría: su ligante son las emulsiones asfálticas, que consisten en una dispersión de finas gotas de asfalto, estabilizadas en una fase acuosa, por la presencia de un agente emulsificante, obteniéndose un producto relativamente fluido (Mercado, *et al.*, 2008). Estas se colocan en temperatura ambiente y su principal uso se da en el campo de conservación de vías. Se pueden aplicar como riego de liga, riego de imprimación, riego de curado y riego en negro (Ávila, Velasco, 2021).

Asimismo, las mezclas asfálticas se pueden clasificar según la proporción de vacíos, el cual es un parámetro imprescindible para que no se produzcan deformaciones plásticas como consecuencia del paso de las cargas y de las variaciones térmicas:

- Mezclas cerradas o densas: posee una granulometría de todos los tamaños, en donde el agregado fino llena los huecos que deja la estructura del agregado grueso. La proporción de vacíos no supera el 6%, lo que las hace impermeables (Ávila, Velasco, 2021).
- Mezclas semicerradas o semidensas: el tamaño de los agregados es usualmente pequeño. La proporción de vacíos está entre el 6 y 10% (Padilla, 2004).
- Mezclas abiertas: no tiene agregados de tamaño pequeño, lo que hace que la proporción de vacíos supera el 12% (Padilla, 2004).
- Mezclas porosas o drenantes: tiene poca cantidad de agregados de tamaño medio. La proporción de vacíos es superior al 20% (Ávila, Velasco, 2021).

C. Uso y producción del asfalto

La impermeabilidad y el comportamiento termoplástico del asfalto lo hacen ideal para una amplia gama de aplicaciones, principalmente por la industria de la construcción, como componente de productos utilizados en pavimentación y techado. Los asfaltos más utilizados para fabricar mezclas o preparados son los siguientes:

- Asfalto diluido: son preparaciones en las que se ha reducido la viscosidad del asfalto mediante la adición de un disolvente, normalmente derivado del petróleo. Normalmente, los disolventes utilizados son aguarrás, queroseno y gasóleo. Estos productos reducidos se utilizan típicamente para pulverización y algunas aplicaciones de mezcla (Hunter, *et al.*, 2015).
- Asfalto modificado: los ligantes asfálticos modificados con agentes químicos (por ejemplo, PMB) están diseñados para cambiar las propiedades de rendimiento como la elasticidad, la adherencia o la fuerza cohesiva. Estos agentes pueden ser polímeros, ceras, caucho granulado, azufre y ácidos, entre otros materiales. Los asfaltos modificados ahora se usan ampliamente en una variedad de aplicaciones (Hunter, *et al.*, 2015).
- Emulsiones bituminosas: las emulsiones bituminosas o asfálticas son productos en los que se dispersan gotas de asfalto normal o diluido en un medio acuoso. Se utiliza un emulsionante para estabilizar la mezcla. Las emulsiones permiten la manipulación, el transporte y la aplicación de asfalto a temperaturas más bajas y se utilizan principalmente en aplicaciones de pavimentación de carreteras (Hunter, *et al.*, 2015).

Con respecto a la producción del asfalto, este se fabrica durante la destilación del petróleo crudo. En general, el petróleo crudo se origina a partir de restos de organismos marinos y materia vegetal depositados con lodo y fragmentos de roca en el fondo del océano. Para la extracción de petróleo, se detecta su presencia mediante estudios sísmicos y se recupera mediante la perforación a través de la roca impermeable. El primer proceso en la refinación del petróleo crudo es la destilación fraccionada, que separa físicamente el petróleo crudo en corrientes que varían en el punto de ebullición. Esto se lleva a cabo en altas torres de acero conocidas como columnas de fraccionamiento o destilación. Las fracciones más ligeras del petróleo crudo permanecen como vapor y se toman de la parte superior de la columna de destilación; las fracciones pesadas se extraen de la columna como corrientes secundarias; las fracciones más pesadas quedan como líquidos, que salen por la base de la columna (Hunter, *et al.*, 2015).

Este residuo es la materia prima utilizada en la fabricación de más de 20 grados diferentes de asfalto. La viscosidad y el rendimiento son una función tanto del origen del petróleo crudo como de la temperatura y la presión en la columna de vacío durante el procesamiento, y estos varían significativamente de un petróleo crudo a otro. La vida útil de este asfalto puede llegar a varias décadas dependiendo de las condiciones de almacenamiento: las temperaturas deben de ser adecuadas para que permitan la fluidez del asfalto, al menos 30°C por debajo de su punto de inflamación hasta 121°C; el tanque de almacenamiento debe de seguir el código API-650 es la base para el diseño, montaje y operación en la industria petrolera y de asfaltos, el cual indica que debe de ser cerrado para proteger contra

el aire y la humedad y hecho de acero para prevenir corrosión. Por otra parte, la vida útil de una mezcla asfáltica colocada en una carretera se encuentra entre 10 y 25 años, pero depende de diversos factores como el clima, temperatura, carga de tráfico y regularidad del mantenimiento, así como del tipo de asfalto, agregado y aditivos que compongan la mezcla (Hunter, *et al.*, 2015).

D. Composición del asfalto

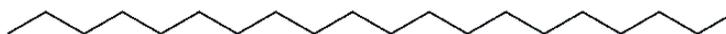
La reología es la ciencia que estudia el flujo y deformación de la materia. Las características reológicas del bitumen asfáltico a una temperatura particular son determinadas por la constitución (composición química) y la estructura (acomodamiento físico) de las moléculas en el material. Algún cambio en la constitución, la estructura o ambas es considerado un cambio en la reología (Hunter, *et al.*, 2015).

El asfalto es una mezcla compleja de moléculas que son en su mayoría hidrocarburos con una pequeña cantidad de especies heterocíclicas análogas estructuralmente y grupos funcionales que contienen átomos de azufre, nitrógeno y oxígeno. El asfalto también contiene trazas de metales como vanadio, níquel, hierro, manganeso y calcio, que se producen en forma de sales inorgánicas y óxidos o en estructuras de porfirinas. La composición del asfalto puede separarse en dos grandes grupos químicos llamados asfaltenos y maltenos. Estos últimos pueden subdividirse en saturados, aromáticos y resinas.

1. Saturados

Los saturados consisten en hidrocarburos alifáticos de cadena lineal y ramificada junto con compuestos cicloalifáticos. Son aceites viscosos no polares de color pajizo o incoloro. La relación molar de hidrógeno a carbono (H/C) de la fracción saturada es de aproximadamente 2. Se ha informado que el rango de peso molecular promedio varía entre 470 y 880 g/mol. Esta fracción forma del 5 al 20% del asfalto (Hunter, *et al.*, 2015).

Figura 1. Estructura de los saturados

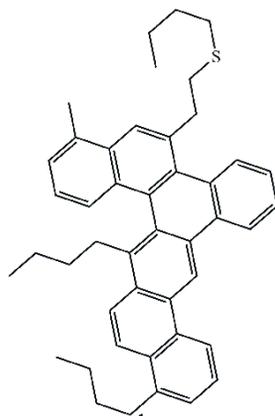


(Zhang, *et al.*, 2019)

2. Aromáticos

Los aromáticos comprenden los compuestos aromáticos nafténicos de peso molecular más bajo en el asfalto y representan la mayor proporción del medio de dispersión para los asfaltenos peptizados. Constituyen del 40 al 65% del asfalto total y son líquidos viscosos de color marrón oscuro. Podría decirse que la relación H/C de la fracción aromática oscila entre 1.4 y 1.6. El rango de peso molecular promedio está en la región de 570 a 980 g/mol. Consisten en cadenas de carbono no polares unidas a sistemas de anillos insaturados (aromáticos) (Hunter, *et al.*, 2015).

Figura 2. Estructura de los aromáticos

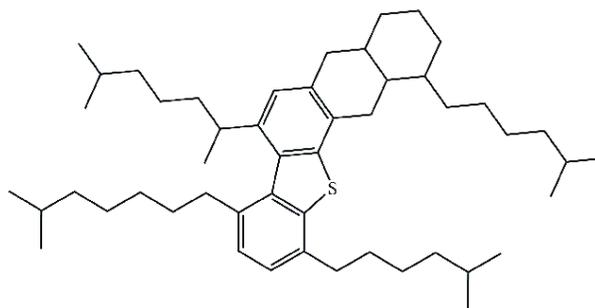


(Zhang, *et al.*, 2019)

3. Resinas

Las resinas son solubles en n-heptano. Están compuestos en gran parte de hidrógeno y carbono, y contienen una pequeña cantidad de átomos de oxígeno, azufre y nitrógeno. Son de color marrón oscuro, sólidos o semisólidos y, al ser de naturaleza polar, fuertemente adhesivos. Las resinas son agentes dispersantes o peptizadores de los enos asfálticos. La proporción de resinas a asfaltenos gobierna, hasta cierto punto, el carácter de solución (sol) o gelatinoso (gel) del asfalto. Se encuentra que las resinas separadas del asfalto tienen pesos moleculares que oscilan entre 780 y 1400 g/mol y una relación atómica H/C de 1.4 a 1.7 (Hunter, *et al.*, 2015).

Figura 3. Estructura de las resinas



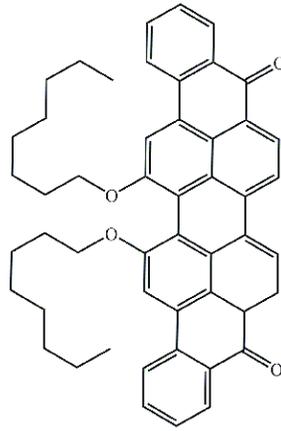
(Zhang, *et al.*, 2019)

4. Asfaltenos

Compuestos químicos insolubles en n-heptano que pueden ser separados mediante la digestión del asfalto (Reyes, *et al.*, 2012). El asfalto se describe tradicionalmente como un sistema coloidal que consiste en una miscelánea de asfaltenos de alto peso molecular disueltos en un medio aceitoso de maltenos de bajo peso molecular. Esta mezcla de asfaltenos se considera junto a una envoltura absorbida de resinas aromáticas de alto peso molecular que actúa

como una estabilizadora de la solvatación. Hacia afuera de esta micela de asfaltenos hay resinas aromáticas menos polares en capas hacia un medio un medio oleoso menos aromático (Juárez, 2018).

Figura 4. Estructura de los asfaltenos



(Zhang, *et al.*, 2019)

E. Clasificación

Según la American Society of Testing and Materials (ASTM) los asfaltos de pavimentación se pueden dividir en tres grupos generales: cementos asfálticos, asfaltos rebajados y asfaltos emulsificados, siendo la primera la más común que se puede dividir en tres sistemas de identificación que presentan diferentes maneras de medir sus propiedades:

- Caracterización por penetración: este método utiliza la norma ASTM D-946 (clasificación estándar por grado de penetración para cementos asfálticos utilizados en pavimentación). Los grados de penetración presentan los siguientes rangos: 40 – 50, 60 – 70, 85 – 100, 120 – 150, 200 – 300. Este método se efectúa permitiendo que una aguja penetre la superficie de una muestra de asfalto bajo una carga dada. La distancia que penetra la aguja en la muestra en un tiempo determinado es medida en décimas de milímetro (0.1 mm o 1 dmm). Un grado 200-300 indica que la aguja penetró en la muestra, bajo condiciones específicas de 200 a 300 dmm. Esta es un indicador para un asfalto “blando”, un grado 40- 50 es indicación de un asfalto “duro” (Avellán, 2007).
- Caracterización por viscosidad: este método utiliza la norma ASTM D-3381 (clasificación estándar por grado de viscosidad para cementos asfálticos utilizados en pavimentación). Se clasifican los asfaltos según su viscosidad absoluta a 60°C. La unidad utilizada es el Poise (P) y se clasifican de la siguiente manera: AC-5 (500 ± 100 P), AC-10 (1000 ± 200 P), AC-20 (2000 ± 400 P), AC-30 (3000 ± 600 P) (Avellán, 2007).

- Caracterización por comportamiento: este sistema está incluido en la norma ASTM D-6373 y fue creado por el Instituto de Asfalto de Estados Unidos. Bajo este sistema se conocen las temperaturas máximas y mínimas del pavimento en función de la temperatura del aire y la latitud geográfica. La ventaja de este sistema es que predice cómo se comportará el asfalto al envejecer (Avellán, 2007).

F. Propiedades y ensayos del asfalto

Debido al gran número de características presentes en el asfalto, estas pueden ser agrupadas en cinco categorías distintas:

- Propiedades físicas: hacen referencia al estado del asfalto, por ejemplo, a su dureza o resistencia a la deformación bajo condiciones específicas. Una dureza alta implica una mejor resistencia al desgaste, pero pierde adherencia con los agregados, mientras que una dureza baja involucra mayor susceptibilidad a la deformación, pero mejor adaptabilidad en climas fríos (Ávila, 2011).
- Propiedades mecánicas: se centran en la capacidad de fluidez o deformación del asfalto cuando se somete a tensiones bajo diferentes condiciones de temperatura y tiempo (Ávila, 2011).
- Propiedades de adhesividad: consideran la habilidad de los asfaltos para adherirse a los agregados, incluso en presencia de agua (Ávila, 2011).
- Propiedades de durabilidad: estudian la habilidad del asfalto para mantener sus cualidades a lo largo del tiempo y bajo la influencia de factores que causan envejecimiento u oxidación (Ávila, 2011).
- Propiedades químicas: Se enfocan en la composición y la estructura coloidal del asfalto (Ávila, 2011).

Los ensayos realizados para las propiedades listadas anteriormente cobran validez con los estándares con los que se norman, los mundialmente reconocidos consisten en las normas ASTM (siglas que corresponden a la entidad American Society For Testing And Materials) y AASHTO (Siglas que corresponden a la entidad American Association For State Highway And Transportation Official). Asimismo, estas organizaciones mantienen estándares de calibración, los cuales son un conjunto de procedimientos y requisitos que deben cumplirse para garantizar la exactitud y precisión de las mediciones realizadas con equipos compatibles con la ASTM y AASHTO (Ávila, 2011). A continuación, se explican los ensayos físicos más utilizados para caracterizar el asfalto.

1. Ensayo de penetración

El ensayo de penetración determina la medida de consistencia del asfalto, altos valores de penetración indican consistencias más blandas (Avellán, 2007). La penetración se define como la distancia, expresada en décimas de milímetro, hasta la cual una aguja normalizada penetra verticalmente en el material en condiciones definidas de carga,

tiempo y temperatura. Normalmente el ensayo se realiza a 25° C (77° F) durante un tiempo de 5 segundos y con una carga móvil total, incluida la aguja, de 100 g (Ávila, 2011). Está normado según ASTM D5 y AASHTO T-49.

2. Ensayo de viscosidad a 60°C

Los valores de viscosidad a temperaturas de 60°C (140 °F) son utilizadas para clasificar el asfalto (Avellán, 2007). Este procedimiento implica calentar una muestra de asfalto a la temperatura especificada y luego medir la velocidad a la que fluye a través de un viscosímetro capilar. La viscosidad del asfalto a 60°C es una medida importante de su fluidez y capacidad para mezclarse adecuadamente en diversas aplicaciones, como en la producción de mezclas asfálticas utilizadas en pavimentación (Ávila, 2011). Está normado según ASTM D4402 y AASHTO T-136.

3. Ensayo de punto de ablandamiento

Proporciona una relación de la dureza del asfalto (duro o blando) y es útil para clasificar productos bituminosos y es un valor índice de la tendencia del material a fluir cuando está sometido a temperaturas elevadas (Avellán, 2007). Dos anillos horizontales llenos de material bituminoso se calientan a una tasa controlada en un baño líquido, mientras cada uno de ellos soporta una bola de acero. El punto de ablandamiento se considera como el valor promedio de las temperaturas, a la cuales los dos discos se ablandan lo suficiente para permitir que cada bola envuelta en material bituminoso caiga desde una distancia de 25 mm (1") (Ávila, 2011). Está normado según ASTM D36 y AASHTO T-53.

4. Película delgada en horno rotatorio (RTFOT)

El procedimiento se utiliza para medir el endurecimiento anticipado del material durante la construcción y servicio del pavimento (Avellán, 2007). Se calienta la película de material asfáltico en movimiento en un horno a 163°C (325°F), durante 85 minutos. Los efectos del calor y del aire se determinan a partir de los cambios, en los valores de los ensayos físicos efectuados antes y después del tratamiento en el horno. Además, se proporciona un procedimiento opcional para determinar el cambio con base en el peso de la muestra (Ávila, 2011). Está normado según ASTM D2872 y AASHTO T-240.

5. Envejecimiento acelerado PAV

El envejecimiento de larga duración acelerado realizado en un recipiente de envejecimiento a presión (PAV) simula, mediante modelos matemáticos, el envejecimiento oxidativo del asfalto en servicio durante un período de 7 a 10 años. El procedimiento consiste en colocar muestras de asfalto envejecido por RTFOT en recipientes de acero inoxidable, que luego se envejecen durante 20 horas en un recipiente calentado y presurizado a 305 psi dentro del equipo. Las muestras se almacenan para su uso en pruebas de propiedades físicas (Ávila, 2011). Está normado según ASTM D6521 y AASHTO R-28.

G. Espectroscopía infrarroja de Fourier

En la química orgánica es de suma importancia determinar la estructura de un compuesto. Para ello existen pruebas químicas que pueden sugerir los grupos funcionales presentes en una muestra y reducir la búsqueda de un compuesto a un intervalo de estructuras posibles antes de emplear las pruebas físicas para realizar una identificación. A menudo se utilizan pruebas espectroscópicas que son no destructivas. La espectroscopía de absorción es la medición de la cantidad de luz que absorbe un compuesto como una función de la longitud de onda de la luz. En general, un espectrofotómetro irradia la muestra con luz, mide la cantidad de luz transmitida como una función de la longitud de onda y grafica los resultados (Wade, 2011).

El espectro electromagnético es el intervalo de todas las frecuencias posibles, de cero al infinito. En la práctica, los intervalos del espectro van desde las frecuencias de radio que son muy bajas, pasando por la frecuencia de la luz visible e infrarrojo, hasta las frecuencias muy altas de los rayos gama. Cuando una molécula es irradiada con un haz de luz infrarroja, se producen vibraciones que se ven reflejadas en estiramientos de los enlaces entre los átomos; además dependen de la masa de los átomos y de la rigidez del enlace. Los átomos más pesados vibran más lento que los más ligeros y sus enlaces son más rígidos. Un espectro de infrarrojo es una gráfica de la energía absorbida por una molécula como una función de la frecuencia o de la longitud de onda de la luz. En la región infrarroja, las absorciones resultan por lo general a partir de los modos vibracionales de los enlaces en la molécula.

El equipo FTIR (Espectroscopía Infrarroja de Fourier) utiliza un interferómetro conformado por un sistema de reflectores del haz de luz infrarroja que divide el haz hacia un espejo estacionario y a un espejo con velocidad constante. Los haces regresan para volver a combinarse en el reflecto o separador de haces. El haz del espejo móvil recorre una distancia distinta a la del haz del espejo fijo, y los dos haces se combinan para crear un patrón de interferencia llamado interferograma. Este contiene de manera simultánea toda la información de un espectro IR. Se dice que el interferograma está en el dominio del tiempo, que corresponde a la energía observada por el detector a medida que el espejo se mueve a través de la señal. Un algoritmo de cómputo estándar llamado Transformada de Fourier convierte el dominio del tiempo al espectro en el dominio de la frecuencia que permite observar la intensidad de la absorción como una función de la frecuencia (o longitud de onda). En comparación con los espectrofotómetros IR normales, su sensibilidad es mayor y necesita menos energía de la fuente y menos tiempo para un escaneo, por lo regular de 1 a 2 segundos (Wade, 2011).

H. Calidad del asfalto

Las propiedades físicas del bitumen asfáltico son importantes para el diseño, construcción y mantenimiento de pavimentos. Entre ellas se encuentran:

- Durabilidad: mide qué tanto puede retener el asfalto sus características originales cuando es expuesto a procesos normales de degradación y envejecimiento. Es juzgada principalmente por el comportamiento del

pavimento, debido a que es afectado por el diseño de la mezcla, agregados al asfalto, la mano de obra entre otras (Avellán, 2007).

- Adhesión y cohesión: adhesión es la capacidad del asfalto de pegarse al agregado en la mezcla de pavimentación. Por otra parte, la cohesión es la capacidad de mantener firmes las partículas del agregado en el producto final (Avellán, 2007).
- Susceptibilidad da la temperatura: el asfalto es un material termoplástico ya que, se vuelve más viscoso de acuerdo con la disminución de su temperatura. Esta propiedad varía entre asfaltos de diferente origen, aunque posean el mismo grado de consistencia. (Avellán D. 2007)
- Endurecimiento y envejecimiento: el endurecimiento sucede luego de agregar el asfalto al suelo y es causado principalmente por el proceso de oxidación que se favorece a altas temperaturas y cuando el asfalto está en películas delgadas. (Avellán D. 2007) El envejecimiento es un proceso lento que involucra cambios en la composición química del asfalto y se puede definir como la reacción de grupos lábiles del asfalto con el oxígeno. (Vargas X., Reyes F. 2010)

I. Ensayos de la mezcla asfáltica

El deterioro de los pavimentos tiene diversos orígenes y trae consecuencias que afectan desfavorablemente a la seguridad y los costos de operación de los usuarios de las carreteras. Todo proceso de mantenimiento o rehabilitación busca mantener o recuperar el índice de servicio durante un lapso determinado que compense apropiadamente las inversiones realizadas. Las principales causas de los deterioros prematuros de los pavimentos consisten en deficiencias de diseño y construcción, incrementos imprevistos en el tránsito vehicular y factores ambientales perjudiciales.

Uno de los principales tipos de deterioro ocasionado por las condiciones del medio ambiente en las mezclas asfálticas es el daño por humedad. Generalmente, esto también se debe a una mala construcción y a un mal diseño de la mezcla asfáltica, lo que reduce la resistencia y durabilidad cuando está expuesta directamente al agua. Este daño, comúnmente conocido como “stripping” (desprendimiento de capas), consiste en la separación física del asfalto y el agregado por la pérdida de adhesión entre ambos (Kennedy, et al., 1984). Esto acelera la degradación estructural de las mezclas junto con fisuras y deformación plástica y reduce la vida útil del pavimento. El resultado de la pérdida de resistencia es reversible cuando se elimina el agua de la mezcla (Aziz, Al-Shaybani, 2017). En respuesta a ello, existen distintas pruebas estandarizadas para evaluar la susceptibilidad a la humedad que tiene una mezcla asfáltica determinada.

1. Relación de resistencia a la tracción

La relación de resistencia a la tracción o tensión indirecta (TSR, por sus siglas en inglés) mide la resistencia de las mezclas comprimidas de asfalto al daño por humedad. La muestra se carga en un pistón a una velocidad de deformación estable de movimiento vertical que lo comprime hasta el fallo. Se prueban dos casos en este estudio: el primero representa los modelos de control no acondicionados y el segundo es el caso acondicionado, que se sumerge en agua a 60°C durante 24 horas. Ambos se prueban a 25°C, donde se calcula la Resistencia a la tracción indirecta. Una relación de resistencia a la tracción más alta mejora la resistencia al daño por humedad. Está normado según la ASTM D4867 Y AASHTO T-283.

2. Prueba de hervido

Este es un ensayo rápido que se utiliza a menudo en campo para determinar visualmente la pérdida de adherencia de las mezclas asfálticas sueltas, sometiéndolas a la rápida acción del agua hirviendo. El procedimiento consiste en añadir una cantidad de mezcla en el agua hirviendo que luego se retira y se coloca en un papel toalla. Con ello se realiza una evaluación visual del recubrimiento del agregado; cualquier capa fina transparente se considera completamente cubierto (González, 2015). Está normado según la ASTM D3625.

J. Definición y beneficios del uso de aditivos

Las mezclas asfálticas no siempre son capaces de soportar las cargas debidas a la acción al tráfico ni tampoco a las condiciones climáticas en las que se encuentran. Por ello, se ha visto la necesidad de mejorar sus características y propiedades mediante la aplicación de aditivos, que han demostrado la gran capacidad para aumentar la vida útil de las mezclas. Los aditivos son sustancias que modifican las propiedades químicas, físicas y mecánicas de la mezcla asfáltica. Son productos diseñados para superar las propiedades del asfalto original (las cuales dependen de su contenido de asfaltenos, maltenos, resinas y aceites), mejorando el desempeño de los pavimentos a mediano y largo plazo (entre 4 a 6 años). Los aditivos tienen como objetivo hacer que el comportamiento físico de la mezcla no dependa tanto de la temperatura, el agua y otros factores (Ávila, Velasco, 2021).

El principal beneficio del uso de aditivos es la mejora de la resistencia a la oxidación, con menor agrietamiento térmico (temperatura fría) y una mayor durabilidad de la mezcla asfáltica. Asimismo, algunos aditivos proveen mejoras en la resistencia ante el daño por humedad (Daly, 2017). Las principales razones para el uso de aditivos son:

- Aumentar la resistencia de la mezcla.
- Aumentar la elasticidad de la mezcla para minimizar el agrietamiento.
- Mejorar la resistencia a la fatiga de la mezcla.
- Mejorar la unión entre el asfalto y el agregado para reducir la falta de desprendimiento o la sensibilidad a la humedad.
- Mejorar la resistencia a la abrasión para reducir los aglutinantes de asfalto.

- Mejorar la resistencia al envejecimiento por oxidación.
- Reducir el espesor estructural del pavimento.
- Reducir los costos del ciclo de vida de los pavimentos.
- Mejorar el rendimiento general de los pavimentos (Ávila, Velasco, 2021).

La selección del aditivo asfáltico depende de varios factores, considerando las necesidades específicas del proyecto, las condiciones de la localización y las propiedades deseadas en el pavimento. Es necesario llevar a cabo un análisis detallado de las especificaciones del proyecto, consultando a ingenieros y especialistas para garantizar la durabilidad de la mezcla asfáltica. La decisión del uso de un aditivo depende del clima, humedad del aire, propiedades del suelo, tipo y regularidad del tráfico y costos (Ávila, Velasco, 2021).

K. Tipos de aditivos

1. Polímeros

Son moléculas formadas por la unión de cientos de miles de moléculas pequeñas llamadas monómeros. La mayor parte de los polímeros son materiales sintéticos con una gran variedad de aplicaciones. En general, los polímeros tienen una excelente resistencia mecánica debido a las grandes cadenas poliméricas que se atraen entre sí por las fuerzas intermoleculares de Van der Waals. Los polímeros se pueden diseñar para obtener una amplia gama de propiedades físicas y se pueden dividir en tres categorías generales: fibras, plásticos (plastómeros) y gomas (elastómeros):

- Elastómeros (gomas): son polímeros amorfos, es decir que no tienen una forma determinada y son moldeados según las necesidades de la producción. Cuando están a temperatura ambiente, los elastómeros son blandos y fácilmente deformables. La estructura molecular de los elastómeros está formada por largas cadenas de monómeros y enlaces que están enredados cuando no se le somete a ninguna presión. Los elastómeros más utilizados son los cauchos naturales como el estireno-butadieno-estireno (SBS), cauchos sintéticos derivados del petróleo y el grano de llanta reciclado y triturado (GCR) (Ávila, Velasco, 2021).
- Grano de caucho reciclado (GCR): con las reservas de neumáticos de desecho en continuo crecimiento, en muchas partes del mundo se ha decidido transformar este material como aditivo de mezclas asfálticas. El caucho produce mezclas más resistentes a los fenómenos de fatiga y ahuellamiento, aumenta la resistencia al envejecimiento, oxidación del asfalto y a bajas temperaturas para evitar agrietamiento. Finalmente, al ser utilizado como aditivo disminuye el impacto negativo que tiene este material en el entorno (Ávila, Velasco, 2021).
- Plastómeros (plásticos): el uso de plastómeros en la modificación del asfalto es limitada. El polietileno, el plástico más común, se puede utilizar en tres formas:
 - Polietileno de alta densidad (LDPE).

- Polietileno lineal de baja densidad (HDPE).
- Plástico común. (LLDPE) (Ávila, Velasco, 2021).

2. Agentes antideslizantes (anti-stripping)

Los aditivos “anti-stripping”, se utilizan para minimizar o eliminar el deterioro provocado por el agua en el interior de la mezcla asfáltica. Los aditivos antideslizantes actúan en la mezcla reduciendo la tensión superficial de esta, y de este modo mejorando la adhesión entre el ligante y el agregado. La composición química de la mayoría de los agentes anti-stripping producidos comercialmente consiste principalmente en aminas. Entre estos aditivos se encuentran: amidoaminas, imidazolinas, poliaminas, cal hidratada, organometálicos, y ácidos. La cal hidratada resulta de la calcinación de rocas calizas y reduce el índice de envejecimiento del pavimento, retardando la oxidación de muchos tipos de asfaltos al reaccionar con las moléculas altamente polares del asfalto. Se utiliza con mayor frecuencia porque ayudan a contrarrestar el daño por humedad, permite que el pavimento se mantenga flexible a largo plazo e impide el agrietamiento que se da en el pavimento por envejecimiento (Ávila, Velasco, 2021).

3. Fibras

Son materiales naturales o sintéticos, que tienen como fin mejorar la mezcla asfáltica, en la actualidad existe una amplia variedad de ellas, cada tipo de fibra mejora alguna propiedad de la mezcla como, se muestra a continuación:

- Fibras de poliéster mejoran el esfuerzo a tensión y la susceptibilidad a la humedad.
- Fibras acrílicas dan resistencia a la disgregación por el efecto abrasivo producido por el tráfico, son buenas para minimizar la propagación de grietas.
- Fibras de polipropileno controlan el agrietamiento en los pavimentos (Ávila, Velasco, 2021).

L. UNOBOND®

El aditivo empleado en este trabajo es el UNOBOND® propiedad del Departamento UNO Bitumen de la empresa UNO Guatemala. Este consiste en un organosilano de segunda generación, reactivo a temperatura ambiente, soluble en agua y asfalto y estable hidrolíticamente. Proporciona una mayor cobertura de los agregados con el asfalto, al mismo tiempo que mejora la compactación, incluso a bajas temperaturas. Las ventajas principales de este aditivo consisten en la reducción a la susceptibilidad al agua y la mejora de la cohesión entre agregado y asfalto en una mezcla asfáltica, es decir, es un agente promotor de adhesividad (UNO Bitumen, 2015).

Con respecto a sus características, es un líquido amarillo pálido inodoro. Es inflamable a 80°C y es estable durante 30 días aproximadamente en un tanque a 180°C y hasta 24 meses almacenado en una zona cubierta lejos de la luz solar directa entre 5 y 45°C. Asimismo, es soluble en agua y, a 25°C, su densidad es de 1.01 g/ml y su viscosidad es menor a 300 cP (UNO Bitumen, 2015). El comportamiento funcional de este aditivo difiere según el momento en la secuencia de fabricación:

- Asfalto antes del mezclado: la adición de UNOBOND® en el asfalto produce una micelación de los asfaltenos, que quedan recubiertos por los organosilanos. Esto se debe a que la molécula del aditivo tiene una parte orgánica extremadamente compatible con los maltenos y una parte polar. Cuando se micelan los asfaltenos, se reduce la atracción entre los mismos y se mejora la trabajabilidad del asfalto (mayor fluidez y facilidad de recubrimiento), que antes estaba limitada por la atracción polar entre los asfaltenos (UNO Bitumen, 2015).
- En contacto con el agregado: a nivel molecular, el UNOBOND® reacciona con la superficie de los agregados, formando enlaces fuertes tipo siloxano (Si-O-Si). Esto provoca una modificación de los agregados, ya que el aditivo forma una capa hidrófoba en los agregados, convirtiéndolos en superficies apolares y, por ende, mejorando su compatibilidad y adhesividad al asfalto. De esta manera, el desprendimiento del asfalto será prácticamente nulo (UNO Bitumen, 2015).

V. ANTECEDENTES

En el 2021, una investigación llevada a cabo en la Universidad Católica de Colombia evaluó distintos aditivos en una mezcla densa en caliente de tamaño máximo nominal de 19 mm (MDC-19). Los aditivos seleccionados como modificadores de las mezclas bituminosas fueron: cal hidratada (CH), fibra de coco (FC), fibra de polipropileno (PP) y grano de caucho reciclado (GCR). Los porcentajes de cada aditivo se establecieron con base en la revisión literaria previamente realizada. Un total de 72 probetas de asfalto fueron fabricadas; 12 para determinar el contenido de asfalto óptimo empleando la metodología Marshall y los 60 restantes para la evaluación experimental de las mezclas bituminosas (Ávila, Velasco, 2021).

Los ensayos experimentales realizados fueron: Ensayo Marshall, Ensayo de tracción indirecta y ensayo de pérdida de partículas; estos siguiendo la normativa INVIAS. De los resultados experimentales, se observó que la mezcla modificada con CH fue el aditivo más favorable y prometedor en la mezcla asfáltica densa en caliente, esto debido a que presenta mejoras en el comportamiento mecánico ya que tiene una mayor resistencia a la deformación además de una buena estabilidad y un menor daño por humedad, esto resulta una buena alternativa para el desempeño general en la mezcla. Finalmente, recomendaron ampliar el espectro de dosificaciones de los aditivos, ya que únicamente se empleó tasa de dosificación de 0.05% en peso de mezcla asfáltica (0.5 kg de fibras por 1000 kg de mezcla asfáltica) antes de añadir asfalto (Ávila, Velasco, 2021).

Otro estudio realizado en el 2016 en la Universidad Piloto de Colombia examina los resultados de modificar asfalto tipo 80-100 con lignina, un polímero natural de bajo costo que se encuentra en la madera y proporciona soporte estructural, impermeabilidad y resistencia a la degradación. Se analizaron concentraciones de lignina de 5%, 10%, 15% y 20% en la mezcla asfáltica que se sometió a pruebas de RTFO, penetración y punto de ablandamiento. Según los resultados, un 20% de lignina endurece el material, lo que afecta negativamente sus propiedades mecánicas, especialmente en climas fríos. Además, el porcentaje de sustitución ideal es del 15% porque mejora el comportamiento reológico del asfalto, aumentando su consistencia y su punto de ablandamiento. Finalmente, La modificación del asfalto con lignina no solo mejora las propiedades técnicas, sino que también proporciona una forma de reutilizar este desecho, lo que beneficia a una variedad de industrias (Rodríguez, *et al.*, 2016).

Por otro lado, con respecto a la caracterización química del asfalto, Guatemala analiza el crudo y asfaltos por medio de sus propiedades físicas. Se encuentra en fase de investigación y desarrollo el uso de técnicas químicas analíticas en el análisis de asfaltos. Sin embargo, una tesis realizada en la Universidad del Valle de Guatemala en 2018 caracterizó de bitúmenes asfálticos vírgenes y modificados, utilizando la técnica de Espectroscopía Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR). Como modificadores se utilizó poliuretano, un terpolímero elastomérico reactivo (TER), aceite crudo de palma (ACP) y estearina. Se trabajó con muestras de asfaltos de tres viscosidades distintas; AC20, AC30 y AC40. La técnica FTIR propuso un análisis cualitativo capaz de identificar si un asfalto modificado

presenta las mismas características en diferentes lotes de producción. Al final consistió en una herramienta que complementa, junto al análisis de las propiedades físicas de un asfalto, la realización en menor tiempo del control de calidad de asfaltos modificados (Leiva, 2018).

Los asfaltos vírgenes presentaron diferencias en el rango de sus espectros IR entre 1800 cm^{-1} y 600 cm^{-1} que permiten su identificación. El pico característico en los espectros IR de asfaltos modificados está situado en aproximadamente 1740 cm^{-1} proveniente del grupo carbonilo de los modificadores agregados (C=O). El incremento de este pico indicó cualitativamente el porcentaje de modificador presente en el asfalto. Asimismo, las propiedades físicas variaron de manera no lineal y no fue posible relacionarlas con los picos característicos en los espectros IR de las muestras, pero se observó que los asfaltos modificados con ACP son manipulables a menores temperaturas y su pérdida de solventes se estima será más lenta por la presencia del aceite (Leiva, 2018).

De la misma manera, en la Universidad de Costa Rica se realizó una investigación con el objetivo de evaluar el proceso de oxidación de los asfaltos por medio de la espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) para evaluar la formación de grupos carbonilos en el asfalto, lo que demostró que había oxidación. Para simular las condiciones de producción de mezclas asfálticas, se sometió el asfalto a procesos de envejecimiento en una variedad de condiciones y temperaturas. El estudio sugiere que los valores obtenidos en el FTIR no proporcionan una decisión clara para asfaltos originales y envejecidos en RTFO, a menos que el asfalto esté significativamente oxidado, en cuyo caso los resultados del FTIR son concluyentes. Además, se menciona que el cálculo de sulfóxidos y carbonilos en el asfalto a través del área del pico generado por el FTIR es un método que podría mejorarse para obtener mediciones más sensibles y precisas (Villegas, *et al.*, 2015).

Por último, las normas ASTM (American Society for Testing and Materials) son un conjunto de estándares técnicos utilizados en la industria para establecer criterios y procedimientos de prueba uniformes, las cuales se utilizan de manera local. En el caso del asfalto empleado en este trabajo, la clasificación de los diferentes tipos se rige por la norma ASTM D3381/D3381M – 09^a. El tipo AC30 se refiere a un asfalto caliente modificado con polímeros, que se utiliza comúnmente en la construcción de carreteras y pavimentos. En este trabajo se empleará el asfalto tipo AC30 del proveedor, la cual está regida por las normas ASTM pertinentes para la clasificación de este tipo, la cual se encuentra en la sección E de Anexos.

VI. METODOLOGÍA

A. Equipo

A continuación, se listan los equipos empleados en la experimentación del presente trabajo. Las imágenes de cada uno se muestran en la sección D de Anexos.

Cuadro 1. Equipos

Equipo	Marca	Rango	Incertidumbre
Penetrómetro	Precision	0 – 379 dmm	± 0.5 dmm
Viscosímetro dinámico	Brookfield	15 – 2,000,000 cP	± 0.01 cP
Horno rotatorio de película delgada	Cox & Sons	20 – 200 °C	± 0.1 °C
Estufa	Cimarec+	0 – 120 °C	± 0.1 °C
Baño térmico	Fisher Scientific	0 – 100 °C	± 0.1 °C
Horno	Fisher Scientific	0 – 210 °C	± 0.1 °C
Balanza	Mettler Toledo	0.5 – 5,100 g	± 0.01 g
Espectrofotómetro de haz infrarrojo con Transformada de Fourier	Perkin Elmer	4,000 – 400 cm ⁻¹ / 0 – 100 %T y %Abs	± 1cm ⁻¹
Marco de carga MS-398 con mordaza Lottman	Gilson, Karol-Warner	0.02 – 2.0 in/min; 10,000 lb	± 1 lb

B. Reactivos

Cuadro 2. Propiedades de los reactivos

Reactivo	Fórmula química	Peso molecular (g/mol)	Punto de ebullición (°C)	Punto de fusión (°C)	Densidad (g/cm ³)	Solubilidad
Etanol absoluto	C ₂ H ₆ O	46.07	78.3	-114.5	0.79	Conforme
N heptano	C ₇ H ₁₆	100.21	97 a 98	-91	0.68 a 15°C	0.05 g/L
Kerosina	N/A	170	N/A	- 47	0.81	Insoluble en agua

(Merck Millipore, 2023)

Cuadro 3. Toxicidades de los reactivos

Reactivo	Apariencia física	Toxicidades			Desecho
		Por ingestión	Por inhalación	Por absorción	
Etanol absoluto	Líquido incoloro con olor a alcohol	Vómitos, dolor abdominal; enjuagar la boca	Somnolencia, vértigo; proporcionar aire fresco	Irritación ocular grave; enjuagar con agua por varios minutos.	Conservar en recipientes cerrados alejado de toda llama o fuente de chispas
N heptano	Líquido incoloro con olor fuerte	Puede ser mortal, llamar inmediatamente a un médico	Puede provocar somnolencia, proporcionar aire fresco	Irritación cutánea, quitar la ropa contaminada y enjuagar la piel con agua	Conservar en un recipiente herméticamente cerrado alejado del calor
Kerosina	Líquido incoloro con olor a gasolina	Irritación, sensación de quemadura en la boca; enjuagar la boca	Irritación nasal, dolor de cabeza; proporcionar aire fresco	Irritación ocular y de la piel; lavar con jabón y abundante agua	Conservar en contenedores cerrados en un lugar fresco, ventilado y alejado de fuentes de calor o ignición

(Merck Millipore, 2023)

C. Materiales

A continuación, se lista la cristalería y materiales empleados.

Cuadro 4. Cristalería y materiales

Cristalería/Materiales	Marca	Capacidad	Incertidumbre
Beaker	Pyrex	800 ml	± 0.05 ml
Vaso para horno RTFO	Gilson Company, Inc.	N/A	N/A
Cronómetro	Thomas Scientific	N/A	± 0.01 s
Termómetro de bulbo	Kessler	N/A	± 0.1 °C

D. Metodología

1. Elección de las concentraciones de aditivo

- i. Revisar historial de las concentraciones de aditivo utilizadas por los clientes de la empresa en sus diseños de mezclas asfálticas.
- ii. Elegir las tres concentraciones más utilizadas por los clientes: 0.03%, 0.05% y 0.08% (m/m).

2. Caracterización físicoquímica del asfalto AC30

- i. Caracterizar una parte del ligante bituminoso AC30 en condiciones originales con las siguientes pruebas:
 - a. Penetración, según el procedimiento extraído de la norma ASTM D5 en la sección E de Anexos:
 - Verificar que la aguja esté limpia; de lo contrario, limpiar con kerosina, secar e insertar en el penetrómetro.
 - Llenar el recipiente respectivo con asfalto hasta llegar a la línea señalada y colocar el recipiente en un baño de agua a 25°C por 1 h.
 - Introducir el recipiente de la muestra directamente sobre el contenedor del soporte sumergido del penetrómetro. Mantener el recipiente de la muestra completamente cubierto con la misma agua del baño a 25°C.
 - Con un indicador de nivel, verificar que el aparato esté nivelado y llevar el indicador a cero.
 - Colocar la aguja bajándola lentamente hasta que la punta esté en contacto con su imagen reflejada en la superficie de la muestra.
 - Apretar el botón para soltar rápidamente el soporte de la aguja y ajustar el instrumento para medir la distancia penetrada en décimas de milímetro. Ignorar el resultado si el contenedor se mueve.
 - Realizar cada una de las tres determinaciones en puntos alrededor del centro del recipiente.
 - b. Viscosidad a 60°C, según el procedimiento extraído de la norma ASTM D4402 en la sección D en Anexos:

- Encender el instrumento y permitir que se caliente a 60°C.
 - Ajustar el controlador de la temperatura de prueba deseada y setear la velocidad a 0.8 rpm.
 - Precalentar la cámara de muestra y la geometría de medición del aparato seleccionado hasta alcanzar el equilibrio de temperatura durante al menos 15 minutos.
 - Agregar el volumen de muestra especificado por el fabricante a la cámara de muestra.
 - Insertar la geometría de medición en el líquido de la cámara y acoplar al viscosímetro.
 - Llevar la muestra a la temperatura deseada dentro de los 30 minutos de margen y permitir que se equilibre por mínimo 10 minutos antes de comenzar la medición. Anotar la viscosidad mostrada automáticamente en la pantalla.
- c. Punto de ablandamiento, según el procedimiento extraído de la norma ASTM D36 en la sección E Anexos:
- Engrasar una placa o superficie plana de un recipiente, colocar los dos anillos y verter la muestra hasta llenar completamente. Dejar enfriar y engrasar los anillos con una espátula caliente para aplanar la superficie.
 - Colocar el aparato (soporte, bolas y guías de centrado) en un baño de agua a 4°C por 15 minutos. Cuando esté temperado, sacar del baño y ensamblar con los anillos de muestras y el termómetro en posición.
 - Colocar con pinzas las dos bolas sobre cada guía de centrado.
 - Calentar el baño desde abajo para que la temperatura indicada por el termómetro suba a un ritmo uniforme de 5°C. La variación máxima permisible para cualquier período de 1 minuto después de los primeros 3 minutos debe ser de $\pm 0.5^\circ\text{C}$.
 - Registrar para cada aro y bola la temperatura indicada por el termómetro en el instante en que la muestra que rodea la bola toca la placa inferior. Repetir la prueba si la diferencia entre ambas temperaturas excede 1.2°C.
- d. Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR):
- Realizar una corrida de fondo sin muestra para calibrar el equipo.
 - Limpiar el lente de emisión de luz infrarroja con etanol absoluto y papel Kimwipe.
 - Colocar aproximadamente 1 cm³ de muestra con una espátula en el sensor del espectrofotómetro.
 - Remover la muestra y limpiar el sensor con etanol absoluto y n-heptano.
 - Obtener el espectro IR con el software Perkin Elmer Spectrum.
 - Realizar el mismo procedimiento para el resto de los ensayos. Para validar los resultados, verificar que los espectros obtenidos para una muestra no difieran significativamente entre sí.
- ii. Someter la otra parte del ligante bituminoso AC30 a la prueba de Película Delgada en Horno Rotatorio (RTFOT), según el procedimiento extraído de la norma ASTM D2872 en la sección E de Anexos:

- Dentro del horno, ajustar el orificio de salida del aire de manera que el chorro de aire sople horizontalmente en el arco central de la abertura. Colocar el termómetro y nivelar el horno.
 - Precalear el horno por un mínimo de 16 horas antes de la prueba con el termostato de control ajustado a la configuración empleada durante la experimentación.
 - Verificar que la muestra esté libre de agua y calentar en su recipiente con una tapadera ajustada holgadamente dentro de un horno que no exceda los 150°C para garantizar que esté completamente fluida.
 - Revolver la muestra manualmente evitando incorporar burbujas de aire.
 - Verter 35 ± 0.5 g de la muestra en cada recipiente de vidrio requeridos, esparciendo en las paredes del vaso para formar una película delgada.
 - Colocar los vasos con asfalto en el carro del horno de modo que esté balanceado, llenando espacios no utilizados con contenedores vacíos.
 - Cerrar la puerta y girar el conjunto del carro a 15 ± 0.2 rev/min durante 85 minutos.
 - Si la temperatura de prueba de $163 \pm 0.5^\circ\text{C}$ no se alcanza dentro de los primeros 10 minutos, la prueba debe de ser interrumpida.
 - Al finalizar el período de prueba, retirar cada vaso de muestra y transferir su contenido a los recipientes respectivos para su análisis. Realizar la transferencia vertiendo cualquier residuo que fluya libremente del recipiente de muestra de vidrio y luego raspando la mayor cantidad posible del residuo restante.
 - Agitar suavemente el recipiente de recogida para homogenizar el residuo son introducir aire en él.
- iii. Caracterizar este asfalto en condiciones envejecidas con las siguientes pruebas:
- a. Penetración, según el procedimiento descrito en la sección D, 2, i, inciso a de la Metodología.
 - b. Viscosidad a 60°C, según el procedimiento descrito en la sección D, 2, i, inciso b de la Metodología.
 - c. Punto de ablandamiento, según el procedimiento descrito en la sección D, 2, i, inciso c de la Metodología.
 - d. FTIR según el procedimiento descrito en la sección D, 2, i, inciso d de la Metodología.

3. Análisis de aditivo en mezcla asfáltica

- i. Con los agregados seleccionados, realizar la mezcla asfáltica con proporciones definidas.
- ii. Realizar el análisis de hervido para el ligante bituminoso AC30 de línea base (0.00% de aditivo) y con aditivo a las tres concentraciones elegidas (0.03%, 0.05% y 0.08%), según el procedimiento extraído de la norma ASTM D3625 en la sección E de Anexos:
 - Verter agua destilada en un recipiente limpio de manera que el recipiente esté aproximadamente lleno hasta la mitad. Calentar hasta que hierva entre 85 y 95°C para controlar la ebullición y evitar salpicaduras.
 - Con un implemento apropiado, colocar aproximadamente 250 g (0.5 lb) de la mezcla de agregados revestidos con asfalto en el agua hirviendo mientras el recipiente está expuesto a la fuente de calor.
 - Mantener la ebullición durante $10 \text{ min} \pm 15 \text{ s}$. Evitar la manipulación excesiva de la mezcla de áridos bituminosos revestidos. Al cabo de 10 min, retirar el recipiente de la fuente de calor.

- Quitar cualquier asfalto libre de la superficie del agua para evitar que se vuelva a aplicar la capa. Enfriar a temperatura ambiente, decantar el agua y vaciar la mezcla húmeda sobre una toalla de papel blanca.
 - Observar visualmente el agregado (grueso y fino) para el recubrimiento bituminoso retenido. Cualquier área delgada, marrón y translúcida debe considerarse completamente recubierta. Las observaciones visuales se realizan inmediatamente después de colocar la muestra sobre la toalla de papel blanca.
- iii. Realizar el análisis de Relación en la Resistencia a la Tensión Indirecta (TSR) para el ligante bituminoso AC30 de línea base (0.00% de aditivo) y con el porcentaje de aditivo que maximiza la adherencia entre el agregado y asfalto de acuerdo con el análisis de hervido realizado anteriormente, según el procedimiento extraído de la norma ASTM D4867 en la sección E de Anexos:
- Compactar un total de 6 muestras a 6 – 8% de espacios de aire, 3 sujetas a un acondicionamiento de humedad y 3 sin acondicionar
 - Acondicionar 3 muestras con 50 – 80% de saturación al vacío por 3 a 5 minutos, envolver con plástico, almacenar en una bolsa cerrada con 10 ml de agua y colocar dentro de un freezer por 16 a 20 h. Remover el envoltorio y colocar en un baño térmico a 60°C por 24 h. Transferir a otro baño térmico a 25°C por 2 h, verificar que la temperatura se mantenga.
 - Colocar las 3 muestras sin acondicionamiento dentro de una bolsa cerrada y sumergir dentro del baño térmico a 25°C por 2 h.
 - Medir la Resistencia a la tracción indirecta máxima con la mordaza respectiva y obtener el promedio.

4. Caracterización fisicoquímica del asfalto AC30 con las tres dosificaciones de aditivo

- i. Para una parte del ligante bituminoso AC30 de línea base y con aditivo a las tres concentraciones elegidas, caracterizar con las siguientes pruebas en condiciones originales:
- a. Penetración, según el procedimiento descrito en la sección D, 2, i, inciso a de la Metodología.
 - b. Viscosidad a 60°C, según el procedimiento descrito en la sección D, 2, i, inciso b de la Metodología.
 - c. Punto de ablandamiento, según el procedimiento descrito en la sección D, 2, i, inciso c de la Metodología.
 - d. FTIR según el procedimiento descrito en la sección D, 2, i, inciso d de la Metodología.
- ii. Someter la otra parte del ligante bituminoso AC30 a la prueba RTFOT, según el procedimiento descrito en la sección D, 2, inciso ii de la Metodología.
- iii. Caracterizar este asfalto en condiciones envejecidas con las siguientes pruebas:
- a. Penetración, según el procedimiento descrito en la sección D, 2, i, inciso a de la Metodología.
 - b. Viscosidad de Brookfield, según el procedimiento descrito en la sección D, 2, i, inciso b de la Metodología.
 - c. Punto de ablandamiento, según el procedimiento descrito en la sección D, 2, i, inciso c de la Metodología.
 - d. FTIR según el procedimiento descrito en la sección D, 2, i, inciso d de la Metodología.

VII. RESULTADOS

A. Caracterización fisicoquímica del asfalto AC30

Cuadro 5. Resultados promedio de los ensayos de penetración, viscosidad y punto de ablandamiento para asfalto AC30 original y envejecido

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

El cuadro anterior muestra los resultados promedio de los ensayos de penetración, viscosidad a 60°C y punto de ablandamiento para el asfalto AC30 en condiciones originales y envejecidas. Los análisis fueron realizados en el laboratorio de UNO Bitumen® en Puerto Cortés, Honduras, bajo condiciones de temperatura de 25°C y presión de 1.01 bar, de acuerdo con las normas ASTM D5-06, ASTM D4402-02, ASTM D36-95 y ASTM D2872-97. Se utilizaron los valores mostrados en los Cuadros 15 al 20 y se siguió el procedimiento según el Cálculo 6.

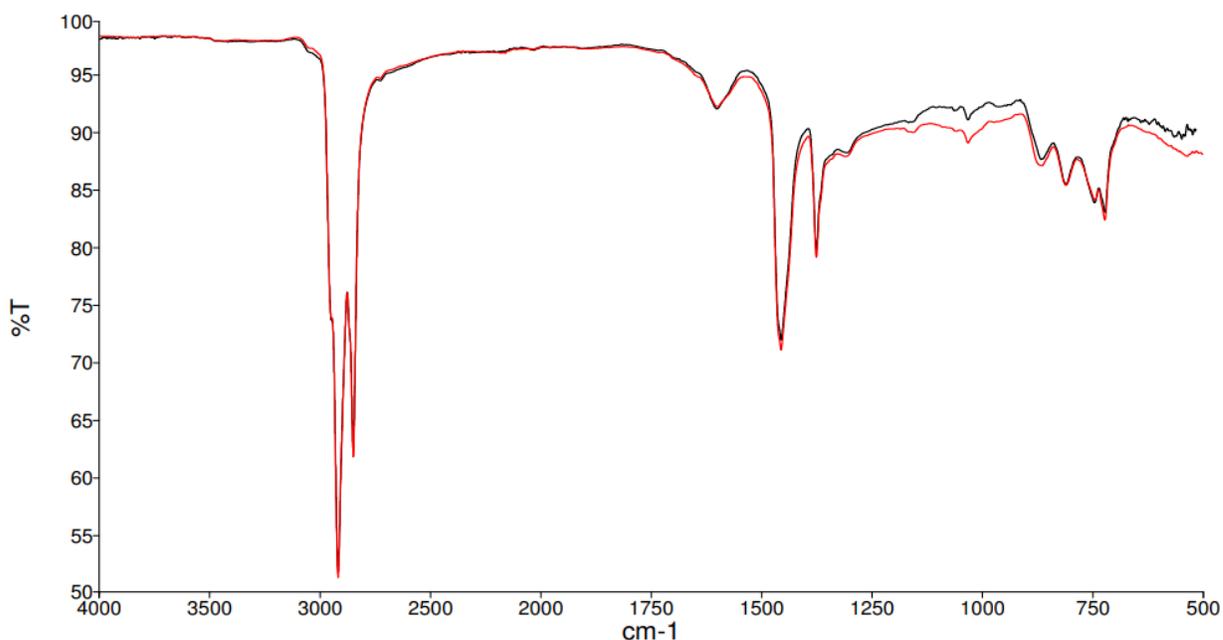
Cuadro 6. Presencia de los picos característicos de los espectros IR obtenidos para el asfalto AC30 en condiciones originales y envejecidas

Tipo de vibración y estructura	Intervalo de frecuencia (cm ⁻¹)	Presencia en el asfalto AC30 en condiciones originales		Presencia en el asfalto AC30 en condiciones envejecidas	
		POSITIVA	NEGATIVA	POSITIVA	NEGATIVA
C – H tensión, alcano	3,000 – 2,840	X		X	
C = C tensión, alqueno	1,600	X		X	
C – H flexión, grupo –CH ₃	1,470 – 1,370	X		X	
C – O tensión, alquil aril éter	1,275 – 1020	X		X	
S = O tensión, sulfóxido	1,070 – 1,030	X		X	
C – H flexión; 1,2,4-trisustituido	880 ± 20	X		X	
C – H flexión; 1,4-disustituido	810 ± 20	X		X	
C – H flexión, benceno monosustituido	750 ± 20	X		X	
C – H flexión, derivado del benceno	700 ± 20	X		X	
C – H flexión, benceno sustituido	500		X	X	

(Merck, 2023)

El cuadro anterior muestra los resultados del análisis de espectroscopía infrarroja con Transformada de Fourier para el asfalto AC30 en condiciones originales y envejecidas. Los análisis fueron realizados en el laboratorio de la Universidad del Valle de Guatemala, bajo condiciones de temperatura de 25°C y presión de 1 bar. Los espectros individuales obtenidos se muestran en la Sección A de Anexos.

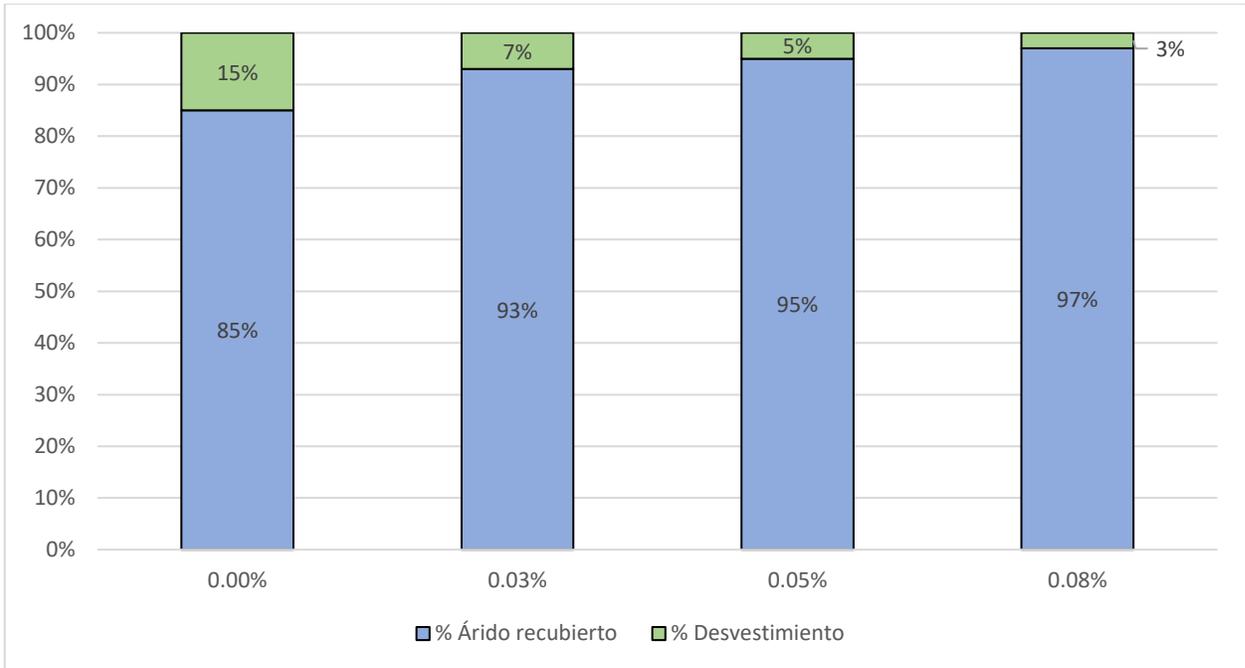
Figura 5. Comparación de espectros IR del asfalto AC30 en condiciones originales y envejecidas



En la figura anterior se muestran los espectros IR sobrepuestos del asfalto AC30 en condiciones originales y envejecidas. Ambos se obtuvieron con el Software PerkinElmer Spectrum, versión 10.5.4, en el laboratorio de la Universidad del Valle de Guatemala. La línea negra indica el espectro del asfalto en condiciones originales, mientras que la roja indica el espectro del asfalto en condiciones envejecidas. Finalmente, %T en el eje y se refiere al porcentaje de transmitancia en un rango de 0% a 100% y cm^{-1} en el eje x se refiere al rango de frecuencia de vibraciones moleculares.

B. Análisis de aditivo en la mezcla asfáltica

Figura 6. Porcentajes de desvestimiento y árido recubierto para el asfalto AC30 con las tres concentraciones de aditivo analizadas



En la figura anterior se muestran los resultados obtenidos del análisis de hervido de acuerdo con la norma para el asfalto AC30 con las dosificaciones de aditivo elegidas de 0.03%, 0.05% y 0.08% (m/m). El análisis se realizó en el laboratorio de la empresa Serpin bajo condiciones de temperatura de 25°C y presión de 1.01 bar, de acuerdo con la norma ASTM D3625-96.

Cuadro 7. 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

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

En el cuadro anterior se muestran los resultados obtenidos del análisis de hervido de acuerdo con la norma para el asfalto AC30 sin aditivo y con la dosificación de aditivo de 0.08% (m/m) que maximiza la adherencia entre las partículas del agregado pétreo en la mezcla asfáltica de acuerdo con el análisis de hervido realizado anteriormente. El análisis se realizó en el laboratorio de la empresa Serpin bajo condiciones de temperatura de 25°C y presión de 1.01 bar, de acuerdo con la norma ASTM D 4867/D 4867M-09. Se utilizaron los datos mostrados en la Sección E de Anexos.

C. Caracterización fisicoquímica del asfalto AC30 con las tres dosificaciones de aditivo

Cuadro 8. Resultados promedio de los ensayos de penetración, viscosidad y punto de ablandamiento para asfalto AC30 original con las tres concentraciones de aditivo analizadas

Ensayo	Aditivo al 0.03% (m/m)	Aditivo al 0.05% (m/m)	Aditivo al 0.08% (m/m)
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

El cuadro anterior muestra los resultados promedio de los ensayos de penetración, viscosidad a 60°C y punto de ablandamiento para el asfalto AC30 en condiciones originales con las dosificaciones de aditivo elegidas de 0.03%, 0.05% y 0.08% (m/m). Los análisis fueron realizados en el laboratorio de UNO Bitumen®, bajo condiciones de temperatura de 25°C y presión de 1.01 bar, de acuerdo con las normas ASTM D5–06, ASTM D4402–02, ASTM D36–95 y ASTM D2872–97. Se utilizaron los valores mostrados en los Cuadros 15, 17 y 19 y se siguió el procedimiento según el Cálculo 8.

Cuadro 9. Resultados promedio de los ensayos de penetración, viscosidad y punto de ablandamiento para asfalto AC30 envejecido con las tres concentraciones de aditivo analizadas

Ensayo	Aditivo al 0.03% (m/m)	Aditivo al 0.05% (m/m)	Aditivo al 0.08% (m/m)
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

El cuadro anterior muestra los resultados promedio de los ensayos de penetración, viscosidad a 60°C y punto de ablandamiento para el asfalto AC30 en condiciones envejecidas con las dosificaciones de aditivo elegidas de 0.03%, 0.05% y 0.08% (m/m). Los análisis fueron realizados en el laboratorio de UNO Bitumen®, bajo condiciones de temperatura de 25°C y presión de 1.01 bar, de acuerdo con las normas ASTM D5–06, ASTM D4402–02, ASTM D36–95 y ASTM D2872–97. Se utilizaron los valores mostrados en los Cuadros 16, 18 y 20 y se siguió el procedimiento según el Cálculo 8.

Figura 7. Diagrama de caja y bigotes para el ensayo de penetración del asfalto AC30 en condiciones originales

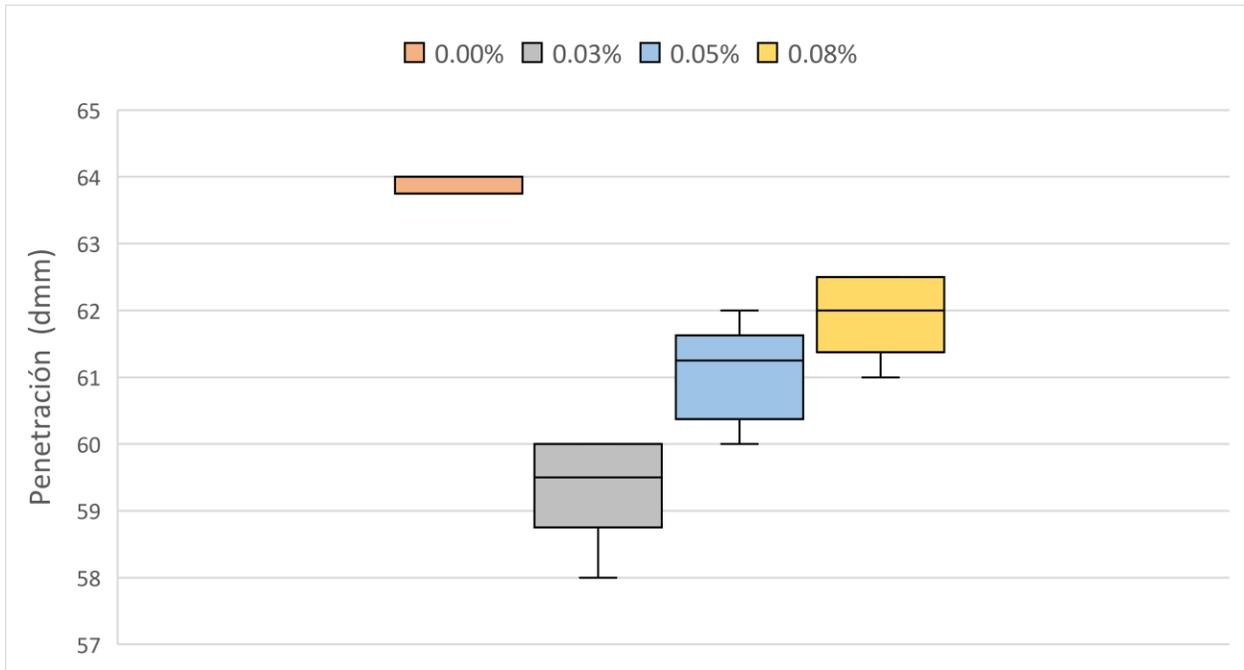


Figura 8. Diagrama de caja y bigotes para el ensayo de penetración del asfalto AC30 en condiciones envejecidas

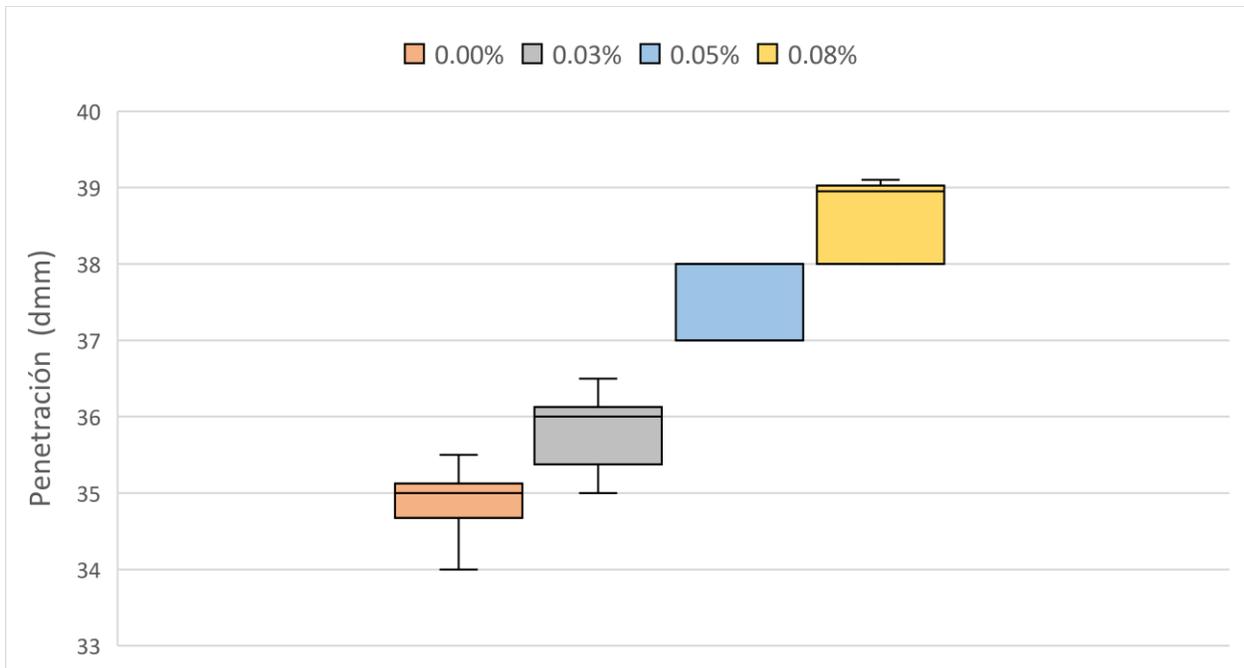


Figura 9. Diagrama de caja y bigotes para el ensayo de viscosidad a 60°C del asfalto AC30 en condiciones originales

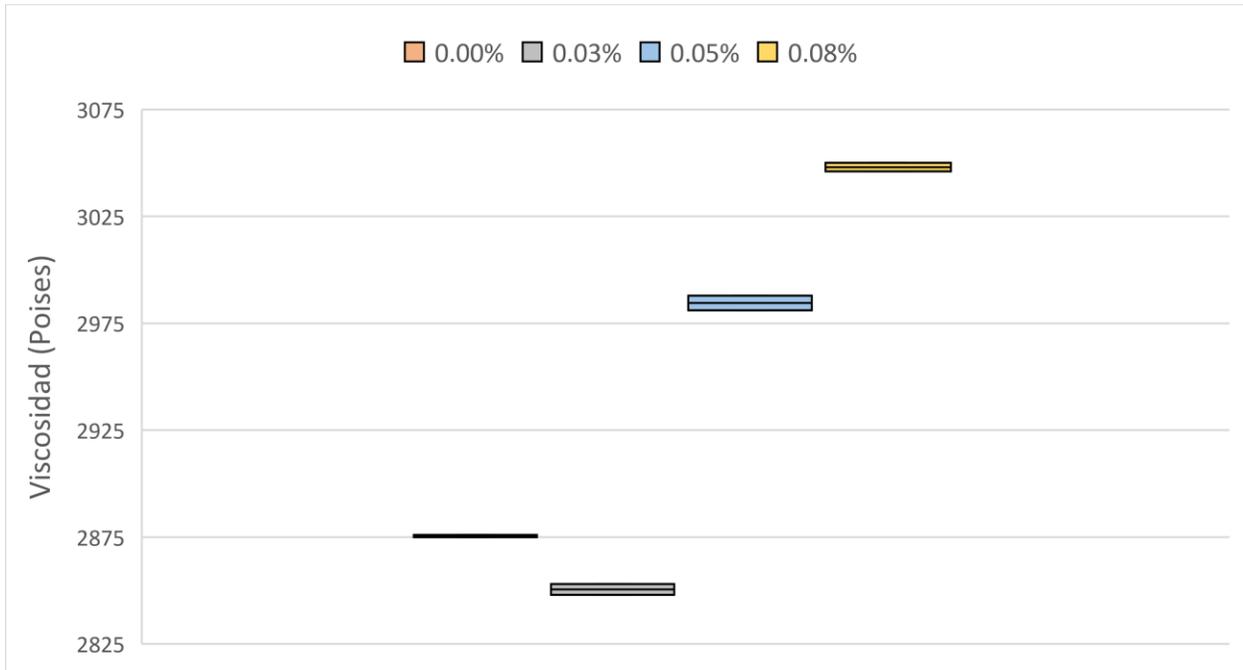


Figura 10. Diagrama de caja y bigotes para el ensayo de viscosidad a 60°C del asfalto AC30 en condiciones envejecidas

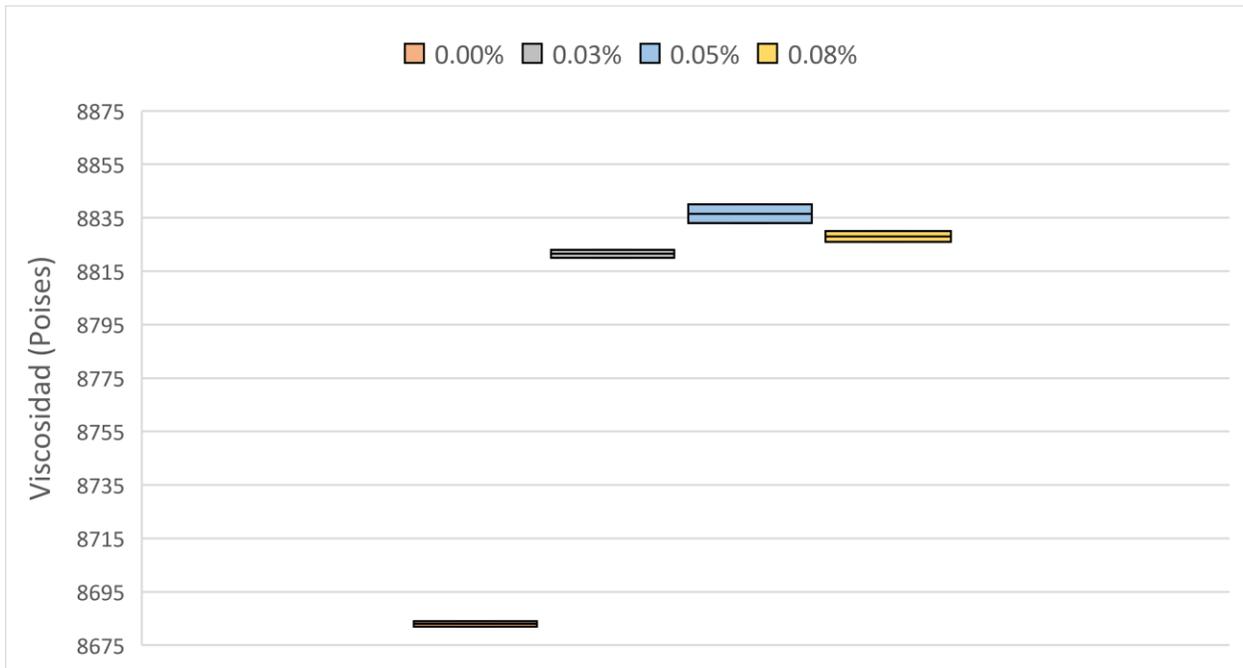


Figura 11. Diagrama de caja y bigotes para el ensayo de punto de ablandamiento del asfalto AC30 en condiciones originales

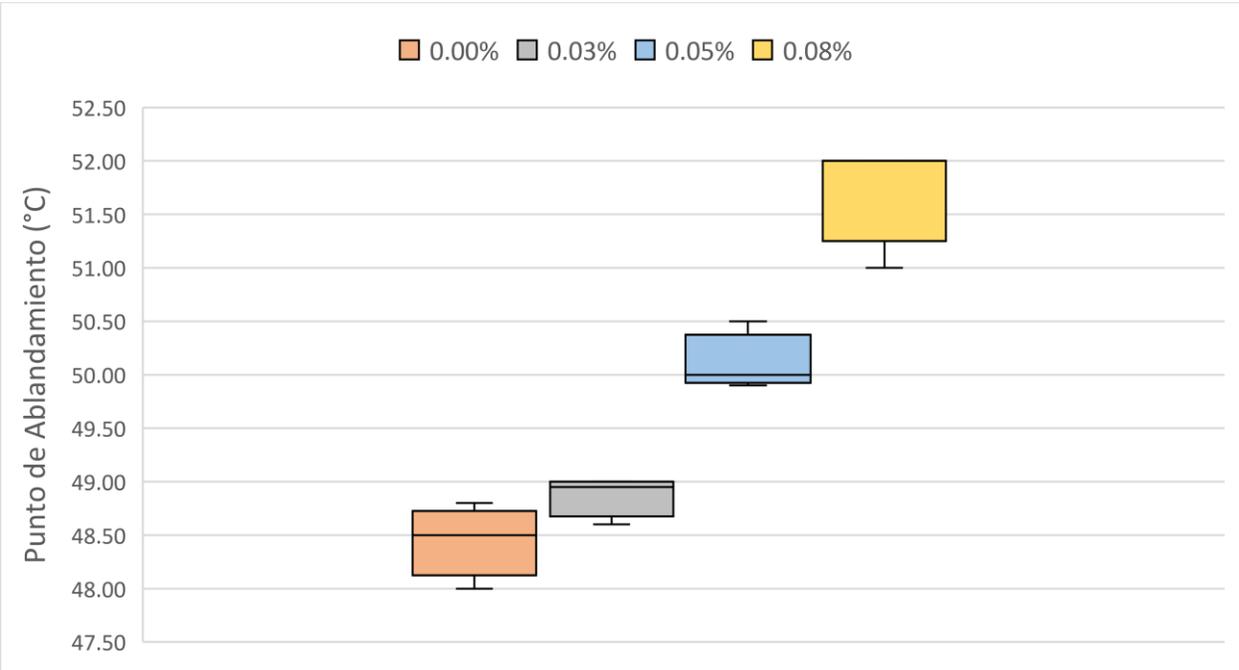
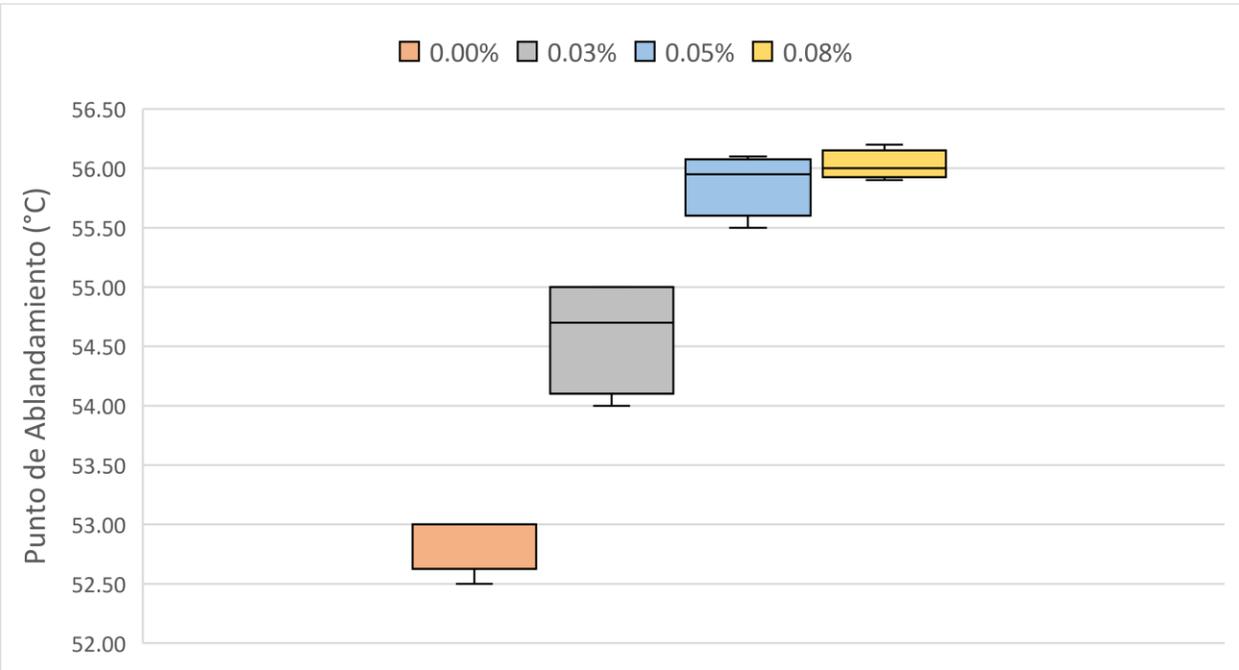


Figura 12. Diagrama de caja y bigotes para el ensayo de punto de ablandamiento del asfalto AC30 en condiciones envejecidas



Cuadro 10. Resultados de la prueba de Tukey para determinar la significancia de las parejas entre medias muestrales del ensayo de penetración

Diferencia poblacional	Asfalto AC30 en condiciones originales			Asfalto AC30 en condiciones envejecidas		
	Diferencia muestral	Valor de Tukey (q)	Decisión	Diferencia muestral	Valor de Tukey (q)	Decisión
$\mu_{0.00\%} - \mu_{0.03\%}$	4.50	1.47	Significativa	0.93	1.15	No significativa
$\mu_{0.00\%} - \mu_{0.05\%}$	2.75	1.47	Significativa	2.77	1.15	Significativa
$\mu_{0.00\%} - \mu_{0.08\%}$	1.92	1.47	Significativa	3.77	1.15	Significativa
$\mu_{0.03\%} - \mu_{0.05\%}$	1.75	1.47	Significativa	1.83	1.15	Significativa
$\mu_{0.03\%} - \mu_{0.08\%}$	2.58	1.47	Significativa	2.83	1.15	Significativa
$\mu_{0.05\%} - \mu_{0.08\%}$	0.83	1.47	No significativa	1.00	1.15	No significativa

El cuadro anterior muestra los resultados obtenidos de la Prueba de Tukey para determinar si las diferencias entre los cuatro tratamientos del asfalto AC30 en condiciones originales y envejecidas con el ensayo de penetración son significativas. Se utilizaron los valores mostrados en el Cuadro 29 y se siguió el procedimiento según el Cálculo 7.

Cuadro 11. Resultados de la prueba de Tukey para determinar la significancia de las parejas entre medias muestrales del ensayo de viscosidad a 60°C

Diferencia poblacional	Asfalto AC30 en condiciones originales			Asfalto AC30 en condiciones envejecidas		
	Diferencia muestral	Valor de Tukey (q)	Decisión	Diferencia muestral	Valor de Tukey (q)	Decisión
$\mu_{0.00\%} - \mu_{0.03\%}$	25.00	15.53	Significativa	138.5	14.37	Significativa
$\mu_{0.00\%} - \mu_{0.05\%}$	109.0	15.53	Significativa	153.5	14.37	Significativa
$\mu_{0.00\%} - \mu_{0.08\%}$	172.5	15.53	Significativa	145.0	14.37	Significativa
$\mu_{0.03\%} - \mu_{0.05\%}$	134.0	15.53	Significativa	15.00	14.37	Significativa
$\mu_{0.03\%} - \mu_{0.08\%}$	197.5	15.53	Significativa	6.50	14.37	No significativa
$\mu_{0.05\%} - \mu_{0.08\%}$	63.50	15.53	Significativa	8.50	14.37	Significativa

El cuadro anterior muestra los resultados obtenidos de la Prueba de Tukey para determinar si las diferencias entre los cuatro tratamientos del asfalto AC30 en condiciones originales y envejecidas con el ensayo de viscosidad a 60°C son significativas. Se utilizaron los valores mostrados en el Cuadro 30 y se siguió el procedimiento según el Cálculo 7.

Cuadro 12. Resultados de la prueba de Tukey para determinar la significancia de las parejas entre medias muestrales del ensayo de punto de ablandamiento

Diferencia poblacional del % de aditivo	Asfalto AC30 en condiciones originales			Asfalto AC30 en condiciones envejecidas		
	Diferencia muestral	Valor de Tukey (q)	Decisión	Diferencia muestral	Valor de Tukey (q)	Decisión
$\mu_{0.00\%} - \mu_{0.03\%}$	0.42	0.94	No significativa	1.73	0.86	Significativa
$\mu_{0.00\%} - \mu_{0.05\%}$	1.65	0.94	Significativa	3.00	0.86	Significativa
$\mu_{0.00\%} - \mu_{0.08\%}$	3.30	0.94	Significativa	3.15	0.86	Significativa
$\mu_{0.03\%} - \mu_{0.05\%}$	1.23	0.94	Significativa	1.28	0.86	Significativa
$\mu_{0.03\%} - \mu_{0.08\%}$	2.88	0.94	Significativa	1.43	0.86	Significativa
$\mu_{0.05\%} - \mu_{0.08\%}$	1.65	0.94	Significativa	0.15	0.86	No significativa

El cuadro anterior muestra los resultados obtenidos de la Prueba de Tukey para determinar si las diferencias entre los cuatro tratamientos del asfalto AC30 en condiciones originales y envejecidas con el ensayo de punto de ablandamiento son significativas. Se utilizaron los valores mostrados en el Cuadro 31 y se siguió el procedimiento según el Cálculo 7.

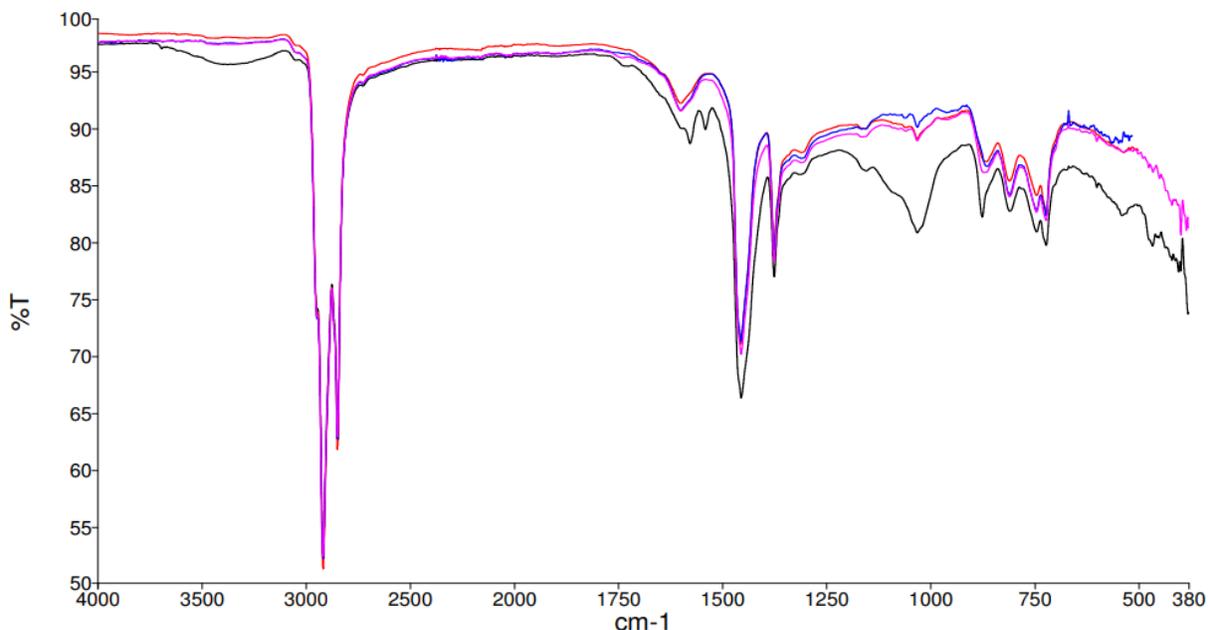
Cuadro 13. Presencia de los picos característicos de los espectros IR obtenidos para el asfalto AC30 en condiciones originales con las tres concentraciones de aditivo elegidas

Tipo de vibración y estructura	Intervalo de frecuencia (cm⁻¹)	Presencia en la mezcla con aditivo al 0.03% (m/m)	Presencia en la mezcla con aditivo al 0.05% (m/m)	Presencia en la mezcla con aditivo al 0.08% (m/m)
O – H tensión, alcohol	3,550 – 3,200	NEGATIVA	POSITIVA	NEGATIVA
C – H tensión, alcano	3,000 – 2,840	POSITIVA	POSITIVA	POSITIVA
C = C tensión, alqueno	1,650 – 1,566	POSITIVA	POSITIVA	POSITIVA
C – H flexión, grupo –CH ₃	1,470 – 1,370	POSITIVA	POSITIVA	POSITIVA
C – O tensión, alquil aril éter	1,275 – 1020	POSITIVA	POSITIVA	POSITIVA
C – H flexión; 1,2,4-trisustituido	880 ± 20	POSITIVA	POSITIVA	POSITIVA
C – H flexión; 1,4-disustituido	810 ± 20	POSITIVA	POSITIVA	POSITIVA
C – H flexión, benceno monosustituido	750 ± 20	POSITIVA	POSITIVA	POSITIVA
C – H flexión, derivado del benceno	700 ± 20	POSITIVA	POSITIVA	POSITIVA
C – H flexión, benceno sustituido	< 500	NEGATIVA	POSITIVA	POSITIVA

(Merck, 2023)

El cuadro anterior muestra los resultados del análisis de espectroscopía infrarroja con Transformada de Fourier para el asfalto AC30 en condiciones originales con las dosificaciones de aditivo elegidas de 0.03%, 0.05% y 0.08% (m/m). Los análisis fueron realizados en el laboratorio de la Universidad del Valle de Guatemala, bajo condiciones de temperatura de 25°C y presión de 1.01 bar. Los espectros individuales obtenidos se muestran en la Sección A de Anexos.

Figura 13. Comparación de espectros IR del asfalto AC30 en condiciones originales con las tres concentraciones de aditivo



En la figura anterior se muestran los espectros IR sobrepuestos del asfalto AC30 en condiciones originales con las tres dosificaciones de aditivo elegidas de 0.03%, 0.05% y 0.08% (m/m). Ambos se obtuvieron con el Software PerkinElmer Spectrum, versión 10.5.4, en el laboratorio de la Universidad del Valle de Guatemala. 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). Finalmente, %T en el eje y se refiere al porcentaje de transmitancia en un rango de 0% a 100% y cm-1 en el eje x se refiere al rango de frecuencia de vibraciones moleculares.

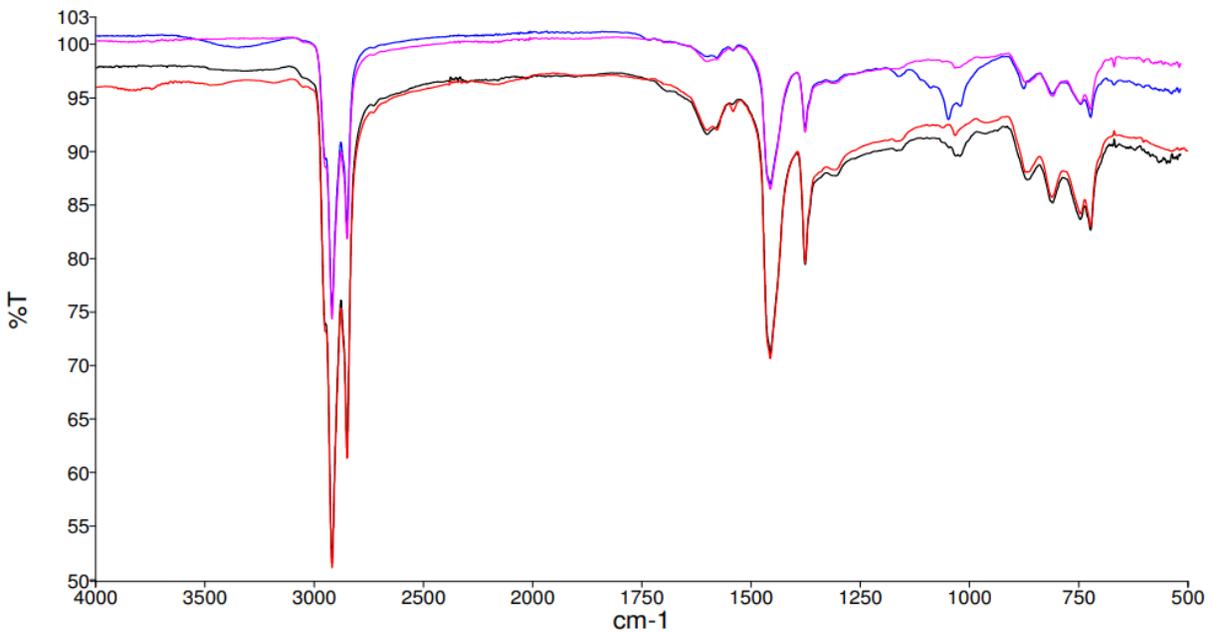
Cuadro 14. Presencia de los picos característicos de los espectros IR obtenidos para el asfalto AC30 en condiciones envejecidas con las tres concentraciones de aditivo elegidas

Tipo de vibración/ Estructura	Intervalo de frecuencia (cm⁻¹)	Presencia en la mezcla con aditivo al 0.03% (m/m)	Presencia en la mezcla con aditivo al 0.05% (m/m)	Presencia en la mezcla con aditivo al 0.08% (m/m)
O – H tensión, alcohol	3,550 – 3,200	POSITIVA	NEGATIVA	NEGATIVA
C – H tensión, alcano	3,000 – 2,840	POSITIVA	POSITIVA	POSITIVA
C = C tensión, alqueno	1,650 – 1,566	POSITIVA	POSITIVA	POSITIVA
C – C tensión, aromático	1,500	POSITIVA	POSITIVA	NEGATIVA
C – H flexión, grupo – CH ₃	1,470 – 1,370	POSITIVA	POSITIVA	POSITIVA
C – O tensión, alquil aril éter	1,275 – 1020	POSITIVA	POSITIVA	POSITIVA
C – H flexión; 1,2,4- trisustituido	880 ± 20	POSITIVA	POSITIVA	POSITIVA
C – H flexión; 1,4- disustituido	810 ± 20	POSITIVA	POSITIVA	POSITIVA
C – H flexión, benceno monosustituido	750 ± 20	POSITIVA	POSITIVA	POSITIVA
C – H flexión, derivado del benceno	700 ± 20	POSITIVA	POSITIVA	POSITIVA
C – H flexión, benceno sustituido	< 500	POSITIVA	POSITIVA	POSITIVA

(Merck, 2023)

El cuadro anterior muestra los resultados del análisis de espectroscopía infrarroja con Transformada de Fourier para el asfalto AC30 en condiciones envejecidas con las dosificaciones de aditivo elegidas de 0.03%, 0.05% y 0.08% (m/m). Los análisis fueron realizados en el laboratorio de la Universidad del Valle de Guatemala, bajo condiciones de temperatura de 25°C y presión de 1.01 bar. Los espectros individuales obtenidos se muestran en la Sección A de Anexos.

Figura 14. Comparación de espectros IR del asfalto AC30 en condiciones envejecidas con las tres concentraciones de aditivo



En la figura anterior se muestran los espectros IR sobrepuestos del asfalto AC30 en condiciones originales con las tres dosificaciones de aditivo elegidas de 0.03%, 0.05% y 0.08% (m/m). Ambos se obtuvieron con el Software PerkinElmer Spectrum, versión 10.5.4, en el laboratorio de la Universidad del Valle de Guatemala. 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). Finalmente, %T en el eje y se refiere al porcentaje de transmitancia en un rango de 0% a 100% y cm-1 en el eje x se refiere al rango de frecuencia de vibraciones moleculares.

VIII. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con el objetivo de caracterizar el asfalto AC30 en condiciones originales y envejecidas, se llevaron a cabo los ensayos físicos de penetración (ASTM D5–06), viscosidad a 60°C (ASTM D4402–02) y punto de ablandamiento (ASTM D36–95). Los resultados obtenidos de estos ensayos y los demás realizados en todo el trabajo son válidos por los métodos que siguen los laboratorios y los equipos según las normas de estándar internacional ASTM (American Society for Testing and Materials) y AASHTO (American Association of State Highway and Transportation) y por que cuentan con un programa de calibración de los mismos.

Estas pruebas se eligieron por su capacidad de proporcionar información sobre las características de calidad del asfalto buscadas para la formulación de mezclas asfálticas. El ensayo de penetración evalúa la consistencia del asfalto a una temperatura dada, en este caso a una temperatura ambiente de 25°C. El resultado es importante para determinar la dureza del asfalto cuando está colocado en la superficie: los asfaltos más duros tienen valores más bajos, mientras que los asfaltos más blandos tienen valores más altos. El ensayo de viscosidad a 60°C mide la fluidez del asfalto a la temperatura más alta que puede alcanzar en el pavimento y el ensayo de punto de ablandamiento determina la resistencia al calor del asfalto mediante la temperatura a la que comienza a ablandarse y deformarse. Para realizar los mismos tres ensayos en el asfalto en condiciones envejecidas, se empleó el Ensayo Rotatorio de Película Delgada (RTFOT, de la norma ASTM D2872–97). Esta prueba permite predecir el comportamiento del asfalto bajo efectos del calor y oxígeno del aire, simulando el envejecimiento a corto plazo que ocurre durante las operaciones de mezclado y colocación en el pavimento. El procedimiento de cada ensayo se basó en las normas ASTM ya que son las que principalmente se utilizan en Guatemala para los ensayos de asfalto. Estas normas garantizan resultados consistentes, lo que es esencial para la reproducibilidad y comparabilidad.

En el Cuadro 5 se observan los resultados promedio de los tres ensayos para el asfalto en condiciones originales y envejecidas. Se puede observar que el asfalto envejecido mostró un valor de penetración menor (34.90 ± 1.095 dmm) que el asfalto original (63.83 ± 0.913 dmm), pero los valores de viscosidad ($8,683 \pm 1.414$ P) y punto de ablandamiento (52.88 ± 0.433 °C) fueron mayores a este último ($2,875.5 \pm 0.707$ P y 48.45 ± 0.574 °C, respectivamente). Esto indica que el asfalto en condiciones envejecidas presenta una mayor dureza a una temperatura ambiente de 25°C, se torna más viscoso a una temperatura de 60°C y mantiene su dureza a una temperatura de 53°C antes de comenzar a ablandarse. El resultado concuerda con el comportamiento teórico del asfalto, ya que estos tienden a endurecerse en la mezcla asfáltica durante la construcción y en el pavimento terminado. Este endurecimiento es causado principalmente por el proceso de oxidación, el cual ocurre más fácilmente a altas temperaturas (como la temperatura que alcanza en el pavimento de 60°C como máximo) en las películas delgadas de asfalto que cubren las partículas del agregado (Avellán, 2007). Para garantizar que las mediciones fueran correctas, se empleó como referencia datos estandarizados del laboratorio certificado de UNO Bitumen mostrados en el Cuadro 36 en la Sección B de Anexos. Los valores de penetración, viscosidad a 60°C y punto de ablandamiento para el asfalto original

consistieron en: 64.0 dmm, 2,875 P, 48°C, mientras que para el asfalto envejecido fueron de: 35 dmm, 8,682 P, 52°C, respectivamente. Dado a que el porcentaje de variación entre los resultados son menores al 1%, estos no varían significativamente con los de referencia, por lo que se asegura la confiabilidad de los datos.

En el Cuadro 6 se muestra la presencia de picos característicos identificados en los espectros infrarrojos obtenidos por medio del análisis de espectroscopía infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR). Tanto el asfalto en condiciones originales y envejecidas mostraron los picos característicos que representan a alcanos en la región de 3,000 – 2,840 cm^{-1} , alquenos en 1,600 cm^{-1} , alquil aril éter en 1,275 – 1,020 cm^{-1} y aromáticos en 880 cm^{-1} en adelante. Estos picos concuerdan con los obtenidos en el estudio realizado en la Universidad del Valle de Guatemala para asfalto virgen AC30 (Leiva, 2018). 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. Según la Figura 5, 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 1705 cm^{-1} y 1030 cm^{-1} . No obstante, no hubo presencia de la banda del ácido carboxílico en los espectros obtenidos.

De acuerdo con un estudio realizado en la Universidad de Costa Rica, 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 para simular el estado del material entre los 7 y los 10 años de estar en carretera, el grupo carbonilo si estuvo presente en el ligante (Villegas, 2015). Esto indica que, a un mayor tiempo de envejecimiento, la presencia de grupos sulfóxidos aumenta. Cabe mencionar que la prueba de envejecimiento, a pesar de seguir estándares normativos, es una predicción que no refleja con absoluta precisión las condiciones reales en la carretera. Aunque el muestreo cumplió con el margen de 72 horas establecido por la norma, existe la posibilidad de que las muestras hayan estado expuestas al aire al momento de colocarlas en los recipientes, contribuyendo a la oxidación. Además, durante el transporte para las mediciones de FTIR en el laboratorio universitario, las muestras permanecieron más tiempo en los contenedores, y durante la manipulación para el muestreo, estuvieron expuestas al aire y a contaminación con polvo.

Por otra parte, se eligieron tres concentraciones de aditivo de 0.03%, 0.05%, 0.08% (m/m) en base a los límites y el valor intermedio del rango utilizado por una empresa comercializadora de asfaltos en Guatemala (UNO Bitumen, 2015). Con el objetivo de realizar pruebas estandarizadas para evaluar visualmente la cantidad de aditivo que mejora la adherencia en la mezcla asfáltica, primero se realizó esta mezcla empleando agregado pétreo de piedra caliza proveniente del aeropuerto La Aurora. La curva granulométrica respectiva se muestra en la Sección E de Anexos. Para determinar la cantidad de aditivo en la mezcla asfáltica que maximiza el porcentaje de recubrimiento del agregado pétreo, se empleó el análisis de hervido (ASTM D3695) que evalúa la adherencia del asfalto a los agregados mediante el calentamiento de la muestra. Posteriormente, se realizó un ensayo de Resistencia a la tracción

indirecta (TSR, ASTM D4867) para comparar la susceptibilidad a la humedad de la mezcla asfáltica con la concentración de aditivo máximo obtenido con la prueba anterior. Con ello se conoce la adherencia entre el asfalto y el agregado en condiciones húmedas y secas, simulando la exposición a lluvia: un alto valor de TSR indica una mayor resistencia al desprendimiento de agregados, lo que se traduce en una mayor durabilidad y rendimiento del pavimento. Los resultados se muestran en la Sección E de Anexos.

Según la Figura 6, el análisis de hervido mostró una diferencia significativa en el desvestimiento entre la mezcla asfáltica sin aditivo y la que contiene una concentración de 0.08% (m/m) de aditivo. 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. El hecho de que la mezcla sin aditivo presente un 15% de desvestimiento puede deberse a que la piedra caliza empleada como agregado presenta una baja porosidad que reduce la adherencia entre las superficies de las partículas de agregado y el asfalto. Asimismo, 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 muestra un drástico descenso en el desvestimiento relacionado con la capacidad del aditivo de modificar químicamente la superficie apolar de los agregados, lo que reduce la tendencia a la separación. Los porcentajes tanto de recubrimiento como desvestimiento pudieron variar, ya que la parte inferior de las piedras en contacto con el recipiente no estuvieron expuestas a la misma temperatura que el resto de la superficie. De la misma manera, el error humano al determinar visualmente el desvestimiento en cada piedra pudo causar variaciones en la determinación de los porcentajes. Sin embargo, debido a que el analista que llevó a cabo las pruebas cuenta con amplia experiencia, puede establecerse que en efecto, la concentración de 0.08% (m/m) de aditivo maximiza la adherencia en la mezcla asfáltica cuando ya está colocada en la carretera bajo condiciones reales de temperatura y carga de tráfico.

Por otro lado, de acuerdo con el Cuadro 7, los resultados muestran que la mezcla sin aditivo tiene un valor de TSR del 78.3%, mientras que la mezcla con un 0.08% de aditivo alcanza un valor de TSR del 95.3%. 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 significativamente 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 se correlacionan con los obtenidos en el estudio realizado por la Universidad Católica de Colombia, a pesar del uso de un asfalto con grado de penetración 60-70 y agregados de río. En él determinaron que, para el ensayo TSR, la adición de aditivos como cal hidratada y grano de caucho reciclado en las mezclas presentaron un mejor desempeño en condiciones húmedas y una mayor unión entre agregados. No obstante, obtuvieron que, con una concentración de 0.3% (m/m) de aditivo de fibra de coco (la dosificación más alta evaluada), el valor TSR bajó por efecto lubricante, en donde la adherencia tan fuerte entre el

asfalto y el agregado impidió la unión con otras partículas y provocó la desintegración de la pastilla. Este resultado refleja la posibilidad de un efecto lubricante para concentraciones arriba de 0.08% (m/m) de aditivo UNOBOND®.

Con el objetivo de caracterizar el asfalto AC30 en condiciones originales y envejecidas con cada dosificación de aditivo, se realizaron las mezclas en base al peso total de la producción y se agitaron por 30 minutos 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. En los Cuadros 8 y 9 se muestran los resultados de las pruebas físicas de penetración, viscosidad a 60°C y punto de ablandamiento para el asfalto en condiciones originales y envejecidas. De forma general, puede observarse que 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. Esto también concuerda con el comportamiento teórico del asfalto y, comparando con los valores del asfalto envejecido sin aditivo en el Cuadro 5, se infiere que la adición de aditivo ayuda a reducir el efecto del envejecimiento.

Para comparar las dosificaciones entre sí, se realizaron diagramas de caja y bigotes mostrados en las Figuras 7 a 12. En ellas se observa la dispersión y distribución de los cuatro tratamientos (sin aditivo y con las tres concentraciones de aditivo de 0.03%, 0.05% y 0.08% (m/m)) para el asfalto en condiciones originales y envejecidas según cada prueba física. Las cajas representan el rango intercuartílico donde se concentra la mayoría de los datos y los bigotes, la dispersión entre ellos. En la mayoría de los casos, los datos son simétricos, lo que demuestra su normalidad. 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 la Figura 7 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.

El análisis estadístico en los Cuadros 21 al 26 en la Sección B de Anexos se muestran los valores de la desviación estándar, coeficiente de variación e intervalo de confianza al 95%. La desviación estándar calculada respalda la dispersión baja de los datos observados en los diagramas de caja y bigotes, puesto que para los ensayos de penetración y punto de ablandamiento se obtuvieron valores menores a 1. Sin embargo, la variabilidad aumentó en los ensayos de viscosidad ya que se obtuvieron desviaciones entre 1 y 5 e intervalos de confianza al 95% más amplios. Esto se debe principalmente al error del analista, ya que se carecía de la misma experiencia que los laboratoristas certificados al llenar los recipientes de muestra, lo que posiblemente introdujo burbujas de aire en las muestras. Además, la manipulación lenta y cuidadosa resultó en una pérdida de temperatura en el asfalto, lo que podría haber afectado las mediciones de viscosidad. No obstante, a pesar de la dispersión observada, los coeficientes de variación obtenidos son considerablemente pequeños, siendo estos menores al 1%, por lo que se puede demostrar que las mediciones de penetración, viscosidad y punto de ablandamiento no poseen una dispersión y una variabilidad significativa entre sus muestras. De la misma manera, los resultados son aceptables según las normas ASTM en la Sección E de Anexos. La desviación estándar y el rango del intervalo de confianza de los datos de penetración cumplen

con los valores aceptables. Para los datos de viscosidad, el porcentaje de diferencia entre ellos no sobrepasa la aceptada y, finalmente, las diferencias entre los puntos de ablandamiento de cada muestra cumplen con la diferencia aceptable.

En cuanto al comportamiento de los datos, en las Figuras 7 y 8 se muestran las mediciones del ensayo de penetración para el asfalto original y envejecido, respectivamente. Para ambos casos, las penetraciones medias de los cuatro grupos son distintas: el asfalto en condiciones originales sin aditivo mostró el valor más alto, seguido por la mezcla al 0.08%, 0.05% y 0.03% (m/m); mientras que el asfalto en condiciones envejecidas con 0.08% (m/m) de aditivo mostró el valor máximo, seguido por el resto de las dosificaciones en orden descendente. 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, en las Figuras 11 y 12 se muestran los tratamientos para el ensayo de punto de ablandamiento para el asfalto original y envejecido, respectivamente. En ambos casos, el punto de ablandamiento aumentó a medida en que las concentraciones de aditivo incrementaban. 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 se realizó un estudio sobre el efecto de la lignina en el envejecimiento de un asfalto 80-100, como se detalla en antecedentes y se muestran los resultados en el Cuadro 37 en la Sección B de Anexos. 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.

En las Figuras 9 y 10 se presentan los tratamientos para la prueba de viscosidad a 60°C para el asfalto original y envejecido, respectivamente. Para el primer caso, el asfalto 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). Para el segundo caso, 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.

Cada una de las mezclas fue sometida a un análisis ANOVA de un factor para determinar si las diferencias entre los cuatro tratamientos son significativas. Para ello se eligió un grado de significancia de 0.05, ya que ofrece una

buena relación y es el utilizado por las normas ATSM. La hipótesis nula indica que no hay diferencia significativa entre las medias de asfalto a las concentraciones de aditivo elegidas, mientras que la hipótesis alternativa indica que sí existe una diferencia significativa entre ellas. Como se observa en los Cuadros 27 al 32, en todos los casos el valor F es menor al valor crítico para F y la probabilidad es menor al grado de significancia de 0.05, por lo que sí existe suficiente evidencia para rechazar la hipótesis nula. Posteriormente, para comparar cada una de las medias entre sí y determinar si existe una diferencia significativa, se empleó la prueba de Tukey, como se observa en los Cuadros 33 al 35. Para el ensayo de penetración, las diferencias entre los cuatro tratamientos fueron significativos con excepción de la diferencia entre las concentraciones de 0.05% y 0.08% (m/m). Para el ensayo de viscosidad a 60°C, únicamente no hubo una diferencia significativa entre las concentraciones de 0.03% y 0.08% (m/m) para el asfalto envejecido. Finalmente, para el ensayo de punto de ablandamiento, no se obtuvo una diferencia significativa entre el asfalto sin aditivo y con aditivo al 0.03% (m/m) en el asfalto original, así como entre las concentraciones de 0.05% y 0.08% (m/m) en el asfalto envejecido.

En general, la adición de las tres concentraciones de aditivo tiene un efecto significativo 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 y la tendencia a suavizarse a una temperatura determinada según el ensayo de punto de ablandamiento. Con respecto a la fluidez del asfalto, esta 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. Finalmente, según los resultados de la presente investigación, la concentración de 0.08% (m/m) de aditivo asfáltico evidenció una mayor adherencia entre el agregado y el asfalto, así como una mayor resistencia a la humedad en la mezcla asfáltica según los resultados del análisis de hervido y TSR, respectivamente. En el contexto de los objetivos delineados en este estudio, la concentración de 0.08% (m/m) se considera como la opción más favorable para mejorar la adherencia de la mezcla asfáltica. No obstante, al observar que no se identificó una diferencia estadísticamente significativa con la concentración de 0.05% (m/m) según la prueba de Tukey, se recomienda, desde una perspectiva económica, considerar esta dosificación como alternativa. Dicha concentración demostró resultados comparables sin requerir una cantidad adicional de aditivo y la elección final entre 0.05% y 0.08% (m/m) podría depender de factores adicionales, como costos, disponibilidad de materiales y las condiciones específicas del proyecto.

Por último, en los Cuadros 13 y 14 se muestran los picos característicos presentes en los espectros infrarrojos obtenidos por medio del análisis de espectroscopía infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR) para el asfalto en condiciones originales y envejecidas con las tres dosificaciones de aditivo. 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. En la Figura 13 se muestran visualmente los espectros superpuestos de los cuatro casos del asfalto en condiciones originales, en donde la concentración de 0.05% mostró picos más pronunciados con un cambio mayor en el porcentaje de transmitancia para alquenos, alquil aril éteres y aromáticos, pero el resto de las concentraciones presentaron un comportamiento similar.

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. Para mitigar las variaciones en los picos presentes en los espectros IR debidas a los errores en la prueba de envejecimiento de RTFOT, se recomienda minimizar el tiempo de exposición al aire durante el muestreo, asegurándose de que las muestras se recojan y manipulen con rapidez. Asimismo, se debe optimizar el transporte de las muestras al laboratorio, evitando prolongados períodos en recipientes y manteniendo condiciones adecuadas de temperatura. Además, durante la manipulación para las mediciones de FTIR, se debe de asegurar la limpieza de los instrumentos y reducir el tiempo en que el recipiente de muestra permanezca abierto para prevenir la contaminación con polvo.

Finalmente, según la Figura 14, 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 cm^{-1} , alquenos en 1,600 cm^{-1} , alquil aril éter en 1,275 – 1,020 cm^{-1} y aromáticos en 880 cm^{-1} en adelante. 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 la Figura 13 del asfalto aditivado en condiciones originales. Con ello puede deducirse 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, según el diagrama de caja y bigotes de la Figura 10.

IX. CONCLUSIONES

1. Utilizando las normas ASTM D5–06, ASTM D4402–02, ASTM D36–95 y ASTM D2872–97 se obtuvo una penetración de 63.83 ± 0.913 dmm, viscosidad a 60°C de $2,875.5 \pm 0.707$ P y punto de ablandamiento de 48.45 ± 0.574 $^\circ\text{C}$ para el asfalto AC30 en condiciones normales, mientras que para el asfalto envejecido se obtuvieron valores de 34.90 ± 1.095 dmm, $8,683 \pm 1.414$ P y 52.88 ± 0.433 $^\circ\text{C}$, respectivamente. de donde 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. Asimismo, el análisis FTIR mostró 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. Asimismo, 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.
2. De acuerdo con los ensayos para la mezcla asfáltica según las normas ASTM D3625–96 y ASTM D 4867, el análisis de hervido mostró que la concentración de 0.08% (m/m) de aditivo maximiza la adherencia en la mezcla asfáltica, reduciendo significativamente el desvestimiento desde un 15% a un 3% . Además, se determinó que esta concentración 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. 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 significativas con la concentración de 0.05% (m/m), por lo que analizar ambas opciones económicamente es recomendable.
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, indicando que el aditivo ayuda a reducir la oxidación. En el ensayo de punto de ablandamiento, se observó un aumento directamente proporcional con la concentración de aditivo, tanto en el asfalto original como en el envejecido, indicando una mayor resistencia a la deformación con concentraciones altas de aditivo. En cuanto a la viscosidad a 60°C , esta aumenta con la concentración de aditivo, lo que refleja una mejora en la fluidez del asfalto. Por otro lado, 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. Finalmente, los análisis ANOVA y prueba de Tukey demuestran que la presencia de aditivo tiene un efecto significativo en las características del asfalto evaluadas en el estudio, principalmente la concentración de aditivo de 0.08% (m/m) que aumenta la temperatura de

ablandamiento de 48.45 ± 0.574 °C a 51.75 ± 0.866 según el ensayo de punto de ablandamiento en condiciones originales y la concentración de 0.05% (m/m) que incrementa la fluidez del asfalto en condiciones envejecidas de $8,863.00 \pm 1.414$ P a $8,828 \pm 2.828$ P según el ensayo de viscosidad.

X. RECOMENDACIONES

1. Realizar un estudio comparativo del aditivo asfáltico evaluado en el resto de los tipos de asfalto que se manejan en la empresa utilizando para crear una base de datos y así optimizar el proceso de diseño de mezclas asfálticas que incluya la viabilidad económica del uso del aditivo.
2. Realizar una prueba de Envejecimiento acelerado de ligantes asfálticos mediante un Recipiente de Envejecimiento Presurizado (PAV), de acuerdo con la norma ASTM D 6521-22, para simular el envejecimiento del asfalto durante la vida útil en servicio y evaluar los efectos de las distintas concentraciones de aditivo asfáltico en sus propiedades físicas.
3. Ampliar el rango de concentraciones de aditivo para determinar la que causa el efecto lubricante en la mezcla asfáltica. Asimismo, verificar el efecto de otro tipo de aditivo sobre las propiedades de la mezcla asfáltica con asfalto AC30 para determinar si impacta en la resistencia a la fatiga, a la humedad o a la temperatura y comparar los resultados con otro tipo de agregado pétreo para analizar cómo este aditivo afecta a la misma propiedad en diferentes contextos.
4. Escalar la experimentación realizada a condiciones de presiones y estrés reales en el pavimento para determinar el efecto en la adhesividad entre el asfalto y el agregado. Esto puede lograrse mediante la colocación de parches en la superficie de la carretera y posteriormente la extracción de núcleos para analizar la calidad y deterioro.
5. Realizar pruebas con respecto al endurecimiento del asfalto tipo AC30 para dilucidar el mecanismo de este proceso y determinar si muestra variaciones según la concentración de aditivo añadida. Asimismo, definir la cinética de los cambios de las propiedades fisicoquímicas del asfalto para comprender el efecto de la concentración de aditivo a lo largo del tiempo.
6. Hacer un estudio sobre el límite de fluidez del asfalto que puede propiciar problemas de segregación y el equilibrio que debe mantener en la mejora del manejo de material que representa un incremento de fluidez.

XI. BIBLIOGRAFÍA

- 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>
- Anderson, D; Sweeney, D; Williams, T; Camm, J; Cochran, J (2017). *Statistics for Business and Economics*. Cengage Learning.
- ASTM International. (2006). *ASTM D5-06: Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials* (Standard No. D5-06). <https://www.astm.org/Standards/D5.htm>
- ASTM International. (2002). *ASTM D4402-02: Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer* (Standard No. D4402-02). <https://www.astm.org/Standards/D4402.htm>
- ASTM International. (1995). *ASTM D36-95: Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus)* (Standard No. D36-95). <https://www.astm.org/Standards/D36.htm>
- ASTM International. (1997). *ASTM D2872-97: Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test)* (Standard No. D2872-97). <https://www.astm.org/Standards/D2872.htm>
- ASTM International. (2008). *ASTM D3625-08: Standard Test Method for Effect of Water on Bituminous-Coated Aggregate Using Boiling Water* (Standard No. D3625-08). <https://www.astm.org/Standards/D3625.htm>
- ASTM International. (2017). *ASTM D4867-17: Standard Test Method for Effect of Moisture on Asphalt Concrete Paving Mixtures* (Standard No. D4867-17). <https://www.astm.org/Standards/D4867.htm>
- ASTM International. (2016). *ASTM D3381-16: Standard Specification for Viscosity-Graded Asphalt Cement for Use in Pavement Construction* (Standard No. D3381-16). <https://www.astm.org/Standards/D3381.htm>
- ASTM International. (2022). *ASTM D6521-22: Standard Practice for Accelerated Aging of Asphalt Binder Using a Pressurized Aging Vessel (PAV)* (Standard No. D6521-22). <https://www.astm.org/d6521-22.html>
- Avellán, M. (2007) *Asfaltos modificados con polímeros*. Universidad de San Carlos de Guatemala. 162 págs.

- Merck (2023). Tabla de espectro de infrarrojos por intervalo de frecuencia. <https://www.sigmaaldrich.com/GT/es/technical-documents/technical-article/analytical-chemistry/photometry-and-reflectometry/ir-spectrum-table>
- Merck Millipore. (2021). *Kerosene CAS 64742-48-9* | 109774. https://www.merckmillipore.com/INTL/en/product/Kerosene,MDA_CHEM-109774
- Merck Millipore. (2023). *Etanol CAS 64-17-5* | 100983. https://www.merckmillipore.com/GT/es/product/Ethanol,MDA_CHEM-100983?ReferrerURL=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F
- Merck Millipore (2023). *n-Heptane CAS 142-82-5* | 104379. https://www.merckmillipore.com/GT/es/product/n-Heptane,MDA_CHEM-104379?ReferrerURL=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F
- Ministerio de Energía y Minas (2023). *Informe Estadístico, Subsector Hidrocarburos*. <https://mem.gob.gt/que-hacemos/hidrocarburos/publicaciones/revista-hidrocarburos/>
- Reyes, F; Daza, C; Rondón, H (2012). Determinación de las fracciones sara de asfaltos colombianos envejecidos al medio ambiente empleando cromatografía líquida en columna. *Escuela de Ingeniería de Antioquía*, 17(1),48-56.
- Rodríguez, D; Rodríguez, C; Ramírez, S; Flórez, C (2016). Evaluación del efecto del envejecimiento del cemento asfáltico 80-100 modificado con lignina. *INGENIARE*, Universidad Libre-Barranquilla, 20, 47-61.
- Skoog, D; West, D; Holler, J; Crouch, S (2015). *Fundamentos de Química Analítica*. Cengage Learning
- Tomala, J; Laica, J; Santos, E (s.f). *Mantenimiento de la capa de rodadura de concreto asfáltico en un pavimento flexible*. Escuela Superior Politécnica del Litoral, Ecuador.
- 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, R; Aguiar, J; Loria, L (2015). Estudio del envejecimiento y oxidación de asfaltos con FTIR y su relación con los parámetros reológicos. Universidad de Costa Rica.
- Wade, L. 2011. *Organic Chemistry*. Pearson Education.

Zhang, Z; Kang, N; Zhou, J; Xingang, L; He, L; Sui, H. (2019). Novel Synthesis of Choline-Based Amino Acid Ionic Liquids and Their Applications for Separating Asphalt from Carbonate Rocks. *Nanomaterials*. 9, 504. doi:10.3390/nano9040504

XII. GLOSARIO

Adhesión: capacidad de dos superficies o materiales diferentes para unirse entre sí mediante fuerzas intermoleculares. En el contexto de este trabajo, garantiza la unión adecuada entre el asfalto y el agregado pétreo.

Asfalto: mezcla de hidrocarburos derivados del petróleo, obtenida de forma natural o por destilación, y utilizada para revestimientos de carreteras y techos.

Durabilidad: Capacidad de mantener una reología, cohesión y adherencia satisfactorias en servicio para resistir el desgaste, el deterioro o el envejecimiento con el tiempo y bajo condiciones de uso normal.

Envejecimiento: proceso natural o transformación que experimenta el asfalto a medida que pasa el tiempo que altera las propiedades fisicoquímicas del material y por ende la durabilidad debida a los efectos de oxidación.

Trabajabilidad: Facilidad con que las mezclas de pavimentación pueden ser colocadas y compactadas.

XIII. ANEXOS

A. Datos originales

Cuadro 15. Mediciones realizadas para el ensayo de penetración en asfalto AC30 en condiciones originales

Mediciones		Aditivo al 0.00%	Aditivo al 0.03%	Aditivo al 0.05%	Aditivo al 0.08%
Muestra 1	Penetración 1 (dmm ± 0.5 dmm)	64.00	59.00	60.50	62.00
	Penetración 2 (dmm ± 0.5 dmm)	64.00	60.00	62.00	62.00
	Penetración 3 (dmm ± 0.5 dmm)	64.00	59.00	61.50	61.00
Muestra 2	Penetración 1 (dmm ± 0.5 dmm)	63.00	60.00	61.00	61.50
	Penetración 2 (dmm ± 0.5 dmm)	64.00	60.00	60.00	62.50
	Penetración 3 (dmm ± 0.5 dmm)	64.00	58.00	61.50	62.50

En el cuadro anterior se muestran los datos obtenidos del ensayo de penetración del asfalto AC30 en condiciones originales sin aditivo y con las tres concentraciones de aditivo elegidas. La prueba se realizó en duplicado, con tres mediciones en cada muestra de acuerdo con el procedimiento descrito en la norma ASTM D5 en la Sección E de Anexos.

Cuadro 16. Mediciones realizadas para el ensayo de penetración en asfalto AC30 en condiciones envejecidas

Mediciones		Aditivo al 0.00%	Aditivo al 0.03%	Aditivo al 0.05%	Aditivo al 0.08%
Muestra 1	Penetración 1 (dmm ± 0.5 dmm)	35.00	36.50	38.00	38.90
	Penetración 2 (dmm ± 0.5 dmm)	34.00	35.50	38.00	39.00
	Penetración 3 (dmm ± 0.5 dmm)	35.00	36.00	38.00	38.00
Muestra 2	Penetración 1 (dmm ± 0.5 dmm)	34.90	36.00	37.00	38.00
	Penetración 2 (dmm ± 0.5 dmm)	35.00	35.00	37.00	39.00
	Penetración 3 (dmm ± 0.5 dmm)	35.50	36.00	38.00	39.10

En el cuadro anterior se muestran los datos obtenidos del ensayo de penetración del asfalto AC30 envejecido por medio de la prueba RTFOT según la norma ASTM D2872 sin aditivo y con las tres concentraciones de aditivo elegidas. La prueba se realizó en duplicado, con tres mediciones en cada muestra de acuerdo con el procedimiento descrito en la norma ASTM D5 en la Sección E de Anexos.

Cuadro 17. Mediciones realizadas para el ensayo de viscosidad a 60°C en asfalto AC30 en condiciones originales

Mediciones	Aditivo al 0.00%	Aditivo al 0.03%	Aditivo al 0.05%	Aditivo al 0.08%
Viscosidad 1 (P ± 0.01 P)	2875	2853	2988	3050
Viscosidad 2 (P ± 0.01 P)	2876	2848	2981	3046

En el cuadro anterior se muestran los datos obtenidos del ensayo de viscosidad a 60°C del asfalto AC30 en condiciones originales sin aditivo y con las tres concentraciones de aditivo elegidas. La prueba se realizó en duplicado de acuerdo con el procedimiento descrito en la norma ASTM D4402 en la Sección E de Anexos.

Cuadro 18. Mediciones realizadas para el ensayo de viscosidad a 60°C en asfalto AC30 en condiciones envejecidas

Mediciones	Aditivo al 0.00%	Aditivo al 0.03%	Aditivo al 0.05%	Aditivo al 0.08%
Viscosidad 1 (P ± 0.01 P)	8684	8823	8833	8830
Viscosidad 2 (P ± 0.01 P)	8682	8820	8840	8826

En el cuadro anterior se muestran los datos obtenidos del ensayo de viscosidad a 60°C del asfalto AC30 envejecido por medio de la prueba RTFOT según la norma ASTM D2872 sin aditivo y con las tres concentraciones de aditivo elegidas. La prueba se realizó en duplicado de acuerdo con el procedimiento descrito en la norma ASTM D4402 en la Sección E de Anexos.

Cuadro 19. Mediciones realizadas para el ensayo de punto de ablandamiento en asfalto AC30 en condiciones originales

Mediciones		Aditivo al 0.00%	Aditivo al 0.03%	Aditivo al 0.05%	Aditivo al 0.08%
Muestra 1	Punto de ablandamiento 1 (°C ± 0.1 °C)	48.50	48.60	49.90	51.00
	Punto de ablandamiento 2 (°C ± 0.1 °C)	48.80	49.00	50.00	52.00
Muestra 2	Punto de ablandamiento 1 (°C ± 0.1 °C)	48.00	49.00	50.00	52.00
	Punto de ablandamiento 2 (°C ± 0.1 °C)	48.50	48.90	50.50	52.00

En el cuadro anterior se muestran los datos obtenidos del ensayo de punto de ablandamiento del asfalto AC30 en condiciones originales sin aditivo y con las tres concentraciones de aditivo elegidas. La prueba se realizó en duplicado, con dos mediciones en cada muestra de acuerdo con el procedimiento descrito en la norma ASTM D36 en la Sección E de Anexos.

Cuadro 20. Mediciones realizadas para el ensayo de punto de ablandamiento en asfalto AC30 en condiciones envejecidas

Mediciones		Aditivo al 0.00%	Aditivo al 0.03%	Aditivo al 0.05%	Aditivo al 0.08%
Muestra 1	Punto de ablandamiento 1 (°C ± 0.1 °C)	53.00	54.40	55.90	56.20
	Punto de ablandamiento 2 (°C ± 0.1 °C)	53.00	55.00	56.10	56.20
Muestra 2	Punto de ablandamiento 1 (°C ± 0.1 °C)	52.50	54.00	55.50	55.90
	Punto de ablandamiento 2 (°C ± 0.1 °C)	53.00	55.00	56.00	56.00

En el cuadro anterior se muestran los datos obtenidos del ensayo de punto de ablandamiento del asfalto AC30 envejecido por medio de la prueba RTFOT según la norma ASTM D2872 sin aditivo y con las tres concentraciones de aditivo elegidas. La prueba se realizó en duplicado, con dos mediciones en cada muestra de acuerdo con el procedimiento descrito en la norma ASTM D36 en la Sección E de Anexos.

Figura 15. Espectro IR correspondiente al asfalto AC30 en condiciones originales sin aditivo obtenido en el laboratorio de la Universidad del Valle de Guatemala

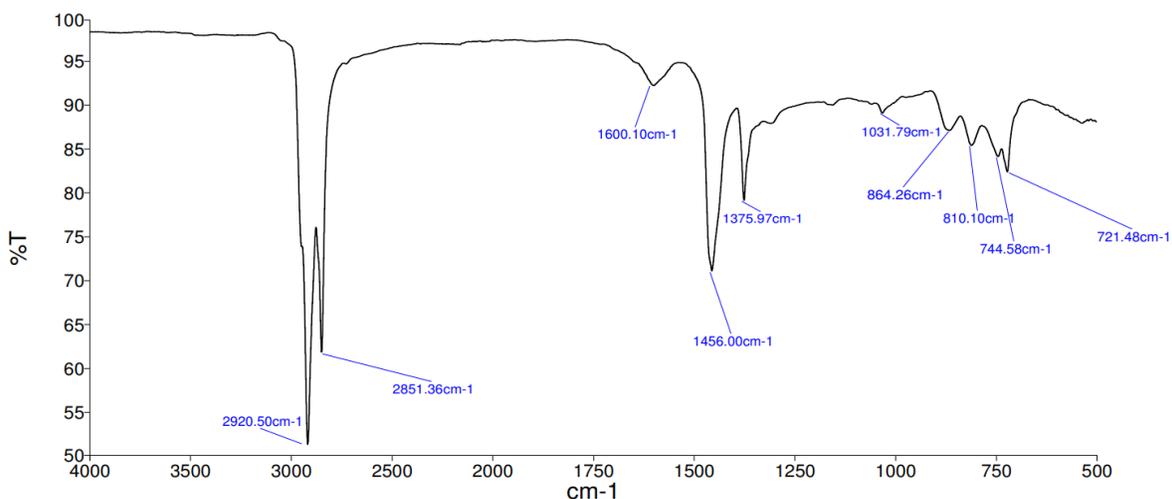


Figura 16. Espectro IR correspondiente al asfalto AC30 en condiciones originales con aditivo al 0.03% (m/m) obtenido en el laboratorio de la Universidad del Valle de Guatemala

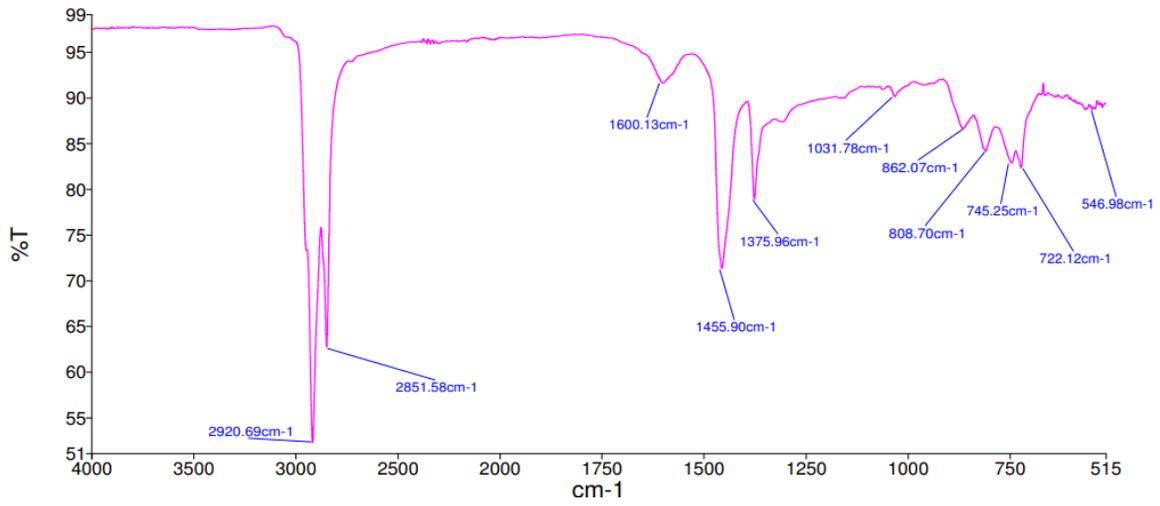


Figura 17. Espectro IR correspondiente al asfalto AC30 en condiciones originales con aditivo al 0.05% (m/m) obtenido en el laboratorio de la Universidad del Valle de Guatemala

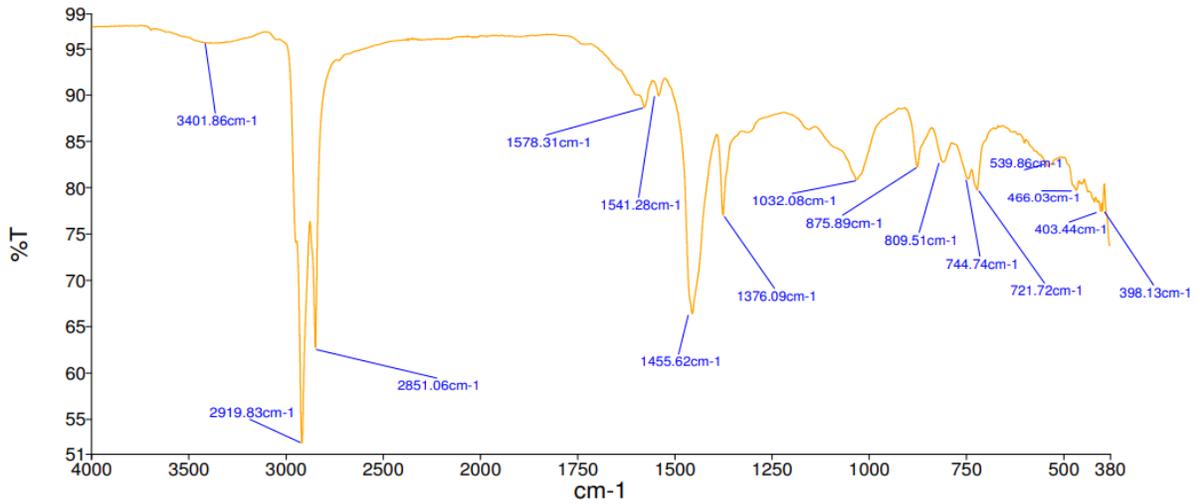


Figura 18. Espectro IR correspondiente al asfalto AC30 en condiciones originales con aditivo al 0.08% (m/m) obtenido en el laboratorio de la Universidad del Valle de Guatemala

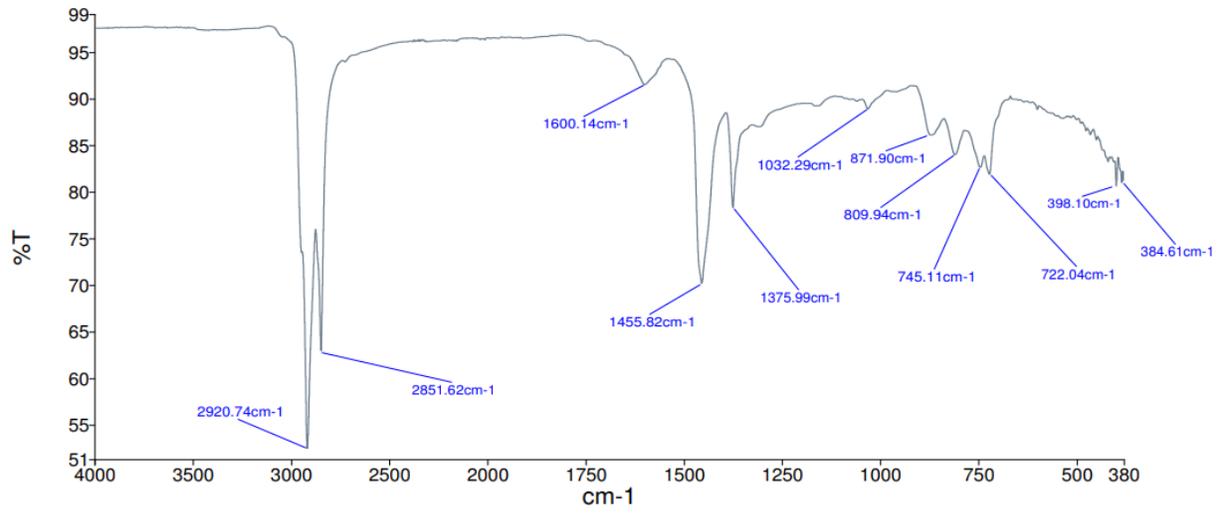


Figura 19. Espectro IR correspondiente al asfalto AC30 en condiciones envejecidas sin aditivo obtenido en el laboratorio de la Universidad del Valle de Guatemala

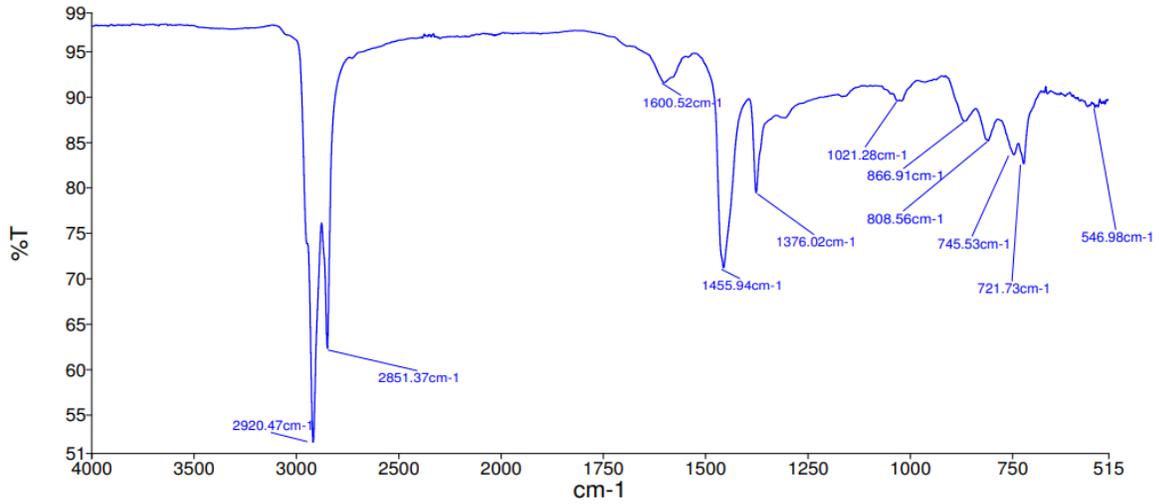


Figura 20. Espectro IR correspondiente al asfalto AC30 en condiciones envejecidas con aditivo al 0.03% (m/m) obtenido en el laboratorio de la Universidad del Valle de Guatemala

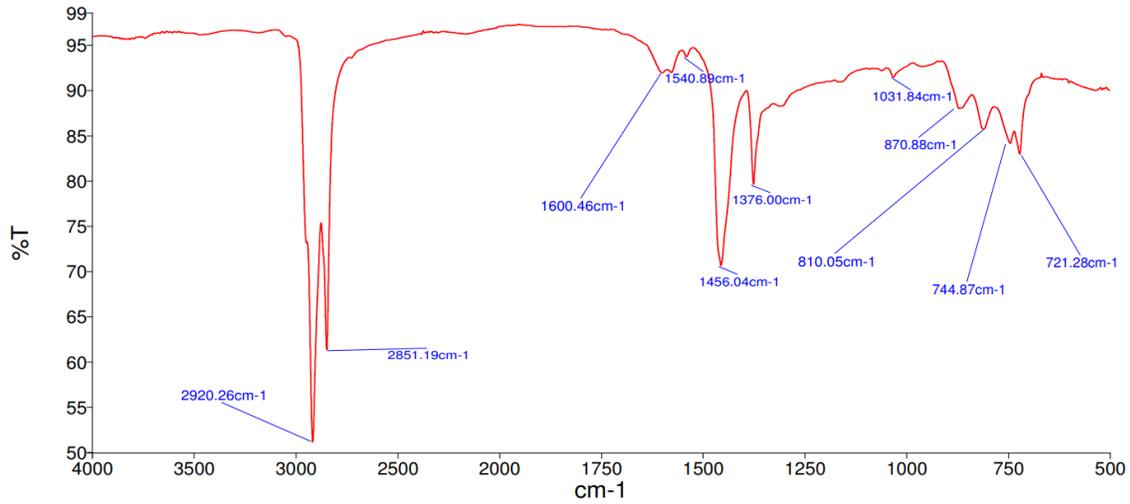


Figura 21. Espectro IR correspondiente al asfalto AC30 en condiciones envejecidas con aditivo al 0.05% (m/m) obtenido en el laboratorio de la Universidad del Valle de Guatemala

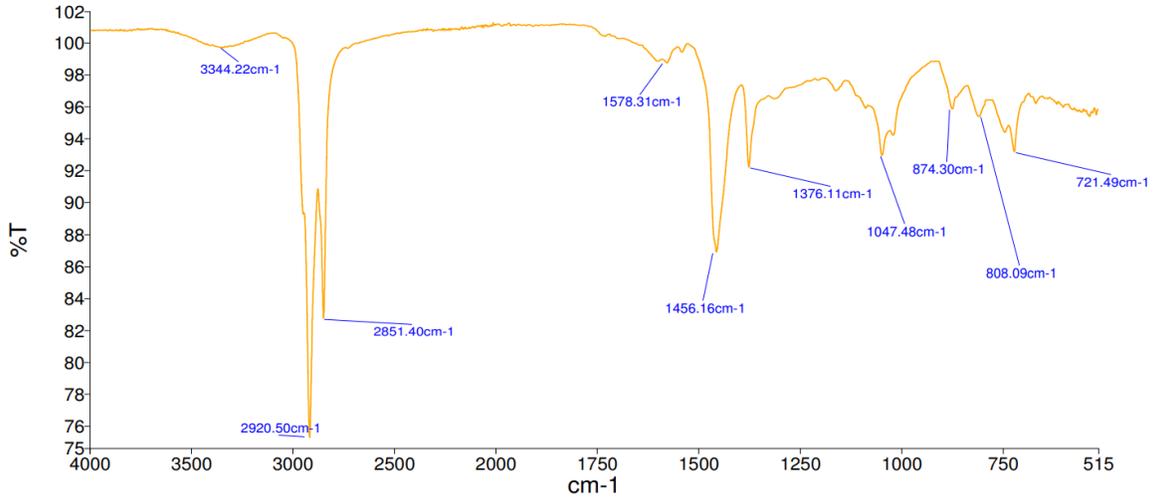
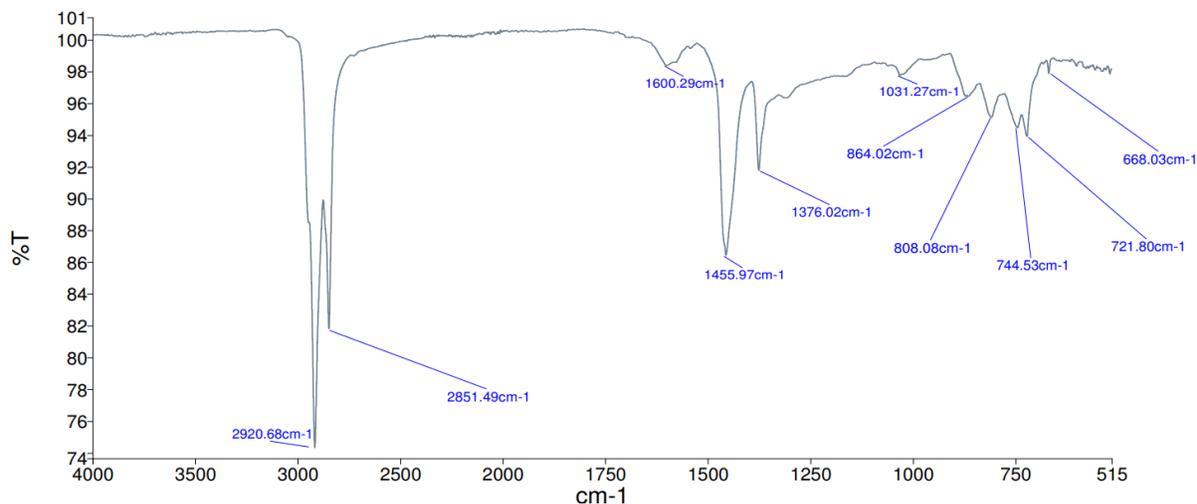


Figura 22. Espectro IR correspondiente al asfalto AC30 en condiciones envejecidas con aditivo al 0.08% (m/m) obtenido en el laboratorio de la Universidad del Valle de Guatemala



B. Datos calculados

Cuadro 21. Análisis estadístico y aceptabilidad de los datos para el ensayo de penetración en asfalto AC30 en condiciones originales

Análisis estadístico	Aditivo al 0.00%	Aditivo al 0.03%	Aditivo al 0.05%	Aditivo al 0.08%
Media aritmética	63.83 ± 0.913	59.33 ± 1.826	61.08 ± 1.646	61.92 ± 1.307
Desviación estándar	0.408	0.816	0.736	0.586
Coefficiente de variación	0.640%	1.376%	1.205%	0.944%
Intervalo de confianza al 95%	[63.51; 64.16]	[58.68; 59.99]	[60.49; 61.67]	[61.45; 62.38]
Rango del intervalo	0.654	1.306	1.178	0.934
Desviación estándar (ASTM D5-06)	0.915	0.800	0.832	0.858
Rango aceptable, 95% de confianza (ASTM D5-06)	2.589	2.264	2.355	2.428
Cumplimiento del rango aceptable	Sí cumple	Sí cumple	Sí cumple	Sí cumple

En el cuadro anterior se muestra el análisis estadístico realizado para los datos obtenidos en el Cuadro 11 del ensayo de penetración del asfalto AC30 en condiciones originales de acuerdo con los Cálculos 1 al 4. Asimismo, se presenta la aceptabilidad de los datos con base en la norma ASTM D5 en la Sección E de Anexos y según el Cálculo 5.

Cuadro 22. Análisis estadístico y aceptabilidad de los datos para el ensayo de penetración en asfalto AC30 en condiciones envejecidas

Análisis estadístico	Aditivo al 0.00%	Aditivo al 0.03%	Aditivo al 0.05%	Aditivo al 0.08%
Media aritmética	34.90 ± 1.095	35.83 ± 1.155	37.67 ± 1.155	38.67 ± 1.163
Desviación estándar	0.490	0.516	0.516	0.520
Coefficiente de variación	1.404%	1.441%	1.371%	1.375%
Intervalo de confianza al 95%	[34.51; 35.29]	[35.42; 36.25]	[37.25; 38.08]	[38.25; 39.08]
Rango	0.784	0.826	0.826	0.833
Desviación estándar (ASTM D5-06)	0.8	0.8	0.8	0.8
Rango aceptable, 95% de confianza (ASTM D5-06)	2.264	2.264	2.264	2.264
Cumplimiento del rango aceptable	Sí cumple	Sí cumple	Sí cumple	Sí cumple

En el cuadro anterior se muestra el análisis estadístico realizado para los datos obtenidos en el Cuadro 12 del ensayo de penetración del asfalto AC30 en condiciones envejecidas de acuerdo con los Cálculos 1 al 4. Asimismo, se presenta la aceptabilidad de los datos con base en la norma ASTM D5 en la Sección E de Anexos y según el Cálculo 5.

Cuadro 23. Análisis estadístico y aceptabilidad de los datos para el ensayo de viscosidad a 60°C en asfalto AC30 en condiciones originales

Análisis estadístico	Aditivo al 0.00%	Aditivo al 0.03%	Aditivo al 0.05%	Aditivo al 0.08%
Media aritmética	2,875.50 ± 0.707	2,850.50 ± 3.536	2,984.50 ± 4.950	3,048.00 ± 2.828
Desviación estándar	0.707	3.536	4.950	2.828
Coefficiente de variación	0.025%	0.124%	0.166%	0.093%
Intervalo de confianza	[2,874.7; 2,876.3]	[2,846.5; 2,854.5]	[2,978.9; 2,990.1]	[3,044.8; 3,051.2]
Porcentaje de diferencia	0.035%	0.176%	0.235%	0.131%
Porcentaje de diferencia aceptable (ASTM D4402)	3.5%	3.5%	3.5%	3.5%
Cumplimiento del porcentaje de diferencia	Sí cumple	Sí cumple	Sí cumple	Sí cumple

En el cuadro anterior se muestra el análisis estadístico realizado para los datos obtenidos en el Cuadro 13 del ensayo de viscosidad a 60°C del asfalto AC30 en condiciones originales de acuerdo con los Cálculos 1 al 4. Asimismo, se presenta la aceptabilidad de los datos con base en la norma ASTM D4402 en la Sección E de Anexos y según el Cálculo 6.

Cuadro 24. Análisis estadístico y aceptabilidad de los datos para el ensayo de viscosidad a 60°C en asfalto AC30 en condiciones envejecidas

Análisis estadístico	Aditivo al 0.00%	Aditivo al 0.03%	Aditivo al 0.05%	Aditivo al 0.08%
Media aritmética	8,863.00 ± 1.414	8,821.50 ± 2.121	8,836.50 ± 4.950	8,828 ± 2.828
Desviación estándar	1.155	1.528	3.606	4.509
Coefficiente de variación	0.016%	0.024%	0.056%	0.032%
Intervalo de confianza	[8,861.4; 8,864.6]	[8,819.1; 8,823.9]	[8,830.9; 8,842.1]	[8,824.8; 8,831.2]
Porcentaje de diferencia	0.023%	0.034%	0.079%	0.045%
Porcentaje de diferencia aceptable (ASTM D4402)	3.5%	3.5%	3.5%	3.5%
Cumplimiento del porcentaje de diferencia	Sí cumple	Sí cumple	Sí cumple	Sí cumple

En el cuadro anterior se muestra el análisis estadístico realizado para los datos obtenidos en el Cuadro 14 del ensayo de viscosidad a 60°C del asfalto AC30 en condiciones envejecidas de acuerdo con los Cálculos 1 al 4. Asimismo, se presenta la aceptabilidad de los datos con base en la norma ASTM D4402 en la Sección E de Anexos y según el Cálculo 6.

Cuadro 25. Análisis estadístico y aceptabilidad de los datos para el ensayo de punto de ablandamiento en asfalto AC30 en condiciones originales

Análisis estadístico	Aditivo al 0.00%	Aditivo al 0.03%	Aditivo al 0.05%	Aditivo al 0.08%
Media aritmética	48.45 ± 0.574	48.88 ± 0.328	50.10 ± 0.469	51.75 ± 0.866
Desviación estándar	0.332	0.189	0.271	0.500
Coefficiente de variación	0.685%	0.387%	0.541%	0.966%
Intervalo de confianza	[48.12; 48.77]	[48.68; 49.06]	[49.83; 50.37]	[51.26; 52.24]
Diferencia entre datos de la Muestra 1	0.3	0.4	0.1	1.0
Diferencia entre datos de la Muestra 2	0.5	0.1	0.5	0.0
Diferencia aceptable (ASTM D36-95)	1.2°C	1.2°C	1.2°C	1.2°C
Cumplimiento de la diferencia aceptable	Sí cumple	Sí cumple	Sí cumple	Sí cumple

En el cuadro anterior se muestra el análisis estadístico realizado para los datos obtenidos en el Cuadro 15 del ensayo de punto de ablandamiento del asfalto AC30 en condiciones originales de acuerdo con los Cálculos 1 al 4. Asimismo, se presenta la aceptabilidad de los datos con base en la norma ASTM D36 en la Sección E de Anexos.

Cuadro 26. Análisis estadístico y aceptabilidad de los datos para el ensayo de punto de ablandamiento en asfalto AC30 en condiciones envejecidas

Análisis estadístico	Aditivo al 0.00%	Aditivo al 0.03%	Aditivo al 0.05%	Aditivo al 0.08%
Media aritmética	52.875 ± 0.433	54.60 ± 0.849	55.875 ± 0.456	56.025 ± 0.218
Desviación estándar	0.250	0.490	0.263	0.126
Coefficiente de variación	0.473%	0.897%	0.471%	0.225%
Intervalo de confianza	[52.63; 53.11]	[54.12; 55.08]	[55.61; 56.13]	[55.90; 56.14]
Diferencia entre datos de la Muestra 1	0.0	0.6	0.2	0.2
Diferencia entre datos de la Muestra 2	0.5	1.0	0.5	0.1
Diferencia aceptable (ASTM D36-95)	1.2°C	1.2°C	1.2°C	1.2°C
Cumplimiento de la diferencia aceptable	Sí cumple	Sí cumple	Sí cumple	Sí cumple

En el cuadro anterior se muestra el análisis estadístico realizado para los datos obtenidos en el Cuadro 16 del ensayo de punto de ablandamiento del asfalto AC30 en condiciones originales de acuerdo con los Cálculos 1 al 4. Asimismo, se presenta la aceptabilidad de los datos con base en la norma ASTM D36 en la Sección E de Anexos.

Cuadro 27. Análisis ANOVA de un factor para el ensayo de penetración del asfalto AC30 en condiciones originales

Origen de variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de cuadrados	Valor F	Probabilidad	Valor crítico F
Entre grupos	62.875	3	20.958	48.835	2.18×10^{-9}	3.098
Dentro de los grupos	8.583	20	0.429			
Total	71.458	23				

En el cuadro anterior se muestra el análisis ANOVA de un factor realizado para comprobar alguna de las siguientes hipótesis: 1) Hipótesis nula que indica que no existe diferencia significativa entre las medias del ensayo de penetración de las mezclas de asfalto AC30 en condiciones originales a las concentraciones de aditivo elegidas y 2) Hipótesis alternativa que indica que las medias del ensayo de penetración de las mezclas de asfalto AC30 en condiciones originales son diferentes. Este análisis fue realizado con una significancia de 0.05 en Excel 2016.

Cuadro 28. Análisis ANOVA de un factor para el ensayo de penetración del asfalto AC30 en condiciones envejecidas

Origen de variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de cuadrados	Valor F	Probabilidad	Valor crítico F
Entre grupos	52.653	3	17.551	67.246	1.26×10^{-10}	3.098
Dentro de los grupos	5.220	20	0.261			
Total	57.873	23				

En el cuadro anterior se muestra el análisis ANOVA de un factor realizado para comprobar alguna de las siguientes hipótesis: 1) Hipótesis nula que indica que no existe diferencia significativa entre las medias del ensayo de penetración de las mezclas de asfalto AC30 en condiciones envejecidas a las concentraciones de aditivo elegidas y 2) Hipótesis alternativa que indica que las medias del ensayo de penetración de las mezclas de asfalto AC30 en condiciones envejecidas son diferentes. Este análisis fue realizado con una significancia de 0.05 en Excel 2016.

Cuadro 29. Análisis ANOVA de un factor para el ensayo de viscosidad a 60°C del asfalto AC30 en condiciones originales

Origen de variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de cuadrados	Valor F	Probabilidad	Valor crítico F
Entre grupos	51,628.38	3	17,209.46	1,512.919	1.45×10^{-6}	6.591382
Dentro de los grupos	45.5	4	11.375			
Total	51,673.88	7				

En el cuadro anterior se muestra el análisis ANOVA de un factor realizado para comprobar alguna de las siguientes hipótesis: 1) Hipótesis nula que indica que no existe diferencia significativa entre las medias del ensayo de viscosidad a 60°C de las mezclas de asfalto AC30 en condiciones originales a las concentraciones de aditivo elegidas y 2) Hipótesis alternativa que indica que las medias del ensayo de viscosidad a 60°C de las mezclas de asfalto AC30 en condiciones originales son diferentes. Este análisis fue realizado con una significancia de 0.05 en Excel 2016.

Cuadro 30. Análisis ANOVA de un factor para el ensayo de viscosidad a 60°C del asfalto AC30 en condiciones envejecidas

Origen de variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de cuadrados	Valor F	Probabilidad	Valor crítico F
Entre grupos	32,054.5	3	10,684.83	1,095.88	2.77×10^{-6}	6.591382
Dentro de los grupos	39	4	9.75			
Total	32,093.5	7				

En el cuadro anterior se muestra el análisis ANOVA de un factor realizado para comprobar alguna de las siguientes hipótesis: 1) Hipótesis nula que indica que no existe diferencia significativa entre las medias del ensayo de viscosidad a 60°C de las mezclas de asfalto AC30 en condiciones envejecidas a las concentraciones de aditivo elegidas y 2) Hipótesis alternativa que indica que las medias del ensayo de viscosidad a 60°C de las mezclas de asfalto AC30 en condiciones envejecidas son diferentes. Este análisis fue realizado con una significancia de 0.05 en Excel 2016.

Cuadro 31. Análisis ANOVA de un factor para el ensayo de punto de ablandamiento del asfalto AC30 en condiciones originales

Origen de variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de cuadrados	Valor F	Probabilidad	Valor crítico F
Entre grupos	26.282	3	8.761	74.691	4.95×10^{-8}	3.490
Dentro de los grupos	1.408	12	0.117			
Total	27.689	15				

En el cuadro anterior se muestra el análisis ANOVA de un factor realizado para comprobar alguna de las siguientes hipótesis: 1) Hipótesis nula que indica que no existe diferencia significativa entre las medias del ensayo de punto de ablandamiento de las mezclas de asfalto AC30 en condiciones originales a las concentraciones de aditivo elegidas y 2) Hipótesis alternativa que indica que las medias del ensayo de punto de ablandamiento de las mezclas de asfalto AC30 en condiciones originales son diferentes. Este análisis fue realizado con una significancia de 0.05 en Excel 2016.

Cuadro 32. Análisis ANOVA de un factor para el ensayo de punto de ablandamiento del asfalto AC30 en condiciones envejecidas

Origen de variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de cuadrados	Valor F	Probabilidad	Valor crítico F
Entre grupos	25.577	3	8.526	88.006	2.18×10^{-9}	3.490
Dentro de los grupos	1.163	12	0.0968			
Total	26.739	15				

En el cuadro anterior se muestra el análisis ANOVA de un factor realizado para comprobar alguna de las siguientes hipótesis: 1) Hipótesis nula que indica que no existe diferencia significativa entre las medias del ensayo de punto de ablandamiento de las mezclas de asfalto AC30 en condiciones envejecidas a las concentraciones de aditivo elegidas y 2) Hipótesis alternativa que indica que las medias del ensayo de punto de ablandamiento de las mezclas de asfalto AC30 en condiciones envejecidas son diferentes. Este análisis fue realizado con una significancia de 0.05 en Excel 2016.

Cuadro 33. Prueba de Tukey para el ensayo de penetración

Variable	Valor asfalto AC30 en condiciones originales	Valor asfalto AC30 en condiciones envejecidas
Error	0.429	0.261
Tamaño de la población	6	
Grados de libertad	20	
Valor de la distribución de Tukey	5.51	

En el cuadro anterior se muestran los valores utilizados para la determinación del valor de Tukey (q) del ensayo de penetración del asfalto AC30, tanto en condiciones originales como envejecidas, de acuerdo con el Cálculo 7. El valor se obtuvo de la tabla de cuantiles de la distribución de Tukey con una significancia del 0.05 mostrada en la Sección E en Anexos.

Cuadro 34. Prueba de Tukey para el ensayo de viscosidad a 60°C

Variable	Valor asfalto AC30 en condiciones originales	Valor asfalto AC30 en condiciones envejecidas
Error	11.375	9.750
Tamaño de la población	2	
Grados de libertad	4	
Valor de la distribución de Tukey	6.51	

En el cuadro anterior se muestran los valores utilizados para la determinación del valor de Tukey (q) del ensayo de viscosidad a 60°C del asfalto AC30, tanto en condiciones originales como envejecidas, de acuerdo con el Cálculo 7. El valor se obtuvo de la tabla de cuantiles de la distribución de Tukey mostrada en la Sección E en Anexos.

Cuadro 35. Prueba de Tukey para el ensayo de punto de ablandamiento

Variable	Valor asfalto AC30 en condiciones originales	Valor asfalto AC30 en condiciones envejecidas
Error	0.117	0.097
Tamaño de la población	4	
Grados de libertad	12	
Valor de la distribución de Tukey	5.50	

En el cuadro anterior se muestran los valores utilizados para la determinación del valor de Tukey (q) del ensayo de punto de ablandamiento del asfalto AC30, tanto en condiciones originales como envejecidas, de acuerdo con el Cálculo 7. El valor se obtuvo de la tabla de cuantiles de la distribución de Tukey mostrada en la Sección E en Anexos.

Cuadro 36. Comparación entre los resultados obtenidos de los ensayos físicos del asfalto AC30 en condiciones originales y envejecidas con los datos del laboratorio de UNO Bitumen®

Condiciones	Ensayo	Resultados promedio obtenidos	Resultados del laboratorio	Porcentaje de variación (%)
Originales	Penetración (dmm)	63.83	64.00	0.266
	Viscosidad (P)	2,875.50	2,875.00	0.017
	Punto de ablandamiento (°C)	48.45	48.80	0.717
Envejecidas	Penetración (dmm)	34.90	35.00	0.286
	Viscosidad (P)	8,683.00	8,682	0.012
	Punto de ablandamiento (°C)	52.875	52.50	0.714

En el cuadro anterior se muestran los resultados experimentales del ensayo de penetración, viscosidad a 60°C y punto de ablandamiento para el asfalto AC30 en condiciones originales y envejecidas junto con los datos establecidos de las mismas pruebas del laboratorio certificado de UNO Bitumen®. Asimismo, se muestra el porcentaje de variación entre los datos, el cual se calculó de acuerdo con el procedimiento seguido en el Cálculo 6.

Cuadro 37. Resultados obtenidos del asfalto 80-100 modificado con lignina

Porcentaje de lignina	Asfalto 80-100 original		Asfalto 80-100 envejecido	
	Punto de ablandamiento (°C)	Penetración (dmm)	Punto de ablandamiento (°C)	Penetración (dmm)
Original	45.6	85.3	43.3	72.3
5%	42.5	74.4	43.9	61.5
10%	48.1	78.2	46.3	59.2
15%	48.8	83.8	49.3	55.5
20%	48.6	71.1	48.0	61.7

(Rodríguez, *et al.*, 2016)

En el cuadro anterior se muestran los resultados del estudio llevado a cabo por la Universidad Piloto de Colombia para evaluar el efecto del envejecimiento del asfalto 80-100 modificado con lignina en concentraciones por peso de 5%, 10%, 15% y 20%. Las pruebas físicas realizadas consistieron en penetración y punto de ablandamiento, así como el ensayo RTFOT para el envejecimiento del asfalto. Estos resultados se utilizaron para comparar el comportamiento del asfalto AC30 con las tres dosificaciones de aditivo de 0.03%, 0.05% y 0.08% (m/m).

C. Análisis de error

Cálculo 1. Media muestral

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N}$$

Donde:

\bar{x} = media de las muestras

N = cantidad total de muestras

x_i = valor que presenta cada muestra (Skoog, *et al.*, 2015)

$$\bar{x} = \frac{(64 + 64 + 64 + 63 + 64 + 64) \text{ dmm}}{6} = 63.83 \text{ dmm}$$

El cálculo anterior muestra el procedimiento seguido en Excel para hallar la media muestral de los datos obtenidos en el Cuadro 11 para el ensayo de penetración del asfalto AC30 sin aditivo en condiciones originales. El cálculo se repitió de la misma manera para las mezclas de asfalto con aditivo a las tres concentraciones elegidas, tanto en condiciones originales como envejecidas, y para el resto de los ensayos de viscosidad a 60°C y punto de ablandamiento.

Cálculo 2. Desviación estándar muestral

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{N - 1}}$$

Donde:

s = desviación estándar de las muestras

\bar{x} = media de las muestras

N = cantidad total de muestras

x_i = valor que presenta cada muestra (Skoog, *et al.*, 2015)

$$s = \sqrt{\frac{(64 - 63.83)^2 + (64 - 63.83)^2 + (64 - 63.83)^2 + (63 - 63.83)^2 + (64 - 63.83)^2 + (64 - 63.83)^2}{6 - 1}} \\ = 0.408$$

El cálculo anterior muestra el procedimiento seguido en Excel para hallar la desviación estándar de los datos obtenidos en el Cuadro 11 para el ensayo de penetración del asfalto AC30 sin aditivo en condiciones originales. El cálculo se repitió de la misma manera para las mezclas de asfalto con aditivo a las tres concentraciones elegidas, tanto en condiciones originales como envejecidas, y para el resto de los ensayos de viscosidad a 60°C y punto de ablandamiento.

Cálculo 3. Coeficiente de variación

$$CV = \frac{s}{\bar{x}} * 100$$

Donde:

CV = coeficiente de variación de las muestras

s = desviación estándar de las muestras

\bar{x} = media de las muestras (Skoog, *et al.*, 2015)

$$CV = \frac{0.408}{63.83} * 100 = 0.640\%$$

El cálculo anterior muestra el procedimiento seguido en Excel para hallar el coeficiente de variación de los datos obtenidos en el Cuadro 11 para el ensayo de penetración del asfalto AC30 sin aditivo en condiciones originales. El cálculo se repitió de la misma manera para las mezclas de asfalto con aditivo a las tres concentraciones elegidas, tanto en condiciones originales como envejecidas, y para el resto de los ensayos de viscosidad a 60°C y punto de ablandamiento.

Cálculo 4. Intervalo de confianza con media poblacional desconocida

$$I.C \mu = \bar{x} \pm \frac{t_s}{\sqrt{N}}$$

Donde:

$I.C \mu$ = intervalo de confianza de la media poblacional

s = desviación estándar de las muestras

\bar{x} = media de las muestras

N = cantidad total de muestras

t_s = t student (Skoog, *et al.*, 2015)

$$I.C \mu \text{ superior} = 63.83 \text{ dmm} + 0.327 = 64.16 \text{ dmm}$$

$$I.C \mu \text{ inferior} = 63.83 \text{ dmm} - 0.327 = 63.51 \text{ dmm}$$

El cálculo anterior muestra el procedimiento seguido en Excel para hallar el intervalo de confianza de los datos obtenidos en el Cuadro 11 para el ensayo de penetración del asfalto AC30 sin aditivo en condiciones originales. Se utilizó la función “CONFIDENCE” en Excel con un nivel de significancia del 0.05. El cálculo se repitió de la misma manera para las mezclas de asfalto con aditivo a las tres concentraciones elegidas, tanto en condiciones originales como envejecidas, y para el resto de los ensayos de viscosidad a 60°C y punto de ablandamiento.

Cálculo 5. Desviación estándar según la norma ASTM D5

$$\sigma = 0.8 + 0.03 * (x - 60)$$

Donde:

x = resultado del ensayo de penetración

σ = desviación estándar del resultado del ensayo de penetración

$$\sigma = 0.8 + 0.03 * (63.83 - 60) = 0.915$$

El cálculo anterior muestra el procedimiento seguido para hallar la desviación estándar de acuerdo con la norma ASTM D5 para los datos obtenidos en el Cuadro 11. El cálculo se repitió de la misma manera para las medias muestrales mayores a 60 dmm de las mezclas de asfalto con aditivo a las tres concentraciones elegidas, tanto en condiciones originales como envejecidas.

Cálculo 6. Porcentaje de diferencia o variación

$$\frac{|V_2 - V_1|}{V_1} * 100$$

Donde:

V_1 = valor inicial

V_2 = valor final (Skoog, *et al.*, 2015)

$$\frac{|2,876 - 2,875|}{2,875} * 100 = 0.035\%$$

El cálculo anterior muestra el procedimiento seguido para hallar el porcentaje de diferencia de los datos del ensayo de viscosidad a 60°C del Cuadro 13 para compararlo con el establecido en la norma ASTM D4402. El cálculo se repitió de la misma manera para los datos de las mezclas de asfalto con aditivo a las tres concentraciones elegidas, tanto en condiciones originales como envejecidas. Asimismo, el cálculo se empleó en los Cuadros 32 y 33 para determinar la variación entre los datos obtenidos y los teóricos.

Cálculo 7. Valor de Tukey

$$w = q * \sqrt{\frac{CME}{r}}$$

Donde:

w = valor comparador para el par de tratamientos

q = valor de la tabla de Tukey

CME = cuadrado medio del error

r = repeticiones de los tratamientos (Anderson, *et al.*, 2017)

$$w = 5.51 * \sqrt{\frac{0.429}{6}}$$

El cálculo anterior muestra el procedimiento seguido para hallar el valor w de la prueba de Tukey para compararlo con la diferencia muestral de dos tratamientos, en este caso, siendo el asfalto AC30 en condiciones originales sin aditivo y con aditivo al 0.03%. El cálculo se repitió de la misma manera para el resto de los tratamientos, tanto en condiciones originales como envejecidas, y para los ensayos de viscosidad a 60°C y punto de ablandamiento. El valor q se obtuvo de la tabla respectiva en la Sección E de Anexos.

Cálculo 8. Propagación de error de la media muestral

$$S_y = y * \sqrt{\left(\frac{S_a}{a}\right)^2 + \left(\frac{S_b}{b}\right)^2 + \left(\frac{S_c}{c}\right)^2 + \dots + \left(\frac{S_n}{n}\right)^2}$$

Donde:

S_y = incertidumbre de la multiplicación o división

y = resultado de la multiplicación o división

$S_a, S_b, S_c, \dots S_n$ = incertidumbres de los valores operados

$a, b, c, \dots n$ = valores operados (Skoog, *et al.*, 2015)

$$S_y = 63.83 \text{ dmm} * \sqrt{\left(\frac{0.5}{64}\right)^2 + \left(\frac{0.5}{64}\right)^2 + \left(\frac{0.5}{64}\right)^2 + \left(\frac{0.5}{63}\right)^2 + \left(\frac{0.5}{64}\right)^2 + \left(\frac{0.5}{64}\right)^2} = 0.913 \text{ dmm}$$

El cálculo anterior muestra el procedimiento seguido para determinar la incertidumbre de la media de los datos obtenidos del ensayo de penetración del asfalto AC30 sin aditivo en condiciones originales. El cálculo se repitió de la misma manera para las mezclas de asfalto con aditivo a las tres concentraciones elegidas, tanto en condiciones originales como envejecidas, y para el resto de los ensayos de viscosidad a 60°C y punto de ablandamiento.

Cálculo 9. Proporciones de la mezcla de asfalto AC30 y aditivo al 0.03%

$$\text{Cantidad de aditivo} = \text{Peso total} * \text{Concentración de aditivo}$$

$$\text{Cantidad de aditivo} = 2,732 \text{ g} \pm 0.001 \text{ g} * 0.03\% = 0.820 \text{ g de aditivo}$$

$$\text{Cantidad de aditivo} = 2,732 \text{ g} \pm 0.001 \text{ g} * 0.05\% = 1.366 \text{ g de aditivo}$$

$$\text{Cantidad de aditivo} = 2,732 \text{ g} \pm 0.001 \text{ g} * 0.08\% = 2.186 \text{ g de aditivo}$$

El cálculo anterior muestra el procedimiento seguido para determinar la cantidad de aditivo necesaria en gramos para cada una de las mezclas de asfalto con 0.03%, 0.05% y 0.08% de concentración de aditivo. El peso total se refiere al peso total de la producción del día en que se realizaron las mezclas (martes 22 de agosto de 2023).

D. Equipo utilizado

Figura 23. Penetrómetro utilizado en el laboratorio certificado del Departamento de UNO Bitumen



Figura 24. Viscosímetro rotacional utilizado en el laboratorio certificado del Departamento de UNO Bitumen



Figura 25. Aparato de anillo y bola utilizado en el laboratorio certificado del Departamento de UNO Bitumen

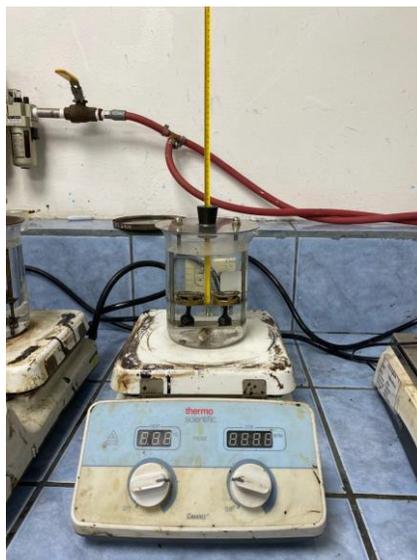


Figura 26. Horno rotatorio de película delgada utilizado en el laboratorio certificado del Departamento de UNO Bitumen



Figura 27. Espectrofotómetro de haz infrarrojo con Transformada de Fourier (FTIR) utilizado en el laboratorio de la Universidad del Valle de Guatemala



Figura 28. Marco de carga MS-398 utilizado para el ensayo TSR en el laboratorio de la empresa Serpin



Figura 29. Mordaza de Lottman utilizado para el ensayo TSR en el laboratorio de la empresa Serpin



Figura 30. Agregado pétreo pintado con asfalto AC30 para prueba de hervido realizada en el laboratorio de la empresa Serpin



Figura 31. Mezcla asfáltica con asfalto AC30 durante la prueba de hervido sobre una estufa de gas del laboratorio de la empresa Serpin



Figura 32. Mezcla asfáltica con asfalto AC30 colocado sobre una superficie blanca tras la prueba de hervido realizada en el laboratorio de la empresa Serpin



E. Resultados y normas ASTM

ANÁLISIS GRANULOMETRICO

AASHTO T- 30

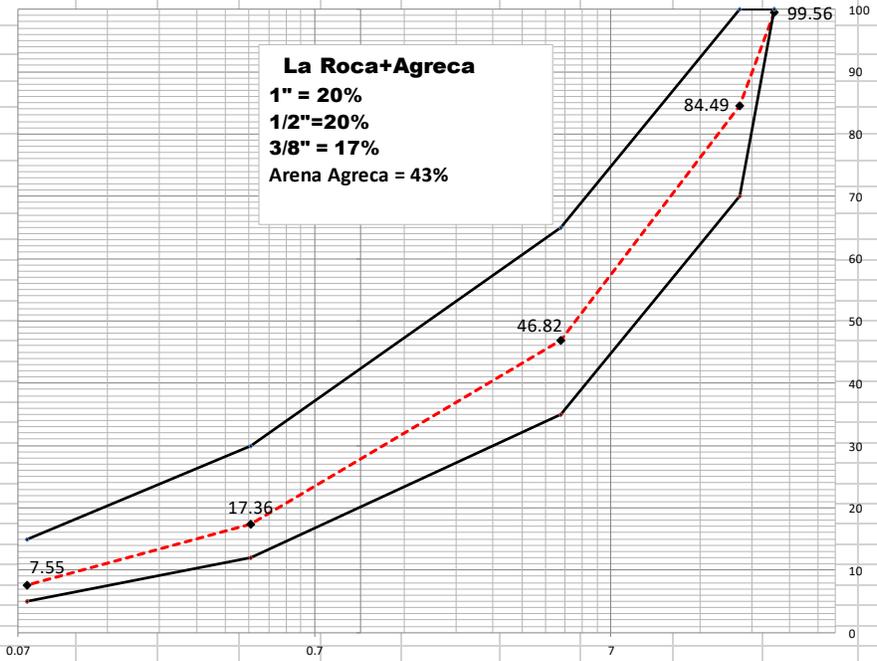


PROYECTO:	AEROPUERTO LA AURORA			
EMPRESA	CONSTRUDAM	FECHA :	#####	
TIPO DE MATERIAL Y USO	DISEÑO MEZCLA ASFALTICA- Tipo C (25mm)			
	INTEGRACION GRANULOMETRIA TEORICA			

INTEGRACION TIPO C

TAMIZ	APORTE		APORTE		APORTE		Agrega		APORTE		% PASA	total
	% pasa	%	% pasa	%	% pasa	%	% pasa	%	%	%		
	1"	20	1/2"	20	Piedrin 3/8"	17	Arena Tritu	43	TOTAL	100		
1 1/2"	100	20	100	20.00	100	17	100	43	100			
1 "	97.78	20	100	20.00	100	17	100	43	99.56			
3/4	22.45	4.49	100.00	20.00	100	17	100	43	84.49			
1/2	1.76	0.35	31.97	6.39	100.00	17.00	100	43	66.75			
3/8	1.41	0.28	1.08	0.22	91.40	15.54	100	43	59.04			
1/4	1.25	0.25	1.70	0.34	45.03	7.65	100.00	43.00	51.24			
4	1.22	0.24	1.60	0.32	19.24	3.27	99.97	42.99	46.82			
8	1.20	0.24	1.50	0.30	7.10	1.21	78.69	33.84	35.58			
10	1.20	0.24	1.50	0.30	6.84	1.16	73.10	31.43	33.14			
16	1.18	0.24	1.45	0.29	6.44	1.09	57.14	24.57	26.19			
30	1.16	0.23	1.41	0.28	6.21	1.06	42.77	18.39	19.96			
40	1.16	0.23	1.40	0.28	6.12	1.04	36.76	15.81	17.36			
50	1.13	0.23	1.38	0.28	6.04	1.03	31.18	13.41	14.94			
100	1.09	0.22	1.29	0.26	5.58	0.95	22.10	9.50	10.93			
200	0.93	0.19	1.09	0.22	4.46	0.76	14.86	6.39	7.55			
pasa												

No. 200 No.40 No.8 No.4 3/4" 1"



LABORATORISTA _____

Encargado _____

TÍTULO:
EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD AL AGUA DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS UTILIZANDO LA PRUEBA DE TRACCION INDIRECTA -TSR (AASHTO T 283)
PROYECTO: AEROPURRTO LA AURORA

TRAMO: TSR DE LABORATORIO

MATERIAL ASFÁLTICO: AC 30 DE UNOPETROL

ADITIVO EMPLEADO: NO

% ASFALTO EN MEZCLA: 4.50% AC 30 Unopetrol

% ADITIVO APLICADO: NO

DENSIDAD ASFALTO: 1.033

MUESTRA DE LABORATORIO
FECHA DE ENSAYO 9/23/2023

PROPORCION: 1" = 20%, 1/2"= 20%, 3/8"= 17%, Arena Tritu=43%

No.	item	Fórmula	1		2		3	
			SECO	HUMEDO	SECO	HUMEDO	SECO	HUMEDO
		Briqueta	4	1	5	2	6	3
Diámetro, mm	a		101.4	101.4	101.5	101.7	101.5	101.4
Espesor, mm	b		66.9	66.9	66.8	65.7	65.0	68.4
Peso aire	c		1229.5	1225.4	1220.5	1218.3	1215.6	1236.1
Peso agua	d		717.0	711.3	712.0	708.4	708.5	724.3
PESO SECO SATURADO	e		1243.5	1233.0	1235.5	1225.3	1223.4	1250.9
Volumen	f	e - d	526.5	521.7	523.5	516.9	514.9	526.6
Peso Vol. Del Especimen	g	c / f	2.335	2.349	2.331	2.357	2.361	2.347
Densidad Máxima Rice	h		2.525	2.525	2.525	2.525	2.525	2.525
% Vacíos aire	i	$[1 - (g/h)]*100$	7.52	6.98	7.67	6.66	6.50	7.04
Volumen vacíos aire	j	$(i * f)/100$	39.6	36.4	40.1	34.4	33.5	37.1
Carga, N	P		8902	---	8242	---	8808	---
SATURACION MEDIANTE VACÍO			VACÍO APLICADO: 20.3 * HG			TIEMPO APLICADO: 5 min		
Peso agua	d'		---	717.9	---	712.5	---	726.7
Peso SSS	e'		---	1248.7	---	1239.5	---	1260.0
Volumen	f'	e' - d'	---	530.8	---	527.0	---	533.3
Volumen absoluto de agua	k'	e' - c	---	23.3	---	21.2	---	23.9
% saturacion		$(100 * k')/j$	---	64.02	---	61.6	---	64.5
% hinchamiento		$[(f' - f) / f]*100$	---	1.74	---	1.95	---	1.27
ACONDICIONAMIENTO DE 24 h en agua a 60 °C (140 °F)								
Espesor, mm	b''		---	66.3	---	65.8	---	68.5
Peso agua	d''		---	721.7	---	720.6	---	733.3
Peso SSS	e''		---	1249.2	---	1242.5	---	1263.5
Volumen	f''	d'' - e''	---	527.5	---	521.9	---	530.2
Volumen absoluto de agua	k''	e'' - c	---	23.8	---	24.2	---	27.4
% saturacion		$(100 * k'')/j$	---	65.4	---	70.3	---	73.9
% hinchamiento		$[(f'' - f) / f]*100$	---	1.11	---	0.97	---	0.68
Carga, N	P''		---	6781	---	7017	---	6639
Resistencia seca	Rts	$(2000 * P) / (\pi * b * a)$	835.2	---	773.7	---	849.9	---
Resistencia húmeda	Rth	$(2000 * P'') / (\pi * b'' * a)$	---	642.7	---	667.9	---	608.8
Relacion Resistencia a la Tensión, %	RRT	$(Rth / Rts) * 100$	77.0		86.3		71.6	
Daño por humedad (visual), %	desvestimiento en las Particulas		15%		15%		15%	
Fractura/ Trituración del agregado, %			4%		4%		4%	
Relacion Resistencia a la Tensión obtenida, %			78.3					

REFERENCIA:
AASHTO T 283

OBSERVACIONES:

Temperatura agua 25 °C

Densidad agua 1.000000

12 golpes por cara a briquetas

Mezcla efectuada en el laboratorio con asfalto AC30 Optimo 4.50%, de UNOPETROL

ELABORÓ:	REVISÓ:	Vo. Bo.
LABORATORIO	CONTROL DE CALIDAD	SUPERVISION

TÍTULO:	EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD AL AGUA DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS UTILIZANDO LA PRUEBA DE TRACCION INDIRECTA -TSR (AASHTO T 283)
----------------	--

PROYECTO: AEROPURRTO LA AURORA

TRAMO: TSR DE LABORATORIO

MATERIAL ASFÁLTICO: AC 30 DE UNOPETROL

ADITIVO EMPLEADO: UNOBOND

% ASFALTO EN MEZCLA: 4.50% AC 30 Unopetrol

% ADITIVO APLICADO: 0.08%

DENSIDAD ASFALTO: 1.033

MUESTRA DE LABORATORIO
FECHA DE ENSAYO 26/09/2023

PROPORCION: 1" = 20%, 1/2"= 20%, 3/8"= 17%, Arena Tritu=43%

No.	item	Fórmula	2	1	4	3	6	5
			4	1	5	2	6	3
			1		2		3	
			SECO	HUMEDO	SECO	HUMEDO	SECO	HUMEDO
Diámetro, mm	a		101.6	101.4	101.3	101.5	101.3	101.5
Espesor, mm	b		67.3	66.3	66.6	66.2	66.9	67.5
Peso aire	c		1223.4	1226.3	1222.7	1220.8	1225.0	1225.4
Peso agua	d		717.0	719.0	715.1	712.2	715.2	715.8
PESO SECO SATURADO	e		1236.5	1237.9	1232.8	1231.1	1238.6	1239.1
Volumen	f	e - d	519.5	518.9	517.7	518.9	523.4	523.3
Peso Vol. Del Especimen	g	c / f	2.355	2.363	2.362	2.353	2.340	2.342
Densidad Máxima Rice	h		2.525	2.525	2.525	2.525	2.525	2.525
% Vacíos aire	i	$[1 - (g/h)]*100$	6.73	6.41	6.46	6.82	7.31	7.26
Volumen vacíos aire	j	$(i * f)/100$	35.0	33.2	33.5	35.4	38.3	38.0
Carga, N	P		8619	---	10599	---	9845	---
SATURACION MEDIANTE VACÍO			VACÍO APLICADO: 20.3 * HG			TIEMPO APLICADO: 5 min		
Peso agua	d'		---	722.2	---	727.2	---	729.2
Peso SSS	e'		---	1242.2	---	1245.7	---	1252.3
Volumen	f'	e' - d'	---	520.0	---	518.5	---	523.1
Volumen absoluto de agua	k'	e' - c	---	15.9	---	24.9	---	26.9
% saturacion		$(100 * k')/j$	---	47.84	---	70.3	---	70.8
% hinchamiento		$[(f' - f) / f]*100$	---	0.21	---	-0.08	---	-0.04
ACONDICIONAMIENTO DE 24 h en agua a 60 °C (140 °F)								
Espesor, mm	b''		---	66.8	---	66.3	---	67.6
Peso agua	d''		---	735.3	---	734.7	---	736.0
Peso SSS	e''		---	1248.6	---	1246.0	---	1255.2
Volumen	f''	d'' - e''	---	513.3	---	511.3	---	519.2
Volumen absoluto de agua	k''	e'' - c	---	22.3	---	25.2	---	29.8
% saturacion		$(100 * k'')/j$	---	67.1	---	71.2	---	78.4
% hinchamiento		$[(f'' - f) / f]*100$	---	-1.08	---	-1.46	---	-0.78
Carga, N	P''		---	8714	---	9656	---	9232
Resistencia seca	Rts	$(2000 * P) / (\pi * b * a)$	803.1	---	1000.4	---	924.8	---
Resistencia húmeda	Rth	$(2000 * P'') / (\pi * b'' * a)$	---	818.6	---	913.2	---	857.3
Relacion Resistencia a la Tensión, %	RRT	$(Rth / Rts) * 100$	101.9		91.3		92.7	
Daño por humedad (visual), %	desvestimiento en las Partículas		15%		15%		15%	
Fractura/ Trituración del agregado, %	Fractura de Agregados.		4%		4%		4%	
Relacion Resistencia a la Tensión obtenida, %			95.3					

REFERENCIA:
AASHTO T 283

OBSERVACIONES: Temperatura agua 25 °C Densidad agua 1.000000

12 golpes por cara a briquetas

Mezcla efectuada en el laboratorio con asfalto AC30 Optimo 4.50%, de UNOPETROL Aditivo Unobond 0.08%

ELABORÓ:	REVISÓ:	Vo. Bo.
Marlon Ruano		
LABORATORIO	CONTROL DE CALIDAD	SUPERVISION



Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials¹

This standard is issued under the fixed designation D 5; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.

1. Scope

1.1 This test method covers determination of the penetration of semi-solid and solid bituminous materials.

1.2 The needles, containers and other conditions described in this test method provide for the determinations of penetrations up to 500.

NOTE 1—For guidance in preparing and testing emulsion residue specimens for this test method, please refer to Section 35 of Test Method D 244.

1.3 The values stated in SI units are to be considered standard.

1.4 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:²

D 36 Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus)

D 244 Test Methods and Practices for Emulsified Asphalts

E 1 Specification for ASTM Liquid-in-Glass Thermometers

E 77 Test Method for Inspection and Verification of Thermometers

E 1137/E 1137M Specification for Industrial Platinum Resistance Thermometers

E 2251 Specification for Liquid-in-Glass ASTM Thermometers with Low-Hazard Precision Liquids

2.2 ANSI Standard:

B46.1 Surface Texture³

2.3 ISO Standard:

ISO Standard 468 Surface Roughness—Parameters, Their Values and General Rules for Specifying Requirements³

3. Terminology

3.1 Definitions:

3.1.1 *penetration, n*—consistency of a bituminous material expressed as the distance in tenths of a millimetre that a standard needle vertically penetrates a sample of the material under known conditions of loading, time, and temperature.

4. Summary of Test Method

4.1 The sample is melted (if starting at ambient temperature) and cooled under controlled conditions. The penetration is measured with a penetrometer by means of which a standard needle is applied to the sample under specific conditions.

5. Significance and Use

5.1 The penetration test is used as a measure of consistency. Higher values of penetration indicate softer consistency.

6. Apparatus

6.1 *Penetration Apparatus*—Any apparatus that permits the needle holder (spindle) to move vertically without measurable friction and is capable of indicating the depth of penetration to the nearest 0.1 mm, will be acceptable. The weight of the spindle shall be 47.5 ± 0.05 g. The total weight of the needle and spindle assembly shall be 50.0 ± 0.05 g. Weights of 50 ± 0.05 g and 100 ± 0.05 g shall also be provided for total loads of 100 g and 200 g, as required for some conditions of the test. The surface on which the sample container rests shall be flat and the axis of the plunger shall be at approximately 90° to this surface. The apparatus shall have a leveling indicator. The spindle shall be easily detached for checking its weight.

6.1.1 The leveling indicator shall be verified at least annually with a hand-held level.

6.2 Penetration Needle:

6.2.1 The needle (see Fig. 1) shall be made from fully hardened and tempered stainless steel, Grade 440-C or equal, HRC 54 to 60. The standard needle shall be approximately 50 mm (2 in.) in length, the long needle approximately 60 mm (2.4 in.). The diameter of all needles shall be 1.00 to 1.02 mm (0.0394 to 0.0402 in.). It shall be symmetrically tapered at one

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee D04 on Road and Paving Materials and is the direct responsibility of Subcommittee D04.44 on Rheological Tests.

Current edition approved June 1, 2006. Published June 2006. Originally approved in 1959. Last previous edition approved in 2005 as D 5 – 05a.

² For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For *Annual Book of ASTM Standards* volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

³ Available from American National Standards Institute, 25 W. 43rd St., 4th Floor, New York, NY 10036.

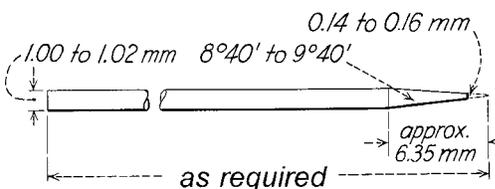


FIG. 1 Needle for Penetration Test

end by grinding to a cone having an angle between 8.7 and 9.7° over the entire cone length. The cone should be coaxial with the straight body of the needle. The total axial variation of the intersection between the conical and straight surfaces shall not be in excess of 0.2 mm (0.008 in.). The truncated tip of the cone shall be within the diameter limits of 0.14 and 0.16 mm (0.0055 and 0.0063 in.) and square to the needle axis within 2°. The entire edge of the truncated surface at the tip shall be sharp and free of burrs. When the surface texture is measured in accordance with American National Standard B 46.1 or ISO 468 the surface roughness height, Ra, of the tapered cone shall be 0.2 to 0.3 µm (8 to 12 µin.) arithmetic average. The surface roughness height, Ra, of the needle shank shall be 0.025 to 0.125 µm (1 to 5 µin.). The needle shall be mounted in a non-corroding metal ferrule. The ferrule shall be 3.2 ± 0.05 mm (0.126 ± 0.002 in.) in diameter and 38 ± 1 mm (1.50 ± 0.04 in.) in length. The exposed length of the standard needle shall be within the limits of 40 to 45 mm (1.57 to 1.77 in.), and the exposed length of the long needle shall be 50 to 55 mm (1.97 to 2.17 in.). The needle shall be rigidly mounted in the ferrule. The run-out (total-indicator reading) of the needle tip and any portion of the needle relative to the ferrule axis shall not exceed 1 mm (0.04 in.). The weight of the ferrule needle assembly shall be 2.50 ± 0.05 g. (A drill hole at the end of the ferrule or a flat on the side is permissible to control the weight.) Individual identification markings shall be placed on the ferrule of each needle; the same markings shall not be repeated by a manufacturer within a 3-year period.

6.2.2 Needles used in testing materials for conformance to specifications shall be shown to have met the requirements of 6.2.1 when tested by a qualified agency.

6.3 *Sample Container*—A metal or glass cylindrical, flat-bottom container of essentially the following dimensions shall be used:

For penetrations below 40:	
Diameter, mm	33–50
Internal depth, mm	8–16
For penetrations below 200:	
Diameter, mm	55
Internal depth, mm	35
For penetrations between 200 and 350:	
Diameter, mm	55–75
Internal depth, mm	45–70
For penetrations 350 to 500	
Diameter, mm	55
Internal depth, mm	70

NOTE 2—For referee testing, the container for testing materials with penetrations below 40 shall be 55 × 35 mm.

6.4 *Water Bath*—A bath capable of maintaining a temperature of 25 ± 0.1°C (77 ± 0.2°F) or any other temperature of test within 0.1°C. The bath shall have a perforated shelf supported in a position not less than 50 mm from the bottom

and not less than 100 mm below the liquid level in the bath. If penetration tests are to be made in the bath itself, an additional shelf strong enough to support the penetrometer shall be provided. Brine may be used in the bath for determinations at low temperatures.

NOTE 3—The use of distilled water is recommended for the bath. Take care to avoid contamination of the bath water by surface active agents, release agents, or other chemicals; as their presence may affect the penetration values obtained.

6.5 *Transfer Dish*—When used, the transfer dish shall have a capacity of at least 350 mL and of sufficient depth of water to cover the large sample container. It shall be provided with some means for obtaining a firm bearing and preventing rocking of the container. A three-legged stand with three-point contact for the sample container is a convenient way of ensuring this.

6.6 *Timing Device*—For hand-operated-penetrometers any convenient timing device such as an electric timer, a stop watch, or other spring activated device may be used provided it is graduated in 0.1 s or less and is accurate to within ±0.1 s for a 60-s interval. An audible seconds counter adjusted to provide 1 beat each 0.5 s may also be used. The time for a 11-count interval must be 5 ± 0.1 s. Any automatic timing device attached to a penetrometer must be accurately calibrated to provide the desired test interval within ±0.1 s.

6.7 *Thermometers*—Calibrated liquid-in-glass thermometers of suitable range with subdivisions and maximum scale error of 0.1°C (0.2°F) or any other thermometric device of equal accuracy, precision and sensitivity shall be used. Thermometers shall conform to the requirements of Specification E 1 or Specification E 2251. Other thermometric devices shall conform to the requirements of Specification E 1137.

6.7.1 Suitable thermometers commonly used are:

ASTM Number	Range
17C or 17F	19 to 27°C (66 to 80°F)
63C or 63F	–8 to + 32°C (18 to 89°F)
64C or 64F	25 to 55°C (77 to 131°F)

6.7.2 The thermometer used for the water bath shall periodically be calibrated in accordance with Test Method E 77. An alternate thermometric device shall periodically be calibrated in accordance with Specification E 1137.

7. Preparation of Test Specimen

7.1 If the sample is not sufficiently fluid as received, heat the sample with care, stirring when possible to prevent local overheating, until it has become sufficiently fluid to pour. In no case should the temperature be raised to more than 60°C above the expected softening point for tar pitch in accordance with Test Method D 36, or to more than 90°C above it for petroleum asphalt (bitumen). Heat samples for the minimum time necessary to ensure that they are sufficiently fluid. Stir to ensure that the sample is homogeneous. Avoid incorporating bubbles into the sample.

7.2 Pour the sample into the sample container to a depth such that, when cooled to the temperature of test, the depth of the sample is at least 120% of the depth to which the needle is expected to penetrate. Pour separate portions for each variation in test conditions. If the sample container is less than 65 mm in

diameter and the expected penetration is greater than 200, pour three separate portions for each variation in test conditions.

NOTE 4—If sufficient material is available it is recommended to fill the sample container to near the brim.

7.3 Allow to cool in air at a temperature between 15 and 30°C for 45 min to 1.5 hr for the small (33 × 16 mm or less) container, 1 to 1.5 h for the medium (55 × 35 mm) container and 1.5 to 2 h for larger containers. Then place the samples together with the transfer dish, if used, in the water bath maintained at the prescribed temperature of test. Allow the small (33 × 16 mm or less) container to remain for 45 min to 1.5 hr, the medium (55 × 35 mm) container to remain for 1 to 1.5 h and the larger containers to remain for 1.5 to 2 h.

NOTE 5—If conditions warrant, it is appropriate to loosely cover each container as a protection against dust. A convenient way of doing this is by covering with a lipped beaker.

8. Test Conditions

8.1 Where the conditions of test are not specifically mentioned, the temperature, load, and time are understood to be 25°C (77°F), 100 g, and 5 s, respectively. Other conditions may be used for special testing, such as the following:

Temperature, °C (°F)	Load, g	Time, s
0 (32)	200	60
4 (39.2)	200	60
45 (113)	50	5
46.1 (115)	50	5

In such cases the specific conditions of test shall be reported.

9. Procedure

9.1 Examine the needle holder and guide to establish the absence of water and other extraneous materials. If the penetration is expected to exceed 350 use a long needle, otherwise use a short needle. Clean a penetration needle with toluene or other suitable solvent, dry with a clean cloth, and insert the needle into the penetrometer. Unless otherwise specified place the 50-g weight above the needle, making the total weight 100 ± 0.1 g.

9.2 If tests are to be made with the penetrometer in the bath, place the sample container directly on the submerged stand of the penetrometer. Keep the sample container completely covered with water in the bath. If the tests are to be made with the penetrometer outside the bath, place the sample container in the transfer dish, cover the container completely with water from the constant temperature bath and place the transfer dish on the stand of the penetrometer.

9.3 Using the level indicator, ensure that the apparatus is level.

9.4 Either note the reading of the penetrometer dial or bring the pointer to zero. Position the needle by slowly lowering it until its tip just makes contact with the surface of the sample. This is accomplished by bringing the actual needle tip into contact with its image reflected on the surface of the sample from a properly placed source of light. Quickly release the needle holder for the specified period of time and adjust the

instrument to measure the distance penetrated in tenths of a millimetre. If the container moves, ignore the result.

9.5 Make at least three determinations at points on the surface of the sample not less than 10 mm from the side of the container and not less than 10 mm apart. If the transfer dish is used, return the sample and transfer dish to the constant temperature bath between determinations. Use a clean needle for each determination. If the penetration is greater than 200, use at least three needles leaving them in the sample until the three determinations have been completed. If the sample container is less than 65 mm in diameter and the expected penetration is greater than 200, make one penetration in each of the three separate containers prepared as per section 7.2.

NOTE 6—With a 55 mm container and a sample with expected penetration greater than 200, it is often not possible to position the needle holder for a third determination without bumping the other two in-place needles. For routine testing it is acceptable to use a single container for all three needle penetrations, moving the first two needles as necessary, provided that the difference between the highest and lowest penetration values does not exceed the value specified in section 10.1.

10. Report

10.1 Report to nearest whole unit the average of three penetrations whose values do not differ by more than the following:

	0 to	50 to	150 to	250 to
Penetration	49	149	249	500
Maximum difference between highest and lowest penetration	2	4	12	20

11. Precision and Bias

11.1 Precision estimates for this test were developed using the AMRL proficiency sample database, which includes paired-sample data representing approximately 16 000 repetitions of the penetration test at 25°C, and approximately 4000 repetitions of the penetration test at 4°C. The materials for the database are conventional straight run and blended asphalts with penetration values ranging from 29 to 286 units measured at 25°C. Analysis of this data indicates that precision of the test can be described with the following equations:

Symbols:	x = penetration test result (units) σ = standard deviation of penetration test result (units)
Single Operator Precision at 25°C	if x < 60, then σ = 0.8 if x > 60, then σ = 0.8 + 0.03 (x-60)
Multilab Precision at 25°C	if x < 60, then σ = 2.5 if x > 60, then σ = 2.5 + 0.05 (x-60)
Single Operator Precision at 4°C	σ = 0.8 + 0.02 (x)
Multilab Precision at 4°C	σ = 2.5 + 0.08 (x)

11.2 The acceptable range of two results (95 % confidence) can be determined by multiplying the standard deviation estimates given in section 11.1 by a factor of 2.83.

11.3 This test method has no bias because the values determined are defined only in terms of the test method.

12. Keywords

12.1 asphalt; bitumen; penetration

ASTM International takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.

This standard is copyrighted by ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org).



Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer¹

This standard is issued under the fixed designation D 4402; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.

1. Scope

1.1 This test method outlines a procedure for measuring the apparent viscosity of asphalt from 38 to 260°C (100 to 500°F) using a rotational viscometer and a temperature-controlled thermal chamber for maintaining the test temperature.

1.2 The values stated in SI units are to be regarded as the standard. The values given in centimetre gram second (cgs) units and inch-pound units are for information only.

1.3 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use. See 10.6 for specific precautionary information.*

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:

E 220 Method for Calibration of Thermocouples by Comparison Techniques²

3. Terminology

3.1 Definitions:

3.1.1 *apparent viscosity, n* —the ratio of shear stress to shear rate for a Newtonian or non-Newtonian liquid.

3.1.2 *filled asphalt, n* —an asphalt blend that contains finely dispersed insoluble mineral matter.

3.1.3 *Newtonian liquid, n* —a liquid for which the rate of shear is proportional to the shearing stress. The constant ratio of the shearing stress to the rate of shear is the viscosity of the liquid. The viscosity of a Newtonian liquid is therefore not dependent on its shear rate. If the ratio is not constant, the

liquid is non-Newtonian. Many liquids exhibit both Newtonian and non-Newtonian behavior, depending on the shear rate or temperature, or both.

3.1.4 *shear rate, n* —the measure of the speed at which the intermediate layers of the liquid move with respect to each other. Its unit of measure is the reciprocal second (sec^{-1}).

3.1.5 *shear stress, n* —the force per unit area required to produce the shearing action. Its SI unit of measurement is the pascal, and its cgs unit of measurement is dynes/cm².

3.1.6 *viscosity, n* —the ratio between the applied shear stress and the rate of shear is called the coefficient of viscosity. This coefficient is a measure of the resistance to flow of the liquid. The SI unit of viscosity is the pascal second (Pa·s). The centimetre gram second (cgs) unit of viscosity is the poise (dyne·s/cm²) and is equivalent to 0.1 Pa·s. Frequently, centipoise (cP)—equal to one millipascal second (mPa·s)—is used as the viscosity unit.

3.2 Definitions of Terms Specific to This Standard:

3.2.1 *apparatus-measuring geometry, n* —the part of the equipment that is immersed in the asphalt sample, the dimensions of which are used, in conjunction with the rotational resisting torque, to calculate the apparent viscosity. This geometry may be referred to by the equipment manufacturer as a spindle, bob, inner concentric cylinder, vane, and so forth.

4. Summary of Test Method

4.1 A rotational viscometer, as described in this test method, is used to measure the apparent viscosity of asphalt at elevated temperatures. The torque on the apparatus-measuring geometry, rotating in a thermostatically controlled sample holder containing a sample of asphalt, is used to measure the relative resistance to rotation. The torque and speed are used to determine the viscosity of the asphalt in pascal seconds, millipascal seconds, or centipoise.

5. Significance and Use

5.1 This test method is used to measure the apparent viscosity of asphalts at handling, mixing, or application temperatures.

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee D08 on Roofing, Waterproofing, and Bituminous Materials and is the direct responsibility of Subcommittee D08.03 on Surfacing and Bituminous Materials for Membrane Waterproofing and Builtup Roofing.

Current edition approved June 10, 2002. Published July 2002. Originally published as D 4402 – 84. Last previous edition D 4402 – 87 (2000) ^{ϵ 1}.

² *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 14.03.

5.2 Some asphalts may exhibit non-Newtonian behavior under the conditions of this test method, or at temperatures within the range of this test method. Since non-Newtonian viscosity values are not absolute properties, but reflect the behavior of the fluid within the particular measurement system, it should be recognized that measurements made by this test method may not always predict field performance under the conditions of use.

5.3 Comparisons between non-Newtonian viscosity values should be made only for measurements made with similar conditions of temperature, shear rate, and shear history.

6. Apparatus

6.1 *Rotational Viscometer*, capable of measuring the torque required to rotate the selected apparatus-measuring geometry at a selected constant speed while submerged in asphalt at constant desired test temperature, and with the capability to convert the torque measurement to viscosity in pascal seconds, millipascal seconds, or centipoise. This calculation may need to be done manually for some instruments.

6.2 *Apparatus-measuring geometry*, of various shapes and sizes, for measurement of various viscosities of asphalt.

6.3 *Temperature-Controlled Thermal Chamber Heater*, for maintaining the sample of asphalt at the test temperature.

6.4 *Sample Chambers*, reusable or disposable.

6.5 *Temperature Controller*, capable of maintaining the specimen temperatures to $\pm 1.0^{\circ}\text{C}$ ($\pm 2.0^{\circ}\text{F}$) for test temperatures between 38 and 260°C (100 to 500°F).

6.6 *Balance*, readable to 0.1 g, for determining the mass of asphalt sample.

6.7 *Calibration Device*, in accordance with Method E 220 for calibrating the temperature controller.

7. Reagents and Materials

7.1 Solvents for cleaning sample chamber, apparatus-measuring geometry, and accessories.

8. Preparation of Apparatus

8.1 The rotational viscometer and thermal chamber heater shall be leveled and prepared as recommended by the instrument manufacturer.

9. Calibration and Standardization

9.1 The viscometer shall be zeroed before use, or as needed, or both, according to the manufacturer's instructions.

9.2 The accuracy of the viscometer shall be checked at least annually using a certified reference fluid of known viscosity at various temperatures, using the method described by the supplier of the reference fluid. The reference fluid shall be certified to be Newtonian in behavior over the full range of expected test temperatures and shear rates. The reference fluid shall be certified at a temperature within 50°C (90°F) of the temperature(s) to be used during the test. The viscosity measured shall be within $\pm 2\%$ of the certified value, or the viscometer requires recalibration.

9.3 The accuracy of the temperature reading and the temperature stability of the temperature controller are to be checked at least every six months by placing an asphalt sample or high flash point oil in the test chamber, and equilibrating to

a temperature within 50°C (90°F) of the temperature(s) to be used during the test. The sample temperature shall then be measured to within $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ ($\pm 0.2^{\circ}\text{F}$) by using a NIST traceable measuring device, as described in Method E 220. If any temperature differential is indicated, the set point of the temperature controller shall be offset accordingly.

10. Procedure

10.1 Follow the manufacturer's instructions for the operation of the instrument.

10.2 Allow the instrument electronics to warm up for at least five minutes before conducting any calibrations or analyses.

10.3 Set the temperature controller to the desired test temperature, taking into account any offset determined in 9.3.

10.4 Select an apparatus-measuring geometry that will develop a resisting torque between 10 and 98 % of the instrument capacity at the selected speed. Generally, measurements will be more accurate at higher torque readings.

10.5 Preferably, preheat the sample chamber and the selected apparatus-measuring geometry until temperature equilibrium has been obtained for at least 15 min. If filled asphalts are being measured, this step is mandatory.

10.6 Add the volume of sample specified by the manufacturer for the apparatus-measuring geometry to be used to the sample chamber. A convenient way for measuring the volume is by weighing out the amount calculated from approximate density data for the sample and then returning the sample chamber to the temperature controlled chamber heater. Thoroughly stir filled asphalts to obtain a representative sample before weighing.

NOTE 1—Exercise caution to avoid sample overheating, and to avoid the ignition of samples with low flash points.

10.7 Do not overfill the sample chamber, but ensure that the measuring portion of the apparatus-measuring geometry will be completely immersed. Follow the manufacturer's instructions. The sample volume is critical to meet the system calibration standard.

10.8 Insert the selected preheated apparatus-measuring geometry into the liquid in the chamber, and couple it to the viscometer, following the manufacturer's instructions for proper alignment.

10.9 Bring the asphalt sample to the desired temperature within 30 min and allow it to equilibrate at the desired test temperature for a minimum of 10 min before beginning the measurement. In the case of filled asphalts, start the motor rotation immediately.

10.10 Start the motor rotation of the viscometer at a speed that will develop a resisting torque that is between 10 and 98 % of the full-scale instrument capacity. Maintain this speed and allow the sample to equilibrate for an additional 5 min. Temperature should not deviate more than $\pm 1.0^{\circ}\text{C}$ ($\pm 2.0^{\circ}\text{F}$) during this conditioning period.

10.11 Measure either the viscosity or the torque at 1-min intervals for a total of three minutes. The instrument may perform this measurement automatically.

10.12 Repeat steps 10.9-10.11 for each test temperature required. If filled asphalts are being measured, a new, freshly stirred sample will be required for each test temperature.

10.13 If torque readings are above 98 % of the instrument capacity at the lowest test temperature, decrease the speed of rotation of the apparatus-measuring geometry and continue with the test, or repeat steps 10.5-10.11 with a smaller diameter geometry and the appropriate volume of sample.

10.14 If the torque reading is below 10 % of the instrument capacity at the highest test temperature, increase the speed of rotation of the apparatus geometry, or repeat steps 10.5-10.11 with a larger diameter geometry and the appropriate volume of sample.

10.15 If the instrument does not read out directly in viscosity units, multiply the torque readings by the appropriate factor to obtain the viscosity values.

11. Calculation

11.1 If the instrument does not automatically average three readings, then calculate the result as the arithmetic average of the three readings taken at 1-min intervals, rounded to three significant figures. If the rotational viscometer has a digital output displaying viscosity in centipoise (cP), multiply by 0.001 to obtain the viscosity in pascal seconds (Pa·s). For instruments that offer automation, the results of a 3-min integration shall be acceptable.

12. Report

12.1 Report test temperature, apparatus-measuring geometry type and size, torque in mNm or percent of instrument

capacity, and speed in sec^{-1} or r/min with viscosity results in pascal seconds (Pa·s), millipascal seconds (mPa·s), or centipoise (cP). For example, Viscosity at $135^\circ\text{C} = 0.455 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ with Bohlin 25 mm bob, 8.3 mNm of torque at 10 sec^{-1} or Viscosity at $400^\circ\text{F} = 240 \text{ cP}$ with Brookfield spindle number 31, 48 % torque at 60 r/min.

13. Precision and Bias

13.1 The following criteria shall be used for judging the acceptability of any result (95 % confidence level).

13.1.1 *Repeatability*—Duplicate values by the same operator shall not be considered suspect unless they differ by more than 3.5 %.

13.1.2 *Reproducibility*—The values reported by each of two laboratories, representing the arithmetic average of duplicate determinations, shall not be considered suspect unless they differ by more than 14.5 %.

NOTE 2—Precision data was developed using unfilled asphalt, and the repeatability and reproducibility values do not apply to filled asphalt. Round robin testing is currently in progress to develop precision data for filled asphalt. In addition, since this procedure has been revised since the original precision statement was developed, the repeatability and reproducibility variability of unfilled asphalt will also be reevaluated before the next reappraisal date.

13.2 *Bias*—No information can be presented on the bias of this test method for measuring apparent viscosity because no material having an accepted reference value is available.

14. Keywords

14.1 asphalt; rotational viscometer; viscosity

ASTM International takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.

This standard is copyrighted by ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org).



Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus)¹

This standard is issued under the fixed designation D 36; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reappraisal. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reappraisal.

1. Scope

1.1 This test method covers the determination of the softening point of bitumen in the range from 30 to 157°C (86 to 315°F) using the ring-and-ball apparatus immersed in distilled water (30 to 80°C), USP glycerin (above 80 to 157°C), or ethylene glycol (30 to 110°C).

1.2 The values stated in SI units are to be regarded as the standard.

1.3 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:

C 670 Practice for Preparing Precision and Bias Statements for Test Methods for Construction Materials²

D 92 Test Method for Flash and Fire Points by Cleveland Open Cup³

D 140 Practice for Sampling Bituminous Materials⁴

D 3461 Test Method for Softening Point of Asphalt and Pitch (Mettler Cup-and-Ball Method)⁵

E 1 Specification for ASTM Thermometers⁶

3. Summary of Test Method

3.1 Two horizontal disks of bitumen, cast in shouldered brass rings, are heated at a controlled rate in a liquid bath while each supports a steel ball. The softening point is reported as the mean of the temperatures at which the two disks soften enough to allow each ball, enveloped in bitumen, to fall a distance of 25 mm (1.0 in.).

4. Significance and Use

4.1 Bitumens are viscoelastic materials without sharply defined melting points; they gradually become softer and less

viscous as the temperature rises. For this reason, softening points must be determined by an arbitrary and closely defined method if results are to be reproducible.

4.2 The softening point is useful in the classification of bitumens, as one element in establishing the uniformity of shipments or sources of supply, and is indicative of the tendency of the material to flow at elevated temperatures encountered in service.

5. Apparatus

5.1 *Rings*—Two square-shouldered brass rings conforming to the dimensions shown in Fig. 1(a).

5.2 *Pouring Plate*—A flat, smooth, brass plate approximately 50 by 75 mm (2 by 3 in.).

5.3 *Balls*—Two steel balls, 9.5 mm ($\frac{3}{8}$ in.) in diameter, each having a mass of 3.50 ± 0.05 g.

5.4 *Ball-Centering Guides*—Two brass guides for centering the steel balls, one for each ring, conforming to the general shape and dimensions shown in Fig. 1 (b).

5.5 *Bath*—A glass vessel, capable of being heated, not less than 85 mm in inside diameter and not less than 120 mm in depth from the bottom of the flare.

NOTE 1—An 800-mL, low-form Griffin beaker of heat-resistant glass meets this requirement.

5.6 *Ring Holder and Assembly*—A brass holder designed to support the two rings in a horizontal position, conforming to the shape and dimensions shown in Fig. 1 (c), supported in the assembly illustrated in Fig. 1 (d). The bottom of the shouldered rings in the ring holder shall be 25 mm (1.0 in.) above the upper surface of the bottom plate, and the lower surface of the bottom plate shall be 16 ± 3 mm ($\frac{5}{8} \pm \frac{1}{8}$ in.) from the bottom of the bath.

5.7 Thermometers:

5.7.1 An ASTM Low Softening Point Thermometer, having a range from -2 to $+80^\circ\text{C}$ or 30 to 180°F , and conforming to the requirements for Thermometer 15C or 15F as prescribed in Specification E 1.

5.7.2 An ASTM High Softening Point Thermometer, having a range from 30 to 200°C or 85 to 392°F , and conforming to the requirements for Thermometer 16C or 16F as prescribed in Specification E 1.

5.7.3 The appropriate thermometer shall be suspended in the assembly as shown in Fig. 1 (d) so that the bottom of the bulb is level with the bottom of the rings and within 13 mm (0.5 in.) of the rings, but not touching them or the ring holder.

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee D-8 on Roofing, Waterproofing, and Bituminous Materials and is the direct responsibility of Subcommittee D08.03 on Surfacing and Bituminous Materials for Membrane Waterproofing and Builtup Roofing.

Current edition approved Oct. 10, 1995. Published December 1995. Originally published as D 36 – 62T. Last previous edition D 36 – 86 (1993) ^{ϵ 1}.

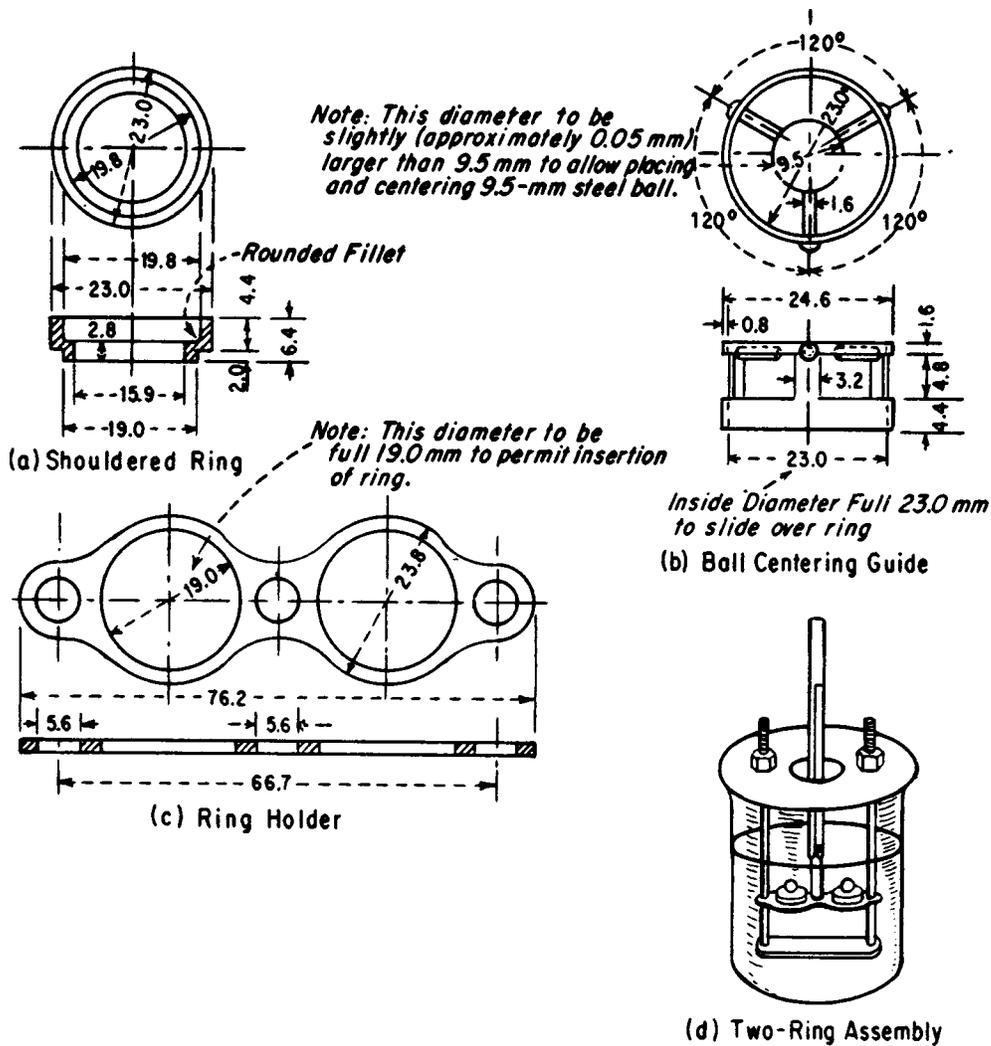
² *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 04.02.

³ *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 05.01.

⁴ *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 04.03.

⁵ *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 04.04.

⁶ *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 14.03.



NOTE 1—All dimensions are in millimetres.

FIG. 1 Shouldered Ring, Ball-Centering Guide, Ring Holder, and Assembly of Apparatus Showing Two Rings

Substitution of other thermometers shall not be permitted.

6. Reagents and Materials

6.1 *Bath Liquids:*

6.1.1 *Freshly Boiled Distilled Water.*

NOTE 2—The use of freshly boiled distilled water is essential to avoid trapping air bubbles on the surface of the specimen which may affect the results.

6.1.2 *USP Glycerin, or*

NOTE 3—**Caution:** Glycerin has a flash point of 160°C (320°F) in accordance with Test Method D 92.

6.1.3 *Ethylene Glycol, with a boiling point between 195 and 197°C (383 and 387°F).*

NOTE 4—**Caution:** Ethylene glycol is toxic when taken internally or inhaled as a vapor. Avoid prolonged or repeated skin contact and inhalation of vapors. Its flash point is 115°C (239°F) in accordance with Test Method D 92. When using this bath liquid, conduct the test in a vented laboratory hood with adequate exhaust fan capacity to ensure removal of toxic vapors.

6.2 *Release Agents:*

6.2.1 To prevent adhesion of bitumen to the pouring plate when casting disks, the surface of the brass pouring plate may be thinly coated just before use with silicone oil or grease (Note 5), a mixture of glycerin and dextrin, talc, or china clay.

NOTE 5—**Caution:** Isolate silicones from other bituminous testing equipment and samples to avoid contamination, and wear disposable rubber gloves whenever handling silicones or apparatus coated with them. Silicone contamination can produce erroneous results in other tests such as those for penetration and flash point.

7. Sampling

7.1 Sample the material in accordance with Practice D 140.

8. Test Specimens

8.1 Do not start unless it is planned to complete preparation and testing of all asphalt specimens within 6 h and all coal-tar pitch specimens within 4½ h. Heat the bitumen sample with care, stirring frequently to prevent local overheating, until it has become sufficiently fluid to pour (Note 6). Stir carefully to avoid incorporation of air bubbles in the sample.

NOTE 6—An electric hot plate having a minimum power to unit-surface-area ratio of 37 kW/m² has been found satisfactory for this purpose.

8.1.1 Take no more than 2 h to heat an asphalt sample to its pouring temperature; in no case shall this be more than 110°C (200°F) above the expected softening point of the asphalt.

8.1.2 Take no more than 30 min to heat a coal-tar pitch sample to its pouring temperature; in no case shall this be more than 55°C (100°F) above the expected softening point of the coal-tar-pitch.

8.1.3 If the test must be repeated later, do not reheat this sample; use a fresh sample in a clean container to prepare new test specimens.

8.2 Heat the two brass rings (but not the pouring plate) to the approximate pouring temperature, and place them on the pouring plate treated with one of the release agents.

8.3 Pour a slight excess of the heated bitumen into each ring, and then allow the specimens to cool in ambient air for at least 30 min. For materials that are soft at room temperature, cool the specimens for at least 30 min at an air temperature at least 10°C (18°F) below the expected softening point. From the time the specimen disks are poured, no more than 240 min shall elapse before completion of the test.

8.4 When the specimens have cooled, cut away the excess bitumen cleanly with a slightly heated knife or spatula, so that each disk is flush and level with the top of its ring.

9. Procedure

9.1 Select one of the following bath liquids and thermometers appropriate for the expected softening point:

9.1.1 Freshly boiled distilled water for softening points between 30 and 80°C (86 and 176°F); use Thermometer 15C or 15F. The starting bath temperature shall be 5 ± 1°C (41 ± 2°F).

9.1.2 USP glycerin for softening points above 80°C (176°F) and up to 157°C (315°F); use Thermometer 16C or 16F. The starting bath temperature shall be 30 ± 1°C (86 ± 2°F).

9.1.3 Ethylene glycol for softening points between 30 and 110°C (86 and 230°F); use Thermometer 16C or 16F. The starting bath temperature shall be 5 ± 1°C (41 ± 2°F).

9.1.4 For referee purposes, all softening points up to 80°C (176°F) shall be determined in a water bath and all softening points above 80°C (176°F) shall be determined in a glycerin bath.

9.2 Assemble the apparatus in the laboratory hood with the specimen rings, ball-centering guides, and thermometer in position, and fill the bath so that the liquid depth will be 105 ± 3 mm (4 1/8 ± 1/8 in.) with the apparatus in place. If using ethylene glycol, make sure the hood exhaust fan is turned on and operating properly to remove toxic vapors. Using forceps, place the two steel balls in the bottom of the bath so they will reach the same starting temperature as the rest of the assembly.

9.3 Place the bath in ice water, if necessary, or gently heat to establish and maintain the proper starting bath temperature for 15 min with the apparatus in place. Take care not to contaminate the bath liquid.

9.4 Again using forceps, place a ball from the bottom of the bath in each ball-centering guide.

9.5 Heat the bath from below so that the temperature indicated by the thermometer rises at a uniform rate of 5°C

(9°F)/min (Note 7). Protect the bath from drafts, using shields if necessary. Do not average the rate of temperature rise over the test period. The maximum permissible variation for any 1-min period after the first 3 min shall be ± 0.5°C (± 1.0°F). Reject any test in which the rate of temperature rise does not fall within these limits.

NOTE 7—Rigid adherence to the prescribed heating rate is essential to reproducibility of results. Either a gas burner or electric heater may be used, but the latter must be of the low-lag, variable output type to maintain the prescribed rate of heating.

9.6 Record for each ring and ball the temperature indicated by the thermometer at the instant the bitumen surrounding the ball touches the bottom plate. Make no correction for the emergent stem of the thermometer. If the difference between the two temperatures exceeds 1°C (2°F), repeat the test.

10. Calculation

10.1 For a given bitumen specimen, the softening point determined in a water bath will be lower than that determined in a glycerin bath. Since the softening point determination is necessarily arbitrary, this difference matters only for softening points slightly above 80°C (176°F).

10.2 The change from water to glycerin for softening points above 80°C creates a discontinuity. With rounding, the lowest possible asphalt softening point reported in glycerin is 84.5°C (184°F), and the lowest possible coal-tar pitch softening point reported in glycerin is 82.0°C (180°F). Softening points in glycerin lower than these translate to softening points in water of 80°C (176°F) or less, and shall be so reported.

10.2.1 The correction for asphalt is -4.2°C (-7.6°F), and for coal-tar pitch is -1.7°C (-3.0°F). For referee purposes, repeat the test in a water bath.

10.2.2 Under any circumstances, if the mean of the two temperatures determined in glycerin is 80.0°C (176.0°F) or lower for asphalt, or 77.5°C (171.5°F) or lower for coal-tar pitch, repeat the test in a water bath.

10.3 To convert softening points slightly above 80°C (176°F) determined in water to those determined in glycerin, the correction for asphalt is +4.2°C (+7.6°F) and for coal-tar pitch is +1.7°C (+3.0°F). For referee purposes, repeat the test in a glycerin bath.

10.3.1 Under any circumstances, if the mean of the two temperatures determined in water is 85.0°C (185.0°F) or higher, repeat the test in a glycerin bath.

10.4 Results obtained by using an ethylene glycol bath will vary from those using water and glycerin. The following formulas shall be used to calculate the differences:

Asphalt:

$$SP(\text{glycerin}) = 1.026583 \times SP(\text{ethylene glycol}) - 1.334968^{\circ}\text{C} \quad (1)$$

$$SP(\text{water}) = 0.974118 \times SP(\text{ethylene glycol}) - 1.44459^{\circ}\text{C} \quad (2)$$

Coal Tar:

$$SP(\text{glycerin}) = 1.044795 \times SP(\text{ethylene glycol}) - 5.063574^{\circ}\text{C} \quad (3)$$

$$\dagger SP(\text{water}) = 1.061111 \times SP(\text{ethylene glycol}) - 8.413488^{\circ}\text{C} \quad (4)$$

† Editorially corrected.

11. Report

11.1 When using ASTM Thermometer 15C or 15F, report to the nearest 0.2°C or 0.5°F the mean or corrected mean of the temperatures recorded in 9.6 as the softening point.

11.2 When using ASTM Thermometer 16C or 16F report to the nearest 0.5°C or 1.0°F the mean or corrected mean of the temperatures recorded in 9.6 as the softening point.

11.3 Report the bath liquid used in the test.

12. Precision and Bias

12.1 With distilled water or USP glycerin, the following criteria shall be used for judging the acceptability of results (95 % probability):

12.1.1 *Single-Operator Precision*—The single-operator standard deviation has been found to be 0.41°C (0.73°F). Therefore, results of two properly conducted tests by the same operator on the same sample of bitumen should not differ by more than 1.2°C (2.0°F).⁷

12.1.2 *Multilaboratory Precision*—The multilaboratory standard deviation has been found to be 0.70°C (1.26°F).

Therefore, results of two properly conducted tests on the same sample of bitumen from two laboratories should not differ by more than 2.0°C (3.5°F).⁷

12.2 With ethylene glycol, the following criteria shall be used for judging the acceptability of results:

12.2.1 *Single-Operator Precision*—The single-operator standard deviation has been found to be 0.72°C (1.29°F). Therefore, results of two properly conducted tests by the same operator on the same sample of bitumen should not differ by more than 2.0°C (3.5°F).⁷

12.2.2 *Multilaboratory Precision*—The multilaboratory standard deviation has been found to be 1.08°C (1.95°F). Therefore, results of two properly conducted tests on the same sample of bitumen from two laboratories should not differ by more than 3.0°C (5.5°F).⁷

12.3 *Bias*—The procedure in Test Method D 36 has no bias because the value of the softening point of the bitumen test is defined in terms of this test method.

13. Keywords

13.1 asphalt; ball and ring; bitumen; coal tar; softening point

⁷ These numbers represent, respectively, the (1S) and (D2S) limits as described in Practice C 670.

The American Society for Testing and Materials takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428.



Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test)¹

This standard is issued under the fixed designation D 2872; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

1. Scope

1.1 This test method is intended to measure the effect of heat and air on a moving film of semi-solid asphaltic materials. The effects of this treatment are determined from measurements of the selected properties of the asphalt before and after the test.

1.2 The values stated in inch-pound units are to be regarded as the standard.

1.3 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:

D 113 Test Method for Ductility of Bituminous Materials²

D 2171 Test Method for Viscosity of Asphalts by Vacuum Capillary Viscometer²

E 1 Specification for ASTM Thermometers³

3. Summary of Test Method

3.1 A moving film of asphaltic material is heated in an oven for 85 min at 325°F (163°C). The effects of heat and air are determined from changes in physical test values as measured before and after the oven treatment. An optional procedure is provided for determining the change in sample mass.

3.2 Precision values for this test method have been developed for viscosity at 140°F (60°C); and ductility at 60° (15.6°C).

4. Significance and Use

4.1 This test method indicates approximate change in properties of asphalt during conventional hot-mixing at about 302°F (150°C) as indicated by viscosity and other rheological measurements. It yields a residue which approximates the asphalt condition as incorporated in the pavement. If the

mixing temperature differs appreciably from the 302°F (150°C) level, more or less effect on properties will occur. This test method also can be used to determine mass change, which is a measure of asphalt volatility.

5. Apparatus⁴

5.1 *Oven*—This shall be a double-walled electrically heated convection-type oven. Its inside dimensions shall be 15 in. (381 mm) high, 19 in. (483 mm) wide, and $17\frac{1}{2} \pm \frac{1}{2}$ in. (445 ± 13 mm) deep (with the door closed). The door shall contain a symmetrically located window with dimensions of 12 to 13 in. (305 to 330 mm) wide by 8 to 9 in. (203 to 229 mm) high. The window shall contain two sheets of heat-resistant glass separated by an air space. The window should permit an unobstructed view of the interior of the oven. The top of the upper heating element shall be $1 \pm \frac{1}{8}$ in. (25 ± 3 mm) below the oven floor.

5.1.1 The oven shall be vented at the top and bottom. The bottom vents shall be located symmetrically to supply incoming air around the heating elements. They shall have an open area of 2.31 ± 0.11 in.² (15.0 ± 0.7 cm²). The top vents shall be symmetrically arranged in the upper part of the oven and have an open area of 1.45 ± 0.07 in.² (9.3 ± 0.45 cm²).

5.1.2 The oven shall have an air plenum covering the side walls and ceiling. The air space shall be $1\frac{1}{2}$ in. (38.1 mm) deep from the walls and ceiling. At a midpoint in the width of the oven, and 6 in. (152.4 mm) from the face of the circular metal carriage to its axis, a squirrel cage-type fan $5\frac{1}{4}$ in. (133 mm) OD by $2\frac{7}{8}$ in. (73 mm) wide shall be turned at 1725 rpm by an externally mounted motor. The squirrel cage fan shall be set so that the fan turns in an opposite direction to its vanes. The air flow characteristics of the fan-plenum system shall be suction from the floor of the oven through the wall plenums and exhaust of the air through the fan. Fig. 1 and Fig. 2 show details of this plenum system.

5.1.3 The oven shall be equipped with a proportional control thermostat capable of maintaining 325°F (163°C) temperature within $\pm 1.0^\circ\text{F}$ ($\pm 0.5^\circ\text{C}$). The sensing element of the thermostat shall be placed 1 in. (25.4 mm) from the left side and approximately $1\frac{1}{2}$ in. (38.1 mm) from the ceiling of the interior of the plenum-enclosed oven so that the end of the

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee D-4 on Road and Paving Materials and is the direct responsibility of Subcommittee D04.46 on Durability and Distillation Tests.

Current edition approved April 10, 1997. Published April 1998. Originally published as D2872 – 70. Last previous edition D2872 – 88 (1995) ^{ϵ 1}.

² *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 04.03.

³ *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 14.03.

⁴ Complete equipment may be obtained from James Cox and Sons Inc., P.O. Box 674, Colfax, CA 95713.

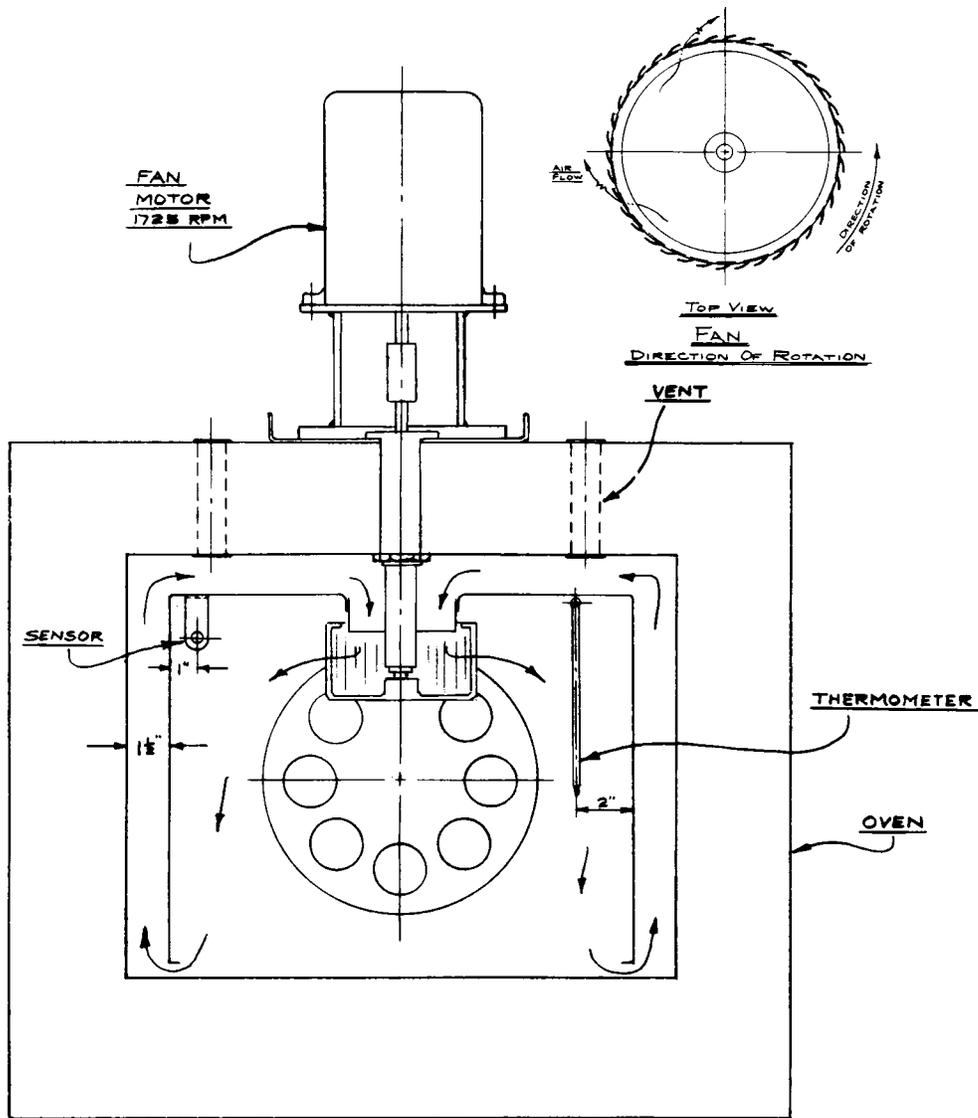


FIG. 1 Schematic of Air Flow Front View

sensing element is at a point approximately 8 in. (203.2 mm) from the rear interior wall of the oven. The thermometer shall be hung or affixed to a mounting in the ceiling which is 2 in. (50.8 mm) from the right side of the oven at a midpoint in the depth of the oven. The thermometer shall hang down into the oven so that the bulb of the thermometer is within 1 in. of an imaginary line level with the shaft of the circular metal carriage. The heating controls shall be capable of bringing the fully loaded oven back to the test temperature within a 10-min period after insertion of the samples in a preheated oven.

5.1.4 The oven shall be provided within a 12-in. (304.8-mm) diameter, vertical circular carriage (see Fig. 2 for details). This carriage shall be provided with suitable openings and clips for firmly holding eight glass containers in a horizontal position (see Fig. 3). The vertical carriage shall be mechanically driven through a 3/4-in. (19-mm) diameter shaft at a speed of 15 ± 0.2 r/min.

5.1.5 The oven shall be equipped with an air jet positioned to blow heated air into each bottle at its lowest point of travel. The air jet shall have an outlet orifice 0.04 in. (1.016 mm) in

diameter (No. 60 drill) connected to a 25-ft (7.6-m) length of 5/16-in. (8-mm) outside diameter refrigeration copper tubing. This tubing shall be coiled to lie flat on the bottom of the oven and lead to a source of fresh, dried, dust-free regulated air.

NOTE 1—Activated silica gel treated with an indicator is a satisfactory desiccant for the dried air.

5.2 *Flowmeter*—The flowmeter may be any suitable type capable of accurately measuring the airflow at a rate of 4000 mL/min. The flowmeter shall be located downstream of all regulating devices and upstream of the copper coil. The flowmeter shall be positioned so it is maintained at approximately room temperature. The airflow shall be calibrated periodically using a wet-test meter or other displacement method. This calibration shall be based on airflow exiting the air jet and shall be conducted with the oven off and at room temperature.

5.3 *Thermometer*—This shall be an ASTM Loss on Heat Thermometer conforming to the requirements for Thermometer 13C as prescribed in Specification E 1. This thermometer

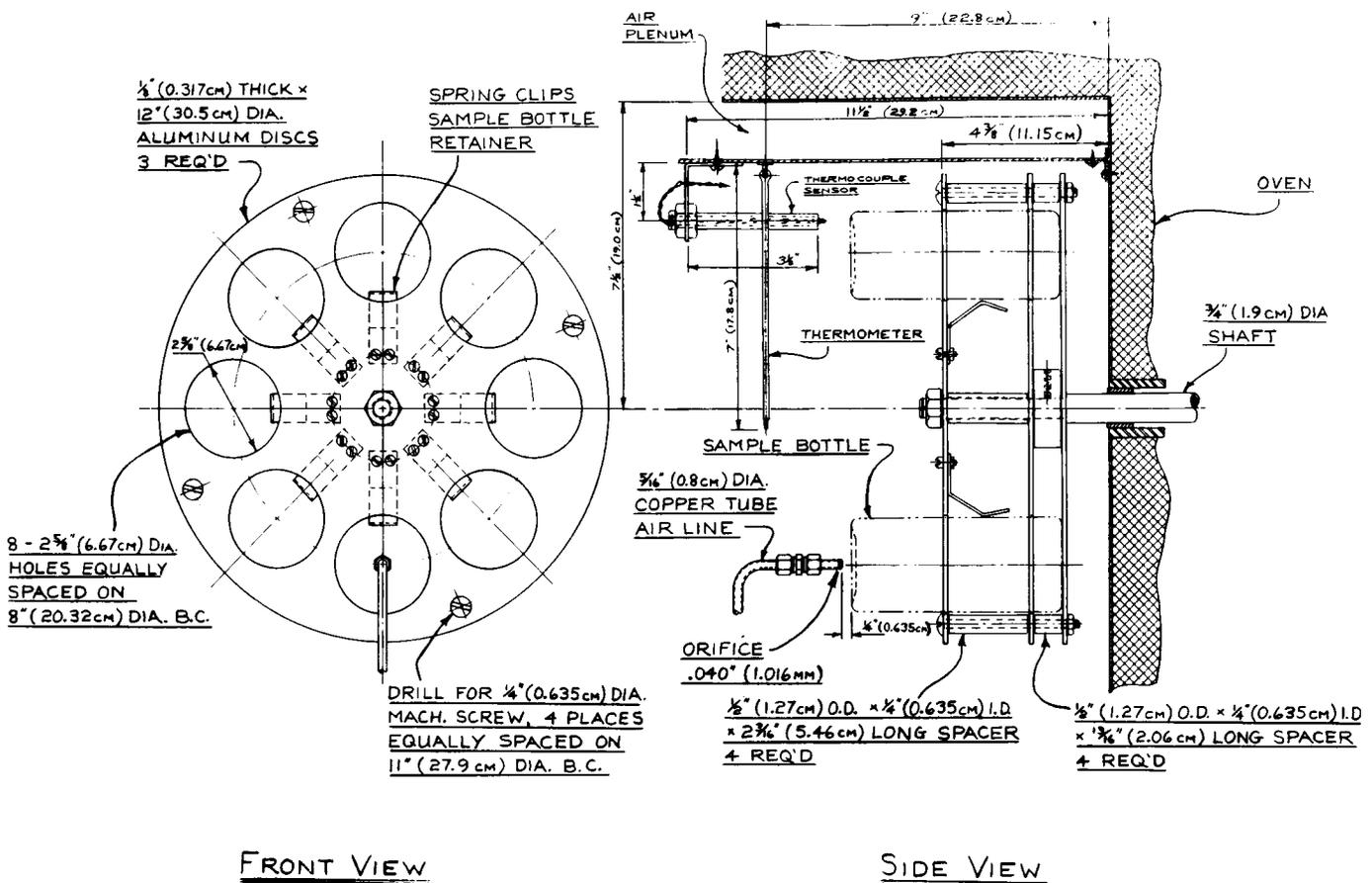


FIG. 2 Circular Metal Carriage

shall be used to make all temperature measurements required by this test method.

5.4 *Container*—The container in which the sample is to be tested shall be of heat-resistant glass conforming to the dimensions shown in Fig. 3.

5.5 *Cooling Rack*—A wire or sheet metal rack, constructed of stainless steel or aluminum, which allows the sample containers to cool in a horizontal position, with each container in the same horizontal plane. The rack shall be constructed in a way that allows air to flow freely around each container with at least 1 in. (2.5 cm) clearance between containers and at least 1 in. (2.5 cm) clearance between the containers and any solid surface.

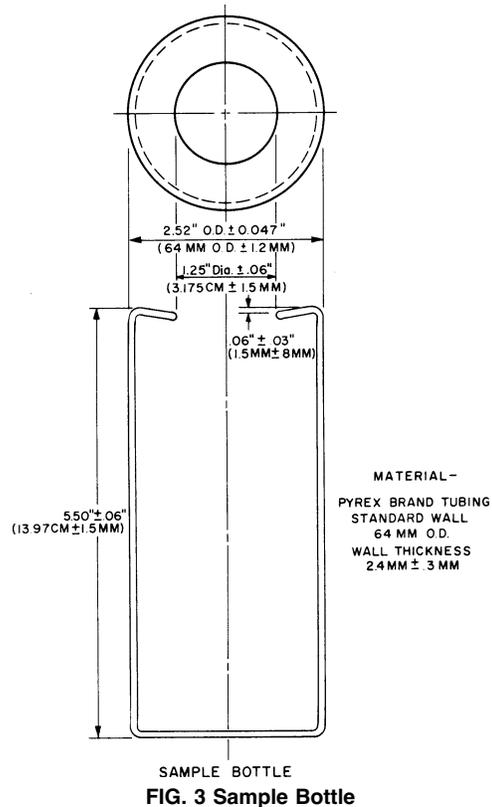
6. Preparation of Oven

6.1 Position the air outlet orifice so that it is 1/4 in. (6.35 mm) from the opening of the glass container. The orifice shall also be so positioned that the jet blows horizontally into the central arc of the opening of the circling glass container.

6.2 Position the thermometer specified in 5.3 so that the end of the bulb of the thermometer is within 1 in. (25.4 mm) of an imaginary line level with the center of the shaft holding the revolving carriage.

6.3 Level the oven so that the horizontal axes of the glass containers when in position in the carriage are level.

6.4 Preheat the oven for a minimum of 16 h prior to testing with the control thermostat adjusted to the setting that will be



used during the test. This setting shall be selected such that when the oven is fully loaded and the air is on, the oven will equilibrate at $325 \pm 1^\circ\text{F}$ ($163 \pm 0.5^\circ\text{C}$), as indicated by the test thermometer.

NOTE 2—Because the presence of sample containers affects the temperature distribution in the oven, containers must be present in the oven when the thermostat setting is determined. The use of empty containers is acceptable for this purpose.

7. Procedure

7.1 The sample as received shall be free of water. Heat the sample in its container with a loosely fitted cover in an oven not to exceed 302°F (150°C) for the minimum time necessary to ensure that the sample is completely fluid. Manually stir the sample but avoid incorporating air bubbles.

7.2 Pour 35 ± 0.5 g of the sample into each of the required glass containers, providing sufficient material for characterizing tests which are to be run on the residue.

7.3 Immediately after pouring the sample into a glass container, turn the container to a horizontal position, without rotating or twisting. Place the container in a clean cooling rack, which is maintained in a draft free, room temperature location, away from ovens or other sources of heat.

NOTE 3—For maximum precision in determining mass change, the cooling rack should be in a location that is the same temperature and humidity as the balance used for measuring the mass of the containers.

7.3.1 Allow the glass sample containers to cool in the cooling rack for a minimum of 60 min, and a maximum of 180 min.

7.3.2 When mass change is being determined, use two separate containers for this determination. After cooling, separately place each of these containers vertically on an analytical balance, and determine its mass to the nearest 0.001 g.

7.4 With the oven at operating temperature and the airflow set at 4000 ± 200 mL/min, arrange the containers holding the asphalt in the carriage so that the carriage is balanced. Fill any unused spaces in the carriage with empty containers. Close the door and rotate the carriage assembly at a rate of 15 ± 0.2 r/min. Maintain the samples in the oven and the air flowing and the carriage rotating for 85 min. The test temperature $325 \pm 1^\circ\text{F}$ ($163 \pm 0.5^\circ\text{C}$) shall be reached within the first 10 min; otherwise, discontinue the test.

7.5 At the conclusion of the testing period, remove any samples for mass change determination and place them horizontally in the cooling rack. Then, remove each remaining glass sample container, one at a time, and transfer its contents to a collection container having a capacity at least 30 % greater than the total expected volume of residue. This transfer shall be accomplished by first pouring out any residue that will flow freely from the glass sample container and then scraping out as much of the remaining residue as practical. While the residue is being removed from each sample container, the oven door shall remain closed, with the heater power on, the air on, and the remaining samples rotating in the carriage. The final container shall be removed from the oven within 5 min of removal of the initial container.

NOTE 4—Any scraping tool or technique may be used, as long as an average of 90 % or more of the residue is removed from the sample

containers. It has been determined that circumferential scraping tends to be more effective than lengthwise scraping.

7.6 After removing the residue from each of the glass containers, gently stir the collection container to homogenize the residue without introducing air into it. Test the residue within 72 h of performing the RTFO test.

7.7 If the mass change is being determined, allow the designated residue sample containers to cool on the cooling rack for a minimum of 60 min and a maximum of 180 min. After cooling, place each container vertically on an analytical balance and determine its mass to the nearest 0.001 g. Discard the residue from mass change determination, and do not use it for other tests.

NOTE 5—To improve mass change precision, the containers used for determining mass change should be handled with clean gloves or tongs, and transfer to the balance should be done with tongs, to prevent temperature changes which could distort the mass measurement.

8. Report

8.1 Report the results from RTFO test in terms of the physical changes in the asphalt brought about by this method. These values are obtained by performing appropriate ASTM tests on the asphalt before and after the moving film oven cycle.

8.2 When determined, report the average mass change of the material in the two containers as a mass percent of the original material. Report this calculated result to the nearest 0.001 %. A mass loss shall be reported as a negative number while a mass gain shall be reported as a positive number.

NOTE 6—This test can result in either a mass loss or a mass gain. During the test, volatile components evaporate, causing a decrease in mass, while oxygen reacts with the sample, causing an increase in mass. The combined effect determines whether the sample has an overall mass gain or an overall mass loss. Samples with a very low percentage of volatile components usually will exhibit a mass gain, while samples with a high percentage of volatile components usually will exhibit a mass loss.

9. Precision and Bias

9.1 Criteria for judging the acceptability of the viscosity at 140°F (60°C) and the ductility at 60°F (15.6°C) test results on the residue after heating are given in Table 1. The values given in Column 2 are the standard deviations that have been found to be appropriate for the materials and conditions of test described in Column 1. The values given in Column 3 are the limits that should not be exceeded by the difference between the results of two properly conducted tests. The values given in Column 4 are the coefficients of variation that have been found to be appropriate for the materials and conditions of test described in Column 1. The values given in Column 5 are the limits that should not be exceeded by the difference between the results of two properly conducted tests expressed as a percent of their mean.

9.2 The precision of the loss of mass determinations have not been determined.

10. Keywords

10.1 aging; asphalt cement; rolling thin-film oven test (RT-FOT)

TABLE 1 Precision of Test on Residue

Test Methods	Standard Deviation (1s)	Acceptable Range of Two Results (d2s)	Coefficient of Variation (percent of mean) (1s %)	Acceptable Range of Two Results (percent of mean) (d2s %)
Single-operator precision:				
Viscosity at 140°F (60°C)	...	...	2.3	6.5
Ductility at 60°F (15.6°C) ^A	3 cm	9 cm	...	...
Multilaboratory precision:				
Viscosity at 140°F (60°C)	...	...	4.2	11.9
Ductility at 60°F (15.6°C) ^A	6 cm	16 cm	...	...

^A This is based on the analysis of data resulting from tests by 16 laboratories on two asphalts ranging from 13 to 30 cm.

The American Society for Testing and Materials takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.

This standard is copyrighted by ASTM, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org).



Standard Practice for Effect of Water on Bituminous-Coated Aggregate Using Boiling Water¹

This standard is issued under the fixed designation D 3625; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

1. Scope

1.1 This practice covers a rapid procedure for visually observing the loss of adhesion in uncompacted bituminous-coated aggregate mixtures due to the action of boiling water.

1.2 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 *ASTM Standards:*

E 1 Specification for ASTM Thermometers²

D 979 Practice for Sampling Bituminous Paving Mixtures³

3. Summary of Practice

3.1 A bituminous-coated aggregate mixture sample is placed in a container of boiling distilled water and boiled for 10 min. After cooling the boiled mixture, visual observation is made of retained bitumen coating on the aggregate.

4. Significance and Use

4.1 This practice is useful as an indicator of the relative susceptibility of bituminous-coated aggregate to water, but should not be used as a measure of field performance because such correlation has not been established. If loss of adhesion due to water is indicated, testing by other procedures should be conducted to further evaluate the mixture.

4.2 This practice should not be used for acceptance/rejection by owner agencies.

5. Apparatus

5.1 *Scoop*, shovel or other implement capable of removing a representative sample from a larger mass of bituminous-coated aggregate mixture.

5.2 *Glass Beakers*, heat-resistant, 1000–2000 mL capacity or suitable metal containers of similar dimensions and capacity.

5.3 *Source of Distilled Water* (at least 500 mL ($\frac{1}{2}$ qt) for each test) (Note 1).

NOTE 1—Water that is not distilled has been shown to significantly affect results of the procedure and should not be used.

5.4 *Device for Heating Water*—gas burner with wire gauze supported on tripod or ring, hot plate, camp stove or other suitable device which will distribute heat evenly.

5.5 *Thermometers*—ASTM low-distillation thermometers graduated either in Celsius or Fahrenheit as specified, having a range from -2 to $+300^{\circ}\text{C}$ or 30 to 580°F respectively, and conforming to the requirements for thermometer 7C or 7F as prescribed in Specification E 1.

6. Sample Preparation

6.1 Prepare an uncompacted bituminous-coated aggregate mixture following established laboratory procedures or obtain a sample of plant-produced mixture in accordance with Practice D 979. The temperature of hot mixtures shall be below the boiling temperature of water, but not less than 85°C (180°F), before placing in boiling water. The temperature of mixtures that are cold mixed shall be at or above room temperature before placing in boiling water.

7. Procedure

7.1 For each sample tested pour distilled water into a clean container (as described in 5.2) such that the container is approximately half full and heat to boiling.

7.2 With an appropriate implement (as described in 5.1) place approximately 250 g ($\frac{1}{2}$ lb) of the bituminous-coated aggregate mixture in the boiling water while the container is exposed to the heat source. Bring the water back to boiling and maintain boiling for $10 \text{ min} \pm 15 \text{ s}$. Avoid excessive manipulation of the bituminous-coated aggregate mixture.

7.3 At the end of 10 min, remove the container from the heat source. Skim off any free bitumen from the surface of the water to prevent recoating. Cool to room temperature, decant the water, and empty the wet mix onto a white paper towel.

NOTE 2—For comparison, a similar amount of fresh bituminous-coated aggregate mixture should be placed into a second container, covered with unheated distilled water for 10 min, the water decanted and the mixture emptied onto a white paper towel.

7.4 Visually observe the aggregate (coarse and fine) for retained bitumen coating. Any thin, brownish, translucent areas are to be considered fully coated. Visual observations shall be

¹ This practice is under the jurisdiction of ASTM Committee D-4 on Road and Paving Materials and is the direct responsibility of Subcommittee D04.22 on Effect of Water and Other Elements on Bituminous-Coated Aggregates.

Current edition approved Sept. 10, 1996. Published November 1996. Originally published as D 3625 – 77. Last previous edition D 3625 – 91.

² *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 14.03.

³ *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 04.03.

made immediately after the sample is placed on the white paper towel (Note 3). Examination of the sample under a light and with low magnification may aid in the visual observation of retained coating.

NOTE 3—Additional information can be obtained by repeating the visual observation 24 h after boiling when the sample has dried and the effects of moisture on the coating appearance of the sample have been eliminated.

8. Keywords

8.1 bituminous paving mixtures; coating/stripping; loss of adhesion; water

The American Society for Testing and Materials takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428.



Standard Test Method for Effect of Moisture on Asphalt Concrete Paving Mixtures¹

This standard is issued under the fixed designation D 4867/D 4867M; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

1. Scope

1.1 This test method covers procedures for preparing and testing asphalt concrete specimens for the purpose of measuring the effect of water on the tensile strength of the paving mixture. This test method is applicable to dense mixtures such as those appearing in the Table for Composition of Bituminous Paving Mixtures in Specification D 3515. This test method can be used to evaluate the effect of moisture with or without antistripping additives including liquids and pulverulent solids such as hydrated lime or portland cement.

1.2 The values stated in either SI units or inch-pound units in parentheses shall be regarded separately as standard. The values in each system may not be exact equivalents; therefore, each system must be used independently of the other, without combining values in any way.

1.3 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:²

- D 979 Practice for Sampling Bituminous Paving Mixtures
- D 1074 Test Method for Compressive Strength of Bituminous Mixtures
- D 1561 Practice for Preparation of Bituminous Mixture Test Specimens by Means of California Kneading Compactor
- D 2041 Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures
- D 2726 Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Non-Absorptive Compacted Bituminous Mixtures

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee D04 on Road and Paving Materials and is the direct responsibility of Subcommittee D04.22 on Effect of Water and Other Elements on Bituminous Coated Aggregates.

Current edition approved July 1, 2009. Published July 2009. Originally approved in 1988. Last previous edition approved in 2004 as D 4867-04.

² For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For *Annual Book of ASTM Standards* volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

- D 3203 Test Method for Percent Air Voids in Compacted Dense and Open Bituminous Paving Mixtures
- D 3387 Test Method for Compaction and Shear Properties of Bituminous Mixtures by Means of the U.S. Corps of Engineers Gyratory Testing Machine (GTM)
- D 3496 Practice for Preparation of Bituminous Mixture Specimens for Dynamic Modulus Testing
- D 3515 Specification for Hot-Mixed, Hot-Laid Bituminous Paving Mixtures³
- D 3549 Test Method for Thickness or Height of Compacted Bituminous Paving Mixture Specimens
- D 3665 Practice for Random Sampling of Construction Materials
- D 4013 Practice for Preparation of Test Specimens of Bituminous Mixtures by Means of Gyratory Shear Compactor
- D 4123 Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures³
- D 6926 Practice for Preparation of Bituminous Specimens Using Marshall Apparatus

3. Summary of Test Method

3.1 *Potential for Moisture Damage*—The degree of susceptibility to moisture damage is determined by preparing a set of laboratory-compacted specimens conforming to the job-mix formula without an additive. The specimens are compacted to a void content corresponding to void levels expected in the field, usually in the 6 to 8 % range. The set is divided into two subsets of approximately equal void content. One subset is maintained dry while the other subset is partially saturated with water and moisture conditioned. The tensile strength of each subset is determined by the tensile splitting test. The potential for moisture damage is indicated by the ratio of the tensile strength of the wet subset to that of the dry subset.

3.2 *Additive Effect*—The effect of an antistripping additive is determined on a set of specimens containing an additive prepared and tested as described in 3.1. The effect of an additive dosage may be estimated by repeating the tests on sets with different additive dosages.

³ Withdrawn. The last approved version of this historical standard is referenced on www.astm.org.



3.3 *Plant-Produced Mixtures*—The potential for moisture damage or the effectiveness of an additive in a plant-produced mixture is determined on specimens that are laboratory compacted to expected field-level void content, divided into wet and dry subsets, and evaluated as described in 3.2.

4. Significance and Use

4.1 This test method can be used to test asphalt concrete mixtures in conjunction with mixture design testing to determine the potential for moisture damage, to determine whether or not an antistripping additive is effective, and to determine what dosage of an additive is needed to maximize the effectiveness. This test method can also be used to test mixtures produced in plants to determine the effectiveness of additives under the conditions imposed in the field.

5. Apparatus

5.1 To prepare and compact the specimens use apparatus from any one of the following: Test Methods D 1074, and D 3387, Practice D 3496, or Practices D 1561, D 4013, and D 6926.

5.2 *Vacuum Pump or Water Aspirator* in accordance with Test Method D 2041.

5.3 *Manometer or Vacuum Gage* in accordance with Test Method D 2041.

5.4 *Container*, preferably Type F, of Test Method D 2041.

5.5 *Balance* in accordance with Test Method D 2726.

5.6 *Water Baths* Three:

5.6.1 One waterbath in accordance with Test Method D 2726.

5.6.2 One bath capable of maintaining a temperature of $60 \pm 1.0^\circ\text{C}$ ($140 \pm 1.8^\circ\text{F}$) for 24 h, and

5.6.3 One bath capable of maintaining a temperature of $25 \pm 1.0^\circ\text{C}$ ($77 \pm 1.8^\circ\text{F}$).

5.7 *Mechanical or Hydraulic Testing Machine* capable of maintaining the required strain rate and measuring load with equal or better precision.

5.8 *Loading Strips* in accordance with Test Method D 4123.

6. Preparation of Laboratory Test Specimens

6.1 Make at least six specimens for each test, three to be tested dry and three to be tested after partial saturation and moisture conditioning.

6.2 Use specimens 100 mm (4 in.) in diameter and 62.5 mm (2.5 in.) high, in general, but specimens of other dimensions may be used if desired. When using aggregate larger than 25 mm (1 in.), use specimens at least 150 mm (6 in.) in diameter.

NOTE 1—The user is cautioned that the specimen diameter has been determined to influence both the tensile strength and the tensile strength ratio. The tensile strength and the tensile strength ratio values may be different for 150-mm specimens compared to 100-mm specimens.

6.3 Prepare mixtures in batches large enough to make at least 3 specimens or, as an alternative, prepare a batch just large enough for 1 specimen. If theoretical maximum specific gravity is to be determined, use a batch large enough or prepare a separate batch to provide a specimen for this purpose.

6.4 When a liquid antistripping additive is used, heat a sufficient quantity of asphalt cement for one batch to $150 \pm$

6°C ($300 \pm 10^\circ\text{F}$) in a closed 1 L (1-qt) can in an oven. Add the required quantity of additive and immediately mix, for approximately 2 min, with a mechanical stirrer approximately 25 mm (1 in.) from the bottom of the container. Maintain the treated asphalt cement at $150 \pm 6^\circ\text{C}$ ($300 \pm 10^\circ\text{F}$) in the closed can until it is used. Discard the treated asphalt cement if not used the same day it is prepared, or if allowed to cool so that it requires reheating.

6.5 When using a pulverulent solid antistripping additive, use the addition procedure simulating the procedure expected in the field. Follow the procedure specified in either 6.5.1, 6.5.2, or 6.5.3.

6.5.1 When dry powder is added to dry aggregate, dry, batch, and heat the mineral aggregate to $150 \pm 6^\circ\text{C}$ ($300 \pm 10^\circ\text{F}$). Add the required quantity of additive to the aggregate, and thoroughly mix the entire mass until a uniform distribution of additive is achieved. Take care to minimize the loss of additive to the atmosphere in the form of dust. After mixing, maintain the treated aggregate at the required mixing temperature until it is used.

6.5.2 When dry powder is added to damp aggregate, batch the damp mineral aggregate, and adjust the moisture content of the combined aggregate to the expected field moisture level. Add the required quantity of additive to the damp aggregate, and thoroughly mix the entire mass until a uniform distribution of additive is achieved. Take care to minimize the loss of additive to the atmosphere in the form of dust. After mixing, dry the treated aggregate, heat to the required mixing temperature, and maintain at that temperature until it is used.

6.5.3 When powder slurry is used, add the required quantity of additive to water using the powder to water ratio expected in the field. Take care to minimize the loss of additive to the atmosphere in the form of dust. To prevent settling, continuously mix the resulting slurry until it is used. Batch the damp mineral aggregate, adjust the moisture content as required in 6.5.2, add the required quantity of slurry, and thoroughly mix the entire mass until a uniform distribution of slurry is achieved. After mixing, dry the treated aggregate, heat to the required mixing temperature, and maintain at that temperature until used.

6.6 Proportion, mix, and compact specimens in accordance with one of the following: Test Methods D 1074, D 3387, Practice D 3496, Practices D 1561, D 4013, or D 6926, and 6.6.1 and 6.6.2.

6.6.1 After mixing, stabilize the mixture temperature of each specimen at the required compaction temperature, in a closed container, in an oven for 1 to 2 h. If preparing a multi-specimen batch, split the batch into single-specimen quantities before placing into the oven.

6.6.2 Compact the specimens to $7 \pm 1\%$ air voids, or a void level expected in the field at the time of construction. This void level can be obtained by adjusting the following: the static load in double-plunger compaction; the number of blows in a marshall hammer compaction; the foot pressure, number of tamps, leveling load, or some combination in kneading compaction; or the number of revolutions in gyratory compaction. Determine the exact procedure by trial for each mixture.



6.6.3 Cool specimens in the mold to room temperature as rapidly as possible in a stream of moving air, extract from molds, then follow the procedure outlined in Section 8 within 24 h.

7. Preparation of Field Specimens

7.1 Select a truck to be sampled in accordance with Practice D 3665.

7.2 Secure a sample from the truck at the plant in accordance with Practice D 979.

7.3 Stabilize the mixture temperature to approximately the temperature found in the field when rolling begins. Maintain this temperature in a closed container, in an oven if necessary, for approximately the time lapse between mixing and the start of actual rolling.

7.4 Compact the specimens in accordance with 6.6.2, and cool and extract from the molds in accordance with 6.6.3.

7.5 If specimens are not to be compacted in the field laboratory, place the samples in a sealed container, transport to the laboratory, and reheat to the temperature required in 7.3. Proceed with the steps in 7.4.

NOTE 2—Specimens made from plant-produced mixtures in accordance with Section 7 may yield different results from specimens made from laboratory-produced mixtures of the same job mix made in accordance with Section 6.

8. Procedure

NOTE 3—A data sheet that is convenient for use with this procedure appears in Appendix X1.

8.1 Determine the theoretical maximum specific gravity in accordance with Test Method D 2041.

8.2 Determine the specimen height in accordance with Test Method D 3549.

8.3 Determine the bulk specific gravity in accordance with Test Method D 2726, and express the volume of the specimen in cubic centimeters. The term (*B-C*) in Test Method D 2726 is the volume of the specimen in cubic centimeters.

8.4 Calculate the percent air voids in accordance with Test Method D 3203, and express the volume of air in cubic centimeters. The volume of air is the volume of the specimen in 8.3 multiplied by the percent air voids.

8.5 Sort the specimens into two subsets so that the average air voids of the two subsets are approximately equal. Store the subset to be tested dry at room temperature.

8.6 Partially saturate the subset to be moisture conditioned with distilled water at room temperature using a vacuum chamber. If it is difficult to reach the minimum degree of saturation required in 8.6.3, the water used to saturate may be heated up to 60°C (140°F).

8.6.1 Partially saturate, to the degree specified in 8.6.3, by applying a partial vacuum such as 70 kPa or 525 mm Hg (20 in. Hg) for a short time such as five min.

NOTE 4—Experiments with partial vacuum at room temperature indicate that the degree of saturation is very sensitive to the magnitude of the vacuum and practically independent of the duration. The level of vacuum needed appears to be different for different mixtures.

8.6.2 Determine the volume of the partially saturated specimen in accordance with Test Method D 2726. Determine the

volume of the absorbed water by subtracting the air-dry mass of the specimen in 8.3 from the saturated surface-dry mass of the partially saturated specimen.

8.6.3 Determine the degree of saturation by dividing the volume of the absorbed water in 8.6.2 by the volume of air voids in 8.4 and express the result as a percentage. If the volume of water is between 55 and 80 % of the volume of air, proceed to 8.7. If the volume of water is less than 55 %, repeat the procedure beginning with 8.6.1 using a slightly higher partial vacuum. If the volume of water is more than 80 %, the specimen has been damaged and is discarded.

NOTE 5—If the average air voids of the saturated subset is less than 6.5 %, a degree of saturation of at least 70 % is recommended.

8.7 Moisture condition the partially saturated specimens by soaking in distilled water at 60 ± 1.0°C (140 ± 1.8°F) for 24 h.

NOTE 6—If a freeze-thaw conditioning cycle is desired, the following procedure is suggested instead of the procedure in 8.7. Wrap each of the partially saturated specimens tightly with two layers of plastic film using masking tape to hold the wrapping if necessary. Place each wrapped specimen into a leak-proof plastic bag containing approximately 3 mL of distilled water, and seal the bag with a tie or tape. Place the wrapped and bagged specimens into an air bath freezer at -18 ± 2.0°C (-0.4 ± 3.6°F). After at least 15 h in the freezer, remove the specimens and immerse them in a water bath at 60 ± 1.0°C (140 ± 1.8°F) for 24 h. After 3 min of immersion, after specimen surface thaw occurs, remove the bag and wrapping from the specimens.

8.8 Adjust the temperature of the moisture-conditioned subset by soaking in a water bath for 1 h at 25 ± 1°C (77 ± 1.8°F).

8.9 Measure the height of the moisture-conditioned subset by Test Method D 3549, and determine volume by Test Method D 2726.

8.9.1 Determine the water absorption and the degree of saturation in accordance with 8.6.2 and 8.6.3. A degree of saturation exceeding 80 % is acceptable.

8.9.2 Determine the swell of the partially saturated specimens by dividing the change in specimen volumes in 8.6.2 and 8.3 by the specimen volume in 8.3. Determine the swell of moisture-conditioned specimens by dividing the change in the specimen volume in 8.9 and 8.3 by the specimen volume in 8.3.

8.10 Adjust the temperature of the dry subset by soaking in a water bath for 20 min at 25 ± 1.0°C (77 ± 1.8°F).

8.11 Determine the tensile strength at 25 ± 1.0°C (77 ± 1.8°F) of both subsets.

8.11.1 Place a specimen into the loading apparatus and position the loading strips so that they are parallel and centered on the vertical diametral plane. Apply a diametral load at 50 mm/min (2 in./min) until the maximum load is reached, and record the maximum load.

8.11.2 Continue loading until the specimen fractures. Break the specimen open and visually estimate and record the approximate degree of moisture damage, if any.

8.11.3 Inspect all surfaces, including the failed faces, for evidence of cracked or broken aggregate, that may influence test results, and record observations.



9. Calculation

9.1 Calculate the tensile strength as follows:

$$S_t = 2000 P / \pi t D \text{ (kPa)} \quad (1)$$

or

$$S_t = 2P / \pi t D \text{ (psi)}$$

where:

S_t = tensile strength, kPa (psi)

P = maximum load, N (lbf)

t = specimen height immediately before tensile test, mm (in.), and

D = specimen diameter, mm (in.).

9.2 Calculate the tensile strength ratio as follows:

$$TSR = (S_{tm}/S_{td})100 \quad (2)$$

where:

TSR = tensile strength ratio, %

S_{tm} = average tensile strength of the moisture-conditioned subset, kPa (psi), and

S_{td} = average tensile strength of the dry subset, kPa (psi).

10. Report

10.1 Report the following information:

10.1.1 Number of specimens in each subset,

10.1.2 Average air voids of each subset,

10.1.3 Average degree of saturation after partial saturation and after moisture conditioning,

10.1.4 Average swell after partial saturation and after moisture conditioning,

10.1.5 Tensile strength of each specimen in each subset,

10.1.6 Tensile strength ratio,

10.1.7 Results of visually-estimated moisture damage observed when the specimen fractures, and

10.1.8 Results of observations of fractured or crushed aggregate.

NOTE 7—If the conditioning procedure described in Note 6 is used, that fact should be included in the report.

11. Precision and Bias

11.1 *Precision*—The standard deviations for use with this test method have been determined using laboratory-mixed specimens conditioned in accordance with 8.7. Neither plant-mixed material nor the conditioning in Note 6 has been studied. Nineteen laboratories participated in the precision study by testing five asphalt concrete mixtures, two of which contained a liquid antistripping additive.

11.1.1 *Within-Laboratory Precision*—The single-operator standard deviation of tensile strength for either dry or moisture-conditioned specimens has been found to be 55 kPa (8 psi). The d2s limit for the maximum allowable difference in tensile strength between duplicate specimens of the same mixture tested by the same operator is 159 kPa (23 psi).

11.1.2 *Between-Laboratory Precision*—The multilaboratory standard deviation of the tensile-strength ratio has been found to be 8 %. The d2s limit for the maximum allowable difference in tensile-strength ratio between results of tests performed on samples of the same mixture by two different laboratories is 23 %.

11.2 *Bias*—This test method has an undetermined bias because the value of a tensile-strength ratio can be defined only in terms of the test method.

12. Keywords

12.1 antistripping additives; asphalt concrete paving mixtures; moisture; tensile strength; water



Standard Specification for Viscosity-Graded Asphalt Cement for Use in Pavement Construction¹

This standard is issued under the fixed designation D3381/D3381M; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.

1. Scope

1.1 This specification covers asphalt cements graded by viscosity at 60°C [140°F] for use in pavement construction. Three sets of limits are offered in this specification. The purchaser shall specify the applicable table of limits. In the event the purchaser does not specify limits, [Table 1](#) shall apply. For asphalt cements graded by penetration at 25°C [77°F]. See Specification [D946](#). If needed, volume corrections for asphalt cements should be made according to Practice [D4311](#).

1.2 The values stated in either SI units or inch-pound units are to be regarded separately as standard. The values stated in each system may not be exact equivalents; therefore, each system shall be used independently of the other. Combining values from the two systems may result in non-conformance with the standard.

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:²

- [D5 Test Method for Penetration of Bituminous Materials](#)
- [D92 Test Method for Flash and Fire Points by Cleveland Open Cup Tester](#)
- [D95 Test Method for Water in Petroleum Products and Bituminous Materials by Distillation](#)
- [D113 Test Method for Ductility of Bituminous Materials](#)
- [D140 Practice for Sampling Bituminous Materials](#)
- [D946 Specification for Penetration-Graded Asphalt Cement for Use in Pavement Construction](#)
- [D1754 Test Method for Effects of Heat and Air on Asphaltic Materials \(Thin-Film Oven Test\)](#)

¹ This specification is under the jurisdiction of ASTM Committee [D04](#) on Road and Paving Materials and is the direct responsibility of Subcommittee [D04.40](#) on Asphalt Specifications.

Current edition approved Dec. 1, 2009. Published January 2010. Originally approved in 1975. Last previous edition approved in 2009 as D3381 – 09. DOI: 10.1520/D3381_D3381M-09A.

² For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For *Annual Book of ASTM Standards* volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

- [D2042 Test Method for Solubility of Asphalt Materials in Trichloroethylene](#)
- [D2170 Test Method for Kinematic Viscosity of Asphalts \(Bitumens\)](#)
- [D2171 Test Method for Viscosity of Asphalts by Vacuum Capillary Viscometer](#)
- [D2872 Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt \(Rolling Thin-Film Oven Test\)](#)
- [D4311 Practice for Determining Asphalt Volume Correction to a Base Temperature](#)

3. Manufacture

3.1 The asphalt cement shall be prepared from crude petroleum by suitable methods.

4. Physical Requirements

4.1 The asphalt cement shall be homogeneous, free from water, and shall not foam when heated to 175°C [350°F].

4.2 The asphalt cements shall conform to the requirements given in [Table 1](#), [Table 2](#), or [Table 3](#), as specified by the purchaser.

5. Methods of Sampling and Testing

5.1 Sample and test asphalt cements in accordance with the following methods:

- 5.1.1 *Sampling*—Practice [D140](#).
- 5.1.2 *Water*—Test Method [D95](#).
- 5.1.3 *Viscosity at 60°C [140°F]*—Test Method [D2171](#).
- 5.1.4 *Viscosity at 135°C [275°F]*—Test Method [D2170](#).
- 5.1.5 *Penetration*—Test Method [D5](#).
- 5.1.6 *Flash Point, Cleveland Open Cup*—Test Method [D92](#).
- 5.1.7 *Solubility in Trichloroethylene*—Test Method [D2042](#).
- 5.1.8 *Thin-Film Oven Test*—Test Method [D1754](#) (see [Table 1](#) and [Table 2](#)).
- 5.1.9 *Rolling Thin-Film Oven Test*—Test Method [D2872](#) (see [Table 3](#)).
- 5.1.10 *Ductility*—Test Method [D113](#).

6. Keywords

6.1 asphalt cement; bitumen; pavement; viscosity

TABLE 1 Requirements for Asphalt Cement, Viscosity Graded at 60°C [140°F]

NOTE 1—Grading based on original asphalt.

Test	Viscosity Grade					
	AC-2.5	AC-5	AC-10	AC-20	AC-30	AC-40
Viscosity, 60°C [140°F], Pa·s	25 ± 5	50 ± 10	100 ± 20	200 ± 40	300 ± 60	400 ± 80
Viscosity, 135°C [275°F], min, mm ² /s	80	110	150	210	250	300
Penetration, 25°C [77°F], 100 g, 5 s, min	200	120	70	40	30	20
Flash point, Cleveland open cup, min, °C [°F]	165 [325]	175 [350]	220 [425]	230 [450]	230 [450]	230 [450]
Solubility in trichloroethylene, min, %	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0
Tests on residue from thin-film oven test:						
Viscosity, 60°C [140°F], max, Pa·s	125	250	500	1000	1500	2000
Ductility, 25°C [77°F], 5 cm/min, min, cm	100 ^A	100	50	20	15	10

^A If ductility is less than 100, material will be accepted if ductility at 15°C [60°F] is 100 minimum at a pull rate of 5 cm/min.

TABLE 2 Requirements for Asphalt Cement Viscosity Graded at 60°C [140°F]

NOTE 1—Grading based on original asphalt.

NOTE 2—Table 2 specifies asphalts that are less temperature susceptible than those specified by Table 1. Asphalts that meet Table 2 requirements will also meet Table 1 requirements of the same grade.

Test	Viscosity Grade					
	AC-2.5	AC-5	AC-10	AC-20	AC-30	AC-40
Viscosity, 60°C [140°F], Pa·s	25 ± 5	50 ± 10	100 ± 20	200 ± 40	300 ± 60	400 ± 80
Viscosity, 135°C [275°F], min, mm ² /s	125	175	250	300	350	400
Penetration, 25°C [77°F], 100 g, 5 s, min	220	140	80	60	50	40
Flash point, Cleveland open cup, min, °C [°F]	165 [325]	175 [350]	220 [425]	230 [450]	230 [450]	230 [450]
Solubility in trichloroethylene, min, %	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0
Tests on residue from thin-film oven test:						
Viscosity, 60°C [140°F], max, Pa·s	125	250	500	1000	1500	2000
Ductility, 25°C [77°F], 5 cm/min, min, cm	100 ^A	100	75	50	40	25

^A If ductility is less than 100, material will be accepted if ductility at 15°C [60°F] is 100 minimum at a pull rate of 5 cm/min.

TABLE 3 Requirements for Asphalt Cement Viscosity Graded at 60°C [140°F]

NOTE 1—Grading based on residue from rolling thin-film oven test.

Tests on Residue from Rolling Thin-Film Oven Test: ^A	Viscosity Grade				
	AR-1000	AR-2000	AR-4000	AR-8000	AR-16000
Viscosity, 60°C [140°F], Pa·s	100 ± 25	200 ± 50	400 ± 100	800 ± 200	1600 ± 400
Viscosity, 135°C [275°F], min, mm ² /s	140	200	275	400	550
Penetration, 25°C [77°F], 100 g, 5 s, min	65	40	25	20	20
% of original penetration, 25°C [77°F], min	...	40	45	50	52
Ductility, 25°C [77°F], 5 cm/min, min, cm	100 ^B	100 ^B	75	75	75
Tests on original asphalt:					
Flash point, Cleveland open cup, min, °C [°F]	205 [400]	220 [425]	225 [440]	230 [450]	240 [460]
Solubility in trichloroethylene, min, %	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0

^A Thin-film oven test may be used but the rolling thin-film oven test shall be the referee method.

^B If ductility is less than 100, material will be accepted if ductility at 15°C [60°F] is 100 minimum at a pull rate of 5 cm/min.

ASTM International takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.

This standard is copyrighted by ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org). Permission rights to photocopy the standard may also be secured from the ASTM website (www.astm.org/COPYRIGHT/).