

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



Caracterización de bitúmenes asfálticos vírgenes y modificados, utilizando la técnica de Espectroscopía Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR)

Trabajo de graduación en modalidad de tesis presentado por  
Bryan Alfonso Juárez Leiva  
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Química

Guatemala  
2018







UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



*Excelencia que trasciende*

**DELVALLE**  
GRUPO EDUCATIVO

Caracterización de bitúmenes asfálticos vírgenes y modificados, utilizando la técnica de Espectroscopía Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR)

Trabajo de graduación en modalidad de tesis presentado por  
Bryan Alfonso Juárez Leiva  
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Química

Guatemala  
2018



Vo. Bo.:



(f). \_\_\_\_\_  
Ing. Cristián Rossi Sosa

Tribunal examinador:



(f). \_\_\_\_\_  
Ing. Cristián Rossi Sosa

(f). \_\_\_\_\_  
Ing. Gamaliel Zambrano

(f). \_\_\_\_\_  
Ing. Luis Núñez

Fecha de aprobación: Guatemala, 4 de diciembre del 2018



## PREFACIO

Este trabajo es la conclusión de la primera etapa de mi vida profesional y, como los logros más grandes en la vida, no me pertenece solamente a mí. Quiero agradecer primeramente a mi madre, Ana María de los Ángeles Leiva Penados, por todo su apoyo y por siempre creer en mí. Sin ella mi educación no hubiera sido posible. A mi tía Scarlet, por su cariño y apoyo en todos los ámbitos de mi vida así como en mi formación profesional.

Le agradezco profundamente a la Licda. Ana Luisa Mendizábal por su invaluable e incondicional apoyo en la realización de este trabajo, por sus consejos y amistad. También en el ámbito profesional le agradezco a mi asesor, el Ing. Cristián Rossi, por su guía y apoyo en la redacción de este trabajo y al Ing. José Garavito por su amistad y confianza en la generación de esta investigación.

También les agradezco a todas aquellas personas que en algún momento me apoyaron durante mi carrera universitaria, a mis amigos y colegas. Sin su ayuda esto no habría sido posible.



# ÍNDICE

PREFACIO .....	iii
ÍNDICE .....	v
LISTA DE CUADROS .....	vii
LISTA DE FIGURAS .....	ix
RESUMEN.....	xi
I. INTRODUCCIÓN .....	1
II. OBJETIVOS .....	3
A. Objetivo general .....	3
B. Objetivos específicos.....	3
III. JUSTIFICACIÓN .....	5
IV. MARCO TEÓRICO .....	7
A. Fabricación, almacenamiento, manejo y aspectos ambientales del bitumen asfáltico .....	7
1. Manufactura .....	7
B. Constitución, estructura y reología de bitúmenes asfálticos .....	8
1. Constitución del bitumen asfáltico .....	8
2. Estructura del bitumen asfáltico .....	10
3. Relación entre constitución y reología.....	12
4. Relación entre la composición química amplia del bitumen y sus propiedades físicas.....	12
C. Especificación y calidad del betún .....	12
1. Susceptibilidad térmica de los asfaltos.....	13
2. Grado de penetración, grado de penetración dura y bitúmenes asfálticos de grado de viscosidad.....	14
3. Bitúmenes asfálticos modificados con polímeros (PMB).....	14
4. Bitúmenes asfálticos oxidados .....	15
5. Bitúmenes asfálticos duros .....	15
6. Calidad del bitumen asfáltico .....	15
7. Propiedades físicas del asfalto de pavimentación.....	16
8. Clasificación de asfaltos.....	17
9. Especificación sobre bitúmenes asfálticos .....	18

D.	Asfaltos modificados.....	23
1.	Polímeros utilizados en la modificación de asfaltos .....	23
2.	Especificaciones de asfaltos modificados .....	25
3.	Ensayos.....	25
E.	Espectroscopía infrarroja .....	26
1.	Vibraciones moleculares .....	27
2.	Medición del espectro IR .....	28
3.	Espectrofotómetro infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR) ..	29
4.	Interpretación de espectros IR.....	30
F.	Comparación y contraste .....	31
G.	Aplicación de espectroscopía infrarroja en asfaltos .....	32
V.	ANTECEDENTES.....	35
VI.	METODOLOGÍA .....	39
A.	Equipo: (Ver detalles en la sección de ANEXOS) .....	39
B.	Reactivos: (Ver detalles en la sección de ANEXOS) .....	39
C.	Materiales: .....	39
D.	Metodologías:.....	39
1.	Obtención de muestras:.....	39
2.	Análisis de muestras:.....	40
3.	Análisis de datos: .....	41
VII.	RESULTADOS.....	43
VIII.	ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	55
IX.	CONCLUSIONES .....	61
X.	RECOMENDACIONES .....	63
XI.	BIBLIOGRAFÍA .....	65
XII.	ANEXOS .....	67
XIII.	GLOSARIO .....	83

## LISTA DE CUADROS

Tabla 1 Identificación de normas AASHTO y ASTM aplicables a asfaltos ....	19
Tabla 2 Identificación de normas AASHTO y ASTM aplicables a asfaltos modificados .....	25
Tabla 3 Regiones del infrarrojo medio según grupos funcionales .....	30
Tabla 4 Rangos de grupos funcionales en la región espectral IR del carbonilo .....	31
Tabla 5 Variación en forma de espectros IR de asfaltos vírgenes y variación en porcentaje de transmitancia en asfaltos modificados debido a la variación de porcentaje de modificador .....	43
Tabla 6 Estándares para la elaboración de la curva de calibración de muestras de asfalto AC30 de Guatemala con ACP de Fray Bartolomé de las Casas...	45
Tabla 7 Picos característicos determinados de espectros IR de asfaltos vírgenes y modificados.....	46
Tabla 8 Resultados promedio de pruebas físicas realizadas a las muestras analizadas .....	49
Tabla 9 Datos experimentales del punto de penetración de muestras de asfalto analizadas .....	67
Tabla 10 Datos experimentales del punto de ablandamiento de muestras de asfalto analizadas.....	67
Tabla 11 Datos experimentales de la gravedad específica de muestras de asfalto analizadas.....	68
Tabla 12 Datos experimentales de la viscosidad medida a 135°C de muestras de asfalto analizadas.....	68
Tabla 13 Datos experimentales de la viscosidad medida a 165°C de muestras de asfalto analizadas.....	69
Tabla 14 Características técnicas del espectrofotómetro de haz infrarrojo con Transformada de Fourier (FTIR).....	80
Tabla 15 Características técnicas del penetrómetro .....	80
Tabla 16 Características técnicas del aparato de anillo y bola digital automático .....	80
Tabla 17 Características técnicas del picnómetro de Hubbard.....	80
Tabla 18 Características técnicas del viscosímetro de Brookfield .....	80
Tabla 19 Propiedades físicas y químicas del etanol absoluto grado reactivo	80
Tabla 20 Propagación de error en los cálculos aritméticos .....	81



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Estructura química de los asfaltenos .....	9
Figura 2 Estructuras de compuestos aromáticos .....	9
Figura 3 Estructuras de compuestos saturados .....	10
Figura 4 Representación esquemática de un asfalto tipo SOL .....	11
Figura 5 Representación esquemática de un asfalto tipo GEL .....	11
Figura 6 Concepto de susceptibilidad térmica .....	13
Figura 7 Espectro IR del metanol.....	28
Figura 8 Picos o bandas características de asignación para vibraciones moleculares para el ligante asfáltico clasificado como AC-30 (LPI IV) .....	32
Figura 9 Espectro FTIR de un asfalto clasificado como AC-30 (LPI IV) .....	33
Figura 10 Espectros FTIR con diferentes porcentajes de polímeros recibidos del proveedor A.....	36
Figura 11 Valores y radio de absorbancia para elaboración de curvas de calibración para detectar polímeros modificadores en asfalto .....	36
Figura 12 Curva de calibración para muestras de asfalto con polímeros .....	37
Figura 13 Comparación de las relaciones de absorción en los métodos ATR y Transmisión .....	37
Figura 14 Petróleos de Guatemala .....	38
Figura 15 Espectros IR de AC30 de Guatemala virgen y modificado con diferentes porcentajes de ACP de Fray Bartolomé de las Casas* .....	44
Figura 16 Curva de calibración del conjunto de muestras de asfalto de Guatemala modificado con ACP de Fray Bartolomé de las Casas* .....	45
Figura 17 Comportamiento del valor de punto de penetración en asfaltos AC30 modificados con ACP de diferentes localidades de Guatemala. ....	51
Figura 18 Comportamiento del valor de punto de ablandamiento en asfaltos AC30 modificados con ACP de diferentes localidades de Guatemala.....	51
Figura 19 Comportamiento del valor de la gravedad específica en asfaltos AC30 modificados con ACP de diferentes localidades de Guatemala.....	52
Figura 20 Comportamiento del valor de viscosidad medida a 135°C en asfaltos AC30 modificados con ACP de diferentes localidades de Guatemala.....	52
Figura 21 Comportamiento del valor de viscosidad medida a 165°C en asfaltos AC30 modificados con ACP de diferentes localidades de Guatemala.....	53
Figura 22 Tabla de grupos funcionales y rangos en el espectro infrarrojo usada para identificación de compuestos químicos en la técnica FTIR .....	69
Figura 23 Espectros IR de AC30 de Guatemala virgen y modificado con diferentes porcentajes de TER*.....	70
Figura 24 Espectros IR de asfaltos vírgenes de diferente viscosidad de Guatemala* .....	71
Figura 25 Espectros IR de AC30 de Guatemala virgen y modificado con diferentes porcentajes de Estearina* .....	72

Figura 26 Espectros IR de AC30 de Brasil virgen y modificado con diferentes porcentajes de ACP de Fray Bartolomé de las Casas* .....	73
Figura 27 Espectros IR de AC30 de Brasil virgen y modificado con diferentes porcentajes de ACP de Pataxte* .....	74
Figura 28 Espectros IR de AC30 de Brasil virgen y modificado con diferentes porcentajes de ACP de Santa Rosa* .....	75
Figura 29 Espectros IR de AC30 de Guatemala virgen y modificado con diferentes porcentajes de ACP de Fray Bartolomé de las Casas* .....	76
Figura 30 Espectros IR de AC40 vírgenes de Guatemala y Honduras* .....	77
Figura 31 Espectros IR de AC30 de Guatemala virgen y modificado con diferentes porcentajes de ACP de Pataxte* .....	78
Figura 32 Espectros IR de AC40 de Guatemala virgen y modificado con diferentes porcentajes de TER* .....	79

## RESUMEN

Este estudio plantea el uso de la técnica de espectroscopía infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR) para el análisis e identificación de bitúmenes asfálticos. Se abordó cómo esta técnica podría trabajar de la mano con el análisis de las propiedades físicas medibles de los asfaltos para su control de calidad.

En la actualidad, los bitúmenes asfálticos, también conocidos como asfaltos, se analizan únicamente con la determinación de sus propiedades físicas. Se propone el uso de la técnica FTIR para identificar y diferenciar asfaltos vírgenes y modificados. 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 propone un análisis cualitativo capaz de identificar si un asfalto modificado presenta las mismas características en diferentes lotes de producción. Es 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.

Los asfaltos vírgenes presentan diferencias en el rango de sus espectros IR entre  $1800\text{ cm}^{-1}$  y  $600\text{ cm}^{-1}$  que permiten su identificación. El pico característico en los espectros IR de asfaltos modificados está situado en aproximadamente  $1740\text{ cm}^{-1}$  proveniente del grupo carbonilo de los modificadores agregados (C=O). El incremento de este pico indica cualitativamente el porcentaje de modificador presente en el asfalto.

Las propiedades físicas varían de manera no lineal y no es posible relacionarlas con los picos característicos en los espectros IR de las muestras pero se puede observar 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.

Se recomienda realizar un análisis económico a la implementación de la técnica FTIR en el control de calidad de asfaltos modificados, y evaluar con un análisis más profundo los espectros IR de estos asfaltos la posibilidad de cuantificar el porcentaje del modificador presente.



# I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, en Guatemala, el control de calidad de los asfaltos se mantiene únicamente por la medición de pruebas de tipo. Entre estas se encuentra el punto de ablandamiento, punto de penetración, la gravedad específica y viscosidad. Este trabajo presenta cómo aplicar la técnica de espectroscopía infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR) para analizar asfaltos vírgenes de tres viscosidades diferentes catalogados como AC20, AC30 y AC40 y asfaltos modificados con poliuretano, un terpolímero elastomérico reactivo (TER), estearina y aceite crudo de palma (ACP).

El objetivo general de esta investigación es determinar si es viable utilizar la técnica FTIR como apoyo para el control de calidad de los asfaltos vírgenes y modificados en Guatemala.

La determinación de las pruebas físicas que se realizan para clasificar un asfalto puede tomar desde horas hasta días para completarse. Este trabajo pretende determinar una forma para identificar y caracterizar asfaltos vírgenes y modificados, para reducir el tiempo de análisis de cada muestra.

Este trabajo de graduación inició con la recolección de muestras de asfaltos vírgenes y modificados para realizar un análisis químico de espectroscopía, utilizando un espectrofotómetro tipo FTIR (Espectroscopia Infrarroja con transformada de Fourier). De este análisis se obtuvo espectros IR de las muestras y además se determinó sus propiedades físicas como la viscosidad, gravedad específica, punto de penetración y punto de ablandamiento.

Se propuso utilizar la técnica FTIR para obtener los espectros IR de muestras de asfalto virgen y modificado. El equipo utilizado es mucho más sensible que el espectrofotómetro IR convencional al contar con el algoritmo de cómputo (transformada de Fourier), que requiere menos tiempo y energía para obtener un espectro IR de cada muestra y proporciona espectros definidos y de mayor resolución (Wade L. 2011).

En comparación de la medición de pruebas físicas, se determinó que el análisis espectroscópico propuesto requiere de 10 a 20 minutos de análisis por muestra. Además, el trabajo colaborativo entre el análisis de las propiedades físicas del asfalto y su espectro IR pueden llegar a ser más eficientes en tiempo para la industria del asfalto en el país.

Se documentó la técnica FTIR para ser aplicada en laboratorios de análisis de muestras de asfalto. Por otra parte, se presenta cómo esta técnica puede ser un apoyo para la reducción en el tiempo de análisis para diferentes tipos de asfalto. Se espera contribuir a la industria del asfalto en Guatemala y al desarrollo del país.

Este trabajo surge de la necesidad de mejorar el proceso de control de calidad de la industria del asfalto en Guatemala. Como objetivos se tiene el analizar y comparar muestras de asfaltos vírgenes y modificados de Guatemala y otros países para agregar la técnica FTIR a este proceso.

Cabe mencionar que la obtención de muestras de asfalto es un proceso de un período de tiempo considerable ya que se trabajó con muestras de distintas propiedades y procedencia. En la sección de Resultados se pueden observar espectros IR de las muestras agrupadas con viscosidad, país y modificador donde se puede apreciar las diferencias en sus picos característicos en cuanto porcentaje de transmitancia (%T) y longitud de onda ( $\text{cm}^{-1}$ ).

Se determinó que la técnica FTIR permite identificar asfaltos vírgenes de distintas viscosidades debido a picos característicos ubicados en el rango entre  $1800$  a  $600 \text{ cm}^{-1}$  de sus espectros IR. Los asfaltos modificados se lograron identificar de forma cualitativa gracias a que el aumento de modificador influye en la concentración del grupo carbonilo ( $\text{C}=\text{O}$ ) y esto se refleja en la variación del pico característico ubicado en la longitud de onda de  $1745 \text{ cm}^{-1}$  aproximadamente. Se determinó también que es posible cuantificar la concentración de modificador utilizado analizando su espectro IR, este se observó solamente en las muestras de AC30 de Guatemala y Brasil con ACP de diferentes localidades de Guatemala.

Se determinó también que no existe correlación entre la técnica FTIR y el análisis de propiedades físicas de asfaltos debido a que estas propiedades presentan valores variables y los espectros IR solamente reflejan el comportamiento de los enlaces químicos más no el cambio en sus propiedades macromoleculares. Esto se debe a distintas fuentes de error como la preparación de los estándares, mediciones de las propiedades físicas por diferentes personas y en diferentes días. Se recomienda realizar un análisis de la técnica FTIR con un mayor número de muestras bajo condiciones controladas.

## II. OBJETIVOS

### A. Objetivo general

Determinar la viabilidad de la técnica de espectroscopía infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR) en la identificación de bitúmenes asfálticos vírgenes de viscosidades AC20, AC30 y AC40, de Guatemala, Honduras, Brasil y China, y asfaltos modificados con poliuretano, terpolímero elastomérico reactivo, estearina y aceite crudo de palma.

### B. Objetivos específicos

1. Comparar espectros IR de bitúmenes asfálticos vírgenes de distinta procedencia analizando variaciones en picos característicos pertinentes a grupos químicos funcionales para identificarlos de acuerdo a su viscosidad.
2. Comparar espectros IR de bitúmenes asfálticos modificados con diferentes porcentajes de poliuretano, terpolímero elastomérico reactivo, estearina y aceite crudo de palma de diferentes regiones de Guatemala, analizando variaciones en picos característicos para identificar el porcentaje de modificador agregado.
3. Comparar los picos característicos de los espectros IR de asfaltos vírgenes y modificados con los resultados de pruebas físicas, según las normas AASHTO y ASTM de penetración, punto de ablandamiento, gravedad específica y viscosidad para determinar si puede existir una correlación entre ambos análisis.



### III. JUSTIFICACIÓN

Según la Cámara Guatemalteca de Construcción la superficie autorizada de construcción en metros cuadrados ( $m^2$ ) del 2017 fue de  $2.24 \times 10^6 m^2$ . Por otra parte, las licencias de construcción del 2017 fueron 7,804 y la producción de asfalto del 2018 hasta marzo ha sido de 119.81 mil barriles (19,048.27  $m^3$ ), sin tomar en cuenta la importación. (CGC 2018)

En la actualidad existen más de 30 empresas productoras de mezclas asfálticas en caliente tales como ASFALGUA, PADEGUA, ASFALSUR, Pavimentos del Norte, ASPECTRO, entre otras. La producción total del 2018 en promedio fue de 9,161.48 barriles por día (1,456.56  $m^3$ ). El asfalto es el destilado más bajo del proceso de purificación del petróleo y es lo que se utiliza para preparar productos como carreteras y pavimentos. (MEM, 2016)

En Guatemala la empresa PERENCO Guatemala Limited extrae petróleo y es la principal productora de asfalto virgen en el país. Los gastos más comunes del país en asfalto es la compra de asfalto virgen por empresas grandes que la distribuyen a proveedores por todo el país. El producto se prepara según los requisitos del comprador y se realizan mediciones de control de calidad. Los gastos más importantes se reflejan en el uso de combustibles como diésel para mantener el asfalto a una temperatura de aproximadamente  $171.1^\circ C$  ( $340^\circ F$ ), esta temperatura de debe mantener para que el asfalto pueda ser bombeado durante toda su estancia en contenedores o pipas hasta su aplicación.

Actualmente, los métodos utilizados para la caracterización de asfaltos y determinar su calidad solamente se constan de evaluaciones de sus propiedades físicas. La caracterización del asfalto o bitumen asfáltico, usando pruebas físicas, requiere hasta dos jornadas de trabajo de un operador. Esto es aproximadamente 16 a 20 horas. Este proceso incluye la determinación de ciertas propiedades físicas del asfalto como el punto de penetración, punto de ablandamiento, la gravedad específica y viscosidad. (Sitecal, 2015).

La técnica de espectroscopía infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR) es una técnica química analítica no destructiva que propone reducir el tiempo de análisis por muestra, hasta el orden de minutos (aproximadamente 10 minutos de lectura por muestra). Se esperaría que la empresa use esta técnica de FTIR aplicada y que permita, en comparación con el análisis físico en los asfaltos, el ahorro de tiempo en el proceso de control de calidad de asfaltos vírgenes y modificados. (Read J., Whiteoak D. 2004)



## IV. MARCO TEÓRICO

### A. Fabricación, almacenamiento, manejo y aspectos ambientales del bitumen asfáltico

#### 1. Manufactura

El petróleo se separa, purifica, mezcla y a veces se modifica física y químicamente antes de poder utilizarse. El petróleo es separado en diferentes compuestos por medio de destilación, en una torre de destilación se separan los compuestos por orden de punto de ebullición. Los compuestos con punto de ebullición más bajo se elevarán en forma de vapor y al llegar a un punto de la torre donde la temperatura sea menor al de su punto de ebullición se condensan y separan. (Read J., Whiteoak D. 2004)

Las fracciones de la torre de destilación más pesadas permanecen en forma de líquido y se remueven por la base de la torre. Las fracciones más livianas de la destilación del petróleo incluyen compuestos como propano y butano, y dirigiéndose hacia abajo se produce la nafta que es materia prima para la gasolina. Más abajo se obtiene queroseno que sirve para producir combustible de avión y en menor medida combustible doméstico. Una fracción más pesada es el gasóleo o más conocido como diésel que es utilizado en motores diésel. (Read J., Whiteoak D. 2004)

La fracción más pesada de la destilación del petróleo es conocida como residuo largo, es una mezcla de hidrocarburos de alto peso molecular que requiere ser procesada antes que sirva como materia prima para fabricar bitumen asfáltico o asfalto. (Read J., Whiteoak D. 2004)

Este residuo largo es destilado al vacío a una presión debajo de los 10 a 100 mmHg a temperaturas entre 350 y 425°C para producir diésel, destilados y un residuo corto. El residuo corto es usado como materia prima en la fabricación de más de 20 asfaltos diferentes. (Read J., Whiteoak D. 2004)

La viscosidad del residuo corto depende tanto del origen del petróleo crudo y de la temperatura y presión del vacío durante su procesamiento. Dependiendo de su origen la columna de destilación se ajusta de modo que se obtenga un residuo corto con una penetración en el rango de 35 a 300 dmm. (Read J., Whiteoak D. 2004)

## B. Constitución, estructura y reología de bitúmenes asfálticos

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. (Read J., Whiteoak D. 2004)

### 1. Constitución del bitumen asfáltico

El bitumen asfáltico o 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 el vanadio, níquel, hierro, manganeso y calcio, que se producen en forma de sales inorgánicas y óxidos o en estructuras de porfirinas. (Read J., Whiteoak D. 2004)

Análisis elementales de bitúmenes asfálticos fabricados de una variedad de petróleos muestran que la mayoría de asfaltos contienen, 80 a 88% carbón, 8 a 12% hidrógeno, 0 a 9% azufre, 0 a 2% oxígeno y 0 a 1% nitrógeno. Todos los rangos de porcentajes se reportan en masa/masa con respecto a la composición química del asfalto (García W. 2013)

La composición precisa varía según la fuente de petróleo, modificaciones por semisoplado y soplado de aire durante la fabricación y envejecimiento en servicio.

La composición del bitumen es muy compleja pero puede separarse en dos grandes grupos químicos llamados asfaltenos y maltenos. Los maltenos pueden subdividirse en saturados, aromáticos y resinas. Los asfaltenos y los tres grupos más no están definidos y existe superposición entre ellos, sin embargo, la reología del asfalto se utiliza en lugar de la composición química. (Read J., Whiteoak D. 2004)

#### a. Asfaltenos

En general, son considerados altamente polares y aromáticos complejos de alto peso molecular. El rango de peso molecular varía según el método de obtención y, puede estar entre 1000 a 100,000. Tienen un tamaño de partícula de entre 5 a 30nm y un radio atómico de hidrógeno/carbono de 1:1. (Read J., Whiteoak D. 2004)

El contenido de asfaltenos tiene un gran efecto en las características reológicas del asfalto. Incrementar el contenido de asfaltenos produce un asfalto más duro y viscoso con menor penetración, un punto de ablandamiento mayor y consecuentemente mayor viscosidad. Los asfaltenos constituyen 5 al 25% en masa del asfalto. (Read J., Whiteoak D. 2004)

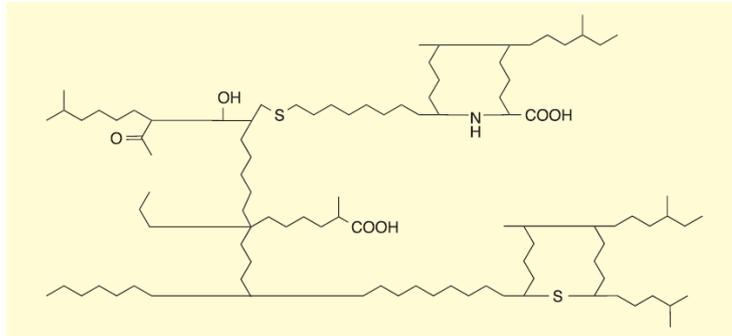


Figura 1 Estructura química de los asfaltenos  
(Hunter R., Self A., Read J. 2015)

#### b. Resinas

Son compuestos solubles en n-heptano. También, como los asfaltenos, son compuestos con altos contenidos de hidrógeno y carbono y poco oxígeno, azufre y nitrógeno. Son de un color café oscuro, sólidos o semisólidos, de naturaleza polar y altamente adhesivos. Las resinas son agentes dispersantes o peptizadores para los asfaltenos. La proporción de resina y asfalto decide, hasta cierto punto, la solución o tipo de carácter gelatinoso del bitumen asfáltico. Las resinas separadas del asfalto presentan pesos moleculares en el rango de 500 a 50,000, un tamaño de partícula de 1 a 5 nm y un radio atómico Hidrógeno/Carbono 1:3 hasta 1:4. (Read J., Whiteoak D. 2004)

#### c. Aromáticos

Los aromáticos son los compuestos aromáticos nafténicos con menor peso molecular en el asfalto y representan el mayor porcentaje de medio de dispersión de los asfaltenos peptizados. Estos constituyen del 40 al 65% del asfalto y son líquidos café oscuro viscosos. El peso molecular de los aromáticos está entre 300 a 2000. Consisten en cadenas de carbono apolares donde el sistema de anillos insaturados dominan y poseen una capacidad muy alta para disolver hidrocarburos de alto peso molecular. (Read J., Whiteoak D. 2004)

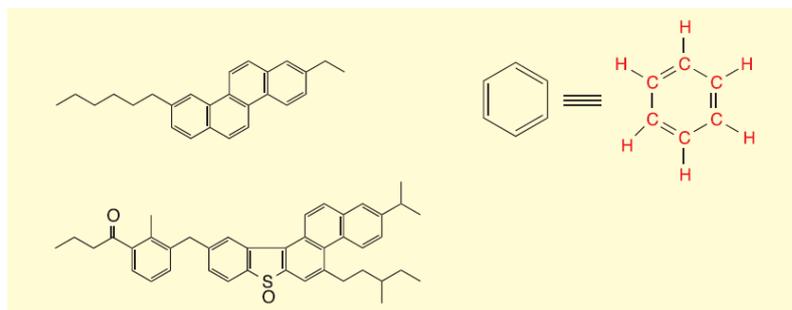


Figura 2 Estructuras de compuestos aromáticos  
(Hunter R., Self A., Read J. 2015)

#### d. Saturados

Estos compuestos saturados consisten en hidrocarburos alifáticos de cadenas rectas y ramificadas con alquil-naftenos y algunos alquil-aromáticos. Son aceites viscosos no polares que tienen color paja o blanco. El rango de peso molecular promedio es similar a los aromáticos y los componentes incluyen saturados cerosos y no cerosos. Estos compuestos forman el 5% al 20% del bitumen asfáltico. (Read J., Whiteoak D. 2004)

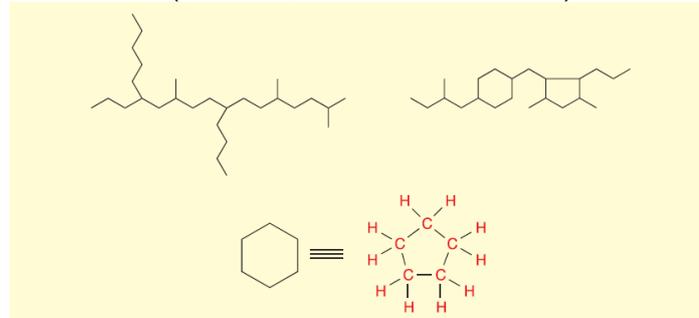


Figura 3 Estructuras de compuestos saturados  
(Hunter R., Self A., Read J. 2015)

#### e. Constituyentes metálicos del bitumen asfáltico

Los metales principales que se hallan en bitumen asfálticos son: aluminio, cromo, hierro, magnesio, níquel, plata, tantalio, vanadio, bario, cobre, lantano, manganeso, potasio, sodio, estaño, zinc, calcio, galio, plomo, molibdeno, silicio, estroncio, uranio y zirconio. (Read J., Whiteoak D. 2004)

## 2. Estructura del bitumen asfáltico

El bitumen asfáltico 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. (Read J., Whiteoak D. 2004)

Cuando un bitumen asfáltico contiene asfaltenos completamente peptizados se le llama de tipo SOL. Contiene una cantidad suficiente de resinas y aromáticos con un poder adecuado de solvatación. Gracias a esto las micelas tienen buena libertad de movimiento en el bitumen. (Read J., Whiteoak D. 2004)

-  Asfaltenos
-  Hidrocarburos aromáticos de alto peso molecular
-  Hidrocarburos aromáticos de bajo peso molecular
-  Hidrocarburos aromático/nafténico
-  Hidrocarburos nafténico/alifático
-  Hidrocarburos saturados

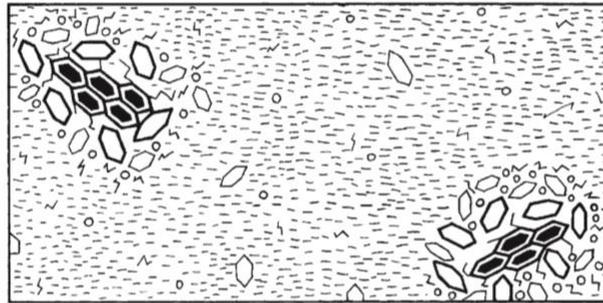


Figura 4 Representación esquemática de un asfalto tipo SOL (Hunter R., Self A., Read J. 2015)

Los asfaltenos pueden unirse más y formar agrupaciones si los aromáticos y resinas del medio no son suficientes para peptizar. A este tipo de asfaltos se les puede llamar de tipo GEL. En la práctica la mayoría de bitúmenes son de carácter intermedio. (Read J., Whiteoak D. 2004)

-  Asfaltenos
-  Hidrocarburos aromáticos de alto peso molecular
-  Hidrocarburos aromáticos de bajo peso molecular
-  Hidrocarburos aromático/nafténico
-  Hidrocarburos nafténico/alifático
-  Hidrocarburos saturados

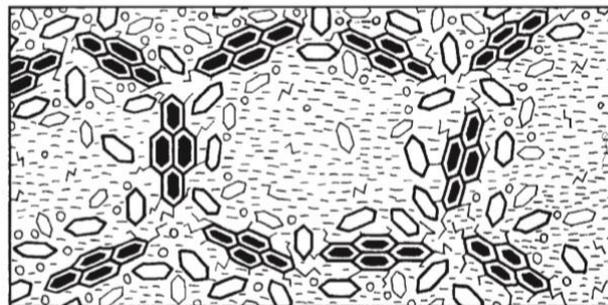


Figura 5 Representación esquemática de un asfalto tipo GEL (Hunter R., Self A., Read J. 2015)

El comportamiento coloidal de los asfaltenos en el bitumen asfáltico resulta de la agregación y solvatación. Según el grado en que estén peptizados se verá afectada la viscosidad del sistema. Estos efectos disminuyen cuando aumenta la temperatura y el carácter GEL de ciertos bitúmenes se pierde cuando se calientan a altas temperaturas. (Read J., Whiteoak D. 2004)

La viscosidad de los saturados, aromáticos y resinas depende de la distribución del peso molecular. Entre más grande sea el peso molecular mayor será la viscosidad. La cantidad de saturados puede afectar el carácter GEL de un asfalto ya que entre más saturados hayan los asfaltenos estarán en un medio más aglomerado y difícil para ser solvatados. (Read J., Whiteoak D. 2004)

### 3. Relación entre constitución y reología

Cuando el contenido de asfaltenos es constante y hay variación en la concentración de los otros tres componentes al aumentar el contenido de aromáticos, con una proporción constante de resinas, tiene poco efecto sobre la reología aparte de una reducción en la susceptibilidad al corte. (Read J., Whiteoak D. 2004)

También se ha observado que al mantener una proporción constante de resinas y aromáticos, y aumentar la de los saturados suaviza el bitumen. La adición de resinas endurece el betún, reduce el índice de penetración y la susceptibilidad al corte pero aumenta la viscosidad. (Read J., Whiteoak D. 2004)

Por otra parte, las propiedades reológicas del bitumen dependen en gran medida de su contenido de asfaltenos. A una temperatura constante, la viscosidad incrementa cuando la concentración de asfaltenos mezclados con maltenos aumenta. (Read J., Whiteoak D. 2004)

### 4. Relación entre la composición química amplia del bitumen y sus propiedades físicas

Durante todos los procesos previos a la obtención de los bitúmenes asfálticos sus propiedades físicas son modificadas. Por ejemplo, antes del soplado los contenidos de saturados y resinas permanecen sustancialmente en el mismo orden. De igual manera, el envejecimiento del bitumen hace que su contenido de asfaltenos muestre un incremento gradual y las resinas y aromáticos disminuyen. (Read J., Whiteoak D. 2004)

Se debe tomar en cuenta que los bitúmenes de composiciones químicas muy diferentes pueden tener propiedades físicas muy similares si se derivan de diferentes crudos. Por lo tanto, es imposible describir los bitúmenes en general en términos de concentraciones de componentes químicos y la definición de componentes individuales como los asfaltenos es poco relevante. (Read J., Whiteoak D. 2004)

## C. Especificación y calidad del betún

El rendimiento de bitúmenes asfálticos de grado de penetración para preparar mezclas de asfalto, que se aplican en carreteras, se ha estudiado por muchos años. Gracias al aumento de la carga de tráfico y los requisitos de rendimiento cada vez más exigentes, la capacidad de predecir el comportamiento a largo plazo de los asfaltos se vuelve cada vez más importante. (Read J., Whiteoak D. 2004)

El rendimiento de una mezcla asfáltica en una carretera depende de muchos factores, incluidos el diseño, la naturaleza de la aplicación y la calidad de los componentes individuales. En términos volumétricos, el betún o asfalto es un componente relativamente menor de una mezcla asfáltica, pero tiene un papel crucial ya que actúa como un aglutinante duradero y que confiere propiedades viscoelásticas. (Read J., Whiteoak D. 2004)

Los betunes modificados pueden requerir métodos de prueba más sofisticados para describir su desempeño de manera adecuada. Además de las pruebas especificadas en los estándares, algunos proveedores de betún llevan a cabo una gama más amplia de pruebas de laboratorio para garantizar que los betunes se fabriquen con un estándar constante. (Hunter R., Self A., Read J. 2015)

### 1. Susceptibilidad térmica de los asfaltos

Se define como el cambio de la consistencia con un cambio de la temperatura. Se puede observar en la curva Consistencia vs Temperatura, en la Figura No. 6, como el asfalto Z pierde más consistencia que el W, para una misma diferencia de temperatura. Cuando la temperatura aumenta desde a hasta b la consistencia de Z se reduce. Esto significa en lenguaje técnico que el ligante Z es más susceptible térmicamente que el ligante W. (García W. 2013)

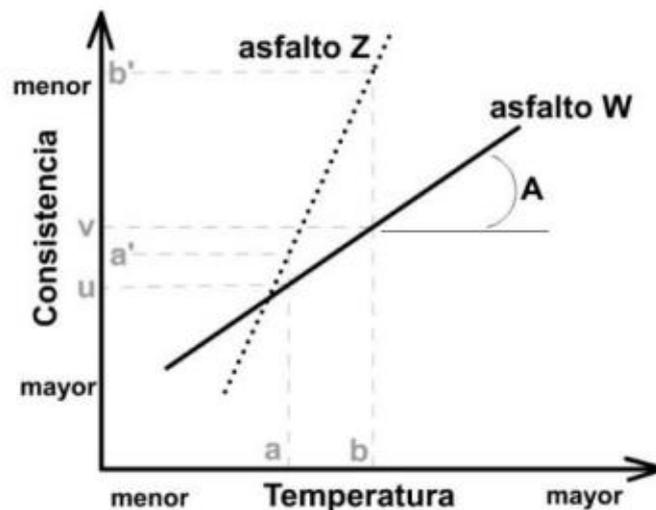


Figura 6 Concepto de susceptibilidad térmica  
(García W. 2013)

Esta propiedad es muy importante ya que permite modificar la consistencia del asfalto para el mezclado con agregados, su compactación y por último para la vida de servicio de la mezcla. (García W. 2013)

## 2. Grado de penetración, grado de penetración dura y bitúmenes asfálticos de grado de viscosidad

La designación por rango de penetración es, por ejemplo, el betún de pluma 40/60. Este tiene una penetración que varía de 40 a 60 inclusive. La unidad de penetración es decimilímetro (0.1 mm). Esta es la unidad que se mide en la prueba de penetración según la norma ASTM D5. Sin embargo, los betunes de grado de penetración generalmente se mencionan sin indicar unidades. (Hunter R., Self A., Read J. 2015)

Los betunes más blandos se cubren con pruebas de viscosidad ya que los betunes de grado de penetración más duros los cubren las pruebas de penetración y punto de ablandamiento. (Hunter R., Self A., Read J. 2015)

Dichos grados también se denominan betunes de grado de viscosidad. Los betunes de grado de penetración dura representan el otro extremo de la escala de viscosidad: generalmente se caracterizan y designan solo por el rango de penetración (ejemplo, 10/20). En los últimos años, la tendencia ha sido utilizar betunes más duros. (Hunter R., Self A., Read J. 2015)

## 3. Bitúmenes asfálticos modificados con polímeros (PMB)

Durante las últimas tres décadas, los PMB se han vuelto cada vez más populares como reemplazo de los betunes de grado de penetración en las capas superiores de los pavimentos de asfalto. Los clientes generalmente lo hacen debido a las propiedades superiores de los PMB. Aunque representan aglutinantes de tecnología avanzada, todavía se designan tanto por el rango de penetración como por un punto de ablandamiento mínimo: por ejemplo, 45/80 – 55 es un PMB con una penetración de 45 – 80 dmm y un punto de ablandamiento de al menos 55 °C. (Hunter R., Self A., Read J. 2015)

Los copolímeros de estireno-butadieno fueron los modificadores de betún más utilizados en la primera década del siglo XXI, en los últimos años otros modificadores se han vuelto cada vez más populares en la búsqueda de mejorar el rendimiento del betún. Los ejemplos incluyen parafina, ceras de amida y caucho de miga reciclado. Las especificaciones para dichos betunes modificados están empezando a desarrollarse, y es probable que los mismos métodos de prueba utilizados para PMB describan adecuadamente el rendimiento de dichos aglutinantes. (Hunter R., Self A., Read J. 2015)

#### 4. Bitúmenes asfálticos oxidados

Los bitúmenes asfálticos oxidados se usan casi por completo para aplicaciones industriales (techos, pisos, masillas, revestimientos de tuberías, pinturas, etc.). Se especifican y designan por referencia tanto para el punto de ablandamiento como para las pruebas de penetración: por ejemplo, 85/40 es un betún de grado oxidado con un punto de ablandamiento de  $85 \pm 5^\circ\text{C}$  y una penetración de  $40 \pm 5$  dmm. Los betunes oxidados también deben cumplir con los criterios de solubilidad, pérdida por calentamiento y punto de inflamación. (Hunter R., Self A., Read J. 2015)

Los puntos de ablandamiento de los grados oxidados de betún son considerablemente más altos que los de los correspondientes betunes de grado de penetración, y por lo tanto la susceptibilidad a la temperatura (es decir, el índice de penetración es alto). (Hunter R., Self A., Read J. 2015)

#### 5. Bitúmenes asfálticos duros

Los bitúmenes asfálticos duros se utilizan únicamente para aplicaciones industriales (briquetas de carbón, pinturas, etc.). Se especifican tanto por el punto de ablandamiento como por las pruebas de penetración, pero se designan solo por un rango de punto de ablandamiento y el prefijo H: por ejemplo, H80/90 es un betún de grado duro con un punto de ablandamiento entre  $80$  y  $90^\circ\text{C}$ . Los betunes duros también deben cumplir con los criterios de solubilidad, pérdida por calentamiento y punto de inflamación. (Hunter R., Self A., Read J. 2015)

#### 6. Calidad del bitumen asfáltico

Básicamente, se puede garantizar el rendimiento satisfactorio de un betún en la carretera si se controlan cuatro propiedades:

##### a. Reología

La reología del betún de grado de penetración a temperaturas de servicio aún se caracteriza adecuadamente por los valores de penetración y el índice de penetración aunque existen métodos más sofisticados. (Hunter R., Self A., Read J. 2015)

Para evaluar la reología de los betunes modificados más complejos se utilizan las pruebas con el reómetro de corte dinámico según los estándares BSI, 2012b y BSI, 2010a. Estas pruebas permiten a los usuarios evaluar la rigidez del betún y su comportamiento viscoso y elástico en una amplia gama de temperaturas de servicio. (Hunter R., Self A., Read J. 2015)

#### b. Cohesión

La resistencia cohesiva del betún se caracteriza por la ductilidad de la mezcla a baja temperatura (BSI, 2008) o por la prueba de tracción (BSI, 2010b). En la prueba de ductilidad original las muestras de betún en forma de campana se sumergen en un baño de agua y estiran a una velocidad constante de 50 mm/min hasta que se produce la fractura. La ductilidad corresponde a la distancia que la muestra se estira antes de la falla es la ductilidad. (Hunter R., Self A., Read J. 2015)

Otro método involucra no solo la tensión en la fractura sino la energía requerida para estirar la muestra durante toda la prueba. A este método se le llama prueba de ductilidad forzada y produce resultados con menos discriminación del comportamiento extensible y por lo tanto cohesivo de diferentes betunes. Los PMB (bitúmenes modificados con polímeros) muestran mayor resistencia y mejor descripción con este método. (Hunter R., Self A., Read J. 2015)

#### c. Adhesión

La adherencia del betún puede medirse solo en combinación con un sustrato. Las pruebas realizadas en el laboratorio junto con las observaciones del rendimiento en la práctica han identificado vínculos clave entre las propiedades funcionales y la constitución del betún. Este trabajo ha indicado que si la distribución del peso molecular y la constitución química del bitumen está desequilibrada, puede exhibir falta de homogeneidad que puede afectar adversamente las propiedades cohesivas y adhesivas del bitumen. (Hunter R., Self A., Read J. 2015)

#### d. Durabilidad

Es la capacidad para mantener de manera satisfactoria una reología, cohesión y adhesión satisfactorias en el servicio. El término "envejecimiento" se utiliza a menudo para describir el cambio en las propiedades del betún durante el almacenamiento, mezcla, tendido y servicio. Para los betunes que se clasifican según su grado de penetración, el envejecimiento es sinónimo de endurecimiento pero algunos PMB (betunes modificados con polímeros) pueden volverse más blandos bajo ciertas condiciones. (Hunter R., Self A., Read J. 2015)

### 7. Propiedades físicas del asfalto de pavimentación

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

a. 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 D. 2007)

b. 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 D. 2007)

c. Susceptibilidad da la temperatura

El bitumen asfáltico es un material termoplástico ya que, se vuelve más viscoso de acuerdo a la disminución de su temperatura. Esta propiedad varía entre asfaltos de diferente origen aunque posean el mismo grado de consistencia. (Avellán D. 2007)

d. Endurecimiento y envejecimiento

El endurecimiento sucede luego de agregar el asfalto al suelo. 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. Se puede definir como la reacción de grupos lábiles del asfalto con el oxígeno. (Vargas X., Reyes F. 2010)

8. Clasificación de asfaltos

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. La clasificación de uso más común la es de los asfálticos. A continuación se detalla sus características:

a. Cementos asfálticos

Se pueden 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 D. 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)

#### 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 D. 2007)

#### b. Asfaltos rebajados

Se conocen también como asfaltos diluidos, son cementos asfálticos que han sido mezclados con solventes de petróleo. (Avellán D. 2007)

#### c. Asfaltos emulsificados

Es una emulsión de cemento asfáltico y agua con un porcentaje pequeño de un agente emulsionante. El agua forma la fase continua y pequeños glóbulos de asfalto forman la fase discontinua. (Avellán D. 2007)

### 9. Especificación sobre bitúmenes asfálticos

Los bitúmenes o cementos asfálticos cumplen con especificaciones incluidas en el libro Especificaciones Generales para Construcción de Carreteras y Puentes (2001). Estas se originan de las normas de la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) y de la American Society for Testing and Materials (ASTM). (Avellán D. 2007).

Tabla 1 Identificación de normas AASHTO y ASTM aplicables a asfaltos

Ensayo	AASHTO	ASTM
Viscosidad	T – 201 T – 202	D – 2170 D – 2171
Penetración	T – 49	D – 5
Punto de inflamación	T – 48	D – 92
Prueba de película delgada en horno	T – 179	D – 1754
Prueba giratoria de película delgada en horno	T – 240	D – 2872
Ductilidad	T – 51	D – 113
Solubilidad	T – 44	D – 2042
Peso específico	T – 228	D – 70
Punto de ablandamiento	T – 53	D – 3695

Fuente: principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente, Dina Avellán.

Estos ensayos muestran las características y control de calidad que deben seguir los bitúmenes asfálticos. A continuación se detallan:

- a. Viscosidad ASTM D-2171 (Viscosidad de asfalto por viscosímetro capilar de vacíos)

La viscosidad del bitumen asfáltico se indica a 60 °C (140 °F), que es la temperatura más alta que el pavimento puede llegar a experimentar durante su servicio. La viscosidad a 135 °C (275 °F) corresponde aproximadamente, a la viscosidad del asfalto durante el mezclado y colocación. Es necesario conocer la viscosidad del asfalto a estas dos temperaturas para determinar si es apropiado o no para el pavimento que se está diseñando. (Avellán D. 2007)

- b. Penetración ASTM D-5 (Viscosidad de asfalto por viscosímetro capilar de vacíos)

Esta es otra medida de consistencia. Este ensayo tiene como objetivo impedir que bitúmenes asfálticos sean utilizados si tienen valores inapropiados de penetración a 25°C (77°F). Es aplicable a materiales dentro de un rango de 0.0036 a 20,000 (Pa\*s), equivalentes a 0.036 a 200,000 Poises (P). Esta propiedad se expresa como la distancia, en décimas de milímetro (0.1 mm), que una aguja patrón penetra verticalmente una muestra del material bajo condiciones específicas de carga, tiempo y temperatura. (Avellán D. 2007)

Para este ensayo se utiliza un equipo con un vástago con una aguja capaz de indicar la profundidad de penetración con una precisión de 0.1 mm. La masa del vástago debe ser 47.50±0.05g y el total del vástago y aguja de 50.00±0.05g. Para manipular el asfalto debe estar a una temperatura entre 135°C y 165°C, y contar con un baño de agua para que la muestra se mantenga a una temperatura de 25°C. (Sitecal 2015)

La medición de cada muestra toma 5 segundos. Se recomienda trabajar en triplicado. La muestra se debe obtener caliente, no se debe calentar por más de 30 min. Luego se deja enfriar y dependiendo del volumen de la muestra toma entre 1 a 2 horas. (Sitecal 2015)

- c. Punto de inflamación ASTM D-92 (Punto de inflamación para materiales bituminosos)

Es la temperatura más baja a la cual se separan los materiales volátiles de la muestra y crean un destello en presencia de una llama abierta. Se hace la aclaración que el punto de inflamación no es lo mismo que el punto de combustión, que es la temperatura más baja cuando el asfalto se inflama y se quema. (Avellán D. 2007)

El punto de inflamación sirve para conocer la temperatura máxima para manejar y almacenar sin peligro porque el bitumen asfáltico es calentado durante su almacenaje para mantener su viscosidad baja y poder ser bombeado. El aparato para medir este punto es conocido como “copa abierta de Cleveland”. (Avellán D. 2007)

Este ensayo utiliza una copa metálica llamada copa abierta de Cleveland que contiene una placa de calentamiento, un aplicador de llama, un calentador y soportes. El asfalto se agrega caliente a la copa, en caso se agregó más de lo especificado se debe vaciar, limpiar y volver a llenar. (Sitecal 2015)

El calor se aplica para que la temperatura de la muestra suba a una velocidad entre 14 y 17 °C por minuto. Cuando la temperatura de la muestra se aproxime a los 55°C por debajo del punto de inflamación esperado, se disminuye el calor para que la velocidad de la temperatura sea entre 5 a 6 °C por minuto cuando falten 28 °C para el punto de inflamación esperado. En este punto se aplica la llama de prueba cada 2 °C sucesivos leídos en el termómetro. (Sitecal 2015)

El punto de inflamación se determina en el termómetro cuando aparece un destello en cualquier punto de la superficie del material, no se debe confundir el verdadero destello con el halo azulado que algunas veces puede circundar la llama de prueba. (Sitecal 2015)

- d. Prueba de película delgada en horno (TFO) ASTM D-1754 (Efectos de calor y aire en materiales asfálticos) y Prueba de película delgada en horno rotatorio (RTFO) ASTM D-2872 (Efectos de calor y aire en una película en movimiento de asfalto)

Son procedimientos que exponen una muestra de cemento asfáltico, a condiciones que se aproximan a las que se dan durante las operaciones en las plantas de mezclado en caliente. Las pruebas de viscosidad y penetración efectuadas sobre las muestras obtenidas después de los ensayos de TFO o RTFO, son usadas para medir el endurecimiento anticipado del material durante la construcción y servicio del pavimento. (Avellán D. 2007)

e. Ductilidad ASTM D-113 (Ductilidad de materiales bituminosos)

Es una medida de cuanto puede ser estirada una muestra de asfalto antes de que se rompa o divida. Se obtiene por una prueba de extensión, en donde el contenido de una probeta llena con bitumen asfáltico se derrama y es extendido o estirado a una velocidad y a una temperatura específica, hasta que el hilo de asfalto se rompa. La longitud del hilo en el momento del corte se mide en centímetros y se denomina ductilidad. Las condiciones establecidas para la realización de este ensayo son a  $25 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$  y a una velocidad de 5 cm/min. (Avellán D. 2007)

La muestra se calienta para moldearla, teniendo cuidado de no elevar su temperatura a más de 80-110 °C por encima del punto de ablandamiento esperado. La muestra luego se tamiza y agrega a un molde. Se deja enfriar a temperatura ambiente por 30-40 min y luego se coloca en baño de agua para la temperatura que especifique el método por otros 30min. Por último, se corta el exceso de ligante asfáltico (bitumen) con una espátula caliente, resistente y afilado, de modo que el molde se ajuste al nivel de llenado. (Sitecal 2015)

El molde se estira sujeto por dos clips hasta el punto de convertirse en un hilo y la ruptura ocurre en el punto donde el hilo no tiene prácticamente sección transversal. La ductilidad se reporta como el promedio de un trabajo en triplicado. (Sitecal 2015)

f. Solubilidad ASTM D-2042 (Solubilidad de asfaltos en tricloroetileno):

Este ensayo es utilizado para medir la pureza de un bitumen asfáltico. Una muestra es sumergida en un solvente (tricloroetileno) en donde se disuelven sus componentes cementantes activos. Las impurezas como sales, el carbono libre y los contaminantes inorgánicos no se disuelven, sino que se depositan en forma de partículas. Estas impurezas insolubles son luego filtradas fuera de la solución y medidas como un porcentaje de la muestra original. (Avellán D. 2007)

g. Peso específico ASTM D-70 (Densidad de materiales bituminosos semisólidos)

Es la proporción de la masa de cualquier volumen de material a la masa de un volumen igual de agua, ambos a una temperatura determinada. El peso específico es determinado generalmente usando el método del picnómetro. Los resultados para el asfalto, como para el agua, se expresan normalmente en términos de peso específico a una temperatura dada. (Avellán D. 2007)

Existen dos razones importantes por las que se debe conocer el peso específico del cemento asfáltico usado:

- El asfalto se expande cuando se calienta y se contrae cuando se enfría. Esto significa que el volumen dado de una cierta cantidad de asfalto será mayor a altas temperaturas. Las medidas de peso específico proveen un patrón para efectuar correcciones de temperatura/volumen.
- El peso específico de un asfalto es esencial en la determinación del porcentaje de intersticios o “vacíos” de un pavimento compactado.

Este ensayo utiliza dos picnómetros, uno de calibración y otro para la muestra. El picnómetro de calibración utiliza agua destilada y se mide su masa cuando llega a la temperatura del proceso durante 30 minutos. El picnómetro de la muestra se llena con la mitad de la muestra y el resto de agua destilada. Se debe calentar la muestra previamente y luego de cerrar el picnómetro y alcanzar la temperatura del ensayo en baño de agua por 30 min. (Sitecal 2015)

h. Punto de ablandamiento ASTM D-3695 (Anillo y bola):

Es la menor temperatura a la que una muestra en un anillo horizontal de dimensiones específicas, es forzada a caer 25 mm por el peso de una bola de acero específica, cuando la muestra se calienta con incrementos de temperatura a una velocidad establecida. (Sitecal 2015)

Proporciona una relación de la dureza del asfalto (duro o blando). Para realizar este ensayo, una pequeña esfera de acero es colocada en el centro de un anillo, también de acero, el cual se sumerge en un baño de agua o de glicerina. Se utiliza agua cuando el asfalto posee un punto de ablandamiento menor a 80 °C y glicerina cuando el punto de ablandamiento es mayor a 80 °C. La temperatura del baño debe controlarse y aumentar a una tasa de 5 °C por minuto. En el momento en que la esfera toca la base (25mm por debajo del anillo) se mide la temperatura y esta determina el punto de ablandamiento del asfalto. (Avellán D. 2007)

La muestra se calienta hasta que pueda ser vertida. La temperatura no debe aumentar a más de 110 °C por sobre el punto de ablandamiento estimado y se debe llevar a esta temperatura en un tiempo menor a 240 min. Se deja enfriar pero no debe pasar más de 4 horas para terminar cada ensayo. (Sitecal 2015)

## D. Asfaltos modificados

Para llevar a cabo la modificación de asfalto, se debe conocer la compatibilidad de este con el modificador para que coexistan como sistema, es decir debe ser miscible, lo que indica una mezcla monofásica. Al ser un asfalto inmisible con un polímero o agregado se traduce en la aparición de una segunda fase. Un polímero es compatible con el asfalto cuando la heterogeneidad de la mezcla no se puede apreciar por un examen visual. (Avellán D. 2007)

Los asfaltos más ricos en fracciones aromáticas y resinas serán los más compatibles, ya que estas fracciones son las que permiten que el polímero se disuelva. Los asfaltos menos compatibles son los más ricos en asfaltenos y saturados. (Avellán D. 2007)

El comportamiento del asfalto depende de la temperatura, tiempo de carga y envejecimiento. A altas temperaturas y bajo cargas sostenidas, el asfalto se comporta como un líquido viscoso ya que, es una mezcla plástica la cual provoca ahuellamiento (deterioro superficial de una carretera de cemento asfáltico). A bajas temperaturas y bajo cargas rápidas se vuelve frágil, ocasionando grietas transversales y agrietamiento térmico. (Avellán D. 2007)

Los asfaltos modificados son producto de la incorporación en el asfalto de un polímero o de hule molido. El objetivo de esto es modificar sus propiedades físicas y reológicas para disminuir su susceptibilidad a la temperatura, humedad y oxidación e incrementar la adherencia con el material pétreo. Aumentar la resistencia de las mezclas asfálticas a la deformación y esfuerzos de tensión repetidos. (Avellán D. 2007)

### 1. Polímeros utilizados en la modificación de asfaltos

Existen asfaltos modificados con polímeros utilizando dos tipos de polímeros; elastómeros y plastómeros. Los elastómeros se les llama polímeros de respuesta elástica, pueden ser caucho, SBS (estireno-butadieno-estireno), SBR (estireno-butadieno-látex) e isopropeno. Los plastómeros son aquellos que rigidizan el asfalto ofreciendo resistencia por lo que no son deformables, estos pueden ser PVC (policloruro de vinilo) y EVA (Acetato de Etil-Vinilo). (Avellán D. 2007)

Los asfaltos modificados con polietileno presentan la ventaja de ser de bajo costo y contribuye a mejorar al medio ambiente usando desechos de este polímero en las carreteras. El asfalto obtiene buena resistencia al calor y al envejecimiento, baja viscosidad y puede ser más resistente. También es flexible a bajas temperaturas y cuando se prepara en concentraciones de 7% aumenta la rigidez del asfalto a temperaturas elevadas. (Avellán D. 2007)

Por otro lado, los polímeros o resinas Etilo-Vinil-Acetato (EVA) son muy compatibles con el asfalto. La relación acetato de vinilo/etileno se puede variar hasta el 50%, cuando los contenidos de acetato de vinilo son bajos las propiedades se asemejan a los asfaltos modificados con polietileno. Un polímero EVA con un contenido del 18 % de acetato de vinilo es el más adecuado para ser usado en la construcción de carreteras. Cuando se aumenta la concentración de acetato de vinilo (de 15 a 30 %), adquiere mayor adherencia. (Avellán D. 2007)

Los asfaltos modificados con EVA poseen buena estabilidad térmica. El polímero se dosifica entre 2 % a 10 % según las propiedades que se desean. La temperatura de ablandamiento aumenta entre 6 °C y 12 °C. Tiene una excelente resistencia al resquebrajamiento en flexión, es decir, a las vibraciones repetidas que puede llegar a sufrir un asfalto y a medida que se aumenta el contenido del polímero aumenta la cohesión de las mezclas. El PVC tiene baja compatibilidad con el asfalto, por eso no es utilizado para modificar asfaltos. (Avellán D. 2007)

#### a. Polímeros modificados con elastómeros

Los asfaltos modificados tienen una elevada resistencia mecánica, gran resistencia a la tracción, buen poder humectante y adhesión a los agregados. Según Avellán D., si el trabajo con este tipo de asfalto es realizado dentro de los parámetros correctos, su tiempo de vida está condicionado por la vida del agregado, no por el asfalto; en otras palabras, el pavimento se deteriora por trituración o abrasión del agregado antes que por la falla del ligante (asfalto). Su resistencia al envejecimiento es excelente. (Avellán D. 2007)

#### b. Polímeros modificados con plastómeros

Debido a la forma en que estos polímeros se incorporan al asfalto aumentan de forma considerable su viscosidad, incluso con dosificación baja. (Avellán D. 2007)

Si se aumenta la concentración del polímero, se llega a un punto en el cual la mayoría de los aceites están asociados con el polímero y se produce un cambio drástico en las propiedades físicas del asfalto. Estas se acercan más a las propiedades del polímero que a las del asfalto. Esto sucede cuando el contenido del polímero va de 8 a 10 % (m/m), en este punto, el asfalto aumenta el intervalo de plasticidad, aumenta la resistencia a la ruptura, disminuye su

sensibilidad térmica sobre todo en el intervalo de temperaturas de aplicación. (Avellán D. 2007)

## 2. Especificaciones de asfaltos modificados

Esta normativa se encuentra en el libro *Especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes*, año 2001 en la sección 411 (Asfaltos modificados), es regulada por la Dirección General de Caminos, están basadas en normas AASHTO y ASTM al igual que para asfaltos sin modificar. (Avellán D. 2007)

Tabla 2 Identificación de normas AASHTO y ASTM aplicables a asfaltos modificados

Ensayo	AASHTO	ASTM
Viscosidad cinemática a 135 °C	T – 201	D – 2170
Viscosidad dinámica a 60 °C	T – 202	D – 2171
Penetración	T – 49	D – 5
Recuperación elástica por torsión	---	---
Prueba de película delgada en horno	T – 179	D – 1754
Prueba giratoria de película delgada en horno	T – 240	D – 2872
Viscosidad rotacional tipo Haake	---	D – 4402
Recuperación elástica por ductilómetro	---	D – 6084
Resilencia a 25 °C	---	D – 3407
Gravedad específica	T – 228	D – 70
Punto de ablandamiento	T – 53	D – 3695

Fuente: Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente. (Avellán D. 2007)

## 3. Ensayos

Las pruebas de viscosidad cinemática y dinámica, penetración, gravedad específica, prueba de película delgada en horno, prueba giratoria de película delgada en horno y punto de ablandamiento se realizan con el mismo procedimiento que el que se usa para asfaltos sin modificar. (Avellán D. 2007)

### a. Recuperación elástica por torsión

Para llevar a cabo la prueba se utiliza un cilindro de dimensiones especificadas, el cual se sumerge en la muestra de asfalto modificado y mediante un dispositivo de torsión se gira el cilindro 180° y se determina, después de 30 min, el ángulo recuperado por el cilindro. Esta prueba sirve para determinar la elasticidad de los cementos asfálticos modificados. No necesariamente identifica y especifica el tipo y porcentaje del polímero utilizado. (Avellán D. 2007)

Es importante hacer notar que esta prueba a pesar de ser aceptada en varios países de Europa, además de México y Argentina no está dentro de las normas AASHTO ni ASTM. (Avellán D. 2007)

- b. Resiliencia ASTM D-3407 (Método de prueba estándar para selladores de juntas, concreto y pavimentos asfálticos)

Al igual que la anterior determina la elasticidad y dureza que presentan los cementos asfálticos. Para llevar a cabo esta prueba se utiliza el penetrómetro usado para la prueba de penetración, con la única diferencia de que la aguja utilizada para la prueba es sustituida por la aguja de resiliencia. (Avellán D. 2007)

- c. Recuperación elástica por ductilómetro ASTM D-6084 (Método de prueba estándar para materiales bituminosos)

La recuperación elástica de un material se determina mediante la tensión recobrada, después de alargar severamente el espécimen de muestra del material. Este se estira a una distancia, velocidad y temperatura específicas. A menos que se determine otra cosa la prueba debe realizarse a una temperatura de  $25 \pm 5^\circ\text{C}$  y a una velocidad de  $5 \pm 5$  cm/min. (Avellán D. 2007)

## E. Espectroscopía infrarroja

En la química orgánica es de suma importancia determinar la estructura orgánica de un compuesto. Existen pruebas físicas y químicas para identificar a un compuesto. Las pruebas químicas pueden sugerir los grupos funcionales y reducir la búsqueda de un compuesto a un intervalo de estructuras posibles antes de emplear las pruebas físicas para realizar una identificación. (Wade L. 2011)

Las técnicas de espectroscopía, pruebas de tipo analítico, necesitan muestras pequeñas para ser realizadas. A diferencia de las pruebas químicas, casi todas las pruebas espectroscópicas son no destructivas ya que; no destruyen la muestra. 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 L. 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 gamma. La región del espectro infrarrojo tiene una longitud de onda en su frecuencia y energía menor que el espectro visible. (Wade L. 2011)

Los espectros infrarrojos comunes operan a longitudes de onda de entre  $2.5 \times 10^{-4} \text{ cm}$  y  $25 \times 10^{-4} \text{ cm}$ . Los fotones infrarrojos, partículas de energía sin masa, no tienen la energía suficiente para causar transiciones electrónicas, pero pueden hacer que los grupos de átomos vibren con respecto a los enlaces que los conectan. (Wade L. 2011)

La posición de una banda infrarroja se puede especificar por su longitud de onda ( $\lambda$ ), medida en micrones ( $\mu\text{m}$ ). Sin embargo, es más común usar la unidad de número de onda ( $\bar{\nu}$ ), el cual corresponde al número de ciclos (longitudes de onda) en un centímetro. El número de onda y la longitud de onda se pueden relacionar de la siguiente manera:

$$\bar{\nu}(\text{cm}^{-1}) = \frac{1}{\lambda(\text{cm})} = \frac{10,000 \mu\text{m}/\text{cm}}{\lambda(\mu\text{m})} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Por ejemplo, una absorción a una longitud de onda de  $4 \mu\text{m}$  corresponde a un número de onda de  $2,500 \text{ cm}^{-1}$ . (Wade L. 2011)

## 1. Vibraciones moleculares

Al ser una molécula irradiada con un haz de luz infrarroja esta vibra. Estas vibraciones se ven reflejadas en estiramientos de los enlaces entre los átomos, 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. (Wade L. 2011)

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. (Wade L. 2011)

Incluso con los compuestos sencillos, los espectros de infrarrojo contienen varias absorciones distintas, no solo una absorción para cada enlace. El espectro del metanol es un buen ejemplo. Se puede observar el estiramiento amplio del O—H de  $3300 \text{ cm}^{-1}$ , el estiramiento del C—H justo debajo de  $3000 \text{ cm}^{-1}$ , y el estiramiento del C—O justo debajo de  $1000 \text{ cm}^{-1}$ . (Wade L. 2011)

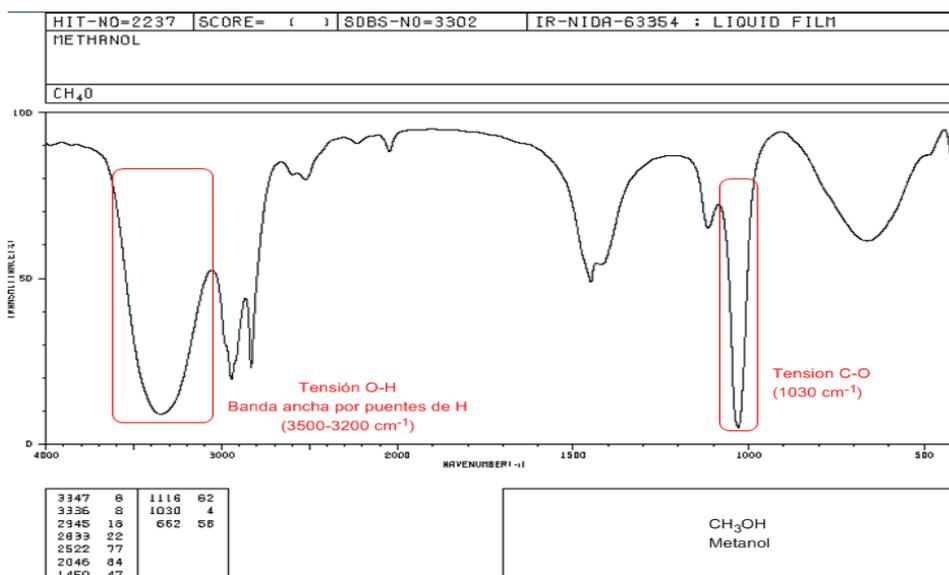


Figura 7 Espectro IR del metanol (SBDS, 2018)

## 2. Medición del espectro IR

Los espectros IR o de infrarrojo pueden medirse con muestras líquidas, gaseosas o sólidas. Las muestras deben colocarse en el haz de luz infrarroja. Por ejemplo, una gota de líquido es colocada entre dos placas de sal hechas de NaCl o KBr, estas sales son transparentes a las frecuencias más importantes de la luz infrarroja. Algunos sólidos pueden molerse con KBr y preparar un disco de este material para que sea irradiado por el haz de luz infrarroja. Por último, los gases pueden colocarse en celdas con ventanas de cloruro de sodio pulidas y ser irradiados por el haz de luz infrarroja. (Wade L. 2011)

Un espectrofotómetro infrarrojo mide las frecuencias de la luz infrarroja absorbida por un compuesto. Un espectrofotómetro sencillo usa dos haces de luz. Un haz pasa por la muestra y el otro se utiliza como referencia al hacerlo pasar por el disolvente en el que está la muestra. Un espejo rotatorio permite de manera alternada que la luz de cada uno de los dos haces entre a un monocromador. (Wade L. 2011)

El monocromador es parte del equipo compuesto por prismas o rejillas de difracción que permite que solo entre al detector una frecuencia de luz a la vez. A medida que esto sucede el espectro es dibujado. Las frecuencias más altas aparecen a la izquierda del espectro. La señal del detector es proporcional a la diferencia en la intensidad de la luz en los haces de la muestra y de referencia. (Wade L. 2011)

Los componentes de los enlaces químicos vibran y sus movimientos tienen frecuencias naturales dentro del rango de frecuencias del infrarrojo. Obsérvese los siguientes datos:

Infrarrojo lejano	10 a 650 $\text{cm}^{-1}$
Infrarrojo medio	650 a 4000 $\text{cm}^{-1}$
Infrarrojo próximo	4000 a 12500 $\text{cm}^{-1}$

Cuando existen vibraciones que inducen oscilaciones que pueden entrar en resonancia con un haz de IR se produce un intercambio de energía entre el haz y las moléculas constituyentes. El comportamiento característico que resulta de un enlace con un tipo atómico, un entorno químico y una concentración de enlaces determinados se observa en lo que se conoce como espectro IR. (Piqué T., Vázquez A. 2012)

Se puede decir que en un espectro infrarrojo se observan bandas correspondientes a prácticamente todos los compuestos moleculares. Cada una de estas bandas correspondería a un movimiento de vibración de uno de los enlaces dentro de una molécula. Por esto, cada compuesto tiene un comportamiento particular frente a un haz de infrarrojo, a esto se debe la eficacia del método IR. (Piqué T., Vázquez A. 2012)

### 3. Espectrofotómetro infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR)

El equipo FTIR utiliza un interferómetro. Es un diseño 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 reflector 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 interferograma contiene de manera simultánea todas las frecuencias y pasa a través del compartimiento de la muestra para alcanzar el detector. (Wade L. 2011)

El interferograma tiene toda la información contenida en 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). (Wade L. 2011)

El FTIR, o espectrofotómetro de Transformada de Fourier, tiene varias ventajas importantes sobre los espectrofotómetros IR normales. Su sensibilidad es mejor debido a que mide todas las frecuencias de manera simultánea en vez de escanear las frecuencias individuales. Se necesita menos energía de la fuente y se requiere menos tiempo para un escaneo, por lo regular de 1 a 2 segundos. (Wade L. 2011)

#### 4. Interpretación de espectros IR

Este proceso se basa en identificar bandas o picos de absorción o transmitancia características, causadas por grupos funcionales diferentes. Según los diferentes grupos funcionales contenidos en las moléculas así aparecen ciertos picos característicos en el espectro IR de un compuesto químico, se pueden observar ejemplos en la tabla siguiente:

Tabla 3 Regiones del infrarrojo medio según grupos funcionales

Número de onda ( $\text{cm}^{-1}$ )	Enlace y tipo de vibración
3750-3300	O-H, N-H (alargamiento)
3300-3000	$-\text{C}\equiv\text{C}-\text{H}$ , $>\text{C}=\text{CH}$ , Ar-H (C-H de alargamiento)
3000-2700	$-\text{CH}_3$ , $-\text{CH}_2-$ , $-\text{C}-\text{H}$ , $-\text{COH}$ (alargamiento)
2400-2100	$\text{C}\equiv\text{C}$ , $\text{C}\equiv\text{N}$ (alargamiento)
1900-1650	$\text{C}=\text{O}$ (alargamiento en ácidos, aldehído, cetona, amida, éster, etc.)
1680-1500	$>\text{C}=\text{C}<$ alifáticos y aromáticos, $>\text{C}=\text{N}-$ (alargamiento)
1475-1300	C-H (deformación)
1200-1000	C-N, C-O (alargamiento)
1000-650	$>\text{C}=\text{CH}-$ , Ar-H, (C-H deformación fuera del plano)

(Creswell., R., C. 1972)

Los espectros IR pueden dividirse en dos grandes partes; la región de los grupos funcionales y la región de la huella dactilar. En el rango desde  $4000 \text{ cm}^{-1}$  hasta  $1400 \text{ cm}^{-1}$  se encuentra la región de grupos funcionales. En esta región las vibraciones provienen fundamentalmente de las vibraciones de estiramiento o alargamiento). En el rango desde  $1400 \text{ cm}^{-1}$  hasta  $600 \text{ cm}^{-1}$  se encuentra la huella dactilar. Es compleja, debido a que aparecen en ella una combinación de vibraciones de alargamiento, así como de flexión. (Mondragón P. 2017)

Existen tablas de grupos funcionales relacionados con sus picos característicos en espectros IR para su identificación en muestras de compuestos orgánicos. En la sección de Anexos se puede ver un ejemplo de estas. Muchos picos característicos importantes aparecen en una región del espectro IR y pertenecen a los grupos carbonilo, se pueden clasificar de la siguiente forma:

Tabla 4 Rangos de grupos funcionales en la región espectral IR del carbonilo

<i>Tipo de carbonilo</i>	<i>Número de onda (cm<sup>-1</sup>)</i>	<i>Intensidad del pico</i>
Amida	1700-1640	Fuerte
Ac. Carboxílico	1725-1705	Fuerte
Cetona saturada	1725-1705	Fuerte
Ésteres (no cíclicos)	1740-1710	Fuerte
Aldehído saturado	1740-1720	Fuerte
Lactonas de 6 y 7 miembros	1750-1730	Fuerte
Halogenuros de acilo	1815-1720	Fuerte
Lactonas de 5 miembros	1780-1760	Fuerte
Anhídridos	2 picos separados: 1850-1800 1780-1740	Fuerte

(Creswell., R., C. 1972)

## F. Comparación y contraste

Los estudios cualitativos se caracterizan por un proceso de construcción interactiva del argumento teórico y la evidencia empírica. Son estudios integrales que tratan de captar el núcleo de interés y los elementos clave de la realidad estudiada, facilitándose de esta manera el entendimiento de los significados, los contextos de desarrollo y los procesos. (Tonon G. 2011)

El método comparativo se denomina en tres formas de considerar la comparación: como contexto de justificación y control de hipótesis; como contexto de descubrimiento y de generación de nuevas hipótesis y como procedimiento lógico y sistemático. El método comparativo es un método para confrontar dos o varias propiedades enunciadas en dos o más objetos. Así se pueden comparar, por ejemplo, unidades geopolíticas, procesos, entre otros. (Tonon G. 2011)

El método comparativo consiste en colocar dos o más fenómenos, uno junto al otro, para establecer sus similitudes y diferencias. De esta manera, obtener conclusiones que definan un problema o establecer sugerencias para mejorar el conocimiento. Se conceptualiza y clasifica la información. (Calduch R. 2014)

La comparación es una herramienta fundamental de análisis. Se utiliza de manera rutinaria en la comparación de hipótesis y puede contribuir al descubrimiento de nuevas hipótesis y formación de teorías. El método comparativo se fundamenta en ser un proceso de búsqueda sistemática de semejanzas y diferencias que implican la comparación de los distintos tipos de realidad social presente. (Calduch R. 2014)

## G. Aplicación de espectroscopía infrarroja en asfaltos

El contenido de polímero en una muestra de asfalto modificado puede determinarse utilizando un espectrofotómetro infrarrojo. (Read J., Whiteoak D. 2004)

En Costa Rica se analizó asfalto para determinar la presencia de polímeros presentes en el ligante asfáltico o asfalto. Los polímeros mejoran el desempeño de la mezcla, aumentando la resistencia a la deformación permanente, la resistencia a la fatiga, al mismo tiempo que aumenta su durabilidad al disminuir la oxidación y el deterioro por permeabilidad. (Salazar J. 2013)

El interés por identificar de forma cualitativa los grupos funcionales presentes en el ligante asfáltico por FTIR (Espectroscopía Infrarroja por transformada de Fourier) he crecido porque permite la identificación molecular de los diferentes grupos funcionales a través de vibraciones moleculares. (Salazar J. 2013)

En la siguientes tabla y figura, se pueden observar el espectro IR típico y los picos característicos de una muestra de asfalto conocido como AC30 (LPI IV). Esta muestra se considera como un asfalto de Costa Rica. (Salazar J. 2013)

Rango de frecuencia (cm <sup>-1</sup> )	Intensidad Relativa FTIR	Asignación
2920 - 2851	alta	Baja de intensidad alta del grupo CH <sub>2</sub> y CH <sub>3</sub> Hidrocarburos saturados
1600	m	Baja de intensidad media de los C=C (Ar) Hidrocarburos aromáticos
1500	s	Baja de intensidad baja de los C=C (Ar) Hidrocarburos aromáticos
1340	m	Baja de intensidad media de los C-N-H Aminas aromáticas
1170	s	Baja de intensidad baja de los R-O-Ar de los alquil Aril eteres
1030	s	Baja de intensidad baja de los R-O-Ar de los alquil Aril eteres

Figura 8 Picos o bandas características de asignación para vibraciones moleculares para el ligante asfáltico clasificado como AC-30 (LPI IV) (Salazar J. 2013)

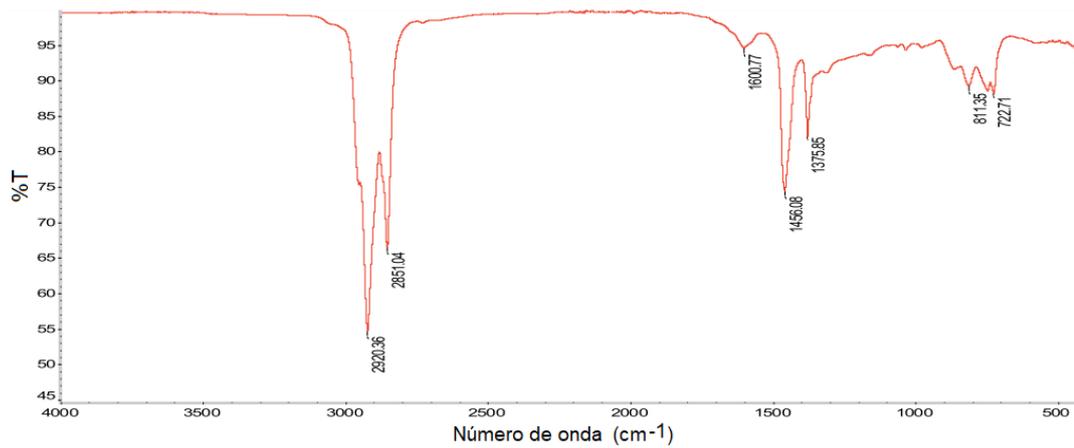


Figura 9 Espectro FTIR de un asfalto clasificado como AC-30 (LPI IV)  
(Salazar J. 2013)

Por otra parte, para una determinación cuantitativa del contenido de polímero en un ligante asfáltico con FTIR se construye una curva de calibración con patrones de concentración conocida y se determinan los espectros IR. Se realizó un conjunto de muestras en concentraciones de 0%, 1%, 1.5%, 2%, 2.5%, 3% y 5% m/m. Luego de tener las muestras patrón y espectros IR, se utiliza un software de integración y se trabajó con al menos 3 picos característicos que mostraran evidencia de cambio en el espectro. (Salazar J. 2013)



## V. ANTECEDENTES

En el 2010 el departamento de transporte de la Universidad del Norte de Texas, UNT por sus siglas en inglés, publicó el reporte técnico *Practical Applications of FTIR to Characterize Paving Materials*.

En este estudio se investigó las aplicaciones prácticas de la Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier para determinar la calidad y uniformidad de cemento de concreto y otros materiales. Se analizaron asfaltos modificados con polímeros SBS, SB entre otros. Con la elaboración de curvas de calibración de diferentes muestras se logró determinar el porcentaje de polímero agregado en otras muestras. (Nasrazadani *et. al.*, 2010)

Se realizó una medición cuantitativa usando el procedimiento estándar AASHTO T302. Este consiste en preparar primero una muestra, el aglutinante de asfalto se calienta a menos de 163 °C y se coloca en un vacío de 20mmHg. La muestra se diluye con 10 ml de solvente y es aplicado en una ventana infrarroja. (Nasrazadani *et. al.*, 2010)

Según este reporte el análisis FTIR puede diferenciar entre SBS/SBR y etileno acetato de vinilo (EVA) en asfaltos. Los espectros de SBS y SBR son similares porque contienen el mismo monómero y sus espectros muestran una banda en  $966\text{cm}^{-1}$  atribuido a un enlace =C-H, en el trans-1,4-butadieno. Por otro lado, el espectro FTIR del EVA muestra 2 bandas en  $1242\text{cm}^{-1}$  (atribuido a un C-O-C) y en  $1736\text{cm}^{-1}$  (atribuido a un C=O en acetato). (Nasrazadani *et. al.*, 2010)

Con dos grupos de muestras de concentraciones conocidas de polímeros de dos fabricantes de asfalto se generaron curvas de calibración FTIR basadas en el método AASHTO T-302 de reflectancia total atenuada (ATR) así como con el método FTIR de transmisión estándar. Se analizaron muestras del Departamento de Transporte de Texas (TxDOT por sus siglas en inglés). (Nasrazadani *et. al.*, 2010)

Se elaboró curvas de calibración con dos métodos distintos, ATR y transmitancia común FTIR. El método ATR consta en preparar una muestra compactada por dos láminas de un cristal ATR (reflectancia total atenuada). Éste método consta en medir cambios en un haz de luz infrarroja cuando pasa por un cristal denso ópticamente con un alto índice de refracción en determinado ángulo con la muestra. En el método de transmisión se utilizó una pastilla de KBr. (Nasrazadani *et. al.*, 2010)

El proveedor A proporcionó seis muestras de asfaltos prefabricados modificados con polímeros con porcentajes variables de polímero de 0 a 5 %. Cada análisis FTIR se realizó en un Thermo Nicolet Avatar 370 DTGS de 4000  $\text{cm}^{-1}$  a 400  $\text{cm}^{-1}$  utilizando 32 escaneos, con una resolución de 2  $\text{cm}^{-1}$ . Ocho muestras separadas y pruebas fueron hechas para el asfalto para determinar la calidad y la repetibilidad de las mediciones. (Nasrazadani *et. al*, 2010)

Se obtuvo espectros de concentración de polímero de 0, 1, 2, 3, 4 y 5 % (m/m) en un rango de 1400  $\text{cm}^{-1}$  a 675  $\text{cm}^{-1}$ . Primero se obtienen el espectro y se estudia en el rango de 1500  $\text{cm}^{-1}$  a 675  $\text{cm}^{-1}$ , luego se realiza un ajuste de línea base entre 1400  $\text{cm}^{-1}$  y 925  $\text{cm}^{-1}$  y las alturas de los picos en 1375  $\text{cm}^{-1}$  y 966  $\text{cm}^{-1}$  se miden desde la línea base. Esto porque las bandas de absorción en estos números de onda representan a cada compuesto; 966 $\text{cm}^{-1}$  se le atribuye al polímero modificador (SBR, SB o SBS) y el pico en 1375 $\text{cm}^{-1}$  se le atribuye al asfalto base. (Nasrazadani *et. al.*, 2010)

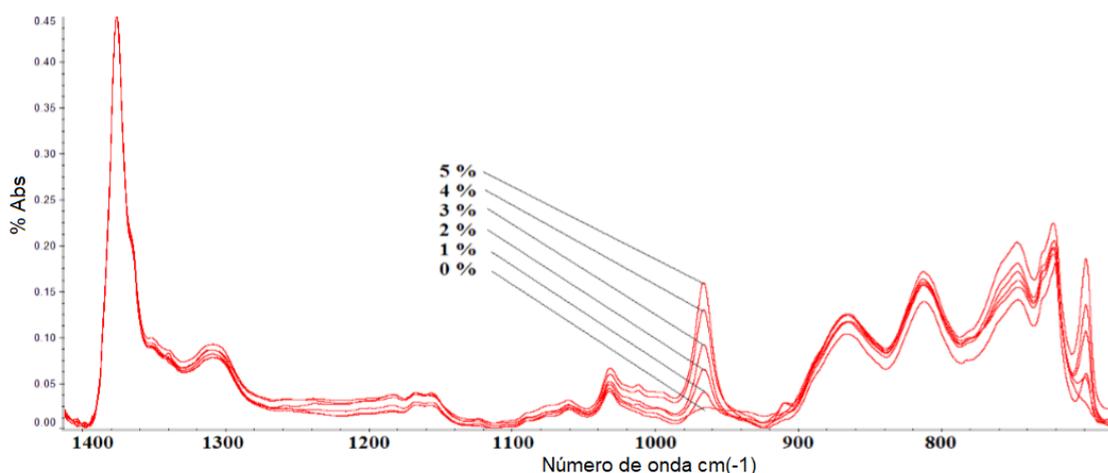


Figura 10 Espectros FTIR con diferentes porcentajes de polímeros recibidos del proveedor A (Nasrazadani *et. al.*, 2010)

Las mediciones de las absorbancias de los picos seleccionados se usan para calcular una relación y relacionarla con el porcentaje de polímero.

Contenido de polímero % (m/m)	Longitud de onda en 966 $\text{cm}^{-1}$	Longitud de onda en 1375 $\text{cm}^{-1}$	Radio de absorbancia promedio	Desviación estándar
0 %	0.013225	0.425625	0.031368	0.00203
1 %	0.033775	0.3955	0.085734	0.005949
2 %	0.040725	0.288875	0.14066	0.004879
3 %	0.078725	0.388	0.202761	0.006916
4 %	0.0922	0.369875	0.27819	0.017633
5 %	0.1265	0.3615	0.349976	0.009291

Figura 11 Valores y radio de absorbancia para elaboración de curvas de calibración para detectar polímeros modificadores en asfalto (Nasrazadani *et. al.*, 2010)

Con estos datos se construyó una curva de calibración, Figura 12, graficando el porcentaje de modificador (polímero en este caso) y la relación de absorbancia de los picos del asfalto y modificador. Esto sirvió para determinar el contenido de polímero de una muestra desconocida de bitumen asfáltico. (Nasrazadani *et. al.*, 2010)

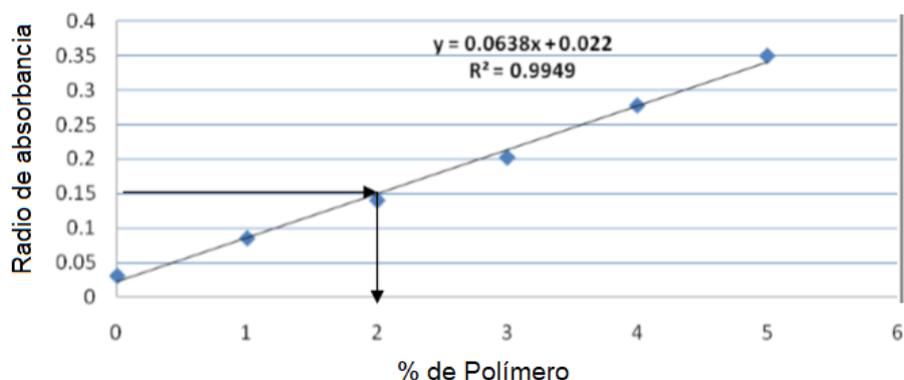


Figura 12 Curva de calibración para muestras de asfalto con polímeros (Nasrazadani *et. al.*, 2010)

Se comparó los métodos ATR y Transmitancia y se graficó la dispersión de las relaciones de intensidad obtenida con cada método, Figura 13. Claramente, se observó que el método de Transmisión es mucho más reproducible con una desviación menor en la relación de intensidad de una medida a otra. El método ATR presenta mayor ruido que se traduce en influencias del entorno. (Nasrazadani *et. al.*, 2010)

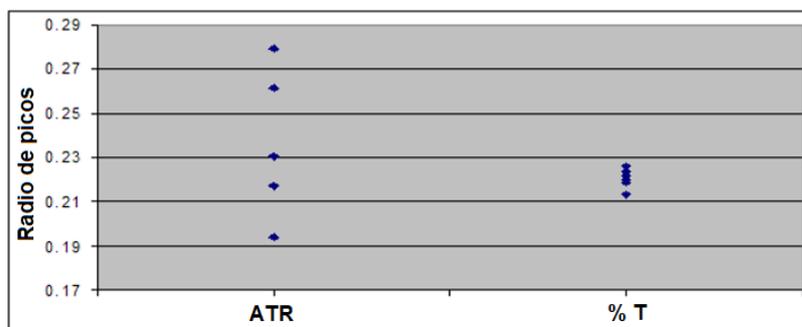


Figura 13 Comparación de las relaciones de absorción en los métodos ATR y Transmisión (Nasrazadani *et. al.*, 2010)

Las muestras de asfalto virgen y modificados proporcionadas por ASFALGUA para esta investigación, fueron preparadas para ser estándares. Las muestras son de diferentes edades al ser preparadas en diferentes años. Sin embargo, el proveedor aclaró que el tiempo de almacenamiento de las muestras no influye en sus propiedades físicas y su composición.

En Guatemala, las empresas de producción de petróleo son CITY PETEN S. DE RL., LATIN AMERICA RESOURCES LTD., PETRO ENERGY S.A., EMPRESA PETROLERA DEL ITSMO, S.A. y PERENCO GUATEMALA LIMITED. El total promedio de producción de crudo del 2018 fue de 9,161.48 barriles por día (1,456.56 m<sup>3</sup>). La empresa PERENCO produce más del 90% del crudo nacional. Este se extrae del campo Xan, ubicado en el área de la Laguna del Tigre, municipio de San Andrés Petén. (MEM, 2018)

La calidad de cada tipo de petróleo extraído está dada por su °API y el contenido de azufre de acuerdo a parámetros internacionales. El petróleo guatemalteco es principalmente un petróleo pesado con alto contenido de azufre (6% aproximadamente). Se le llama pesado porque al separarlo en diferentes fracciones, se obtiene mayor cantidad de fracciones pesadas como lubricantes y parafinas, combustóleo pesado y asfaltos, y el proceso requerido para su separación es más complicado por la cantidad de azufre que posee. (MEM, 2011)

Además, el petróleo se clasifica como “dulce” o “amargo” por su contenido de azufre. Crudos dulces poseen menos del 1 % de azufre mientras que los crudos amargos poseen arriba de 1 % de azufre. (MEM, 2011)

La composición del crudo guatemalteco se desglosa de la siguiente manera:

Zona de extracción	°API	Denominación
XAN	15.8	Pesado/Amargo
ATZAM	37.4	Liviano/Amargo
CHOCOP	13.4	Pesado/Amargo
YALPEMECH	33.8	Liviano/Amargo
RUBELSANTO	25.7	Mediano/Amargo
CHINAJA OESTE	29.7	Mediano/Amargo
CARIBE	21.8	Pesado/Amargo
TIERRA BLANCA	22.7	Pesado/Amargo

Figura 14 Petróleos de Guatemala  
(MEM, 2011)

En la actualidad, 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.

## VI. METODOLOGÍA

### A. Equipo: (Ver detalles en la sección de ANEXOS)

- Espectrofotómetro de haz infrarrojo con Transformada de Fourier (FTIR)
- Penetrómetro Matest para ensayo de punto de penetración.
- Aparato de anillo y bola digital para ensayo de punto de ablandamiento.
- Picnómetro de Hubbard para ensayo de gravedad específica.
- Viscosímetro Brookfield.

### B. Reactivos: (Ver detalles en la sección de ANEXOS)

- Etanol absoluto al 99%.
- Agua destilada.
- Desengrasante automotriz (fórmula desconocida).

### C. Materiales:

- Espátula de metal ordinaria.
- Papel Kimwipes especial para espectrofotómetros.

### D. Metodologías:

#### 1. Obtención de muestras:

- Las muestras de asfalto con los diferentes modificadores fueron proporcionadas por una empresa constructora dedicada a la pavimentación y modificación de bitúmenes asfálticos. Esto se hizo en recipientes cilíndricos de metal (correspondientes a un volumen de un galón) con tapadera, sellados para evitar contaminación. Las muestras provenían de diferentes partes, Guatemala, Brasil, Honduras y China.
- Se analizó muestras de asfalto virgen y modificado.
- Se analizó 30 muestras con el espectrofotómetro infrarrojo con transformada de Fourier y se obtuvo el valor de su punto de penetración, punto de ablandamiento, gravedad específica y viscosidad a 135 °C y 165 °C.
- Para obtener el espectro IR de cada una de las muestras se tomó un volumen aproximado de 2 ml de un punto medio del galón de cada muestra. Esta cantidad de muestra se colocó sobre el lente del espectrofotómetro a manera de cubrirlo completamente y evitar que el haz de luz infrarroja saliera sin golpear la muestra. Esta lectura necesita lecturas de fondo para eliminar interferencias del medio como el CO<sub>2</sub> presente en la habitación.

- La incertidumbre del valor final de las propiedades físicas obtenido se determinó mediante el análisis estadístico de la desviación estándar de las operaciones realizadas para obtener el valor promedio de cada propiedad física.
- Las muestras de asfalto modificado fueron agrupadas según el modificador y porcentaje de modificador según en la etiqueta proporcionada por el proveedor.
- Se extrajo de cada muestra la cantidad necesaria para su análisis (aproximadamente 1 ml). Para esto se utilizó herramientas metálicas limpias, utilizando solvente mineral. El solvente mineral sirvió para limpiar los utensilios antes de tocar la muestra y para remover la muestra de los equipos de medición y utensilios en cada medición. Se aseguró que estas herramientas estuvieran completamente secas con papel absorbente Kimwipe para que no existiera contaminación.
- Los volúmenes de las muestras obtenidas de los galones obtenidos del proveedor fueron almacenadas en bolsas de plástico impermeables durante su análisis con el espectrofotómetro IR.

## 2. Análisis de muestras:

- Antes de obtener el espectro infrarrojo de las muestras se realizó un espectro de fondo con el lente del equipo FTIR sin muestra, este se realizó las veces necesarias dependiendo las condiciones de la línea base de los espectros. Normalmente se hace un corrido de fondo una vez o hasta que el espectro IR de fondo muestre un comportamiento sin interferencias debidas a picos del CO<sub>2</sub>.
- Se obtuvo el espectro IR, utilizando para esto un espectrofotómetro infrarrojo con accesorios de reflectancia total atenuada y transformada de Fourier (FTIR-ATR).
- El análisis se realizó en duplicado para comparar que el segundo espectro IR obtenido de cada muestra fuera igual al primero.
- Para la manipulación de las muestras se utilizó guantes y pinzas y/o herramientas metálicas inoxidable para evitar contaminación.
- Para que el espectrofotómetro analice las muestras se debe preparar limpiando su lente de emisión de luz infrarroja con un alcohol absoluto y papel marca Kimwipe. Se humedece el papel especial con el alcohol y se frota suavemente el lente de 4 a 6 veces, se espera a que se evapore el alcohol o se puede pasar otro papel seco para remover cualquier remanente de alcohol.
- Limpio y seco el sensor del espectrofotómetro se colocó la muestra de aproximadamente 1 ml con una espátula, sobre el lente del sensor tapándolo completamente. Luego de colocar la muestra se obtuvo el espectro IR. Esto se realizó a temperatura ambiente.
- Al obtener cada espectro se removió la muestra con las herramientas metálicas y el sensor del espectrofotómetro se limpió con solvente mineral para remover trazas de muestra. Luego se limpió con alcohol para asegurar su limpieza y evitar humedad del ambiente. Por último se limpió con papel Kimwipe hasta secarlo.

- Se utilizó el software Perkin Elmer Spectrum del espectrofotómetro y se obtuvo el espectro IR y sus datos de valores de transmitancia y número de onda.
- Se realizó comparaciones de espectros entre las muestras.
- Para determinar el punto de penetración se utilizó un penetrómetro Matest. Un volumen de muestra de 25 mL aproximadamente se llevó a una temperatura entre 135 °C y 165 °C y luego se sometió a un baño de agua hasta alcanzar una temperatura de 25 °C. Luego se dejó caer la aguja y se realizó la medición de la distancia penetrada en el asfalto después de 5 s. Este ensayo se trabajó en triplicado.
- Para determinar el punto de ablandamiento se utilizó un aparato de anillo y bola digital automático. Se calentó la muestra de asfalto para rellenar el volumen del anillo del aparato y se llevó a temperatura ambiente en un baño de agua. Se elevó la temperatura del baño a una tasa de 5 °C/min para que el anillo se ablande y en el momento en que el asfalto logra caer 25 mm por el peso de una bola de acero específica el equipo midió la temperatura. Se trabajó este ensayo en duplicado.
- Para determinar la gravedad específica se colocó tres cuartos del volumen del picnómetro con la muestra y se deja enfriar por un tiempo mínimo de 40 min hasta alcanzar una temperatura de 25°C y se determinó su masa. Se sacó la muestra del baño de agua y se llenó el picnómetro con agua destilada fresca hervida o desionizada y se colocó firmemente el tapón del picnómetro. Se regresó el picnómetro al baño de agua por un tiempo mínimo de 30 min, se sacó, se secó y se determinó su masa. Este ensayo se trabajó en triplicado.
- Para determinar la viscosidad a 135 °C y 165 °C se utilizó un viscosímetro electrónico Brookfield. El viscosímetro se niveló precisamente con su brújula incorporada. Se llevó la muestra a cada temperatura especificada y luego se colocó un volumen de aproximadamente 25 mL en el equipo insertando el vástago para realizar la medición. El equipo determinó el valor de la viscosidad a cada temperatura mientras que se midió la temperatura de la muestra para controlarla. Este ensayo se trabajó en triplicado.

### 3. Análisis de datos:

- El análisis químico espectroscópico se realizó de manera cualitativa. Se obtuvo el espectro IR de cada muestra y se analizó todos los espectros IR obtenidos. Se comparó el espectro IR de todas las muestras entre sí para establecer los picos característicos de asfaltos vírgenes y modificados.
- Los espectros IR de asfaltos vírgenes se compararon para determinar diferencias de porcentaje de transmitancia en picos característicos en el mismo número de onda. También se comparó asfaltos vírgenes de la misma y diferente viscosidad para determinar diferencias.
- Los espectros IR de asfaltos modificados se compararon para determinar cuál de los picos característicos era modificado por los diferentes porcentaje de modificador agregado.

- Para cada tipo de muestra, se identificó picos característicos en sus espectros IR que representaran a la muestra como tal.
- En el caso de asfaltos modificados, también se comparó los espectros IR obtenidos con el espectro IR de un asfalto virgen de la misma viscosidad. Se superpuso cada espectro IR en la misma escala para determinar similitudes y diferencias en sus formas y picos. De esta forma, se encontró un pico característico que indica el aumento o disminución en el porcentaje de modificador agregado para identificar asfaltos modificados de manera cualitativa.
- Se identificó en los espectros IR los grupos funcionales respectivos a picos característicos con el uso de tablas teóricas.
- Las medidas del punto de penetración, gravedad específica y viscosidad se realizaron en triplicado y se presentó un valor promedio. Se debe realizar estas mediciones en triplicado. Sus valores no deben diferir en magnitud más que el valor de su incertidumbre.
- Las medidas del punto de ablandamiento se realizaron en duplicado. Sus valores no deben diferir en magnitud más que el valor de su incertidumbre.
- Se buscó una relación, en los espectros IR de las muestras de asfaltos, entre sus valores de pruebas físicas y la forma de sus espectros IR. Se graficó el comportamiento de cada propiedad física con el valor del área del pico característico del espectro IR de cada muestra. Para esto se agrupó a las muestras obtenidas del proveedor según su lugar de origen, asfalto virgen de origen y modificador agregado. No se observó relaciones útiles debido a que las propiedades físicas no presentaron comportamientos predecibles.

## VII. RESULTADOS

Tabla 5 Variación en forma de espectros IR de asfaltos vírgenes y variación en porcentaje de transmitancia en asfaltos modificados debido a la variación de porcentaje de modificador

Muestras	Espectro IR
AC20, 30 y 40	Rango de diferencias: 1300 – 950 $\text{cm}^{-1}$ por alcanos y aminas alifáticas.
AC40 de Honduras y Guatemala	Rango de diferencias: 1700 – 1500 $\text{cm}^{-1}$ y 1250 – 900 $\text{cm}^{-1}$ , debidas a grupos aromáticos y alquenos.
Asfaltos AC30+TER	Pico en 1740 $\text{cm}^{-1}$ por grupos carbonilo (C=O). Disminución de %T en pico 1,030 $\text{cm}^{-1}$ , grupos alquil aril éter
Asfaltos AC40+TER	Pico en 1740 $\text{cm}^{-1}$ por grupos carbonilo (C=O). Espectros no definidos.
Asfaltos AC30+ estearina	Pico en 1740 $\text{cm}^{-1}$ por grupos carbonilo (C=O) Espectros definidos, varía %T en picos iguales.
AC30+ACP Fray, Guatemala	Pico en 1740 $\text{cm}^{-1}$ por grupos carbonilo (C=O). Espectros definidos, única variación.
Asfaltos AC30+ACP de Pataxte, Guatemala	Pico en 1740 $\text{cm}^{-1}$ por grupos carbonilo (C=O). Disminución de %T en pico 1,030 $\text{cm}^{-1}$ por grupos alquil aril éter.
Asfaltos AC30+ACP de Fray, Brasil	Pico en 1740 $\text{cm}^{-1}$ por grupos carbonilo (C=O)
Asfaltos AC30+ACP de Pataxte, Brasil	Pico en 1740 $\text{cm}^{-1}$ por grupos carbonilo (C=O)
Asfaltos AC30+ACP Santa Rosa, Brasil	Pico en 1740 $\text{cm}^{-1}$ por grupos carbonilo (C=O) Espectros definidos.

\*Los espectros IR correspondientes a los grupos de muestras de asfalto modificado de la tabla 5 se pueden encontrar en la sección de ANEXOS. TER = reactivo terpolímero elastomérico. ACP = aceite crudo de palma.

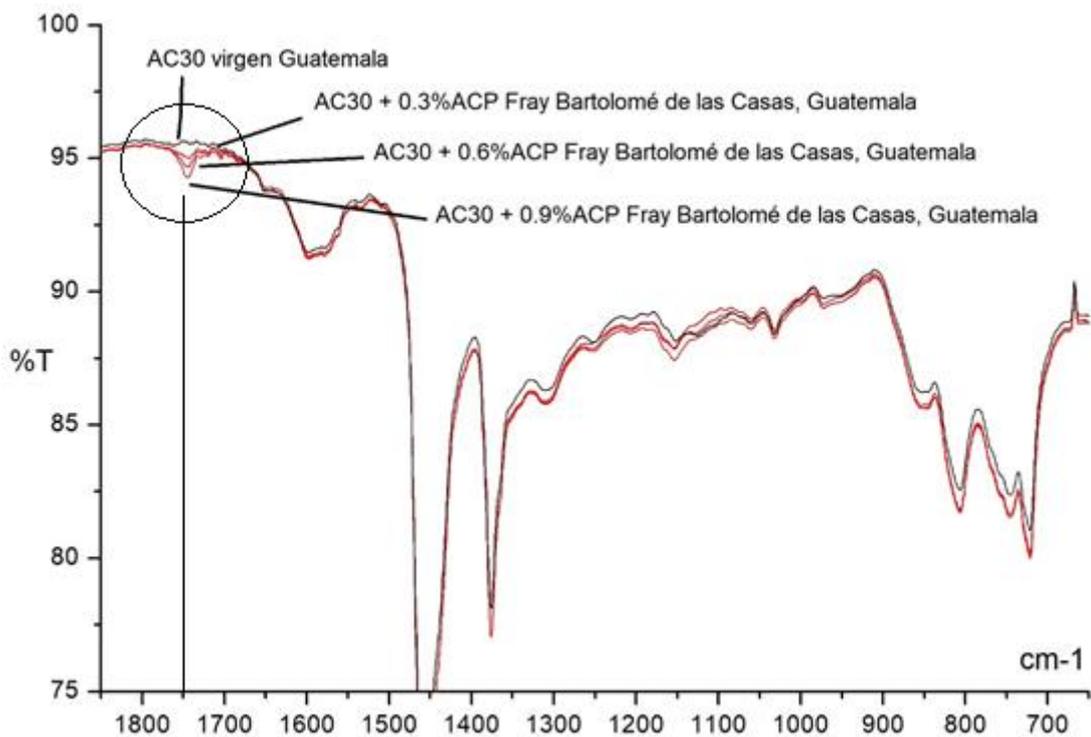
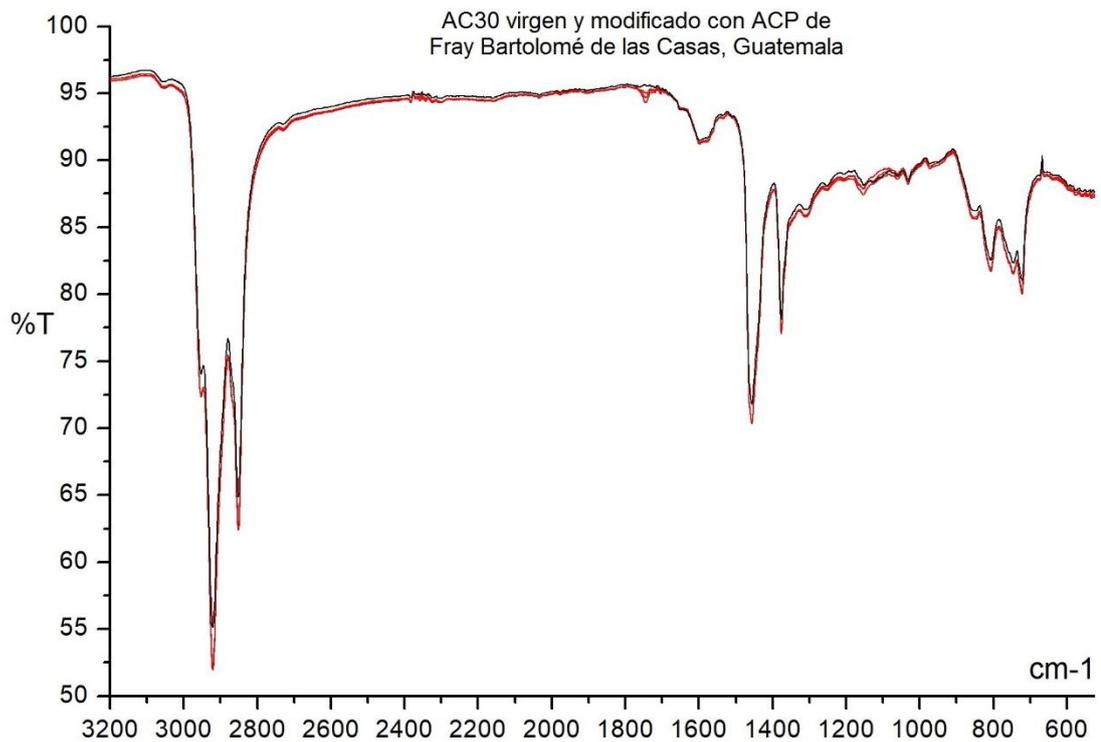


Figura 15 Espectros IR de AC30 de Guatemala virgen y modificado con diferentes porcentajes de ACP de Fray Bartolomé de las Casas\*

Notas:

\* %T se refiere al porcentaje de transmitancia en un rango de 0% a 100%.

\* En la Figura 15 se comparan espectros IR de asfaltos AC30 de Brasil modificados con ACP y un asfalto virgen de Guatemala. Se observa un cambio de %T en aprox. 1740cm<sup>-1</sup> debido a grupos carbonilo (C=O). Se pueden encontrar los espectros IR del resto de comparaciones entre asfaltos modificados en la sección de ANEXOS.

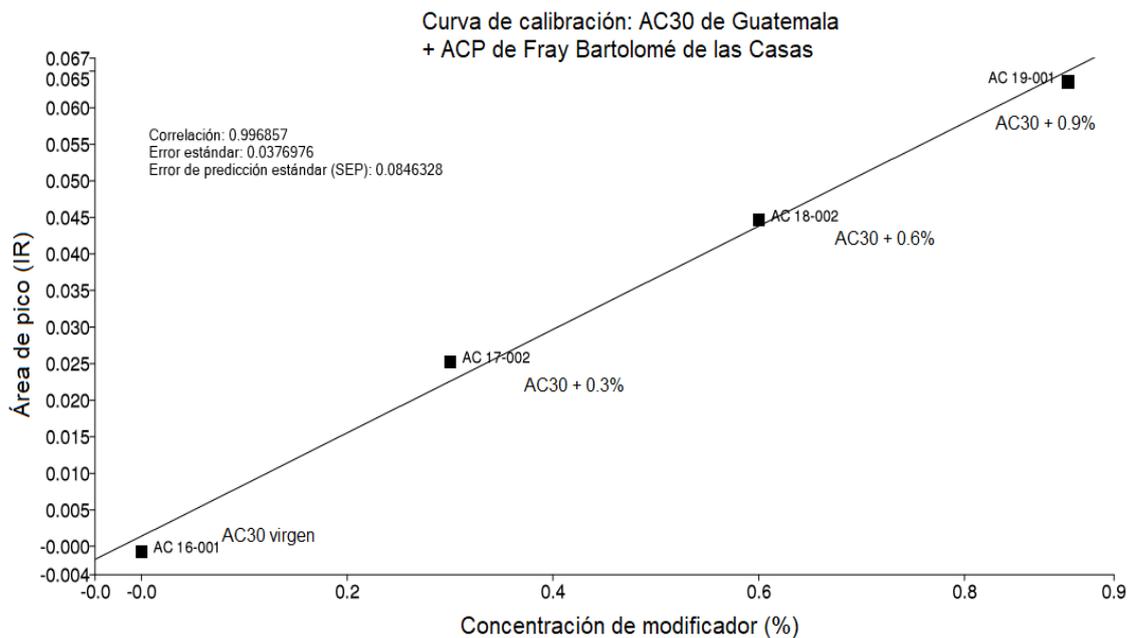


Figura 16 Curva de calibración del conjunto de muestras de asfalto de Guatemala modificado con ACP de Fray Bartolomé de las Casas\*

Tabla 6 Estándares para la elaboración de la curva de calibración de muestras de asfalto AC30 de Guatemala con ACP de Fray Bartolomé de las Casas

Concentración de modificador (% m/m)	Área de absorción IR de pico
0.0	-0.0006
0.3	0.0253
0.6	0.0447
0.9	0.0636

\*El intervalo de integración para el área del pico debido al modificador presente en el espectro IR es  $1765\text{cm}^{-1}$  a  $1733\text{cm}^{-1}$ . Se determinó de igual forma curvas de calibración para todos los grupos de muestras de AC30 con ACP.

**Notas:**

\*En la Figura 16 se observa un comportamiento lineal entre la concentración de modificador ACP y el área del pico del espectro IR de un asfalto AC30 modificado. El área del pico de cada muestra fue medido en aprox.  $1740\text{ cm}^{-1}$ , debido a los grupos carbonilo (C=O) del modificador, para construir una curva de calibración para una determinación cuantitativa.

Tabla 7 Picos característicos determinados de espectros IR de asfaltos vírgenes y modificados

No	Muestra	Picos característicos (cm <sup>-1</sup> )	Detalles	Grupo funcional		
14	AC20 virgen de Guatemala	1650 - 1550	p, a	Aromáticos y alquenos		
		1300	p	Alcano		
		1200 - 1000	p, a	Amina alifática		
1	AC20 + 3% Poliuretano	1750 - 1700	mp	Carbonilo		
		1650 - 1550	p, a	Aromáticos y alquenos		
		1300	p	Alcano		
		1200 - 1000	p, a	Amina alifática		
		2, 15	AC30 virgen de Guatemala	1675 - 1525	1 mp y 1 p, a: seguidos	Aromáticos y alquenos
				1300	mp	Alcano
1150	mp			Alquil aril éter		
1030	mp			Alquil aril éter		
12	AC40 virgen de Guatemala	1650 - 1550	m, a	Aromáticos y alquenos		
		1100 - 990	2 picos m y d	Éter alifático		
4 y 5	AC30 + %TER	1740	mp	Carbonilo		
		1650, 1575	mp, mp	Aromáticos y alquenos		
		1300	mp	Alcano		
		1150	mp	Alquil aril éter		
13	AC40 Honduras	1025	p	Alquil aril éter		
		1600	p	Aromáticos y alquenos		
		1300	mp	Alcano		
		1030	mp	Alquil aril éter		

\*Nomenclatura de picos: grande = g, mediano = m, pequeño = p, muy pequeño = pp, ancho = a, delgado = d. \*ACP = aceite crudo de palma. \*Pataxte, Fray Bartolomé de las Casa y Santa Rosa son los lugares de origen del ACP utilizado como modificador en las muestras de asfalto analizadas. \*Se pueden encontrar las comparaciones de espectros IR en la sección de ANEXOS.

(... continuación Tabla 7)

No	Muestra	Picos característicos (cm <sup>-1</sup> )	Detalles	Grupo funcional
16, 17, 18	AC30 + ACP Fray Bartolomé de las Casas, Guatemala	1750	mp	Carbonilo
		1640 - 1540	p, a	Aromáticos y alquenos
		1300	mp	Alcano
		1150	mp	Alquil aril éter
		1030	mp	Alquil aril éter
6	AC40 + 1.9% y 2.2% TER Guatemala	1740	mp	Carbonilo
		1600	p, a	Aromáticos y alquenos
		1250	mp	
		1125	p, a	Alquil aril éter
		1030	mp	Alquil aril éter
8, 9, 10, 11	AC30 + % ACP Pataxte, Guatemala	1750	mp	Carbonilo
		1600	p, a	Aromáticos y alquenos
		1300	mp	Alcano
		1150	mp	Alquil aril éter
		1030	mp	Alquil aril éter
29, 30	AC-30 + % Estearina	1750	mp	Carbonilo
		1600	p, a	Aromáticos y alquenos
		1300	mp	Alcano
		1250	mp	
		1200 - 1075	mp, a	Alquil aril éter
		1030	mp	Alquil aril éter
19, 20, 21	AC30 + %ACP Santa Rosa, Brasil	1600	mp	Aromáticos y alquenos

\*Nomenclatura de picos: grande = g, mediano = m, pequeño = p, muy pequeño = pp, ancho = a, delgado = d. \*ACP = aceite crudo de palma. \*Pataxte, Fray Bartolomé de las Casa y Santa Rosa son los lugares de origen del ACP utilizado como modificador en las muestras de asfalto analizadas. \*Se pueden encontrar las comparaciones de espectros IR en la sección de ANEXOS.

(... continuación Tabla 7)

No	Muestra	Picos característicos (cm <sup>-1</sup> )	Detalles	Grupo funcional
19, 20, 21	AC30 + %ACP Santa Rosa, Brasil	1300	mp	Alcano
		1150	mp	Alquil aril éter
		1030	mp	Alquil aril éter
		870	p	Aromáticos
22, 23, 24, 25	AC30 + %ACP Pataxte, Brasil	1750	mp	Carbonilo
		1600	p	Aromáticos y alquenos
		1150	mp	Alquil aril éter
		1030	mp	Alquil aril éter
		870	p	Aromáticos
26, 27, 28	AC30 + %ACP Fray Bartolomé de las Casas, Brasil	1600	p	Aromáticos y alquenos
		1300	mp	Alcano
		1150	mp	Alquil aril éter
		1030	mp	Alquil aril éter
		870	p	Aromáticos

\*Nomenclatura de picos: grande = g, mediano = m, pequeño = p, muy pequeño = pp, ancho = a, delgado = d. \*ACP = aceite crudo de palma. \*Pataxte, Fray Bartolomé de las Casa y Santa Rosa son los lugares de origen del ACP utilizado como modificador en las muestras de asfalto analizadas. \*Se pueden encontrar las comparaciones de espectros IR en la sección de ANEXOS.

Tabla 8 Resultados promedio de pruebas físicas realizadas a las muestras analizadas

No	Muestra	Penetración ±0.9 dmm	Ablandamiento ±0.1 °C	Gravedad específica ±0.0260	Viscosidad 135 °C ±0.0002Pa*s	Viscosidad 165°C ±0.002Pa*s
1	AC20 + 3% Poliuretano	40.0	90.0	1.0300	0.5290	0.1125
2	AC30 PERENCO, Guatemala	59.0	49.6	1.0641	0.5910	0.1725
3	AC30 China	57.5	55.0	1.0303	0.7400	0.1900
4	AC30 + 1.5% TER	55.0	67.9	1.0500	0.6848	0.1330
5	AC30 + 1.7% TER	50.0	64.0	1.0370	0.7198	0.4730
6	AC40 + 1.9% TER	36.2	75.9	1.0710	0.8342	0.7500
7	AC40 + 2.2% TER	35.7	77.7	1.0650	0.8932	0.2200
8	AC30 + 0.3% ACP Pataxte, Guatemala	58.0	50.5	1.0320	0.7375	0.1825
9	AC30 + 0.6% ACP Pataxte, Guatemala	60.7	51.0	1.0300	0.7350	0.1950
10	AC30 + 0.9% ACP Pataxte, Guatemala	62.0	49.4	1.0303	0.6833	0.1650
11	AC30 + 1.2% ACP Pataxte, Guatemala	64.0	48.5	1.0380	0.6708	0.1700
12	AC40 Guatemala	44.0	53.6	1.0339	0.8840	0.1879
13	AC40 Honduras	46.0	60.0	1.0110	0.7698	0.1777
14	AC20 PERENCO, Guatemala	60.0	45.0	1.0360	0.5429	0.1147
15	AC30 PERENCO, Guatemala	57.0	49.0	1.0621	0.5870	0.1500
16	AC30 + 0.3% ACP Fray Bartolomé de las Casas, Guatemala	56.0	56.0	1.0630	0.7332	0.1850
17	AC30 + 0.6% ACP Fray Bartolomé de las Casas, Guatemala	53.0	52.2	1.0660	0.7000	0.1625

Los valores son promedio de las mediciones realizadas que pueden hallarse en la sección de Anexos. El punto de penetración, punto de ablandamiento y la gravedad específica se miden a 25°C. La gravedad específica se compara con la del agua. \*ACP = aceite crudo de palma. \*Pataxte, Fray Bartolomé de las Casas y Santa Rosa son los lugares de origen del ACP utilizado como modificador en las muestras de asfalto analizadas.

No	Muestra	Penetración ±0.9 dmm	Ablandamiento ±0.1 °C	Gravedad específica ±0.0260	Viscosidad 135 °C ±0.0002Pa*s	Viscosidad 165°C ±0.002Pa*s
1	AC20 + 3% Poliuretano	40.0	90.0	1.0300	0.5290	0.1125
2	AC30 PERENCO, Guatemala	59.0	49.6	1.0641	0.5910	0.1725
3	AC30 China	57.5	55.0	1.0303	0.7400	0.1900
4	AC30 + 1.5% TER	55.0	67.9	1.0500	0.6848	0.1330
5	AC30 + 1.7% TER	50.0	64.0	1.0370	0.7198	0.4730
6	AC40 + 1.9% TER	36.2	75.9	1.0710	0.8342	0.7500
7	AC40 + 2.2% TER	35.7	77.7	1.0650	0.8932	0.2200
8	AC30 + 0.3% ACP Pataxte, Guatemala	58.0	50.5	1.0320	0.7375	0.1825
9	AC30 + 0.6% ACP Pataxte, Guatemala	60.7	51.0	1.0300	0.7350	0.1950
10	AC30 + 0.9% ACP Pataxte, Guatemala	62.0	49.4	1.0303	0.6833	0.1650
11	AC30 + 1.2% ACP Pataxte, Guatemala	64.0	48.5	1.0380	0.6708	0.1700
12	AC40 Guatemala	44.0	53.6	1.0339	0.8840	0.1879
13	AC40 Honduras	46.0	60.0	1.0110	0.7698	0.1777
14	AC20 PERENCO, Guatemala	60.0	45.0	1.0360	0.5429	0.1147
15	AC30 PERENCO, Guatemala	57.0	49.0	1.0621	0.5870	0.1500
16	AC30 + 0.3% ACP Fray Bartolomé de las Casas, Guatemala	56.0	56.0	1.0630	0.7332	0.1850
17	AC30 + 0.6% ACP Fray Bartolomé de las Casas, Guatemala	53.0	52.2	1.0660	0.7000	0.1625

Los valores son promedio de las mediciones realizadas que pueden hallarse en la sección de Anexos. El punto de penetración, punto de ablandamiento y la gravedad específica se miden a 25°C. La gravedad específica se compara con la del agua. \* ACP = aceite crudo de palma. \* Pataxte, Fray Bartolomé de las Casas y Santa Rosa son los lugares de origen del ACP utilizado como modificador en las muestras de asfalto analizadas.

(... continuación Tabla 8)

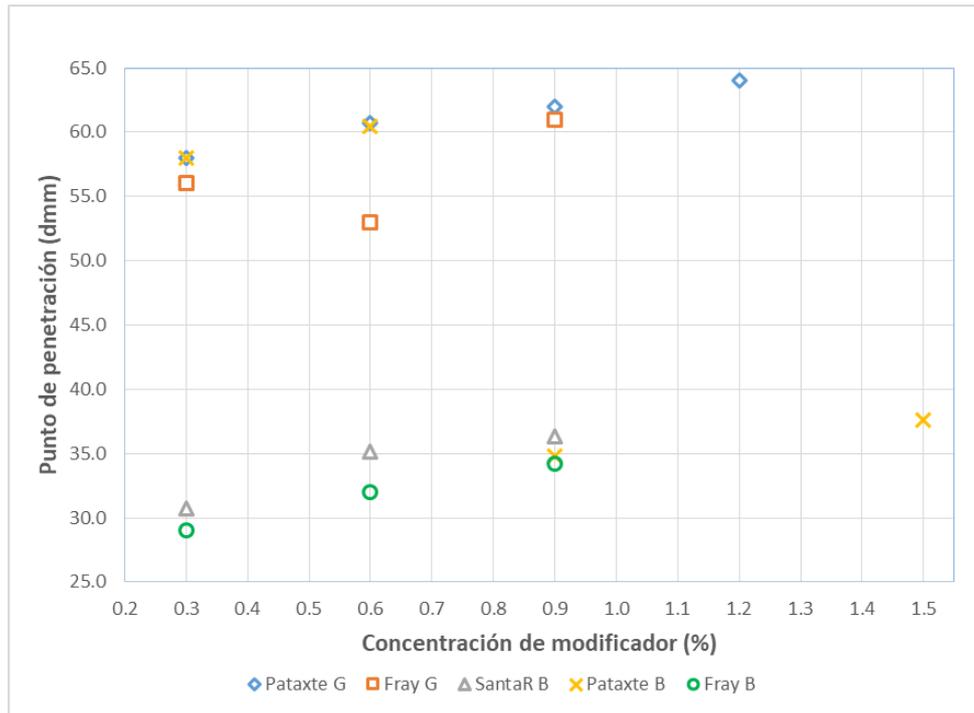


Figura 17 Comportamiento del valor de punto de penetración en asfaltos AC30 modificados con ACP de diferentes localidades de Guatemala.

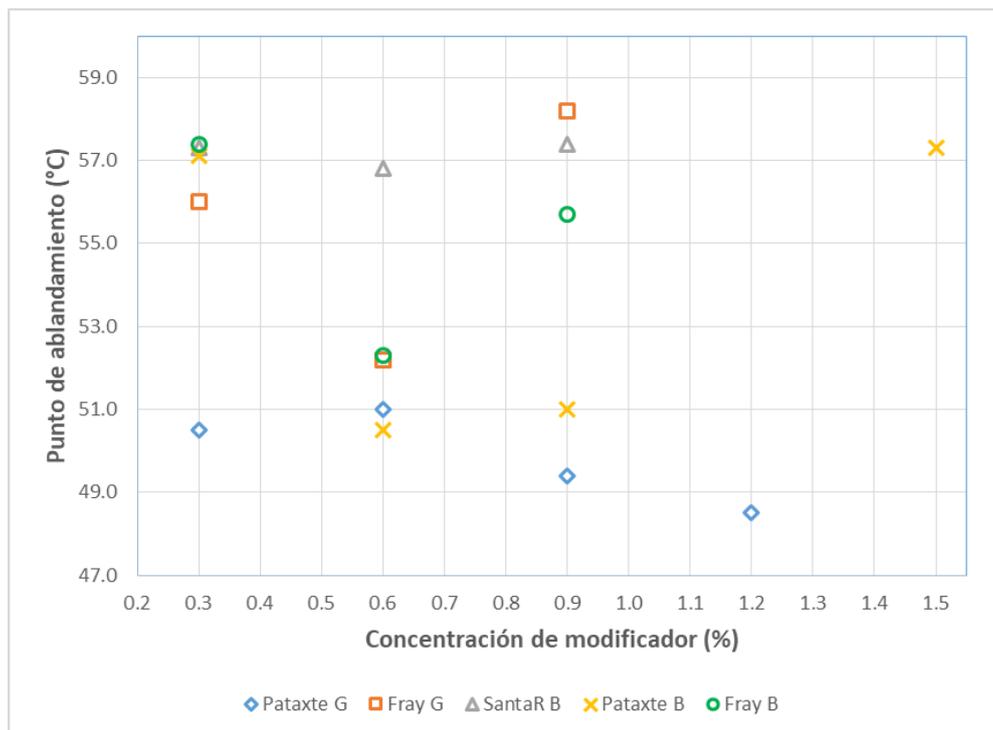


Figura 18 Comportamiento del valor de punto de ablandamiento en asfaltos AC30 modificados con ACP de diferentes localidades de Guatemala.

**Notas:**

\*En la Figura 17 se observa el comportamiento del punto de penetración de asfaltos AC30 de Guatemala y Brasil con ACP de diferentes lugares de Guatemala. En la Figura 18 se observa el comportamiento del punto de ablandamiento del mismo grupo de muestras de la Figura 17.

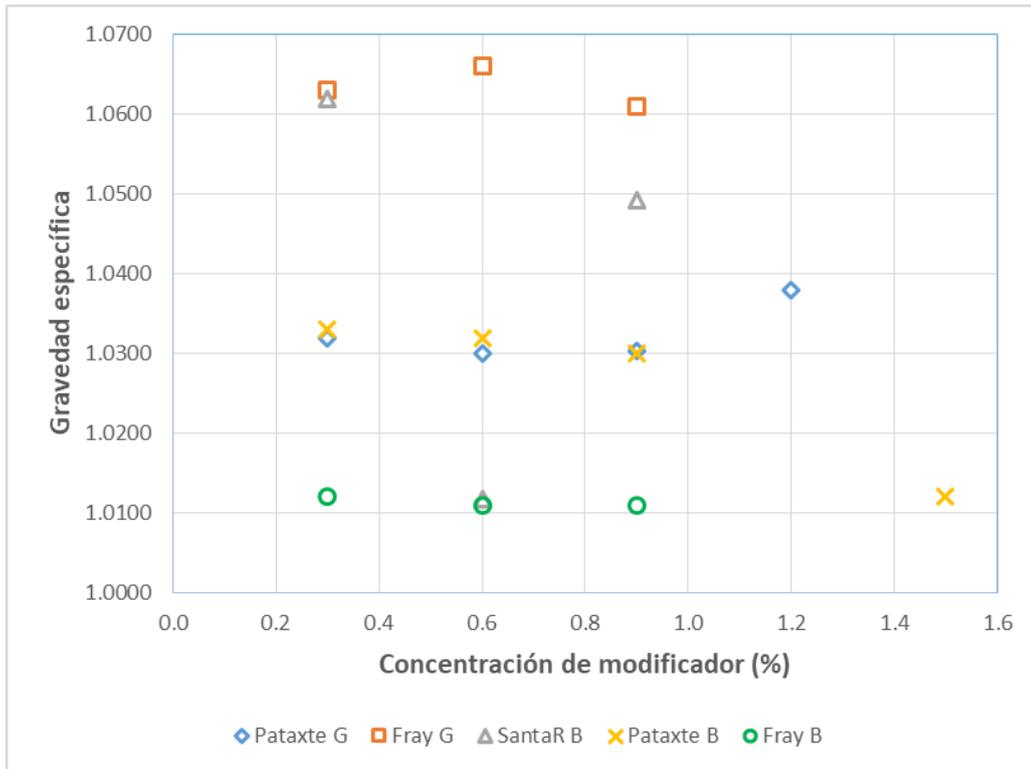


Figura 19 Comportamiento del valor de la gravedad específica en asfaltos AC30 modificados con ACP de diferentes localidades de Guatemala.

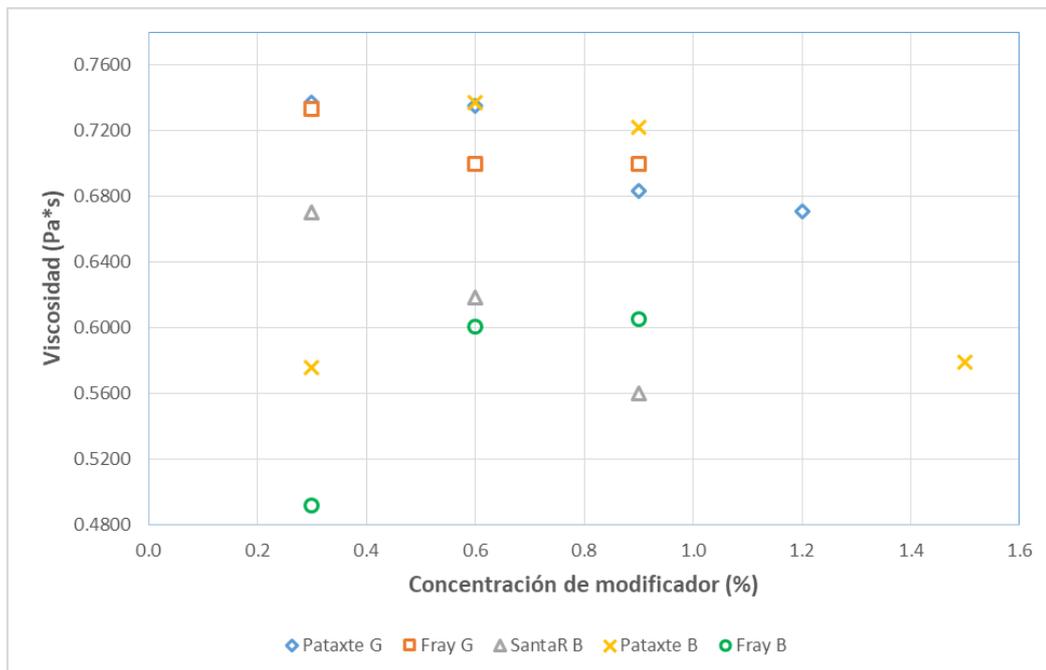


Figura 20 Comportamiento del valor de viscosidad medida a 135°C en asfaltos AC30 modificados con ACP de diferentes localidades de Guatemala.

**Notas:**

\*En la Figura 19 se observa el comportamiento de la gravedad específica de asfaltos AC30 de Guatemala y Brasil con ACP de diferentes lugares de Guatemala. En la Figura 20 se observa el comportamiento de la viscosidad a 135°C del mismo grupo de muestras de la Figura 19.

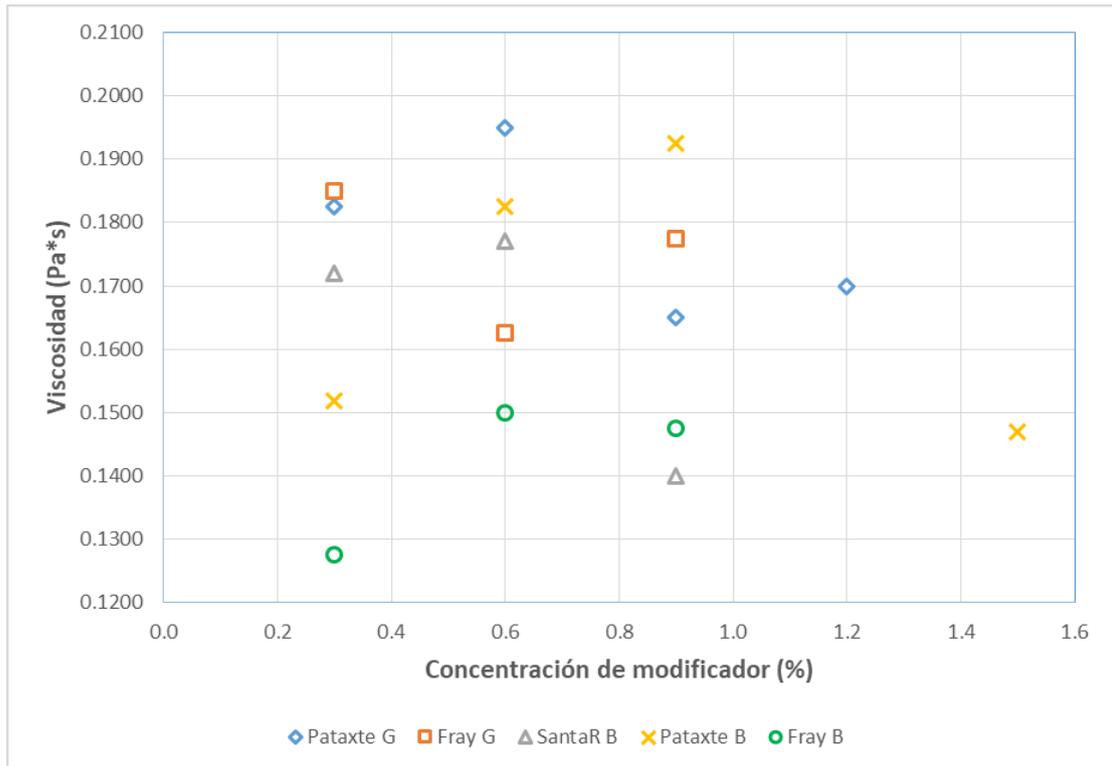


Figura 21 Comportamiento del valor de viscosidad medida a 165°C en asfaltos AC30 modificados con ACP de diferentes localidades de Guatemala.

**Notas:**

\*En la Figura 21 se observa el comportamiento de la viscosidad medida a 165°C de asfaltos AC30 de Guatemala y Brasil con ACP de diferentes lugares de Guatemala.



## VIII. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El principal aporte de este estudio fue la identificación de muestras de bitúmenes asfálticos vírgenes y modificados, también conocidos como asfaltos, con el uso de la técnica de espectroscopía infrarroja con Transformada de Fourier. Se pretendió que sirviera para identificar muestras de asfalto de forma innovadora en la industria de Guatemala. Al asfalto que ingresa a una planta de procesamiento, en forma líquida y con propiedades no determinadas se le debe evaluar su calidad determinando sus propiedades físicas. Esto sirve para determinar un precio y diseñar el proceso al que se deberá someter para convertirlo en un producto deseado.

Los equipos para realizar medición de propiedades físicas como el punto de penetración y punto de ablandamiento no dejan de ser necesarios para la clasificación y control de calidad del asfalto y también para sus diferentes productos. Sin embargo, la técnica FTIR podría llegar a reducir el tiempo de análisis de estas muestras desde un día de trabajo hasta menos de una hora aproximadamente. Las muestras que podrían ser analizadas con la técnica FTIR, sin tomar en cuenta los equipos y métodos para propiedades físicas, son las muestras de asfalto virgen y modificado. El asfalto virgen ingresa a las plantas de tratamiento y el control de calidad se analiza nuevamente para tomar decisiones respecto al proceso que deberá seguir para convertirlo en un producto deseado.

Los asfaltos modificados también se pueden analizar con la técnica FTIR y esto significa una reducción de tiempo y, por lo tanto, dinero en el control de calidad de este tipo de asfaltos. Los picos característicos en sus espectros IR dictaron de manera cualitativa cómo se pueden identificar asfaltos vírgenes y modificados. En caso de los asfaltos vírgenes estos presentan picos con diferente forma y transmitancia debido a la proporción de los grupos funcionales de su composición química.

Los asfaltos vírgenes de diferente origen y diferente viscosidad fueron comparados con sus espectros IR. Se observó que el espectro IR de estas muestras presenta picos diferentes. Por ejemplo, una muestra de AC40 de Guatemala presentó dos picos medianos que se pueden observar como un solo pico entre  $1075 - 975 \text{ cm}^{-1}$ , debido a sus grupos alifáticos y aromáticos, en cambio el AC40 de Honduras solo presenta un pico muy pequeño en aprox.  $1030 \text{ cm}^{-1}$ , a diferencia del AC40 de Guatemala este presenta menor porcentaje de transmitancia lo que se debe a menor cantidad de estos grupos funcionales. Esta es la diferencia más marcada, por otra parte se puede observar un pico mediano en aprox.  $1600 \text{ cm}^{-1}$  en ambas muestras, AC40 de Guatemala y Honduras, pero ambos asfaltos presentan picos con una diferencia pequeña de ancho y número de onda.

Los asfaltos modificados analizados varían por el modificador presente, y también por el uso del modificador ACP proveniente de distintos puntos de Guatemala como Pataxte, Fray Bartolomé de las Casa y Santa Rosa.

En el caso de las muestras modificadas de asfalto AC30 con TER se observó dos cambios notables. El pico situado en aprox.  $1740\text{ cm}^{-1}$  y  $1025\text{ cm}^{-1}$ . El pico en  $1740\text{ cm}^{-1}$  se debe principalmente al aumento de grupos carbonilo (C=O) del TER y el pico en  $1025\text{ cm}^{-1}$  a un aumento en los otros grupos orgánicos que ya están presentes en el asfalto como lo son los compuestos alifáticos.

La muestra de AC40 virgen, comparada con las muestras AC40 modificadas con TER, presentó varias diferencias. Aunque también es posible observar el pico en aprox.  $1740\text{ cm}^{-1}$  debido al grupo carbonilo (C=O), en el rango entre  $1350$  a  $950\text{ cm}^{-1}$  los picos presentan un comportamiento diferente en su número de onda y porcentaje de transmitancia. La muestra de AC40 virgen fue la única que presentó dos picos unidos en  $1045\text{ cm}^{-1}$  y  $1020\text{ cm}^{-1}$ , esto es un parámetro para diferenciar los AC40 de Guatemala con muestras modificadas e incluso con muestras de otros países como lo fueron muestras de Honduras y China.

El grupo de asfaltos modificados mayormente estudiado fue el que comprende asfaltos de viscosidad AC30 de Guatemala y Brasil con ACP de diferentes localidades de Guatemala. En todas las muestras modificadas, a diferencia de un AC30 virgen, se observa un pico en aprox.  $1740\text{ cm}^{-1}$  representando el aumento del grupo carbonilo (C=O) correspondiente a los ácidos carboxílicos del ACP.

Se determinó que los asfaltos AC30 de Brasil presentan dos sutiles diferencias al asfalto de Guatemala en los siguientes rangos: entre  $1650$ – $1550\text{ cm}^{-1}$  y  $900$ – $675\text{ cm}^{-1}$ . En el primer rango se puede observar que la forma del pico de los AC30 de Brasil tiene forma de una “v” y el AC30 de Guatemala presenta un pico más ancho. Además, los extremos de cada pico están situados levemente más a la derecha en el caso de Brasil; desde  $1650\text{ cm}^{-1}$  hasta  $1540\text{ cm}^{-1}$ , y en el caso de Guatemala; desde  $1630\text{ cm}^{-1}$  hasta  $1530\text{ cm}^{-1}$ . Esto se debe a sustituciones en diferentes carbonos de los anillos aromáticos de cada asfalto.

Las muestras de asfalto AC30 de Brasil también presentan una sutil diferencia en los cuatro picos característicos que presentan todas las muestras asfálticas en el rango entre  $900$  a  $650\text{ cm}^{-1}$ . Son cuatro picos característicos seguidos y casi unidos. Las muestras de Brasil, a diferencia de las de Guatemala, presentan el primero de estos cuatro picos en un número de onda levemente mayor, en aprox.  $870\text{ cm}^{-1}$ , mientras que las muestras de Guatemala lo presentan en aprox.  $850\text{ cm}^{-1}$ . Esto hace posible diferenciar a los asfaltos AC30 vírgenes y modificados con ACP de Guatemala y Brasil.

Por otro lado, se detectó con el estudio de las propiedades físicas de asfaltos modificados con aceite crudo de palma y estearina, que estas mezclas presentan valores muy similares. Esta similitud se observó en los espectros IR al encontrar los mismos picos con un leve aumento en el porcentaje de transmitancia de los asfaltos con estearina en el pico ubicado en aproximadamente  $1740\text{ cm}^{-1}$ . Debido a esto, se ha determinado que el uso de estearina, subproducto del aceite crudo de palma, para modificar asfalto no es rentable ya que produce resultados muy similares al usar ACP. Además, el ACP es una materia prima de menor valor por ser menos procesada y utilizarla representa un ahorro.

Las propiedades físicas entre muestras de asfalto vírgenes varían según su viscosidad. Se comprobó que respecto al punto de penetración los valores más altos los presentan los asfaltos AC20 y más bajos los AC40. Para el punto de ablandamiento, los valores más altos corresponden a los AC40 y más bajos a los AC20.

La única muestra de AC20 modificado con poliuretano disminuyó su punto de ablandamiento y aumentó su punto de penetración. También aumentó su viscosidad a altas temperaturas. Esto indica que el asfalto AC20 modificado es manipulable a menores temperaturas que un AC20 virgen y que su resistencia a la deformación es mayor. Sin embargo, existe una desventaja al utilizar el poliuretano, ya que se necesita elevar la temperatura a valores mayores que los indicados en normativas (a más de  $165^{\circ}\text{C}$ ) para obtener una buena integración en el asfalto porque el poliuretano no está diseñado para modificar asfaltos, como es el caso del polímero TER utilizado en un asfalto AC30 y AC40.

En el caso del TER en asfaltos AC30 y AC40, se observó una leve disminución en el punto de penetración al aumentar el porcentaje de este modificador. Se esperaba que el punto de ablandamiento disminuyera al aumentar el punto de penetración, pero no se pudo observar este cambio en ambas muestras, solamente en el AC40. Esto favoreció al AC40 ya que lo convierte en un asfalto más resistente y fuerte, aunque más viscoso y eso significa mayor gasto en combustibles para mantenerlo a una temperatura y viscosidad manejables. El uso para este asfalto modificado sería más específico y para requerimientos como una mayor resistencia.

Al observar las muestras AC30 de Guatemala modificadas con ACP de Pataxte, se determinó un aumento en el punto de penetración y una disminución del punto de ablandamiento conforme la concentración de modificador aumenta. Esto se traduce en un asfalto con propiedades distintas, donde se resalta la cantidad de aceites presentes y permite una mayor durabilidad y resistencia a cambios climáticos.

Se pudo también observar que no todas las muestras modificadas con ACP presentaron este comportamiento. Los valores de punto de penetración y ablandamiento solamente cambian con la adición de modificador, pero no siempre es un aumento o disminución como en el caso de las muestras de AC30 de Guatemala con ACP de Pataxte.

Si al modificar un asfalto virgen se obtiene un aumento del punto de penetración y una disminución del punto de ablandamiento entonces se obtiene un asfalto menos rígido y manejable a temperaturas menores. Esto también es bueno porque se ahorra dinero en el transporte y manipulación del asfalto porque se utiliza menos combustible al ser punto de ablandamiento menor que antes.

Por otra parte, al preparar un producto final con un asfalto modificado con un punto de penetración mayor y un punto de ablandamiento menor como un pavimento, su durabilidad será mayor porque el modificador, en este caso ACP, hace que la pérdida de su consistencia, debida a compuestos volátiles en su fase líquida, sea menor conforme el paso del tiempo y la fatiga que sufra durante su uso.

En el caso de asfaltos vírgenes es posible generar una base de datos o catálogo de espectros IR para tener una referencia cualitativa de la forma de estos espectros IR. Es una herramienta para determinar la viscosidad del asfalto de manera cualitativa para luego realizar el resto de análisis.

Al analizar el espectro IR de un asfalto modificado es posible identificar picos característicos comparando con un espectro de un asfalto virgen de la misma viscosidad. Se necesitan cinco o más muestras con diferentes concentraciones de modificador para elaborar una curva de calibración que sirva para determinar de forma cuantitativa la concentración de modificador. En este caso se puede observar, en la sección de RESULTADOS, la relación entre el área del pico del espectro IR y la concentración del grupo funcional del modificador agregado. Esta relación es lineal y permite cuantificar la concentración de modificador.

El uso de la técnica FTIR en asfaltos podría ser viable en una empresa que prepara asfaltos modificados debido a que es necesario realizar un control de calidad en numerosas ocasiones. Esta técnica permite cuantificar la concentración de modificador en asfaltos modificados. Esta concentración se determinó elaborando curvas de calibración con los datos obtenidos del espectro IR de cada muestra. El área del pico característico que representa la presencia de modificador graficado contra la concentración del modificador permite este procedimiento.

Se comparó el cambio en el valor de las propiedades físicas de los asfaltos modificados de diferentes viscosidades y modificadores. Las muestras con el modificador TER fueron solamente dos grupos de dos muestras por lo que no fue posible determinar ninguna tendencia. También las dos únicas muestras de AC30 con estearina no permiten este análisis. De igual forma sucede con la única muestra de AC20 con poliuretano.

El grupo mayormente estudiado, fue el grupo de muestras de AC30 con ACP de diferentes localidades de Guatemala. Algunos de los grupos de muestras si mostraron cierto comportamiento lineal pero no hubo un solo grupo que presentara una tendencia en todas sus propiedades físicas.

No se determinó de manera cuantitativa las propiedades físicas de un asfalto con el análisis de su espectro IR. La principal razón fue el número limitado de muestras analizadas, en un rango de dos a cuatro muestras de la misma viscosidad y modificador.

Otra posible razón que implica que los comportamientos de las propiedades físicas de los asfaltos analizados no sigan siempre una misma tendencia es el origen de estos asfaltos. En el caso de Guatemala, las muestras analizadas fueron preparadas con asfalto virgen de la Refinería Perenco. Se puede esperar que por cada lote de producción de asfalto virgen exista una diferencia leve en sus propiedades.

Cuando el asfalto se lleva a la empresa que prepara asfaltos modificados, lotes diferentes se pueden llegar a mezclar en el mismo contenedor principal dando lugar a modificaciones leves en la propiedad del asfalto virgen que es materia prima para todos los productos finales.

Otra fuente de error es de índole humano. Las muestras de asfaltos modificados a diferentes concentraciones, evaluadas en este trabajo, tomaron entre unas y dos semanas para prepararse. Diferentes operarios con diferente nivel de experiencia prepararon las muestras estándar y es posible acarrear otro error. Las propiedades físicas de un asfalto modificado pueden ser afectadas por los cambios de temperatura y el tiempo que se toma para prepararlo.

Por último, se puede hablar de otra fuente de error humano, que es la generación de los ensayos de las propiedades físicas de los asfaltos y los modificadores. Las propiedades físicas se trabajan en duplicado o triplicado según sea el caso. Incluso, se puede realizar más de tres veces el mismo ensayo para obtener un valor que sea confiable. Este puede ser un error más que se suma al resultado de cada valor de cada una de las propiedades físicas de los asfaltos vírgenes y modificados.



## IX. CONCLUSIONES

1. La técnica FTIR permite identificar asfaltos vírgenes de viscosidades 20, 30 y 40 debido a picos característicos ubicados en el rango entre 1800 a 600  $\text{cm}^{-1}$ . Un asfalto AC40 virgen presenta dos picos altos en 1050  $\text{cm}^{-1}$  y 1100  $\text{cm}^{-1}$  casi unidos, el asfalto AC30 virgen presenta un espectro IR más parecido a un asfalto virgen AC20 a diferencia que el AC20 presenta un pico en aprox. 1250  $\text{cm}^{-1}$ , levemente más alto, debido a grupos funcionales como éteres alifáticos y un porcentaje mayor de transmitancia que el AC30 en el rango de 1150 a 1000  $\text{cm}^{-1}$ .
2. Los asfaltos modificados analizados se pueden identificar de forma cualitativa comparando sus espectros IR. El espectro IR de asfaltos vírgenes permite observar diferencias en alturas y formas de picos característicos debido a la diferencia de concentración de los grupos funcionales que comparten todos los asfaltos vírgenes. Para los asfaltos modificados se utiliza el cambio en el porcentaje de transmitancia del pico ubicado en aproximadamente 1740  $\text{cm}^{-1}$  debido al cambio de concentración del grupo carbonilo (C=O) según el modificador utilizado en el asfalto.
3. Se determinó que la concentración de modificador agregado, en este caso ACP, en asfaltos de viscosidad AC30, está directamente relacionado con el área del pico ubicado en aprox. 1740  $\text{cm}^{-1}$ . De esta forma es posible elaborar curvas de calibración para determinar de una forma cuantitativa la concentración de modificador en una muestra de asfalto.
4. La técnica FTIR no permite, con el número de muestras analizadas, determinar el valor de una propiedad física. Sin embargo, en ciertos grupos de asfalto de viscosidad AC30 con ACP, se observó un comportamiento lineal. Se necesita de un mínimo de 5 muestras con las mismas características para comprobar esta posibilidad.



## X. RECOMENDACIONES

1. Realizar un análisis económico para comparar el proceso de obtención de propiedades de un asfalto utilizando espectroscopía infrarroja o equipo para determinar propiedades físicas evaluando el recurso humano, equipo y tiempo necesario en cada caso.
2. Realizar un análisis utilizando la técnica FTIR en asfaltos modificados con todos los modificadores posibles existentes en el mercado para contar con una base de datos amplia.
3. Realizar un análisis cualitativo utilizando la técnica FTIR en asfaltos vírgenes de viscosidades AC20, AC30 y AC40 y diferente origen para crear una base de datos. Se recomiendan tres muestras distintas de asfalto de cada viscosidad para asegurar la forma de su espectro IR.
4. Realizar un análisis cuantitativo con los espectros IR de muestras de asfaltos vírgenes y modificados para determinar si es posible determinar el valor de pruebas físicas con la técnica FTIR. Para esto, se necesitan al menos cinco concentraciones de modificador para cada tipo de asfalto y trabajar en triplicado para comparar tres comportamientos de cada propiedad física deseada bajo las mismas condiciones.



## XI. BIBLIOGRAFÍA

- Avellán D. 2007. *Asfaltos Modificados con Polímeros*. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala. 125 págs.
- Beliczky L., Fajen J. 2012. *Industria del Caucho*. Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo. Industrias químicas. España. 20 págs.
- Calduch R. 2014. *Métodos y técnicas de investigación internacional*. España: Universidad Complutense de Madrid. 180 págs.
- Cámara Guatemalteca de la Construcción (CGC). *Directorio Oficial de la Construcción*.  
<http://www.construguate.com/index.php/publicaciones/directorio-oficial-de-la-construccion>. [Revisión junio 2018]
- Creswell, Runquist, Campwell. 1972. *Spectral Analysis of Organic Compounds*. 2da ed. USA: Burgess Publishing Company.  
<http://www.dcne.ugto.mx/Contenido/MaterialDidactico/amezquita/Analitica4/Apendices%20IR.pdf> [revisión octubre 2018]
- García W. 2013. *Estudio de la Influencia del Asfalto Envejecido en el Comportamiento Mecánico de una Mezcla de Concreto Asfáltico Producida en Caliente*. Colombia: Universidad Nacional de Colombia. 341 págs.
- Hunter R., Self. A., Read J. 2015. *The Shell Bitumen Handbook*. Londres: ICE Publishing. 788 págs.
- Ministerio de Energía y Minas (MEM). 2016. *Informe Estadísticas de Hidrocarburos Guatemala*. Guatemala: sección estadística. 35 págs.
- Ministerio de Energía y Minas (MEM). 2018. <http://www.mem.gob.gt/>
- Mondragón P. 2017. *Espectroscopía de Infrarrojo para todos... y 51 espectros de alimentos consumidos en México*. México: Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño. 199 págs.
- Nasrazadani, Seifollah, et. al. 2010. *Practical Applications of FTIR to Characterize Paving Materials*. Texas: University of North Texas. 148 págs.
- Piqué T., Vázquez A. 2012. *Uso de Espectroscopía Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR) en el Estudio de la Hidratación del Cemento*. Argentina: Universidad de Buenos Aires. 10 págs.

- Read J., Whiteoak D. 2004. *The Shell Bitumen Handbook*. Londres: Thomas Telford Publishing. 460 págs.
- Salazar J. 2013. *Métodos de ensayo para la determinación cualitativa y cuantitativa del contenido de polímero presente en ligantes asfálticos modificados*. Costa Rica: LanammeUCR. 8 págs.
- Skoog. D., Holler F., Crouch S. 2008. *Principios de Análisis Instrumental*. 6 ed. México: Cengage Learning. 993 págs.
- *Spectral Data Base for Organic Compounds, SDBS*. [https://sdb.sdb.aist.go.jp/sdb/cgi-bin/direct\\_frame\\_top.cgi](https://sdb.sdb.aist.go.jp/sdb/cgi-bin/direct_frame_top.cgi) [Revisión: Julio 2018]
- Tonon G. 2011. *La Utilización del Método Comparativo en Estudios Cualitativos en Ciencia Política y Ciencias Sociales: Diseño y desarrollo de una tesis doctoral*. El Salvador: universidad nacional de san Luis. 12 págs.
- Vargas X., Reyes F. 2010. *El fenómeno de envejecimiento de los asfaltos. Colombia: ingeniería e investigación volumen 30*. Págs. 27-44.
- Wade L. 2011. *Química Orgánica. Volumen 1*. 7ed. México: Pearson Educación. 664 págs.

## XII. ANEXOS

Tabla 9 Datos experimentales del punto de penetración de muestras de  
asfalto analizadas

<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
39.8	59.1	57.5	54.6	50.3	36.3	35.6	58.1	61.0	62.0
40.0	59.1	57.7	55.0	49.8	36.8	35.9	57.8	60.4	61.9
40.2	58.9	57.3	55.4	49.8	35.5	35.5	58.2	60.7	62.1
<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>20</b>
64.1	44.2	46.4	60.1	57.2	55.8	53.3	60.8	30.8	35.0
64.1	43.8	45.8	59.9	57.0	56.1	52.8	61.0	31.0	35.0
63.9	44.0	45.9	60.0	56.8	56.2	52.9	61.1	30.6	35.2
<b>21</b>	<b>22</b>	<b>23</b>	<b>24</b>	<b>25</b>	<b>26</b>	<b>27</b>	<b>28</b>	<b>29</b>	<b>30</b>
36.4	57.8	60.5	35.0	37.9	29.1	32.2	34.2	39.9	45.1
36.2	58.0	60.3	34.5	37.6	29.0	31.8	34.3	40.0	44.9
36.2	58.2	60.7	34.8	37.4	28.9	31.9	34.0	40.1	45.1

\*Incertidumbre de cada medida:  $\pm 0.5$  dmm. \*Los números del 1 al 30 indican el número de muestra según la tabla 8 correspondiente.

Tabla 10 Datos experimentales del punto de ablandamiento de muestras de  
asfalto analizadas

<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
90.0	49.7	55.0	68.0	64.1	75.9	77.8	50.4	51.0	49.3
90.0	49.5	55.0	67.7	63.9	75.9	77.6	50.5	51.0	49.5
<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>20</b>
48.4	53.6	60.0	45.0	49.0	56.0	52.3	58.1	57.4	56.8
48.6	53.5	60.0	45.0	49.0	56.0	52.1	58.2	57.2	56.8
<b>21</b>	<b>22</b>	<b>23</b>	<b>24</b>	<b>25</b>	<b>26</b>	<b>27</b>	<b>28</b>	<b>29</b>	<b>30</b>
57.4	57.1	50.5	51.0	57.3	57.4	52.3	55.8	56.6	55.8
57.3	57.0	50.5	51.0	57.2	57.3	52.3	55.6	56.8	55.8

\*Incertidumbre de cada medida:  $\pm 0.1$  °C. \*Los números del 1 al 30 indican el número de muestra según la tabla 8 correspondiente.

Tabla 11 Datos experimentales de la gravedad específica de muestras de asfalto analizadas

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1.0300	1.0641	1.0303	1.0500	1.0370	1.0710	1.0650	1.0320	1.0300	1.0303
1.0304	1.0645	1.0307	1.0504	1.0374	1.0714	1.0654	1.0324	1.0304	1.0307
1.0297	1.0638	1.0300	1.0497	1.0367	1.0707	1.0647	1.0317	1.0297	1.0300
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1.0383	1.0342	1.0113	1.0363	1.0624	1.0633	1.0663	1.0613	1.0622	1.0120
1.0376	1.0335	1.0106	1.0356	1.0617	1.0626	1.0656	1.0606	1.0615	1.0113
1.0381	1.0340	1.0111	1.0361	1.0622	1.0631	1.0661	1.0611	1.0620	1.0118
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1.0496	1.0333	1.0323	1.0303	1.0123	1.0123	1.0113	1.0113	1.0103	1.0803
1.0493	1.0330	1.0320	1.0300	1.0120	1.0120	1.0110	1.0110	1.0100	1.0800
1.0490	1.0327	1.0317	1.0297	1.0117	1.0117	1.0107	1.0107	1.0097	1.0797

Mediciones realizadas a 25°C respecto al agua. Incertidumbre:  $\pm 0.0150$ . \*Los números del 1 al 30 indican el número de muestra según la tabla 8 correspondiente.

Tabla 12 Datos experimentales de la viscosidad medida a 135°C de muestras de asfalto analizadas

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0.5292	0.5909	0.7400	0.6848	0.7197	0.8343	0.8929	0.7376	0.7348	0.6836
0.5289	0.5910	0.7401	0.6847	0.7198	0.8343	0.8934	0.7372	0.7350	0.6832
0.5289	0.5910	0.7400	0.6848	0.7199	0.8343	0.8932	0.7377	0.7352	0.6832
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0.6713	0.8836	0.7701	0.5437	0.5873	0.7333	0.7000	0.7000	0.6701	0.6185
0.6706	0.8842	0.7687	0.5424	0.5870	0.7329	0.7020	0.7005	0.6705	0.6183
0.6706	0.8842	0.7707	0.5425	0.5867	0.7333	0.6980	0.6995	0.6695	0.6188
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
0.5601	0.5763	0.7371	0.7215	0.5791	0.4915	0.6003	0.6050	0.5975	0.603
0.5598	0.5757	0.7379	0.7226	0.5787	0.4920	0.6009	0.6050	0.5971	0.6025
0.5601	0.5761	0.7374	0.7220	0.5793	0.4915	0.6004	0.6050	0.5978	0.6031

\*Incertidumbre de cada medida:  $\pm 0.0001 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ . \*Los números del 1 al 30 indican el número de muestra según la tabla 8 correspondiente.

Tabla 13 Datos experimentales de la viscosidad medida a 165°C de muestras de asfalto analizadas

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0.1126	0.1727	0.1900	0.1330	0.4730	0.7500	0.2200	0.1825	0.1950	0.1650
0.1123	0.1724	0.1898	0.1333	0.4732	0.7502	0.2202	0.1827	0.1952	0.1652
0.1125	0.1723	0.1902	0.1327	0.4728	0.7498	0.2198	0.1823	0.1948	0.1648
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0.1695	0.1876	0.1774	0.1144	0.1497	0.1847	0.1622	0.1772	0.1717	0.1767
0.1698	0.1879	0.1777	0.1147	0.1500	0.1850	0.1625	0.1775	0.1720	0.1770
0.1701	0.1882	0.1780	0.1150	0.1503	0.1853	0.1628	0.1778	0.1723	0.1773
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
0.1402	0.1520	0.1827	0.1927	0.1472	0.1277	0.1502	0.1477	0.1608	0.1804
0.1398	0.1516	0.1823	0.1923	0.1468	0.1273	0.1498	0.1473	0.1604	0.1800
0.1400	0.1518	0.1825	0.1925	0.1470	0.1275	0.1500	0.1475	0.1606	0.1802

\*Incertidumbre de cada medida:  $\pm 0.0001 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ . \*Los números del 1 al 30 indican el número de muestra según la tabla 8 correspondiente.

Grupo	Intensidad <sup>a</sup>	Intervalo (cm <sup>-1</sup> )	Grupo	Intensidad <sup>a</sup>	Intervalo (cm <sup>-1</sup> )
<b>A. Cromóforos hidrocarbonados</b>			<b>B. Cromóforos carbonílicos</b>		
1. Tensión C—H			1. Vibraciones de tensión de cetonas		
a. Alcano	m-s	2962-2853	a. Saturadas, acíclicas	s	1725-1705
b. Alqueno, monosustituido (vinilo)	y m	3040-3010	b. Saturadas, cíclicas:		
Alqueno, disustituido, <i>cis</i>	m	3095-3075	Anillo con 6 miembros (y mayores)	s	1725-1705
Alqueno, disustituido, <i>trans</i>	m	3040-3010	Anillo de 5 miembros	s	1750-1740
Alqueno, disustituido, <i>gem</i>	m	3095-3075	Anillo de 4 miembros	s	~1775
Alqueno, trisustituido	m	3040-3010	c. $\alpha\beta$ -Insaturadas, acíclicas	s	1685-1665
c. Alquino	s	~3300	d. $\alpha\beta$ -Insaturadas, cíclicas:		
d. Aromático	v	~3030	Anillo con 6 miembros (y mayores)	s	1685-1665
2. Enlace C—H			Anillo de 5 miembros	s	1725-1708
a. Alcano, C—H	w	~1340	e. $\alpha\beta\alpha'\beta'$ -Insaturadas, acíclicas	s	1670-1663
Alcano, —CH <sub>2</sub> —	m	1485-1445	f. Arilo	s	1700-1680
Alcano, —CH <sub>3</sub>	m	1470-1430	g. Diarilo	s	1670-1660
Alcano, <i>gem</i> -dimetilo	y s	1380-1370	h. $\beta$ -Dicetonas	s	1730-1710
Alcano, <i>ter</i> -butilo	y s	1385-1380	i. $\beta$ -Dicetonas (endólicas)	s	1640-1540
	y s	1370-1365	j. 1,4-Quinonas	s	1690-1660
	m	1395-1385	k. Cetenas	s	~2150
	y s	~1365	2. Aldehídos		
b. Alqueno, monosustituido (vinilo)	s	995-985	a. Vibraciones de tensión del grupo carbonilo:		
	s	915-905	Saturados, alifáticos	s	1740-1720
	y s	1420-1410	$\alpha\beta$ -Insaturados, alifáticos	s	1705-1680
Alqueno, disustituido, <i>cis</i>	s	~690	$\alpha\beta,\gamma\beta$ -Insaturados, alifático	s	1680-1660
Alqueno, disustituido, <i>trans</i>	s	970-960	Arilo	s	1715-1695
Alqueno, disustituido, <i>gem</i>	y m	1310-1295	b. Vibraciones de tensión C—H, dos bandas	w	2900-2820
	s	895-885		y w	2775-2700
	y s	1420-1410	3. Vibraciones de tensión de ésteres		
Alqueno, trisustituido	s	840-790	a. Saturados, acíclicos	s	1750-1735
c. Alquino	s	~630	b. Saturados, cíclicos:		
d. Aromático: tipo de sustitución <sup>b</sup> :			$\delta$ -Lactonas (y anillos grandes)	s	1750-1735
Cinco átomos de hidrógeno adyacentes	v, s	~750	$\gamma$ -Lactonas	s	1780-1760
Cuatro átomos de hidrógeno adyacentes	y v, s	~700	$\beta$ -Lactonas	s	~1820
Tres átomos de hidrógeno adyacentes	v, s	~750	c. Insaturados:		
Dos átomos de hidrógeno adyacentes	v, m	~780	Tipo éster vinílico	s	1800-1770
Un átomo de hidrógeno	v, w	~880	$\alpha\beta$ -Insaturados y arilo	s	1730-1717
3. Tensión de enlaces múltiples C=C			$\alpha\beta$ -Insaturados, $\delta$ -lactona	s	1730-1717
a. Alqueno, no conjugado	v	1680-1620	$\alpha\beta$ -Insaturados, $\gamma$ -lactona	s	1760-1740
Alqueno, monosustituido (vinilo)	m	~1645	$\beta,\gamma$ -Insaturados, $\gamma$ -lactona	s	~1800
Alqueno disustituido, <i>cis</i>	m	~1658	d. $\alpha$ -Cetoésteres	s	1755-1740
Alqueno disustituido, <i>trans</i>	m	~1675	e. $\beta$ -Cetoésteres (enólicos)	s	~1650
Alqueno disustituido, <i>gem</i>	m	~1653	f. Carbonatos	s	1780-1740
Alqueno, trisustituido	m	~1669	g. Tioésteres	s	~1690
Alqueno, tetrasustituido	w	~1669	4. Ácidos carboxílicos		
Dieno	w	~1650	a. Vibraciones de tensión del grupo carbonilo		
b. Alquino, monosustituido	m	2140-2100	Saturados alifáticos	s	1725-1700
Alquino, disustituido	v, w	2260-2190	$\alpha\beta$ -Insaturados alifáticos	s	1715-1690
c. Aleno	m	~1960	Arilo	s	1700-1680
d. Aromático	y m	~1060	b. Tensión del grupo hidroxilo (enlazado), varias bandas	w	2700-2500
	v	~1600	c. Tensión de! anión carboxilato	s	1610-1550
	v	~1580		y s	1400-1300
	m	~1500	5. Vibraciones de tensión de anhídridos		
	y m	~1450	a. Saturados, acíclicos	s	1850-1800
				y s	1790-1740

Figura 22 Tabla de grupos funcionales y rangos en el espectro infrarrojo usada para identificación de compuestos químicos en la técnica FTIR

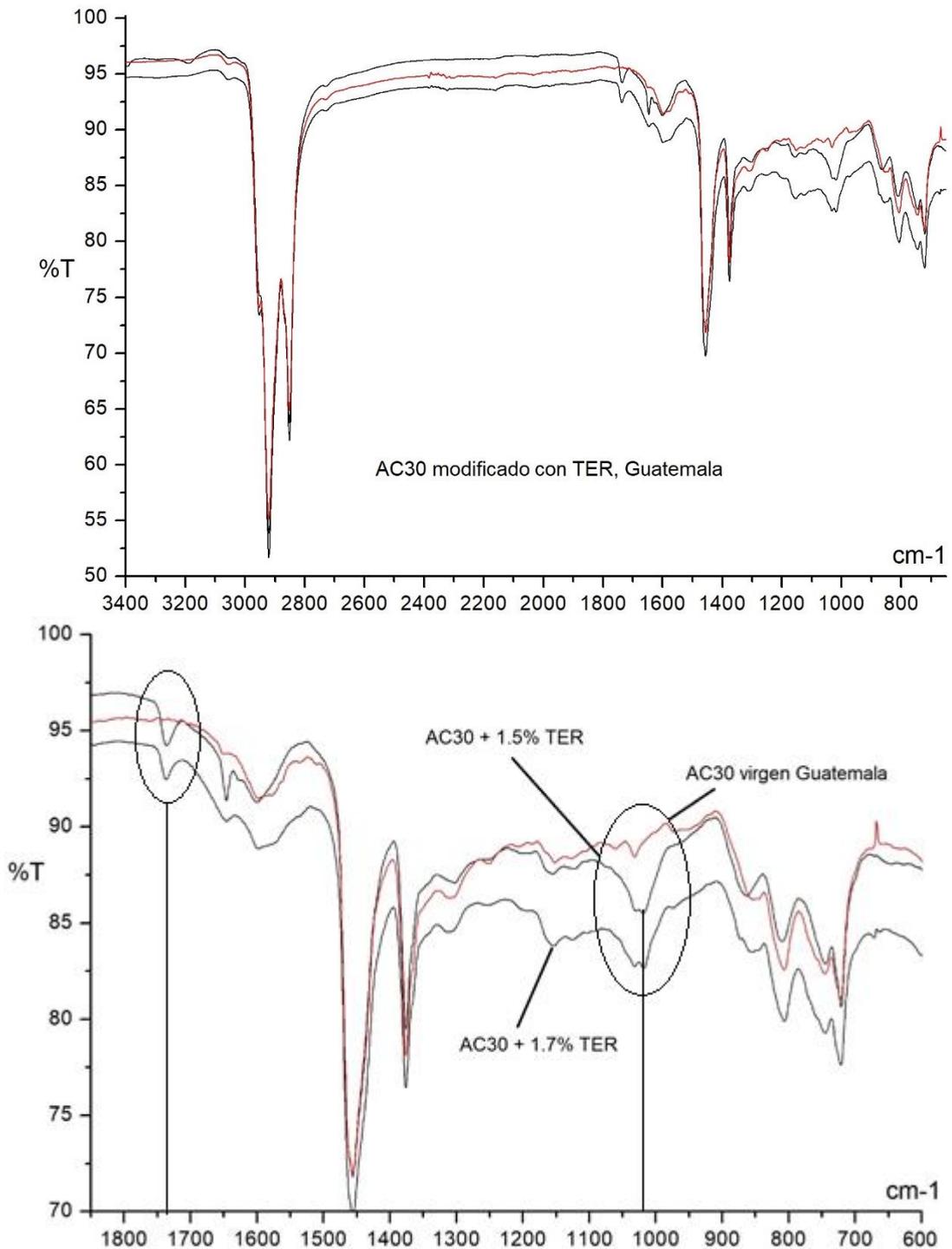


Figura 23 Espectros IR de AC30 de Guatemala virgen y modificado con diferentes porcentajes de TER\*

**Notas:**

\* %T se refiere al porcentaje de transmitancia en un rango de 0% a 100%.

\* En la Figura 23 se representan los espectros de asfaltos modificados con 1.5% y 1.7% de TER y sus variaciones en la forma de sus espectros IR. El valle en aprox. 1740 cm<sup>-1</sup> corresponde a la presencia de grupos carbonilo (C=O) y en aprox. 1650 cm<sup>-1</sup> corresponde a la presencia de grupos aromáticos y dobles enlaces (C=C).

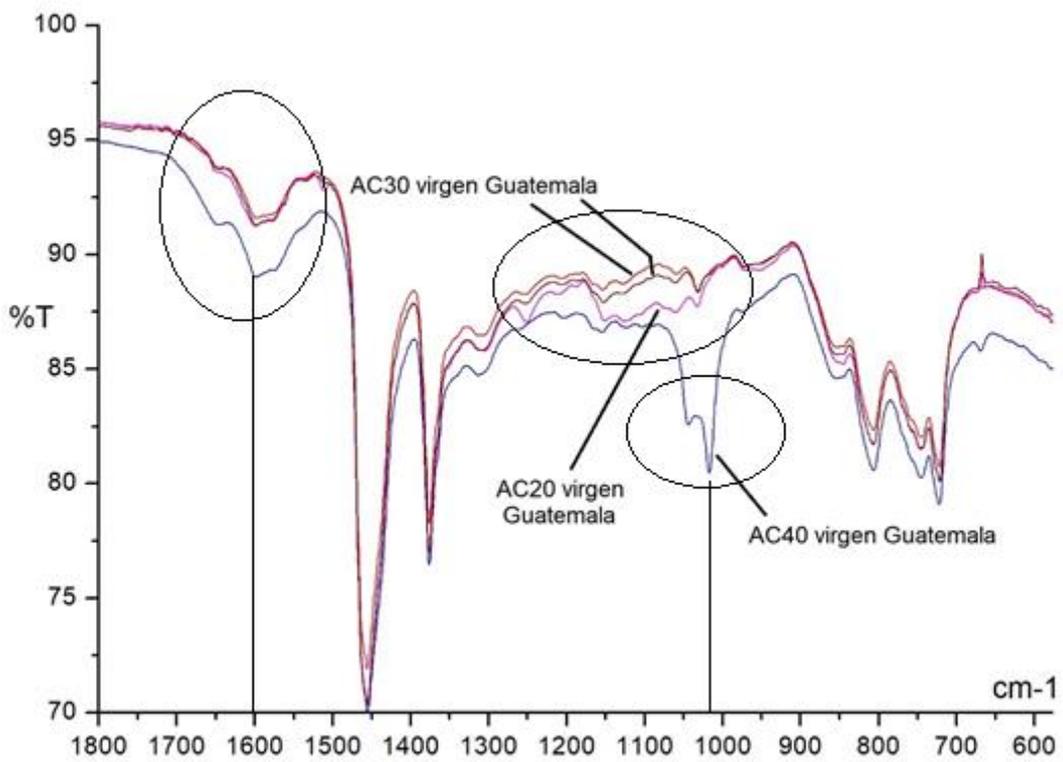
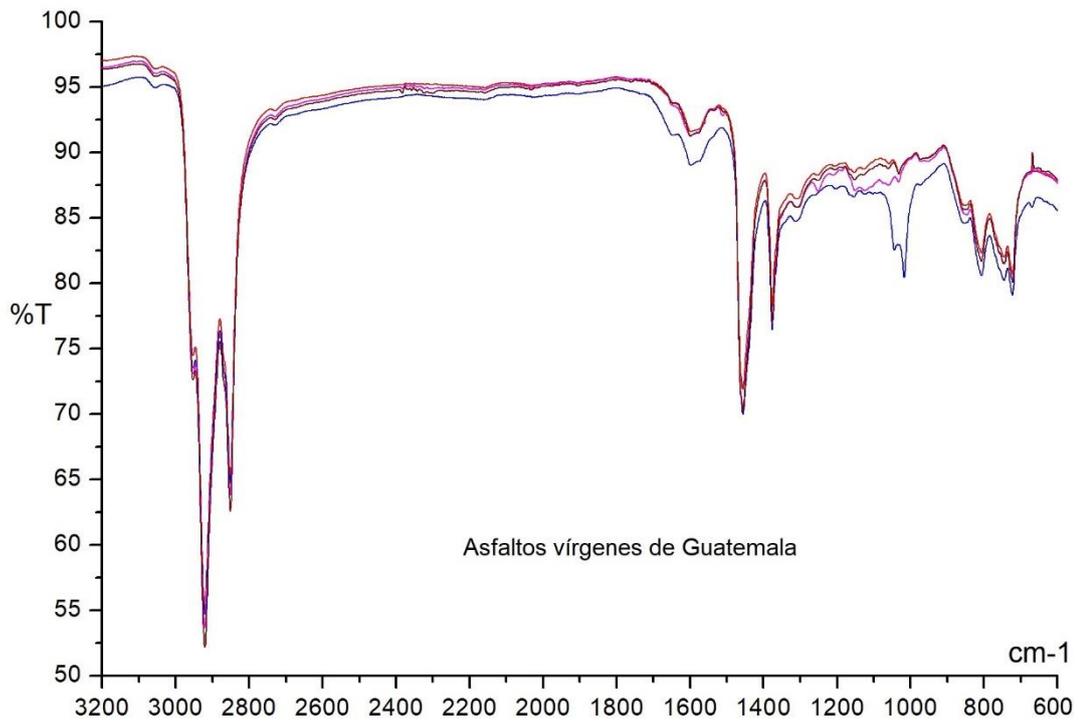


Figura 24 Espectros IR de asfaltos vírgenes de diferente viscosidad de Guatemala\*

**Notas:**

\* %T se refiere al porcentaje de transmitancia en un rango de 0% a 100%.

\* En la Figura 24 se representan los espectros de 3 asfaltos vírgenes de viscosidades 20, 30 y 40, siendo el 40 el más viscoso. Se observa que en el rango de  $1700\text{cm}^{-1}$  a  $1500\text{cm}^{-1}$  su comportamiento es similar, pero en el rango de  $1250\text{ cm}^{-1}$  a  $1000\text{cm}^{-1}$  se aprecian diferencias debidas a la presencia de grupos funcionales como éteres alifáticos.

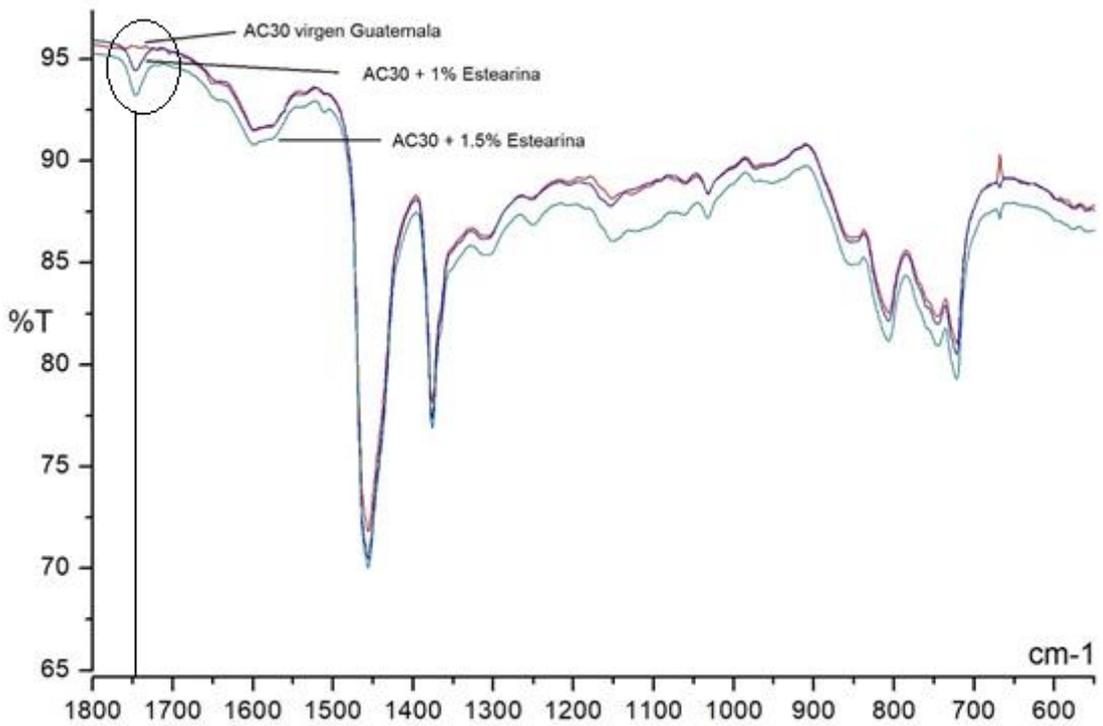
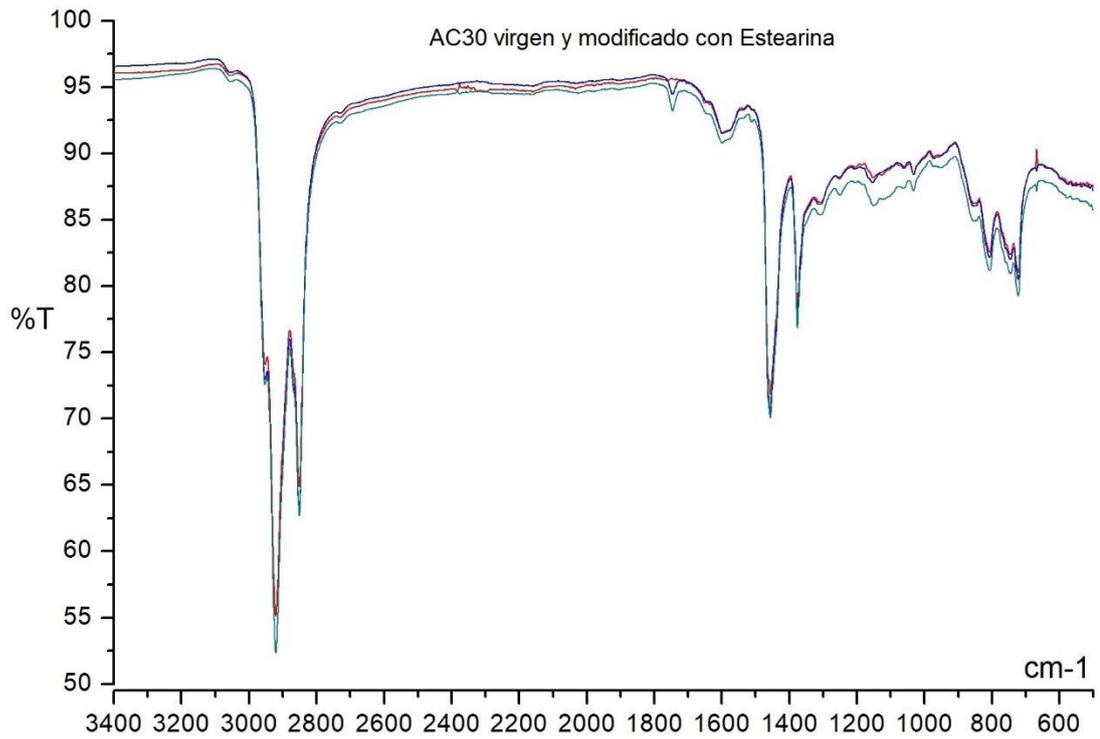


Figura 25 Espectros IR de AC30 de Guatemala virgen y modificado con diferentes porcentajes de Estearina\*

Notas:

\* %T se refiere al porcentaje de transmitancia en un rango de 0% a 100%.

\* En la Figura 25 se representan IR de muestras de asfalto AC30 con 1% y 1-5% de estearina. Los valles de %T se pueden observar en aprox. 1740cm<sup>-1</sup>, esta disminución de %T al aumentar la concentración del modificador se debe al aumento de grupos carbonilo (C=O).

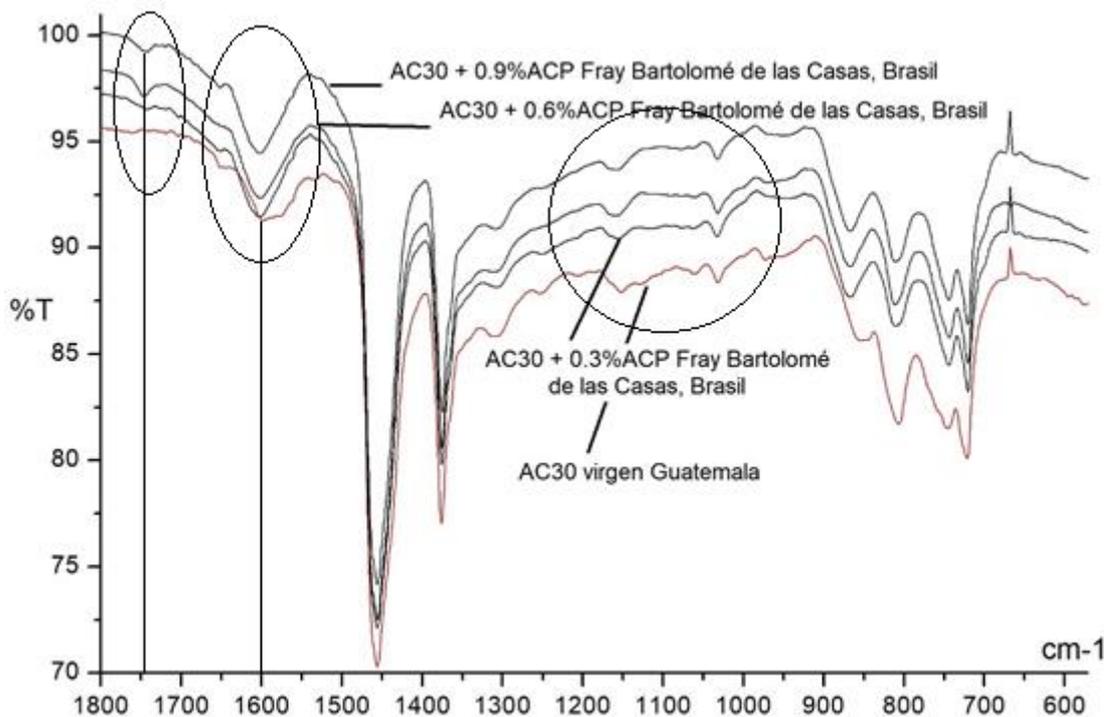
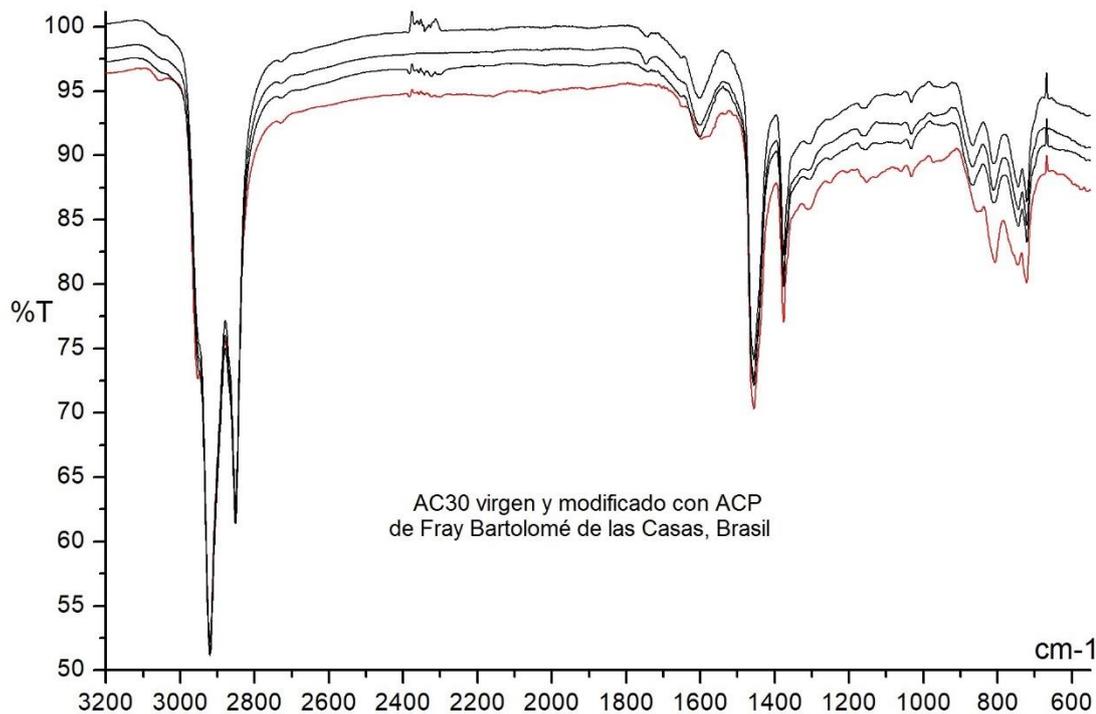


Figura 26 Espectros IR de AC30 de Brasil virgen y modificado con diferentes porcentajes de ACP de Fray Bartolomé de las Casas\*

**Notas:**

\* %T se refiere al porcentaje de transmitancia en un rango de 0% a 100%.

\* En la Figura 26 se comparan espectros IR de asfaltos AC30 de Brasil modificados con ACP y un asfalto virgen de Guatemala. Existe un leve cambio en el pico en aprox.  $1740\text{cm}^{-1}$  debido a grupos carbonilo ( $\text{C}=\text{O}$ ). También se presenta un cambio en el pico en  $1600\text{cm}^{-1}$  debido a grupos como dobles enlace ( $\text{C}=\text{C}$ ). El rango de  $1200\text{cm}^{-1}$  a  $950\text{cm}^{-1}$  no presentó diferencias significativas.

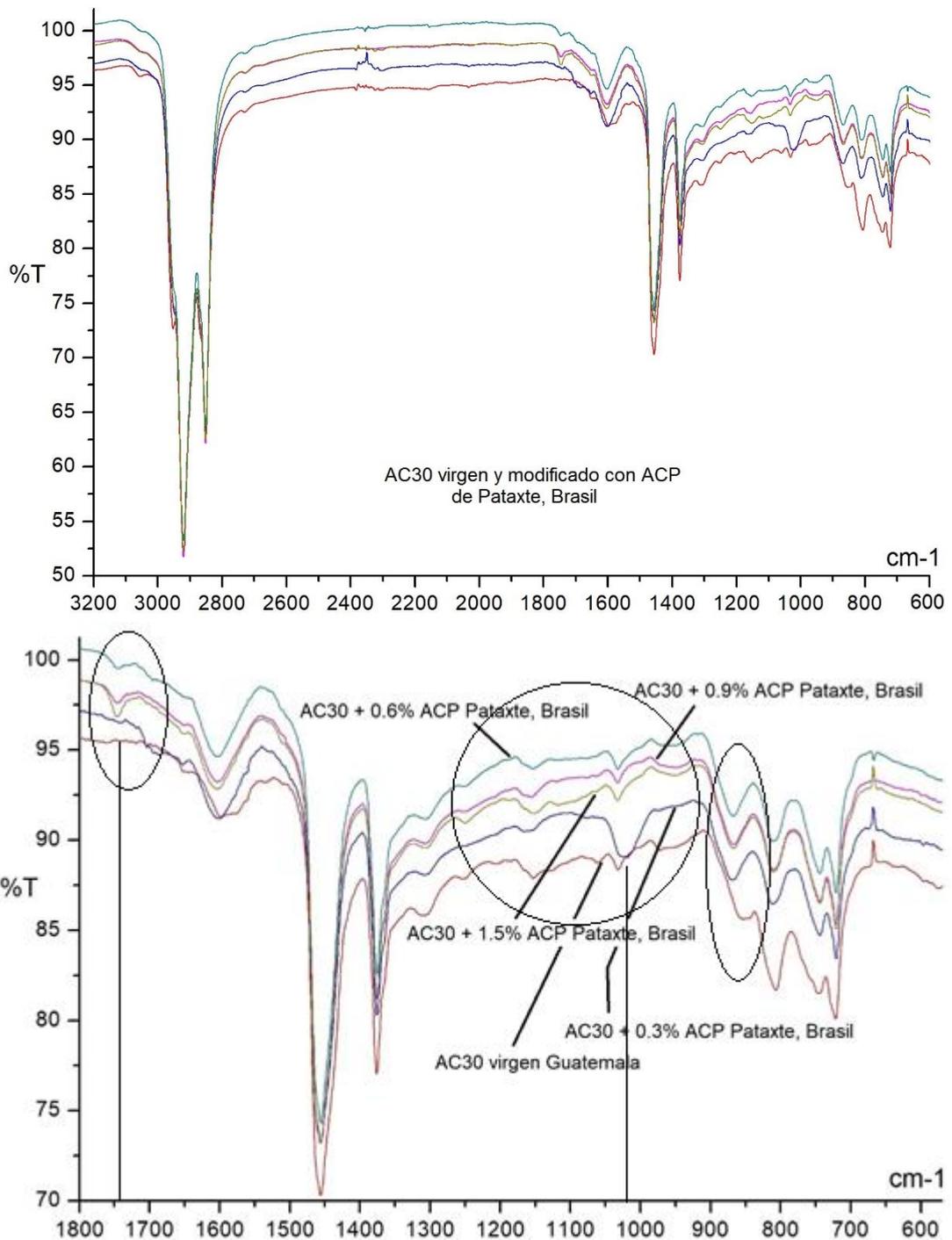


Figura 27 Espectros IR de AC30 de Brasil virgen y modificado con diferentes porcentajes de ACP de Pataxte\*

**Notas:**

\* %T se refiere al porcentaje de transmitancia en un rango de 0% a 100%.

\* En la Figura 27 se comparan espectros IR de asfaltos AC30 de Brasil modificados con ACP y un asfalto virgen de Guatemala. Se observa un cambio de %T en aprox. 1740cm<sup>-1</sup> debido a grupos carbonilo (C=O) y en aprox. 1040cm<sup>-1</sup> debido a grupos de éteres alifáticos.

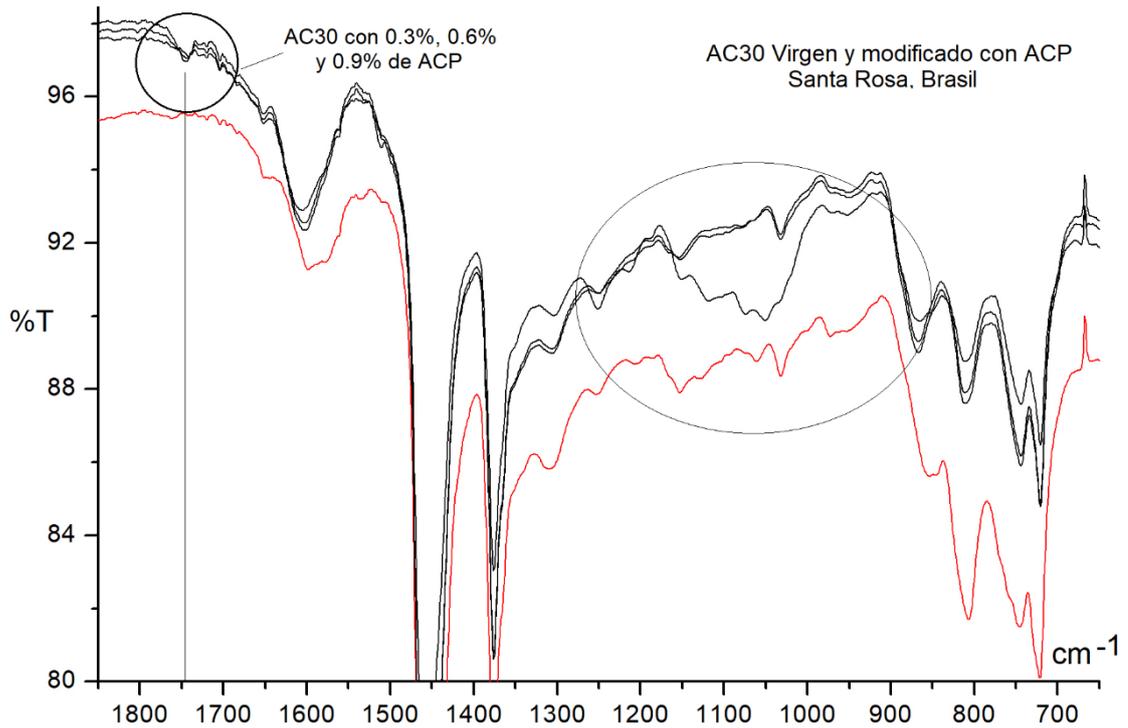
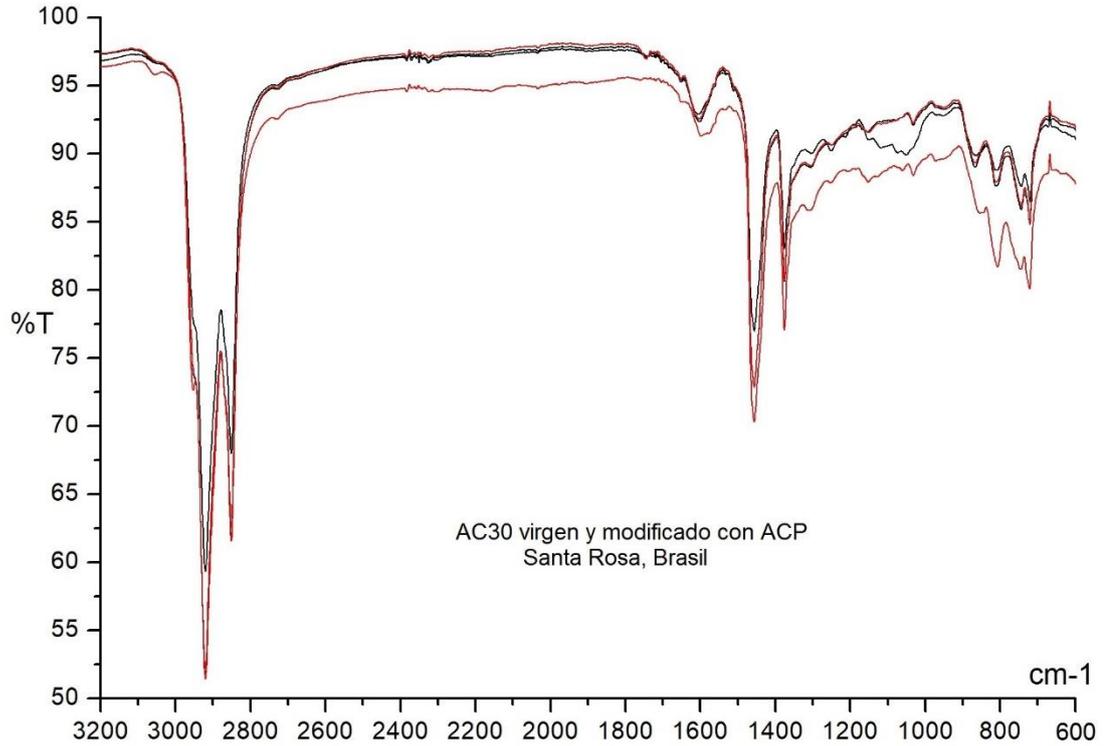


Figura 28 Espectros IR de AC30 de Brasil virgen y modificado con diferentes porcentajes de ACP de Santa Rosa\*

Notas:

\* %T se refiere al porcentaje de transmitancia en un rango de 0% a 100%.

\* En la Figura 28 se comparan espectros IR de asfaltos AC30 de Brasil modificados con ACP y un asfalto virgen de Guatemala. Se observa un cambio de %T en aprox.  $1740\text{cm}^{-1}$  debido a grupos carbonilo ( $\text{C}=\text{O}$ ) y se observa un comportamiento atípico en el rango de  $1200\text{cm}^{-1}$  a  $950\text{cm}^{-1}$  debido a grupos de alquil aril éteres.

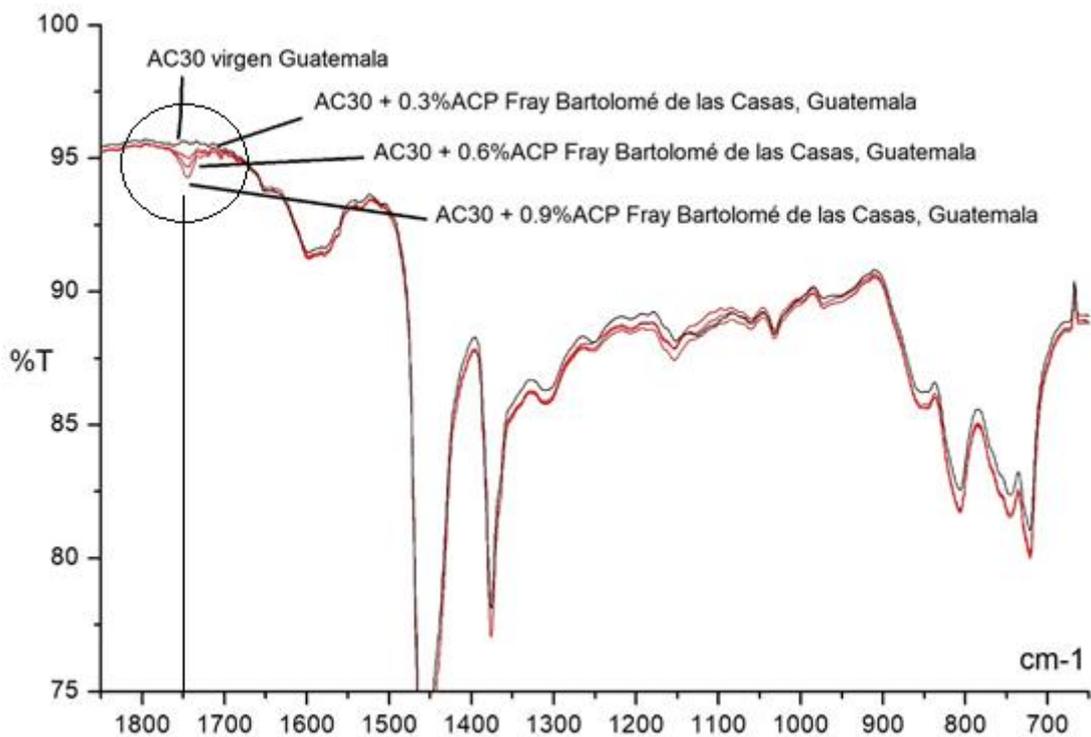
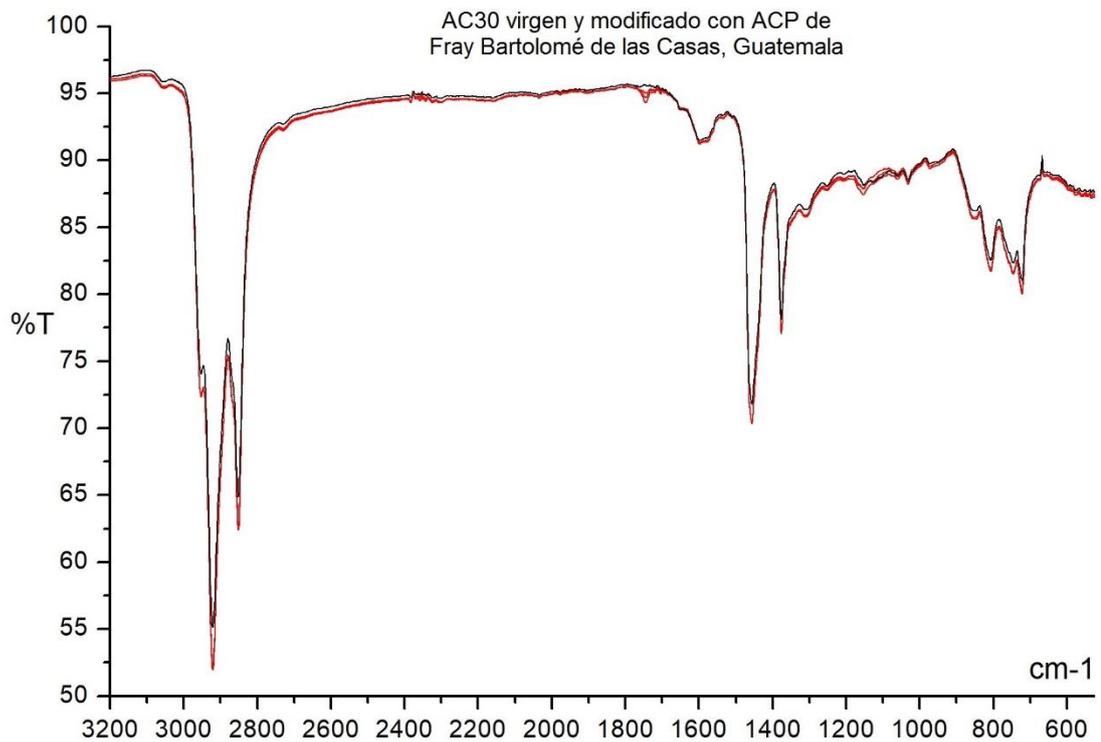


Figura 29 Espectros IR de AC30 de Guatemala virgen y modificado con diferentes porcentajes de ACP de Fray Bartolomé de las Casas\*

Notas:

\* %T se refiere al porcentaje de transmitancia en un rango de 0% a 100%.

\* En la Figura 29 se comparan espectros IR de asfaltos AC30 de Brasil modificados con ACP y un asfalto virgen de Guatemala. Se observa un cambio de %T en aprox. 1740cm<sup>-1</sup> debido a grupos carbonilo (C=O).

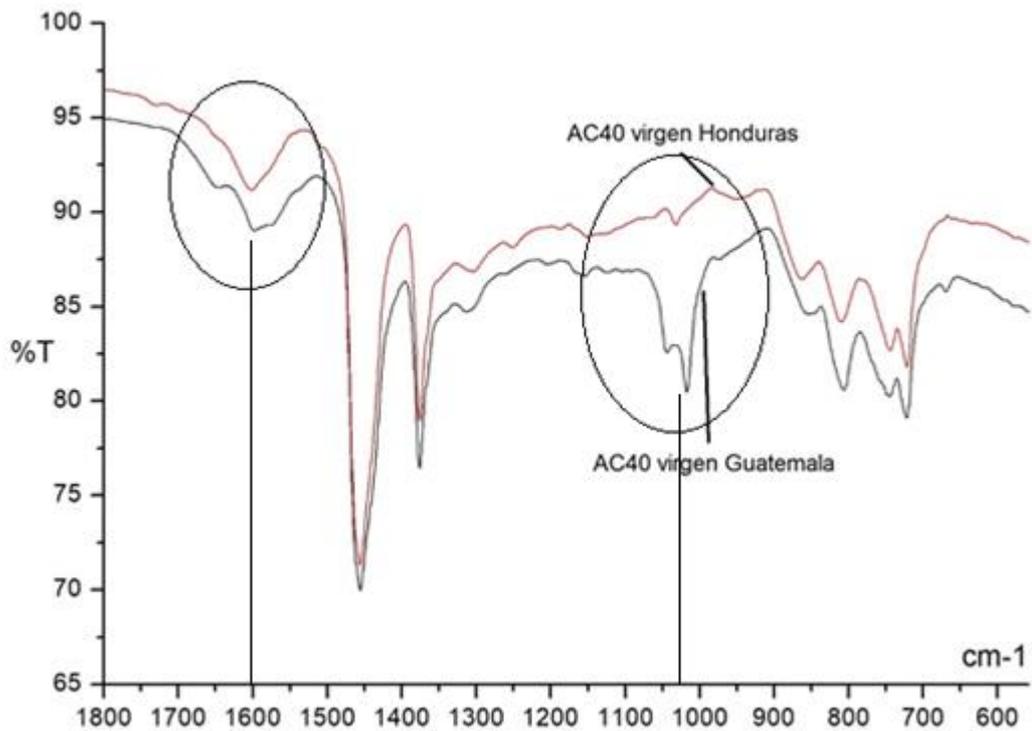
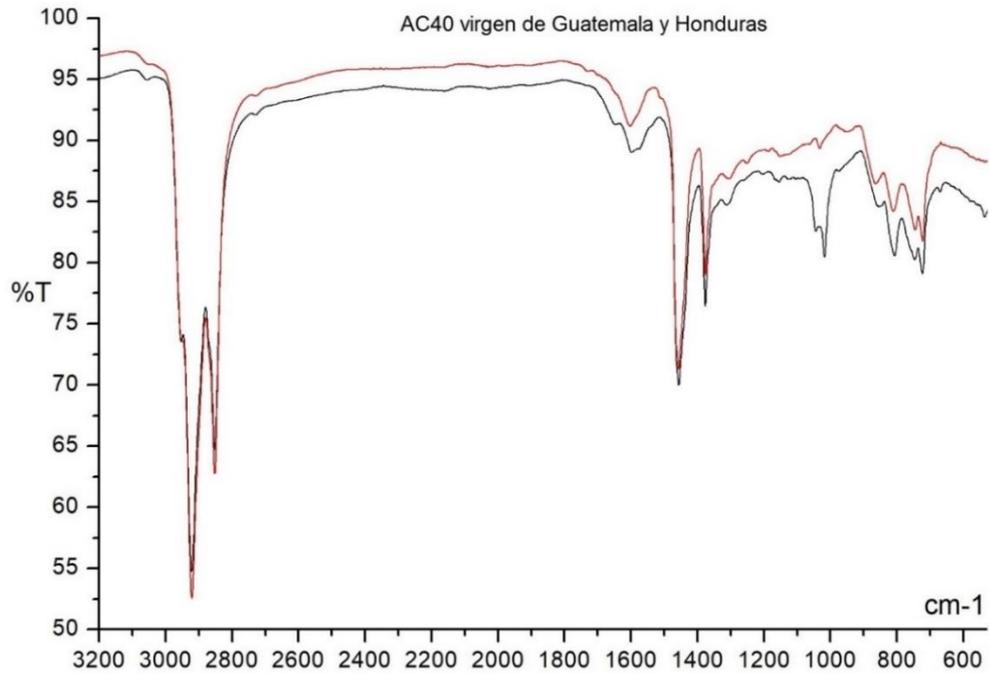


Figura 30 Espectros IR de AC40 vírgenes de Guatemala y Honduras\*

Notas:

\* %T se refiere al porcentaje de transmitancia en un rango de 0% a 100%.

\* En la Figura 30 se observan los espectros IR de dos asfalto AC40; de Guatemala y Honduras. Los picos en aprox.  $1600\text{cm}^{-1}$  y  $1050\text{cm}^{-1}$  presentan formas diferentes por la variación en concentración de compuestos aromáticos y éteres.

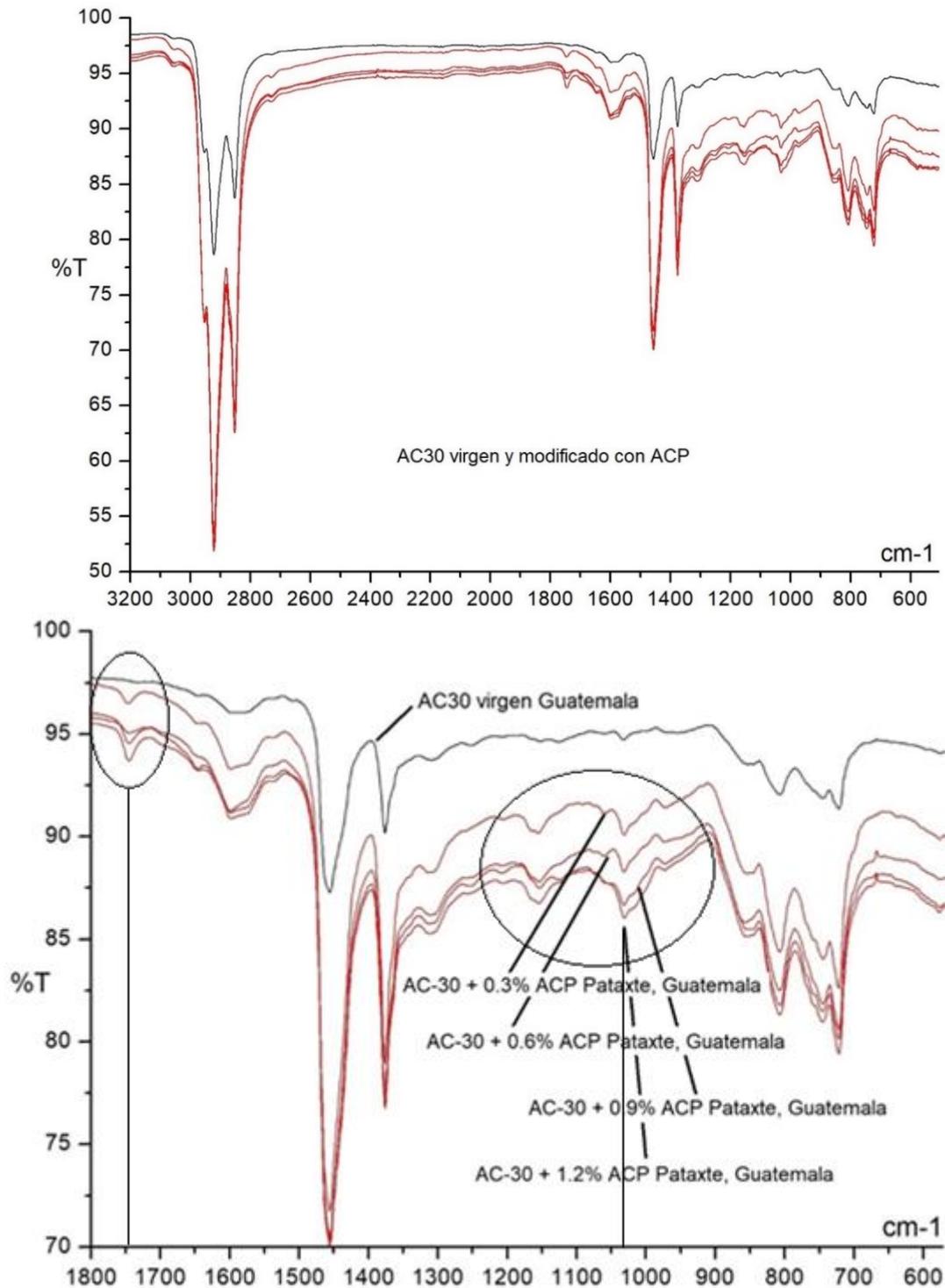


Figura 31 Espectros IR de AC30 de Guatemala virgen y modificado con diferentes porcentajes de ACP de Pataxte\*

Notas:

\* %T se refiere al porcentaje de transmitancia en un rango de 0% a 100%.

\* En la Figura 31 se comparan espectros IR de asfaltos AC30 de Brasil modificados con ACP y un asfalto virgen de Guatemala. Se observa un cambio de %T en aprox. 1740cm<sup>-1</sup> debido a grupos carbonilo (C=O). También se observa una pequeña variación en el pico en aprox. 1030cm<sup>-1</sup> debido a grupos éteres alifáticos.

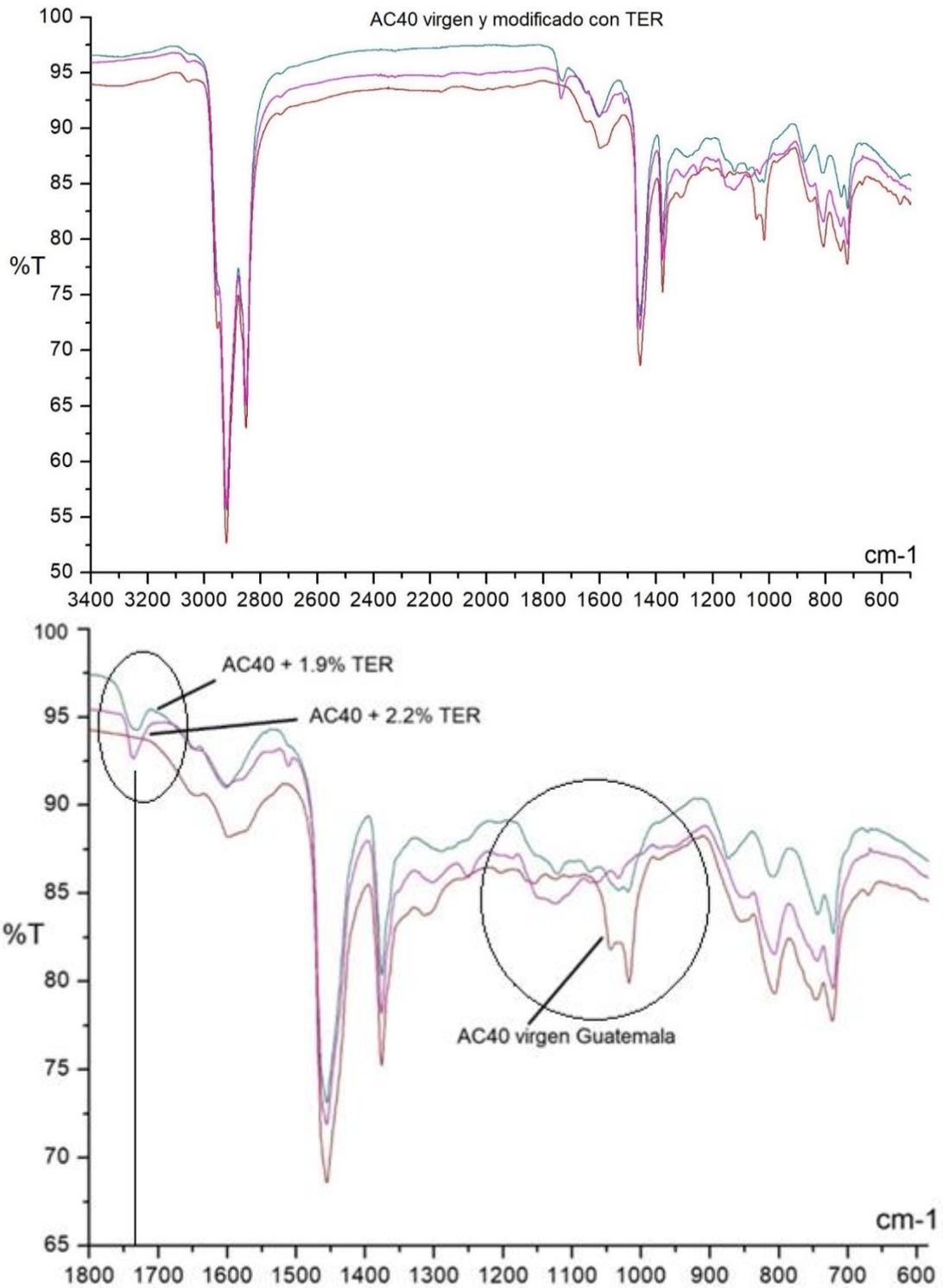


Figura 32 Espectros IR de AC40 de Guatemala virgen y modificado con diferentes porcentajes de TER\*

Notas:

\* %T se refiere al porcentaje de transmitancia en un rango de 0% a 100%.

\* En la Figura 32 se comparan espectros IR de asfaltos AC40 de Guatemala modificados con TER y un asfalto virgen de Guatemala. Se observa un aparición de un pico en aprox. 1740cm<sup>-1</sup> debido a grupos carbonilo (C=O). En asfaltos de esta viscosidad se observa un comportamiento de deseado en el rango de 1200cm<sup>-1</sup> a 950cm<sup>-1</sup> que se debe a la presencia de grupos de éteres alifático.

Tabla 14 Características técnicas del espectrofotómetro de haz infrarrojo con Transformada de Fourier (FTIR)

Marca	Perkin Elmer
Software	Perkin Elmer versión 10.5.4
Rango	4000 – 400 cm <sup>-1</sup> / 0 – 100 %T y %Abs

Tabla 15 Características técnicas del penetrómetro

Marca	Matest
Modelo	YB057
Unidad	dmm
Rango	0 – 500 dmm
Incertidumbre	±0.5 dmm
Carga de ensayo	100g (Émbolo:97.5g y Aguja:2.5g)

Tabla 16 Características técnicas del aparato de anillo y bola digital automático

Modelo	B070N
Unidad	°C
Rango	0 – 250 °C
Incertidumbre	±0.1 °C
Gradiente de temperatura	5°C / min
Velocidad de agitador	0 – 160 rpm

Tabla 17 Características técnicas del picnómetro de Hubbard

Capacidad	25 ml
Esmerilado hembra	24/15
Boca esmerilada	Ancha
Ajuste por nivelación	A la salida del capilar

Tabla 18 Características técnicas del viscosímetro de Brookfield

Marca	Brookfield
Unidad	Pa*s
Rango de viscosidad	0.1500 – 6000 Pa*s
Precisión	1%
Incertidumbre	±0.0001 Pa*s
Vástago	No. 27

\*El número de vástago depende de la muestra para analizar.

Tabla 19 Propiedades físicas y químicas del etanol absoluto grado reactivo

Precaución	Altamente inflamable en forma líquida y vapor. Puede causar irritación grave en ojos.
Fórmula	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH
Número índice	603-002-00-5
Masa molar	46.07 g/mol
Forma	Líquido
Color	Incoloro
Punto fusión	-114.5 °C
Punto de ebullición	78.3 °C

### Cálculo de la gravedad específica del asfalto

$$G. v. = \frac{T_{AC}-T}{(T_{H_2O}-T)-(T_{H_2O+AC}-T_{AC})} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

G.v. = gravedad específica

T = Masa de picnómetro

T<sub>H<sub>2</sub>O</sub> = Masa picnómetro con agua

T<sub>AC</sub> = Masa picnómetro con asfalto

T<sub>AC+H<sub>2</sub>O</sub> = Masa picnómetro con asfalto y agua

### Análisis de error

En el cálculo de valores experimentales existe cierto error por cada dato medido. A este error se le llama desviación estándar. En la siguiente tabla se encuentran las ecuaciones para calcular la desviación estándar de un valor calculado con diferentes operaciones aritméticas. (Skoog, D., Holler F., Crouch. 2008)

Tabla 20 Propagación de error en los cálculos aritméticos

Tipo de cálculo	Ejemplo <sup>a</sup>	Desviación estándar de y
Adición o sustracción	$x = p + q - r$	$s_x = \sqrt{s_p^2 + s_q^2 + s_r^2}$
Multiplicación o división	$x = p \times q/r$	$\frac{s_x}{x} = \sqrt{\left(\frac{s_p}{p}\right)^2 + \left(\frac{s_q}{q}\right)^2 + \left(\frac{s_r}{r}\right)^2}$
Exponenciación	$x = p^y$	$\frac{s_x}{x} = y\left(\frac{s_p}{p}\right)$
Logaritmo	$x = \log_{10} p$	$s_x = 0.434 \frac{s_p}{p}$
Antilogaritmo	$x = \text{antilog}_{10} p$	$\frac{s_x}{x} = 2.303 s_p$

\*p, q, y r son variables experimentales cuyas desviaciones estándar son Sp, Sq y Sr, respectivamente (Skoog, D. *et al.*, 2008)

De las ecuaciones de la tabla anterior, se utilizaron las siguientes:

Desviación estándar de una suma aritmética:

$$s_x = \sqrt{s_p^2 + s_q^2 + s_r^2} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Desviación estándar de una multiplicación o división aritmética:

$$\frac{s_x}{x} = \sqrt{\left(\frac{s_p}{p}\right)^2 + \left(\frac{s_q}{q}\right)^2 + \left(\frac{s_r}{r}\right)^2} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Cálculo de desviación estándar de valores calculados:

Cálculo 1: Propagación de error en el punto de penetración promedio para la muestra AC30 de Guatemala con 0.6% de ACP de Pataxte:

Valores experimentales:

Punto de penetración 1 = 61.0±0.5 dmm

Punto de penetración 2 = 60.4±0.5 dmm

Punto de penetración 3 = 60.7±0.5 dmm

Valor promedio = 60.7 dmm

$$S_X = \sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}$$
$$S_X = \sqrt{0.5^2 + 0.5^2 + 0.5^2}$$
$$S_X = \pm 0.9$$

El resultado es entonces el promedio de las tres mediciones:

$$\text{Punto de penetración} = \frac{61.0 + 60.4 + 60.7}{3} = 60.7 \pm 0.9 \text{ dmm}$$

\*Se determinó de igual manera el valor promedio del punto de ablandamiento, gravedad específica y viscosidades de cada muestra analizada de asfalto virgen y modificado.

Cálculo 2: Determinación de la gravedad específica del asfalto AC30 de Guatemala con 0.6% de ACP de Pataxte:

T = 32.70±0.01g

T<sub>H2O</sub> = 58.27±0.01g

T<sub>AC</sub> = 46.42±0.01g

T<sub>AC+H2O</sub> = 59.12±0.01g

$$G. v. = \frac{46.42g - 32.70g}{(58.27g - 32.70g) - (59.12g - 46.42g)}$$

$$G. v. = 1.0660 \pm 0.0005$$

## XIII. GLOSARIO

ACP: aceite crudo de palma.

Bitumen asfáltico o asfalto: mezcla de sustancias orgánicas altamente viscosa, negra, de alta densidad compuesta principalmente por hidrocarburos aromáticos policíclicos.

Compuesto o grupo lábil: lábil significa poco estable o seguro. Se refiere a un compuesto químico que se transforma con facilidad en otro más estable.

Espectro de infrarrojo. Gráfico donde se presentan las bandas o picos de la absorción o transmitancia en los enlaces de una muestra (eje Y) contra la longitud o número de onda en infrarrojo (eje X).

Estearina: la estearina es un sub producto del aceite crudo de palma. Utilizado como modificador en muestras de asfalto.

Monómero: molécula simple, generalmente de peso molecular bajo, que forma cadenas lineales o ramificadas de dos, tres o más unidades.

Pico característico IR: La técnica IR genera diagramas en segunda dimensión con el eje de la abscisa porcentaje de transmitancia (%T) y la ordenada número de onda ( $\text{cm}^{-1}$ ), en estos diagramas o espectros IR se presenta una línea en forma de picos ubicados en un rango determinado. Se le llama característico porque según los grupos químicos orgánicos de una molécula los picos se presentan en cierto número de onda y cierto %T.

PMB: betún modificado con polímero, por sus siglas en inglés; Polymer modified bitumen.

Polimerización: Proceso mediante el cual las moléculas simples, iguales o diferentes, reaccionan entre sí por adición o condensación y forman otras moléculas de peso doble, triple, etc.

Polímero: sustancia química que resulta de un proceso de polimerización.

Reología: es la rama de la física de medios continuos que se dedica al estudio de la deformación y el flujo de la materia.

TER: terpolímero elastomérico reactivo.