

## Estudio del comportamiento de asfaltos obtenidos por mezclas a partir de un componente duro Lagotreco y componentes blandos de Crudo de Propósitos Generales (CPG) y Tía Juana Mediano (TJM-26)

Autores:

Favia J. Cabeza <sup>(1)</sup>, Benjamín Hidalgo-Prada <sup>(2)</sup>, y Franklin Valles <sup>(3)</sup>

- (1) Depto. de Química, Escuela de Ciencias, Universidad de Oriente, Ave. Universidad, Cumana, Estado Sucre, Venezuela [faviacabeza@gmail.com](mailto:faviacabeza@gmail.com)
- (2) Laboratorio de Caracterización de Materiales, IIBCAUDO "Dra. Susan Tai", Universidad de Oriente, Ave. Universidad, Cerro del Medio, 0293-4521297, [hidalgoben@gmail.com](mailto:hidalgoben@gmail.com)
- (3) Centro de Refinación de Paraguaná, PDVSA – AMUAY, Estado Falcón, Venezuela, [vallesf@pdvsa.com](mailto:vallesf@pdvsa.com)

### Resumen

Se estudió el comportamiento de asfaltos obtenidos por mezclas a partir de un componente duro Lagotreco y componentes blandos de crudo de propósitos generales (CPG) y tía Juana mediano (TJM-26). Se prepararon quince (15) mezclas asfálticas incluyendo a los asfaltos de partida. Se diseñaron ensayos de análisis químico, composición elemental, propiedades fisicoquímicas, métodos oxidativos por RTFOT y PAV y ensayos reológicos por el BBR y el DSR, todos estos procedimientos validados por normas. Los resultados obtenidos indican que nueve (9) mezclas asfálticas {1 (75% TJM-26 + 25% CPG), 2 (50% TJM-26 + 50% CPG), 13 (100% CPG), 8 (50% TJM-26 + 50% Lagotreco), 5 (50% CPG + 50% Lagotreco), 6 (25% CPG + 75% Lagotreco), 9 (25% TJM-26 + 75% Lagotreco), 12 (50% TJM-26 + 25% CPG + 25% Lagotreco) y 15 (100% Lagotreco)}, pudieron ser clasificadas como Asfalto de Grado Comercial (AsGC); adicionalmente todas las mezclas presentaron en mayor o menor grado estrecha dependencia de su composición SARA, de manera que cuando aumenta en proporción el componente duro, los asfaltenos se incrementan ya que son directamente proporcionales. La mezcla asfáltica 3 resultó con mayor resistencia a la deflexión. Las mezclas asfálticas 9 y 12 están dentro de todos los rangos de temperaturas establecidos y cumplieron las condiciones  $G^*/\sin(\delta) \geq 1,00$  kPa,  $G^*/\sin(\delta) \geq 2,20$  kPa y  $G^* \cdot \sin(\delta) \leq 5000$  kPa, indicando esto que no sufrirán de falla por deformación permanente o fisuración térmica. La mezcla 12 (50% TJM-26 + 25% CPG + 25% Lagotreco) produjo una mejor respuesta a las condiciones de servicio, constituyéndose así en la mejor de las combinaciones de proporción de asfaltos y de propiedades viscoelásticas del presente estudio. El diseño de nuevas mezclas asfálticas contribuye al desarrollo de asfaltos que posean propiedades adecuadas para su uso como pavimento aplicando todos los ensayos para su caracterización, a fin de garantizar asfaltos de excelente calidad, ahorrando además la incorporación de aditivos de alto costo, beneficiando a la empresa PDVSA- Amuay- CRP y en general a la industria nacional que utiliza estos materiales viscoelásticos.

Palabras clave: mezclas asfálticas, SARA, reología.

## **Estudio del comportamiento de asfaltos obtenidos por mezclas a partir de un componente duro Lagotreco y componentes blandos de Crudo de Propósitos Generales (CPG) y Tía Juana Mediano (TJM-26)**

### **INTRODUCCIÓN**

#### **El asfalto**

Es un material sólido o semisólido de color marrón oscuro a negro, constituido principalmente por hidrocarburos de alta masa molecular que se puede obtener en forma natural o por medio de procesos de refinación del petróleo. Los petróleos crudos difieren en su composición entre sí, según la cuenca y yacimiento, dividiéndose en: parafínicos, nafténicos o mixtos que contienen otros átomos, como: oxígeno, nitrógeno y azufre. Otra forma de diferenciarlos es por la densidad o grado API (Instituto Americano de Petróleo), el cual se define como:

$$\text{Grado API} = (141,5 / \text{masa específica}) - 131,5$$

Un crudo de baja densidad API, por ejemplo de 11, permite deducir que se trata de un petróleo pesado con bajo contenido de destilados medios y livianos y alto nivel de asfalto, mientras que grados API elevados, como pueden ser de 36 o superiores, indican bajo nivel de pesados. Debido a que el asfalto es la base constituyente pesada del petróleo crudo, no se evapora o hierve cuando es destilado. En consecuencia, el asfalto es obtenido como residuo o producto residual y es valioso para una gran variedad de usos arquitectónicos o ingenieriles, aunque su uso principal es como ligante en la preparación de mezclas para la construcción de carreteras. También, se usa en la fabricación de láminas para techo, bloques para aceras o caminos, revestimiento para paredes, vehículos y techos (1).

En el pasado, las refinerías rara vez cambiaban sus fuentes de abastecimiento de crudo. Esto llevó a que las fuentes de asfalto tuvieran, también, propiedades consistentes. Al integrarse el cambio del abastecimiento de crudo en la refinería, se crearon más variaciones en las propiedades del asfalto, tanto físicas como químicas. De estas variaciones, derivó la necesidad de evaluar el comportamiento del asfalto ante condiciones particulares y predecir su rendimiento en términos de conocidas formas de esfuerzo.

#### **Propiedades químicas elementales**

El análisis químico de SARA (llamado SARA por S: saturados, A: aromáticos, R: resinas y A: asfaltenos) llevado a cabo por cromatografía de capa fina acoplada a un detector de ionización a la llama (TLC/FID de las siglas en inglés), se aplica a los asfaltos para la determinación de sus componentes mayoritarios pertenecientes a su estructura química compleja.

Para determinar la composición química de un material como el asfalto y sus mezclas se utilizan las técnicas de precipitación, extracción, destilación, combustión, inducción y pirólisis, con el fin de identificar las especies atómicas, moléculas o agrupaciones moleculares que la componen en forma cualitativa y cuantitativa de carbono, hidrógeno, nitrógeno, azufre y oxígeno, que se pueden obtener mediante dichas técnicas (2).

### **Propiedades fisicoquímicas**

#### **Punto de penetración.**

El punto de penetración realizado a 25°C (temperatura elegida como el promedio de la temperatura de servicio del pavimento) es una técnica que se utiliza para determinar la consistencia, rigidez o dureza de un material asfáltico; también se puede usar para la clasificación de dicho material según la tabla de Asfaltos Grados Comerciales.

#### **Viscosidades.**

Las especificaciones de los asfaltos y sus mezclas asfálticas clasificados según su viscosidad se basan, por lo común, en los rangos de viscosidad absoluta a 60°C. También se especifica generalmente una viscosidad cinemática mínima a 135°C, cuyo propósito es dar valores límites de consistencia del asfalto a estas dos temperaturas. Se eligió la temperatura de 60°C porque se aproxima a la máxima temperatura superficial de las carreteras en servicio pavimentadas con mezclas asfálticas en los Estados Unidos, y en cualquier otra parte del mundo en donde la construcción de caminos progresa; y la de 135°C, en vista a que se aproxima a la de mezclado y distribución de mezclas asfálticas en caliente para pavimentación (3).

El ensayo de viscosidad rotacional es usado para determinar las características de flujo del ligante asfáltico, por cuanto facilita información sobre las propiedades de manejabilidad y bombeo del asfalto en la planta de mezcla en caliente y calcula automáticamente la viscosidad a la temperatura de ensayo. Este ensayo es determinado por la medida del esfuerzo de la muestra de asfalto al no dejarse deformar por la aguja que gira a una velocidad rotacional constante, cuando es sumergida en una muestra de ligante asfáltico que se encuentra a temperatura constantemente controlada.

#### **Punto de ablandamiento.**

El punto de ablandamiento se define como la temperatura que necesita el asfalto para alcanzar un determinado estado de fluidez, pasando del estado plástico semisólido al estado líquido. Esto se debe a que los asfaltos son materiales que presentan termoplasticidad, pues son afectados por los cambios de temperatura (3).

## Envejecimiento oxidativo

El horno de envejecimiento en película delgada rotatoria por sus siglas en inglés RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test), tiene doble propósito. El primero es para obtener un ligante asfáltico envejecido que pueda ser usado para ensayos adicionales de pruebas físicas. El segundo es para determinar la cantidad másica de compuestos volátiles que el asfalto pierde durante el proceso de envejecimiento. La pérdida de masa por volátiles es una indicación del envejecimiento que puede suceder durante las operaciones de mezcla y construcción, simulando el proceso de fabricación de la mezcla en caliente en condiciones similares del tambor mezclador-secador (4).

Como los asfaltos están compuestos por moléculas orgánicas, pueden reaccionar con el oxígeno del medio ambiente. Esta reacción se denomina oxidación, la cual cambia la estructura y composición de las moléculas del asfalto haciéndolo más frágil. La inapropiada compactación puede generar oxidación o endurecimiento prematuro. En estos casos, los inadecuados niveles de compactación tienen altos porcentajes de vacíos de aire interconectados, que permiten que más aire o el agua penetren en la mezcla acelerando la oxidación (5).

La cámara de envejecimiento a presión, por sus siglas en inglés PAV (Pressure Aging Vessel), consiste en un procedimiento de laboratorio desarrollado por la tecnología del programa estratégico de investigaciones de carreteras, por sus siglas en inglés SHRP (Strategic Highway Research Program), un equipo específicamente desarrollado para realizar un envejecimiento artificial y acelerado de los asfaltos en servicio. En vista de la difusión que han tenido en los últimos años las nuevas especificaciones y ensayos de SUPERPAVE para ligantes asfálticos y sus posibles usos en Venezuela por parte de la Industria Petrolera Nacional, la tecnología ha sido realizada con el apoyo parcial del Instituto Venezolano del Asfalto (6).

El sistema SUPERPAVE se apoya en los principios básicos de comportamiento de los asfaltos, reconociendo que estos dependen de la temperatura y tiempo de carga. A altas temperaturas (climas cálidos) o bajo cargas sostenidas (camiones a baja velocidad), el asfalto se comporta como un líquido viscoso y fluye quedando expuesto a deformación permanente. A bajas temperaturas (próximas a congelación) o corto tiempo de carga (camiones a alta velocidad) el asfalto se comporta como un sólido elástico y por tanto propenso a agrietamientos (7).

Para predecir este comportamiento de los pavimentos, los proponentes del sistema SUPERPAVE concentraron su investigación en el control de tres problemas específicos que presentan los pavimentos:

### **Problema 1. Deformación permanente**

Representa la acumulación de pequeñas deformaciones producidas por las aplicaciones de carga y se caracteriza por una sección transversal de la superficie, que ya no ocupa su posición original y se asocia a las altas temperaturas, condiciones que requieren que el asfalto no solo sea consistente, sino lo más parecido posible a un sólido elástico a alta temperatura. Por lo general, este defecto se desarrolla gradualmente con el incremento de las aplicaciones de carga, típicamente aparece como una depresión longitudinal en la trayectoria de la llanta, algunas veces acompañada por pequeños levantamientos a los lados.

### **Problema 2. Agrietamiento por fatiga**

También llamado “piel de cocodrilo”, generalmente ocurre cuando el pavimento es esforzado al límite de fatiga por repetidas aplicaciones de carga y deformaciones elásticas excesivas. El problema se incrementa con un inadecuado drenaje en el pavimento que contribuye a fallas, permitiendo que las capas de pavimento se saturen, pierdan resistencia y sobre todo rigidez.

### **Problema 3. Agrietamiento a baja temperatura**

Se caracteriza por fisuras transversales causadas por condiciones climáticas adversas. Para esta forma de fisuración el tipo de asfalto juega un papel central, siendo los asfaltos duros y susceptibles a la oxidación los más propensos a la fisuración, por lo cual es recomendable seleccionar los asfaltos blandos y menos susceptibles (5).

### **Reología**

Es la ciencia que estudia la deformación de un material y comprende el análisis y evaluación de la respuesta de los materiales a la aplicación de tensiones o cargas dependientes de la temperatura y el tiempo (8). La reología es una de las ciencias que ha sido más descuidada en la escogencia del tipo de asfalto para preparar mezclas asfálticas, en las cuales la deformación es dependiente del tiempo, y que ocurre cuando el material es sometido a cargas estáticas o dinámicas o a variaciones de temperatura. Se requiere entonces que el asfalto pueda deformarse adecuadamente para liberar tensiones inducidas por estos cambios, si se desea prevenir o minimizar las fallas por fractura de la estructura o su deformación permanente.

Aun cuando un pavimento flexible puede seguir funcionando después que se produce una fractura térmica transversal, el efecto a largo plazo de la infiltración de agua o de los cambios bruscos de temperatura, pueden debilitarlo y producir daños en el sistema estructural del mismo. Es por ello que la calidad tanto de los agregados minerales como el asfalto empleado, determinarán en gran medida el comportamiento en servicio y la durabilidad del pavimento (9).

## Medidas de propiedades reológicas

El reómetro de viga de flexión, por las siglas en inglés BBR (Bending Beam Rheometer), es un equipo específicamente diseñado para determinar la propiedad del asfalto a bajas temperaturas. Se usa para medir cómo el asfalto fluye bajo carga y temperaturas de servicio mínimas del pavimento, cuando éste actúa más como un sólido elástico. De esta manera, el ensayo se realiza sobre el asfalto doblemente envejecido en RTFOT y PAV. El BBR mide la deformación producida continuamente, calculando la resistencia del ligante a la acción de la carga y su velocidad de variación. Los valores obtenidos se relacionan con la resistencia a la fisuración térmica o agrietamiento a baja temperatura de las mezclas asfálticas.

El reómetro de corte dinámico, equipo denominado por sus siglas en inglés DSR (Dynamic Shear Rheometer), es usado para caracterizar tanto el comportamiento viscoso como elástico, a través de la medida del módulo de cizallamiento complejo ( $G^*$ ) y el ángulo de fase ( $\delta$ ) de las mezclas asfálticas, para temperaturas altas e intermedias. Las especificaciones SUPERPAVE utilizan de dos maneras los valores de  $G^*$  y  $\delta$ . La capacidad del ligante a resistir deformaciones permanentes está gobernada por la relación  $G^*/\sin \delta$  a la temperatura de ensayo; este valor debe ser mayor a 1 kPa en el ligante original y mayor a 2,2 kPa para el ligante con envejecimiento corto. Para controlar el agrietamiento por fatiga el ensayo se realiza en el ligante con envejecimiento corto (RTFO) y largo (PAV) a la temperatura promedio y las especificaciones recomiendan que en este caso, el valor  $G^* \cdot \sin \delta$  sea menor o igual a 5000 kPa, para simular el proceso constructivo y años de servicio y a tasas de carga compatibles con el tráfico (tiempo= 0,1 s; Velocidad= 80 km/h) (9).

En el presente trabajo se prepararon mezclas asfálticas con diferentes proporciones de un componente duro Lagoteco y componentes blandos de Tía Juana mediano veintiséis (TJM-26) y crudo de propósitos generales (CPG), existentes en la Refinería de PDVSA (CRP-AMUAY) en el estado Falcón. Se propuso como alternativa la investigación, el desarrollo de mezclas asfálticas, en las cuales los componentes del asfalto fueron separados y evaluados usando la solubilidad de sus moléculas en diferentes solventes por medio de un análisis cromatográfico SARA. También se realizó un análisis elemental de carbono, hidrógeno, nitrógeno, azufre y oxígeno, siendo este último una prueba nueva que se realizó a cada uno de los asfaltos y sus mezclas, donde la composición de cada mezcla varía dependiendo de las proporciones. Como complemento y para dar valor agregado a este estudio, las mezclas fueron sometidas a envejecimiento, análisis reológico y fisicoquímico para establecer la combinación óptima de mezcla y sus propiedades.



## METODOLOGÍA

### Materiales

Para el desarrollo de los objetivos específicos y la obtención de los datos experimentales de este trabajo de investigación, se utilizaron asfaltos obtenidos a través de la refinación de tres tipos de petróleo crudo de distintos grados API, a estos asfaltos se les llamó con el mismo nombre de su procedencia y se clasificaron como componente duro y blando. Cumpliéndose de esta manera el estudio de los asfaltos obtenidos por mezclas a partir de un componente duro Lagotreco y componentes blandos de Crudo de Propósitos Generales (CPG) y Tía Juana Mediano (TJM-26), mientras que para realizar los ensayos de interés se usaron los equipos instalados en el Laboratorio de Amuay, en las áreas de Analítica I y de crudo del Centro Refinador Paraguaná, PDVSA (CRP-AMUAY). Los estudios químicos de los asfaltos y sus mezclas se llevaron a cabo en PDVSA-INTEVEP, quienes suministraron los equipos, materiales, reactivos y apoyo calificado.

### Proporciones de mezclas

Para la obtención de las mezclas asfálticas se utilizó un agitador de baja revolución, marca VELP y modelo DLH, luego se procedió a recolectar las muestras de asfalto duro Lagotreco y blandos Crudo de Propósitos Generales (CPG) y Tía Juana Mediano (TJM-26) en envases de un galón, los cuales fueron calentadas en un horno a 90°C por una hora, hasta que estuvieran fluidos, mientras se tomaron envases de un cuarto de litro para realizar las proporciones de mezclas y evitar el calentamiento excesivo de las muestras, con la identificación respectiva en cada una de los envases usados, con un tiempo de mezclado de 45 minutos a 200 revoluciones por minuto y una temperatura controlada de 90°C para su homogenización.

### Análisis químico elemental

Para la determinación del análisis de SARA por cromatografía en capa fina acoplada a un detector de ionización a la llama (TLC/FID de las siglas en inglés), marca IATROSCAN, modelo SES-A-4100, se realizó por la norma de desarrollo de INTEVEP (AE 0207 - 2001). El método que se utilizó para la determinación elemental de C, H y N en productos de petróleo y lubricantes se basó en la norma ASTM D-5291, bajo el siguiente código de análisis: 1570 para C-H y 1000 para el N. El método para la determinación de azufre en productos de petróleo, basado en la norma ASTM D-1552, bajo el siguiente código de análisis: 1535 azufre por Inducción. En este método el azufre se determinó pesando una pequeña porción de la muestra en un crisol de cerámica adicionando hierro metálico y El LECOCEL como catalizadores. El método para la determinación de oxígeno total en gasolina y metanol, se llevó a cabo por el método de pirólisis reductora, bajo el siguiente código de análisis: 1591 oxígeno en muestras orgánicas, basado en la norma ASTM D-5622.

### **Análisis fisicoquímico**

Para la determinación del punto de penetración se utilizó un penetrómetro, marca Precision, modelo 73515, bajo la norma ASTM D-5. Para el ensayo del punto de ablandamiento se utilizó un equipo marca Herzog, modelo Lauda, bajo la norma ASTM D-36. Para el ensayo de viscosidad absoluta a 60°C se empleó un viscosímetro de vacío CANNON de doble bulbo, modelo CT-1000, bajo la norma ASTM D-2171. Para el ensayo de la viscosidad cinemática a 135°C se empleó un viscosímetro CANNON de brazo cruzado, modelo CT-1000, bajo la norma ASTM D-2170. Para el ensayo de la viscosidad rotacional, se utilizó un equipo Brookfield, modelo DV-III, bajo la norma ASTM D-4402.

### **Ensayos de envejecimiento**

El ensayo de envejecimiento por película fina rotativa en estufa (RTFOT), marca James Cox & Cons inc, modelo CS325-A, se muestra en la figura 14, bajo la norma ASTM D-2872 y especificación AASHTO T-240. Este ensayo se realizó en el recipiente de cámara de envejecimiento a presión (PAV) marca Prentex, modelo 9300, bajo la norma ASTM D-6521 y especificación AASHTO PP-1; la prueba consistió en someter las muestras provenientes del RTFOT.

### **Análisis reológico**

Para el análisis reológico, se utilizó un reómetro de flexión (BBR), marca CANNON, modelo 1020-C, realizado bajo la norma ASTM D-6648 y especificación AASHTO TP-1. El ensayo se realizó tres veces a temperaturas de -12°C, -18°C y -24°C por cada mezcla de asfalto obtenida (15 mezclas). Los análisis en el reómetro de corte dinámico (DSR), se efectuaron en un equipo marca TA Instruments LTD, modelo CSAII (figura 20), bajo la norma ASTM D-7175 y especificación AASHTO TP-5, en donde las mezclas asfálticas fueron previamente calentadas y agregadas en un molde en forma circular y enfriada a temperatura ambiente. Este ensayo se realizó tres veces a diferentes temperaturas por cada mezcla de asfalto obtenida (15 mezclas).

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **Propiedades químicas elementales de las mezclas asfálticas**

En la figura 1, se ilustra el comportamiento de las isoterma a 220°C de los componentes SARA, expresados en porcentaje de masa (% m/m) en función de un componente blando CPG y un componente duro Lagotrec, para las cinco proporciones de mezclas asfálticas. De forma general la isoterma que se encontró en mayor proporción a lo largo de las mezclas hechas fueron los compuestos aromáticos.



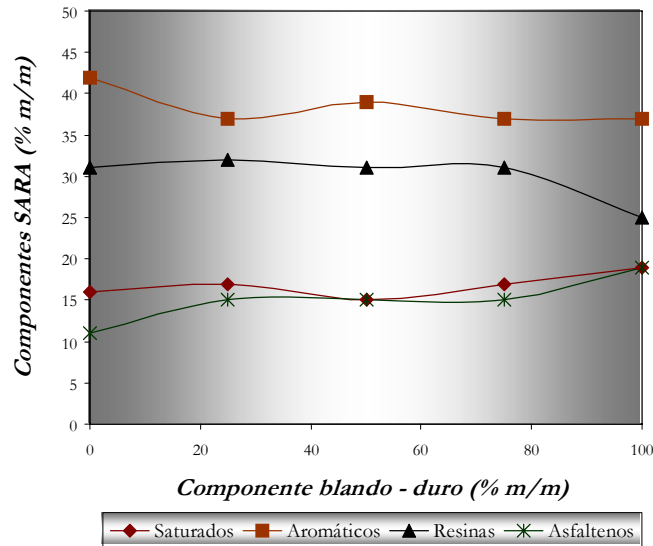


Figura 1. Fracciones de los asfaltos y sus mezclas con relación a los hidrocarburos presentes para un componente blando y duro (CPG y Lagotreco).

La isoterma de las resinas a 220°C se mantiene relativamente estable a lo largo del gráfico y en el último punto desciende por el incremento del componente duro que no logra darle a las moléculas el espacio necesario para su movilidad. Se puede observar como aumenta la isoterma de los asfaltenos desde el tercer punto al quinto punto, esto junto con los aromáticos pudiera haber influido en el hecho que las mezclas 4 (75% CPG + 25% Lagotreco), 5 (50% CPG + 50% Lagotreco) y 6 (25% CPG + 75% Lagotreco) pudieran tener un punto de ablandamiento más elevado, absorbiendo mayor gasto de energía, incrementando su temperatura y, por ende, aumentando paulatinamente las viscosidades absoluta, cinemática y rotacional como podrá demostrarse en el estudio del comportamiento fisicoquímico de estas mezclas.

Esta correlación está directamente relacionada con el nivel de los asfaltenos dándole mayor dureza y viscosidad a la mezcla 6. La isoterma del componente saturado se encuentra por encima y en dos puntos (el tercer y el quinto) coexisten con los asfaltenos, lo cual hace que los enlaces carbono-carbono se incrementen dentro de la estructura interna y tengan menos espacios disponibles y sean más propensos a tener menor elasticidad, ya que si son muy viscosos, la elasticidad disminuye.

Los resultados que se muestran en la figura 2 ilustran el comportamiento de las isotermas a 220°C de los componentes SARA, expresados en porcentajes de masa (% m/m) en función del componente blando TJM-26 y el componente duro Lagotreco para las cinco proporciones de mezclas asfálticas. De manera general se notó el ascenso progresivo de la isoterma a 220°C del componente asfaltenos a lo largo del gráfico.

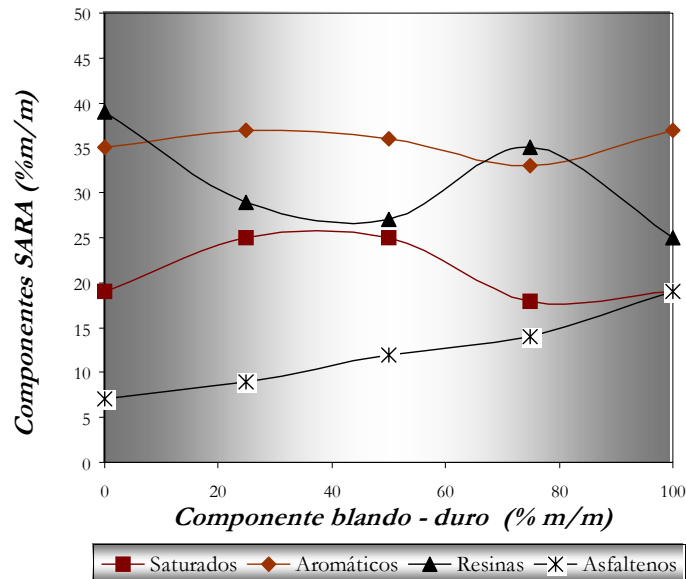


Figura 2. Fracciones de los asfaltos y sus mezclas con relación a los hidrocarburos presentes para un componente blando y uno duro (TJM-26 y Lagotreco).

En dos puntos (el primer y cuarto punto) la isoterma de las resinas tiene un valor más elevado que el de los aromáticos. No obstante, de la figura 2 se puede extraer que los componentes aromáticos están por encima de la isoterma de los saturados, lo cual significa que solo dos mezclas presentan mejor oportunidad para formar enlaces y espacios para la movilidad molecular dentro de la estructura de las mezclas asfálticas, la 9 (25% TJM-26 + 75% Lagotreco) y la 14 (100%TJM-26).

A pesar de que la isoterma a 220°C de los compuestos de hidrocarburos saturados se encuentran en dos puntos similares (segundo y tercer punto), el de menor valor (cuarto punto) ocurre cuando la proporción de las resinas es más alta y la cantidad de componentes aromáticos se aproxima a este valor, demostrándose que a pesar de poseer gran cantidad de enlaces que le otorgan movilidad a la estructura, estos se encuentran impedidos estéricamente por las grandes moléculas cíclicas de los componentes aromáticos y por la influencia de la cantidad más alta de asfaltenos, ya que estos aumentan drásticamente a medida que disminuye el componente blando TJM-26, con lo cual explicaría que pudieran presentar una alta viscosidad las mezclas asfálticas 7 (75% TJM-26 + 25% Lagotreco), 8 (50% Lagotreco + 50% TJM-26) y 9 (25% TJM-26 + 75% Lagotreco). Este análisis corrobora que son los asfaltenos los responsables de la alta viscosidad en los asfaltos y sus mezclas asfálticas. En la tabla 1 a continuación, se ilustran los resultados realizados a una temperatura de 220°C para los componentes SARA, expresados en porcentajes de masa (% m/m) para los componentes blandos CPG y TJM-26 y el componente duro Lagotreco en proporciones de mezclas asfálticas.

Tabla 1. Fracciones de los asfaltos y sus mezclas con relación a los hidrocarburos presentes para un componente duro y dos blandos (Lagotreco, TJM-26 y CPG).

Muestra	Saturados (% m/m)	Aromáticos (% m/m)	Resinas (% m/m)	Asfaltenos (% m/m)
Mezcla 14	19	35	39	7
Mezcla 13	16	42	31	11
Mezcla 12	16	37	36	11
Mezcla 11	17	38	35	10
Mezcla 10	20	35	32	13
Mezcla 15	19	37	25	19

En los análisis realizados a 220°C los componentes saturados muestran un aumento progresivo de los valores en las mezclas 12 (50% TJM-26 + 25% CPG + 25% Lagotreco), 11 (25% TJM-26 + 50% CPG + 25% Lagotreco) y 10 (25% TJM-26 + 25% CPG + 50% Lagotreco) cuando se incrementa la cantidad de componente duro, observándose un valor máximo en los aromáticos de la mezcla 11 y menor cantidad de resinas en la mezcla 10, todos estos resultados indican que a pesar de tener más enlaces en la cantidad de compuestos saturados, estos se ven afectados por el incremento de los asfaltenos, cediendo menos espacios, y los aromáticos con sus grandes estructuras ocupan mayor espacio y también restringen a las demás moléculas haciéndolas más viscosas y duras, lo que explica estos parámetros determinados. Sin embargo, la mezcla 12 (50% TJM.26 + 25% CPG + 25% Lagotreco) se ve más beneficiada por poseer en su constitución química menos asfaltenos y aromáticos y mayor cantidad de resinas permitiendo mayor fluidez y acomodo de las moléculas internamente en su estructura.

Por lo visto en las figuras 1, 2 y lo reflejado en la tabla 1, se puede decir que el componente duro influye directamente en el comportamiento de las mezclas asfálticas incrementando los asfaltenos, cuando descienden las resinas que están directamente vinculados con el nivel de saturados, contribuyendo este último la movilidad entre estos compuestos en la estructura interna de los asfaltos y sus mezclas. Otro factor que influye en el comportamiento de los asfaltos de partida y sus mezclas son sus constituyentes mayoritarios como lo son el carbono, el hidrógeno, el nitrógeno, el azufre y el oxígeno (6).

En la tabla 2, a continuación, se presentan los resultados obtenidos de las mezclas 4, 5, 6, 13 y 15 provenientes como resultados de dos componentes: uno duro Lagotreco y uno blando CPG, mostrando la composición elemental de carbono, hidrógeno, nitrógeno, azufre y oxígeno, para cada una de las mezclas asfálticas.

Tabla 2. Composición elemental de los asfaltos y sus mezclas con relación a los hidrocarburos presentes para un componente duro y uno blando (Lagotreco y CPG).

Composición elemental	CPG (13)	Mezcla 4	Mezcla 5	Mezcla 6	Lagotreco (15)
Carbono (% m/m)	81,49	81,24	81,50	80,85	81,07
Hidrógeno (% m/m)	9,12	8,39	8,68	9,16	7,91
Nitrógeno (% m/m)	0,83	< 0,75	0,77	0,77	0,75
Azufre (% m/m)	3,30	3,30	3,14	3,19	3,42
Oxígeno (% m/m)	<1	<1	<1	<1	<1

La mezcla 5 resultó tener la mayor cantidad del elemento carbono siendo ésta una proporción 50/50 de ambos componentes (duro y blando). Si se correlaciona con la gráfica de la figura 1, se nota que las isotermas de los componentes SARA muestran que los hidrocarburos aromáticos y las resinas tienen un leve incremento cuando aumenta el componente duro Lagotreco, lo cual indica que la cantidad mayoritaria de hidrógeno lo está aportando el componente blando con la capacidad de formar más enlaces con las reacciones internas que ocurren dentro de la estructura de esta mezcla asfáltica. Sin embargo, el azufre en esta mezcla se encuentra en menor proporción, indicando que los enlaces están siendo cedidos por el nitrógeno y el oxígeno para formar más moléculas grandes y complejas de carbono. El carbono, el hidrógeno y el azufre se encuentran dentro de los límites establecidos como componentes elementales.

En la tabla 3 se presentan los resultados de las mezclas 7, 8, 9, 14 y 15 provenientes de un componente duro Lagotreco y uno blando TJM-26, mostrando la composición elemental de carbono, hidrógeno, nitrógeno, azufre y oxígeno, para cada una de las mezclas asfálticas.

Tabla 3. Composición elemental de los asfaltos y sus mezclas con relación a los hidrocarburos presentes para un componente duro y uno blando (Lagotreco y TJM-26).

Composición elemental	TJM-26 (14)	Mezcla 7	Mezcla 8	Mezcla 9	Lagotreco (15)
Carbono (% m/m)	81,77	81,63	81,22	81,65	81,07
Hidrógeno (% m/m)	8,63	8,94	8,35	7,72	7,91
Nitrógeno (% m/m)	< 0,75	< 0,75	< 0,75	0,78	0,75
Azufre (% m/m)	2,88	2,80	3,30	2,76	3,42
Oxígeno (% m/m)	<1	<1	<1	<1	<1

Aquí se puede ver la influencia del componente blando en la mezcla 8 (50% Lagotreco + 50% TJM-26) pues decrece la cantidad de carbono con un aumento del azufre, lo que indica que este elemento está desplazando al carbono para formar enlaces con el hidrógeno, que se incrementa con el contenido de TJM-26. Se puede apreciar también

que la mezcla 9 (25% TJM-26 + 75% Lagotreco) es la que posee mayor cantidad de carbono y su cantidad de azufre es la más pequeña, es decir, ocurre lo contrario a la mezcla 8, lo cual implica que la cantidad de enlaces lo forman los componentes de las resinas como se muestra en la gráfica de la figura 2, que presentó su punto máximo en la mezcla 9 (25% TJM-26 + 75% Lagotreco) con el valor más alto. La presencia de determinados grupos funcionales capaces de formar enlaces tipo puentes de hidrógeno, que dan lugar a asociaciones intermoleculares de bastante tamaño, provoca un incremento importante de la viscosidad (5).

En la tabla 4 a continuación, se muestran los resultados de las mezclas 10, 11, 12, 13, 14 y 15, provenientes de un componente duro Lagotreco y dos blandos CPG y TJM-26, donde se reporta la composición elemental de carbono, hidrógeno, nitrógeno, azufre y oxígeno, para cada una de las mezclas asfálticas.

Tabla 4. Composición elemental de los asfaltos y sus mezclas con relación a los hidrocarburos presentes para un componente duro y dos blandos (Lagotreco, TJM-26 y CPG).

Composición elemental	TJM-26 (14)	CPG (13)	Mezcla 10	Mezcla 11	Mezcla 12	Lagotreco (15)
Carbono (% m/m)	81,77	81,49	81,61	81,12	81,66	81,07
Hidrógeno (% m/m)	8,63	9,12	8,76	7,60	8,35	7,91
Nitrógeno (% m/m)	< 0,75	0,83	0,73	0,76	0,75	0,75
Azufre (% m/m)	2,88	3,30	3,37	3,35	2,77	3,42
Oxígeno (% m/m)	<1	<1	<1	<1	<1	<1

Entre las mezclas 10, 11 y 12, la 11 (25% TJM-26 + 50% CPG + 25% Lagotreco) es la que contiene menor cantidad elemental de carbono y de hidrógeno, esto podría deberse al surgimiento de más reacciones entre los elementos nitrógeno y azufre que llegan a formar enlaces para hacer uniones con grandes grupos de moléculas. La mezcla 12 (50% TJM-26 + 25% CPG + 25% Lagotreco) es la que contiene mayor cantidad de carbono y menor contenido de azufre y nitrógeno en comparación con la mezcla 11 (25% TJM-26 + 50% CPG + 25% Lagotreco). En este sentido la mezcla 12 pudiera generar un mejor comportamiento en cuanto a su manejo fisicoquímico y también en la tabla 5, donde los valores muestran un menor contenido de asfaltenos ocasionando más interacciones con las resinas y los aromáticos produciendo una mezcla óptima de condiciones específicas en su contenido elemental.

En general, en las tablas 2, 3 y 4, la cantidad de oxígeno determinada dio un valor menor que uno (<1) en todas las mezclas analizadas por el método de cromatografía por inducción y no pudo leerse con exactitud el valor de este elemento en dichas mezclas por poseer menor cantidad que el valor requerido para su detección. No así, para el nitrógeno se pudo leer en algunas mezclas la cantidad del contenido de este elemento a pesar que el sistema de detección fue más pequeño que el del oxígeno.

## Propiedades fisicoquímicas y productividad de las mezclas asfálticas

La figura 3 ilustra el comportamiento de las isotermas a 25°C de la propiedad fisicoquímica del punto de penetración (mm), en función del componente blando y el componente duro para las quince proporciones de mezclas asfálticas, expresados en porcentajes de masa (% m/m)

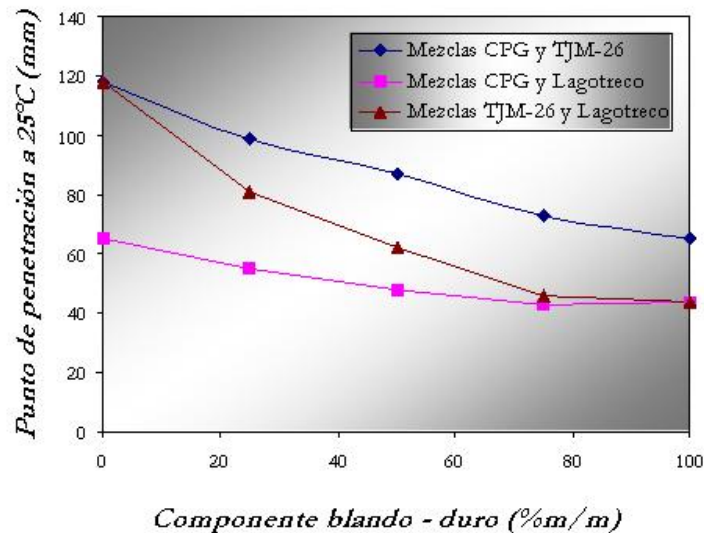


Figura 3. Isotermas a 25°C de la propiedad fisicoquímica del punto de penetración en función de la variación de los componentes blandos TJM-26 y CPG y el componente duro Lagotreco.

En los resultados de los análisis fisicoquímicos correspondientes al punto de penetración realizado tanto a los asfaltos de partida, como a las diferentes mezclas de asfaltos mostrados en la figura 3, se observó un descenso bastante pronunciado en la isoterma a 25°C de las mezclas TJM-26 y Lagotreco, tendencia influenciada mayormente por el componente duro Lagotreco cuando su proporción se incrementa en las mezclas. La figura 3 muestra que el punto de penetración para el asfalto 100% Lagotreco fue el más bajo de esta isoterma, lo cual indicaría que las mezclas que contienen este componente se vuelven más duras.

Estos resultados se corresponden con el incremento en el nivel de los asfaltenos observados en la caracterización de los componentes básicos de los diferentes asfaltos (Figura 2), lo que indica que los asfaltenos pudieran estar ocupando los espacios vacíos existentes en el asfalto, evitando que las moléculas más grandes, como los aromáticos, se muevan dentro de la estructura, haciendo el asfalto más rígido. Sin embargo, en la isoterma a 25°C de las mezclas CPG y Lagotreco ocurre un descenso menos notorio a pesar del incremento progresivo del componente duro Lagotreco, tal como se mostró en la figura 3.



Esto puede explicarse considerando que el componente blando CPG proviene de un petróleo crudo mediano con menor grado API (23° API) comparado con el TJM-26, lo cual lo hace menos blando; en esta isoterma como en la anterior también se incrementa el nivel de asfaltenos como se ilustró en la figura 1, pero aunque estos se incrementan cuando aumenta el componente duro, el nivel de los compuestos saturados es casi similar al de los asfaltenos, lo que les permite a estos ocupar los espacios disponibles que le brindan los enlaces provenientes de los compuestos saturados.

En la figura 4, se muestra el comportamiento de las isotermas de la propiedad fisicoquímica del punto de ablandamiento (°C), en función del componente blando y el componente duro para las quince proporciones de mezclas asfálticas, expresados en porcentajes de masa (% m/m).

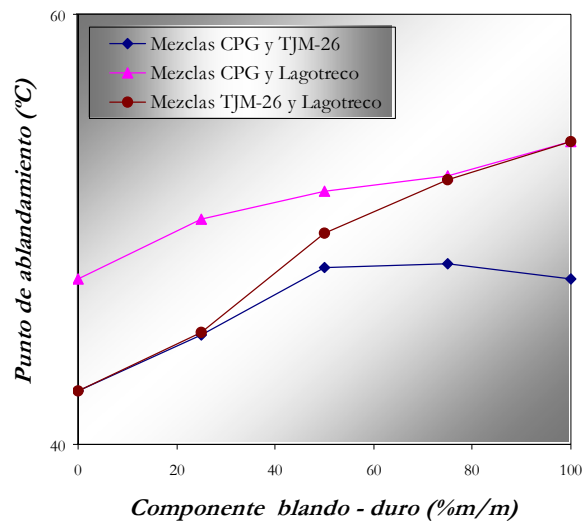


Figura 4. Curvas de la propiedad fisicoquímica del punto de ablandamiento en función de la variación de los componentes blandos TJM-26 y CPG y el componente duro Lagotreco.

La figura 4 ilustra los resultados del análisis fisicoquímico que se realizó tanto a los asfaltos de partida como a las diferentes mezclas. Se observa en la curva de las mezclas TJM-26 y Lagotreco, que el punto de ablandamiento asciende muy rápidamente, incrementándose a lo largo de las otras curvas presentes, cuando se incrementa en proporción el componente duro Lagotreco, lo cual refleja que se requiere más temperatura a medida que las mezclas contienen, en mayor proporción, el componente duro. Las temperaturas de ablandamiento obtenidas indican cuando empiezan a reblandecerse las mezclas a partir de su estado sólido. Estos resultados también pudieran asociarse con la influencia que tiene el aumento de los asfaltenos sobre el componente duro, como se ilustró en la gráfica de la figura 2, ya que estas moléculas requieren mayor consumo energía para incrementar su movilidad.

La curva de la mezclas CPG y Lagotreco indica que el punto de ablandamiento también se incrementa por el componente duro y lo hace de tal manera, que los valores de este

parámetro se encuentran por encima de las curvas presentes de las demás mezclas analizadas. Este comportamiento puede atribuirse a factores similares a los discutidos para la gráfica de la figura 4 donde el CPG aparece menos blando que el TJM-26, así como por el comportamiento similar que existe entre los compuestos saturados y asfaltenos reflejado en la figura 1. Ambos factores son suficientes para que los consumos de energía en forma de calor, sean los más altos en estas mezclas y requieran por lo tanto de temperaturas más elevadas para pasar al estado reblandecido. Se observa que las mezclas que entran en el rango del punto de penetración de las isotermas ilustradas en la figura 3, corresponden a un intervalo de temperatura de ablandamiento entre 45°C y 55°C, (figura 4) de lo cual se puede deducir que por debajo de 45°C las mezclas serían muy blandas para la compactación y adherencia de los agregados a temperaturas mayores y por encima de 55°C; podría tratarse de una mezcla con propiedades viscoelásticas muy elevadas requiriendo más calentamiento del esperado para su uso, por ende mayor oxidación y podría presentar envejecimiento prematuro en el pavimento.

En los resultados de este análisis fisicoquímico, ilustrados en la figura 5 y realizados tanto a los asfaltos de partida como a las mezclas, se observa un incremento de las viscosidades cinemáticas en todas las isotermas a 135°C. La mezcla CPG y Lagotreco muestra la isoterma más alta a 135°C, es decir, con las mayores viscosidades cinemáticas y el incremento de éstas a medida que la cantidad de componente duro Lagotreco aumenta. Este comportamiento se ve reflejado en el punto de ablandamiento de estas mezclas como se ilustra en la figura 4, debido a la cantidad de calor que necesitan absorber para su reblandecimiento, proporcionándole a estas mezclas blando-duro menor tendencia a fluir, esto es, mayor viscoelasticidad para la etapa de mezclado en caliente durante la pavimentación, por lo cual su adherencia a la compactación pudiera ser mayor siempre y cuando no se sobrepasen los límites de su rigidez. Las reacciones químicas implícitas que ocurren a esta temperatura en las mezclas del CPG y Lagotreco son complejas; en ese sentido el aumento del componente duro trae consigo el incremento de los asfaltenos, como se muestra en la figura 1. Este hecho produce el ascenso paulatino de la viscosidad cinemática a 135°C y a su vez provoca el descenso en los puntos de penetración, como se pudo observar en la gráfica de la figura 3 para esta isoterma a 25°C.

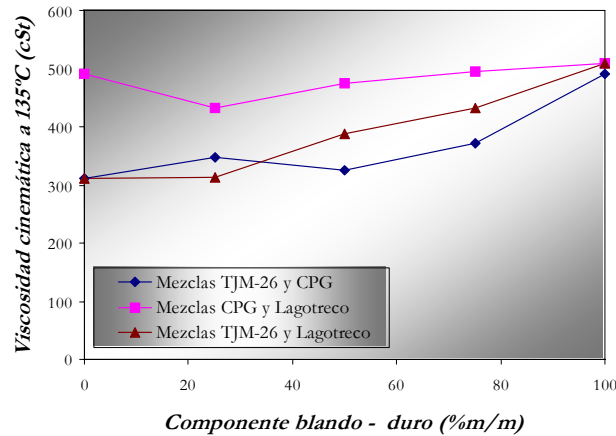


Figura 5. Isotermas de la propiedad fisicoquímica de la viscosidad cinemática a 135°C en función de la variación de los componentes blandos TJM-26 y CPG y el componente duro Lagotreco.

La isoterma a 135°C para las mezclas del TJM-26 y Lagotreco muestra un aumento bastante pronunciado y progresivo a lo largo del gráfico de la figura 5. Aquí se observa la influencia significativa del componente duro Lagotreco al provocar que la viscosidad cinemática ascienda de tal manera, que las mezclas se hacen más viscosas y pegajosas para el mezclado y distribución en caliente para la pavimentación. Para las condiciones óptimas de mezclado se requiere de un asfalto que no sea tan viscoso para que no se enfríe rápidamente convirtiéndose en un plástico semisólido, ni muy fluido que no permita la adherencia de sus componentes y sea menos consistente en su estructura y composición. Aquí también influye de manera importante el incremento de los asfaltenos como se puede apreciar en la figura 2, los cuales le imparten a estas mezclas mayor nivel de viscosidad y dureza cuando desciende el componente blando, tal como se apreció en la figura 3 en relación al punto de penetración.

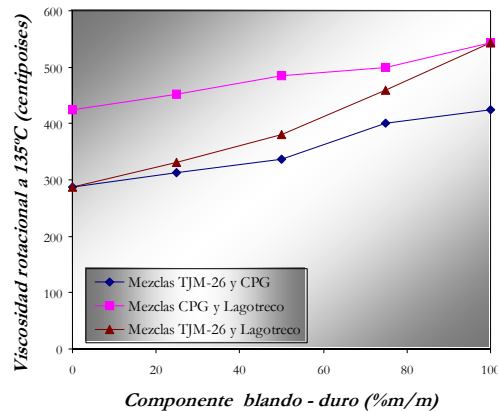


Figura 6. Isotermas de la propiedad fisicoquímica de la viscosidad rotacional a 135°C en función de la variación de los componentes blandos TJM-26, CPG y el componente duro Lagotreco.

Los resultados de la viscosidad rotacional a 135°C medida en las diferentes mezclas se ilustran en la figura 6. La isoterma a 135°C de las mezclas CPG y Lagotreco registra los valores más altos, los cuales se incrementan cuando la cantidad de componente duro aumenta, mostrando así su resistencia a la torsión. A esta temperatura las mezclas blando-duro son sometidas a calentamiento para su bombeo durante las operaciones de planta, sin embargo, el nivel de oxidación que pudiera estar ocurriendo en estas mezclas al ser calentadas es mínimo, ya que la temperatura de 135°C es la requerida para que las mezclas estén bastante fluidas para pasar por las tuberías de la refinería. El incremento en viscosidad que se aprecia en las isotermas de la figura 6 está siendo producido por el efecto ascendente de los asfaltenos (figura 1) provocado por la reacciones que pueden estar llevándose a cabo cuando la cantidad de Lagotreco se incrementa.

La isoterma a 135°C para las mezclas TJM-26 y Lagotreco ilustran un comportamiento de viscosidad rotacional creciente influenciado por el componente duro, siendo más notable el incremento (pendiente) de esta variable fisicoquímica para esta isoterma, a pesar de que la mezcla CPG y Lagotreco tiene la isoterma más elevada. Este comportamiento se correlaciona bien con el incremento de los asfaltenos causado por el efecto de la composición, como se muestra en la gráfica de la figura 2, así como también con el aumento de la viscosidad cinemática (figura 5) a la misma temperatura, no obstante ser ensayos distintos. Lo anterior está de acuerdo con el nivel de requerimiento de temperatura para el ablandamiento de la mezcla TJM-26 y Lagotreco, como se mostró en la figura 4. Estas mezclas pueden ser empleadas para las operaciones en planta porque a pesar de las viscosidades medidas, aún están por debajo del límite necesario ( $\leq 3000$  centipoises (5)).

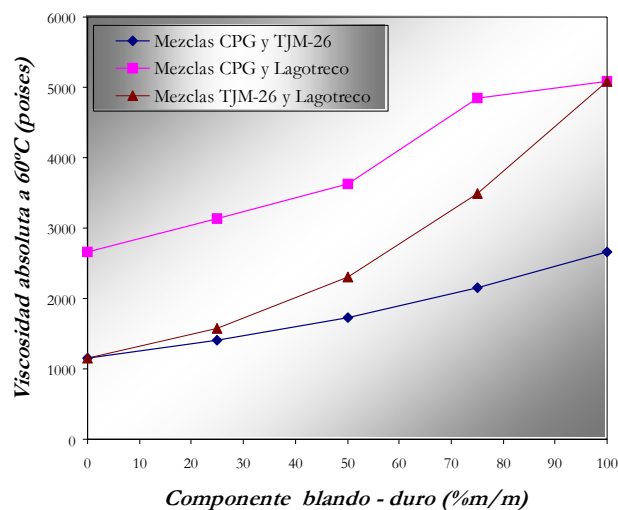


Figura 7. Isotermas de la propiedad fisicoquímica de la viscosidad absoluta a 60°C en función de la variación de los componentes blandos TJM-26, CPG y el componente duro Lagotreco.

En la isoterma a 60°C para la viscosidad absoluta de las mezclas CPG y Lagotreco se observa un incremento que está siendo influenciado por la cantidad de componente duro, siendo éste un factor de gran importancia ya que a esta temperatura un asfalto en servicio no debe ser ni muy viscoso ni poseer mucha fluidez, porque a temperaturas superiores podría sufrir falla por agrietamiento o fatiga cuando es muy viscoso y falla por ahuellamiento cuando tiene mucha fluidez.

En la isoterma a 60°C para las mezclas TJM-26 y Lagotreco de la figura 7 se observa que la viscosidad absoluta aumenta con el incremento en proporciones del componente duro, lo cual hace que las mezclas asfálticas 8 (50% Lagotreco + 50% TJM-26) y 9 (25% TJM-26 + 75% Lagotreco) sean más viscosas. Este comportamiento es similar para la viscosidad rotacional a 135°C (figura 6) y para la viscosidad cinemática a 135°C (figura 5).

Todo lo anterior demuestra que existe una relación directa entre los componentes SARA que hace posible su interacción química para producir un comportamiento específico en cada una de las mezclas expuestas a estos ensayos de consistencia. Por su parte, las propiedades fisicoquímicas están relacionadas entre sí, ya que son directamente proporcionales todas a las viscosidades y temperaturas, cuando aumenta o disminuye la cantidad de alguno de los dos componentes duro o blando y, con respecto al punto de penetración, son inversamente proporcionales cuando aumenta o disminuye uno de los componentes utilizados. Al igual que en la figura 6, las mezclas que se encuentran clasificadas como asfalto comercial arrojaron excelentes resultados en las viscosidades absolutas entrando en el rango de 360 a 80000 Poises.

La productividad es la diferencia entre las concentraciones o porcentajes de componente duro y blando que se estuviese variando, por lo cual, se pudo observar en las gráficas de las figuras 3, 4 y 5, 6 y 7 que a medida que aumentaba el componente duro en las mezclas asfálticas se hacían más duras y más viscosas y como consecuencia menos manejables. Sin embargo, cuando se incrementa la cantidad de componente blando disminuyen su viscosidad y su dureza en las mezclas asfálticas. Estos comportamientos ayudan a establecer qué cantidad de componente duro o blando deben contener para una mejor mezcla y la productividad aumente como resultado.

En la tabla 5 a continuación se muestran los datos obtenidos de las mezclas 10, 11, 12, 13, 14 y 15 provenientes como resultados de un componente duro Lagotreco y dos componentes blandos CPG y TJM-26, obtenidos de los análisis fisicoquímicos.

Tabla 5. Propiedades fisicoquímicas de los asfaltos y sus mezclas preparados a partir de dos componente blandos de TJM-26 y CPG y uno duro Lagotreco

Propiedades	TJM- 26	CPG	Mezcla 10	Mezcla 11	Mezcla 12	Lagotreco
Penetración a 25° C (mm)	118	65	53	58	70	44
Punto de ablandamiento (°C)	42,5	47,7	49,7	48,6	46,4	54,1
Viscosidad absoluta a 60°C (poise)	1148,5	2660	2959,8	2510,7	2084,1	5080,6
Viscosidad cinemática a 135°C (cSt)	311,3	491,6	413,9	412,5	352,1	508,6
Viscosidad rotacional a 135°C (centipoises)	288	424	428	404	364	544

Para este análisis, el punto de penetración de las mezclas asfálticas se incremento con el porcentaje mayoritario de los componentes blandos lo que indica una fluidez bastante buena, a pesar de que solo entro la mezcla 12 en el rango de 60/70 para la clasificación de los asfaltos en Grados Comerciales. Sin embargo, las viscosidades (cinemática, absoluta y rotacional) disminuyeron lo que significa un estado menos viscoso y más manejable para las operaciones en la refinería y para el uso de pavimento. También se notó el descenso de las temperaturas en el punto de ablandamiento implicando menos gasto de energía en cuanto a temperatura lo cual las hace muy favorables para su utilización.

#### **Envejecimiento oxidativo por horno de envejecimiento en película delgada rotativa (RTFOT) y cámara de envejecimiento a presión (PAV)**

Los resultados del RTFOT y el PAV se verán reflejados en las gráficas del reómetro de flexión (BBR) y del reómetro de corte dinámico (DSR), explicando la secuencia del comportamiento a bajas y altas temperaturas, y cómo influye este estado de envejecimiento a largo plazo.

#### **Análisis reológico de las mezclas asfálticas después del RTFOT y el PAV mediante el reómetro de flexión (BBR)**

En la figura 8, se ilustra la correlación del comportamiento de las isotermas de deflexión de la mezcla asfáltica 6 después de pasar por RTFOT y PAV mediante el BBR a tres distintas temperaturas en función del tiempo de resistencia. La figura 8 muestra las isotermas de la mezcla 6 a tres diferentes temperaturas, donde a -18°C y a -24°C se observa una respuesta viscosa debido a que la elasticidad disminuye, lo cual se ve afectada por su estructura interna donde las moléculas no alcanzan la movilidad necesaria para sus enlaces; solo en la isoterma a -12°C se muestra una elongación por la propiedad de elasticidad, aunque la transición elástica- viscosa se estima de manera creciente, hasta que solo actúa la viscosidad y ocurre la pérdida de forma (energía).



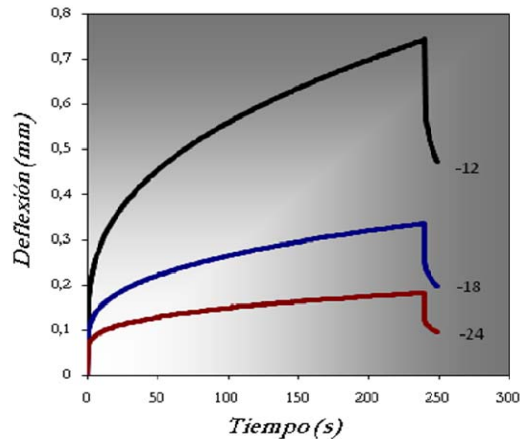


Figura 8. Correlación de las isotermas del índice de deflexión en función del tiempo de la mezcla asfáltica 6 (25% CPG + 75% Lagotreco) con un envejecimiento acelerado en el PAV de 10 años.

La correlación que se ilustra en la figura 42 se aprecia una gran transición elástica-viscosa, cuando la isoterma a -12°C se hace más pronunciada la respuesta es viscosa (lineal); conjuntamente con esta isoterma a -18°C y a -24°C mostrando una excelente respuesta al tiempo de resistencia de carga.

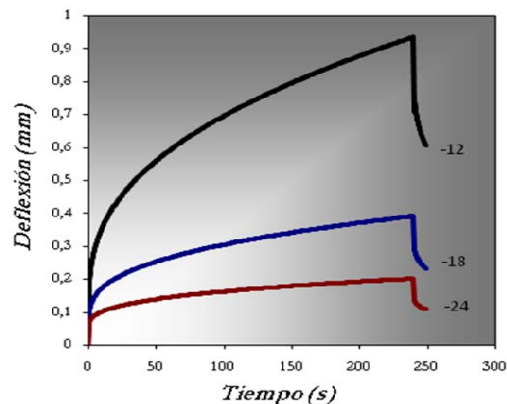


Figura 9. Correlación de las isotermas del índice de deflexión en función del tiempo de la mezcla asfáltica 9 (25% TJM-26 + 75% Lagotreco) con un envejecimiento acelerado en el PAV de 10 años.

Las gráficas de las figuras 9 mostró un tiempo de resistencia a la deflexión bastante bueno. Sin embargo, pudiera haber tenido una mayor elasticidad para soportar la carga y por ende aumentar la deflexión; aquí interviene la composición química de las mezclas que se ve influenciada por el componente duro Lagotreco, y como se explicó en la gráfica de la figura 25 donde los componentes SARA juegan el papel primordial en el comportamiento de estas mezclas.

En la figura 10, se ilustra la correlación del comportamiento de las isotermas de deflexión de la mezcla asfáltica 12 después de pasar por RTFOT y PAV mediante el BBR a tres distintas temperaturas en función del tiempo de resistencia. Como se

muestra en la figura 10, la isoterma a  $-24^{\circ}\text{C}$  está prácticamente superpuesta a la isoterma de  $-18^{\circ}\text{C}$ , observándose de esta manera su gran resistencia a bajas temperaturas y con un tiempo de resistencia a la carga bastante extendido como también lo presenta la isoterma a  $-12^{\circ}\text{C}$  que empieza con una respuesta elástica inmediata que luego pasa a una transición elástica-viscosa en donde a medida que la deflexión se incrementa con el tiempo ocurre una respuesta viscosa (lineal) e intenta restaurar su forma cuando ya ha perdido energía.

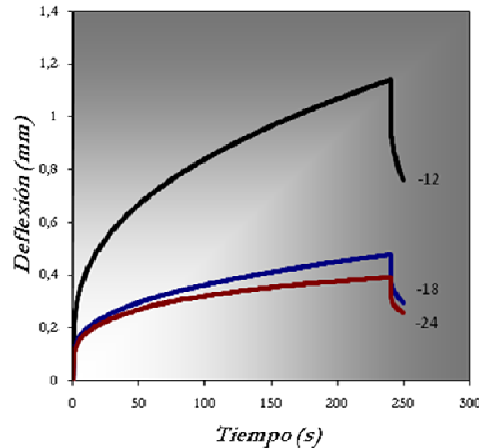


Figura 10. Isotermas del índice de deflexión en función del tiempo de la mezcla asfáltica 12 (50% TJM-26 + 25% CPG + 25% Lagotreco) con un envejecimiento acelerado en el PAV de 10 años.

De manera que la mezcla 12 representada en la gráfica de la figura 10, y en la tabla 5 el punto de penetración, se encontró en el rango de clasificación de 60/70 mm con su gran resistencia al tiempo de carga, en donde la mezcla 12 está siendo influenciada por el componente blando TJM-26 que brinda esa elasticidad y viscosidad apropiada para su buen desempeño. Por consiguiente, las mezclas 6 (25% CPG + 75% Lagotreco) y 9 (25% TJM-26 + 75% Lagotreco) representadas en las figuras 3 están en el rango de clasificación por punto de penetración como asfaltos comerciales, su deflexión es menor y menos amplia debido a la presencia del componente duro Lagotreco y el componente menos blando CPG, la cual las hace menos resistentes a las deformaciones a baja temperatura, en donde los asfaltenos, de la composición SARA, se encuentran más incrementados en estas mezclas provocando menor elasticidad, aumentando sus viscosidades haciéndolas más frágiles a bajas temperaturas. Así mismo, obtuvieron tiempos de resistencia muy favorables.

Las mezclas asfálticas 12 (50% TJM-26 + 25% CPG + 25% Lagotreco) resultó ser de Grado Asfaltos Comerciales a través del punto de penetración, alcanzaron una mejor deflexión por encima de 1 mm influenciada por el contenido en proporción del componente blando TJM-26 que le aporta a estas mezclas buena elasticidad producida por sus componentes SARA donde intervienen los compuestos saturados y las resinas otorgándoles a estas mezclas una mejor respuesta de elongación y en consecuencia son menos viscosas. De lo cual se puede predecir que a bajas temperaturas las

mezclas asfálticas se podrían comportar como un material elástico-blando previniendo la fisuración térmica.

### Análisis reológicos de las mezclas asfálticas vírgenes, oxidadas (RTFOT) y envejecidas (PAV) mediante el reómetro de corte dinámico (DSR)

En la figura 11, se muestra la correlación del comportamiento de las curvas del factor de ahuellamiento ( $G^*/\text{sen } \delta$ ) y de la viscosidad en función de la temperatura de la mezcla asfáltica 6 (25% CPG + 75% Lagotreco). En la figura 11 se observa una curva del factor de ahuellamiento decreciente dando como resultado valores por encima de 1,00 kPa y dentro de los rangos de temperaturas establecidos (52°C, 58°C, 64°C y 70°C), cumpliendo así con la condición  $G^*/\text{sen } \delta \geq 1,00$  kPa, lo cual traduce que esta mezcla asfáltica tiene las propiedades necesarias para ser usado como asfalto para pavimentación, tomando en cuenta que esta mezcla asfáltica no ha sido expuesta a ningún tratamiento oxidativo ni de envejecimiento; pruebas que deben aplicarse antes la toma de decisión para ser utilizado, de esta manera poder predecir con seguridad que no presentará falla por deformación permanente o por fisuración térmica. La viscosidad aumenta notándose la influencia del componente duro Lagotreco, mostrado y discutido en los gráficos de las figuras 5, 6 y 7.

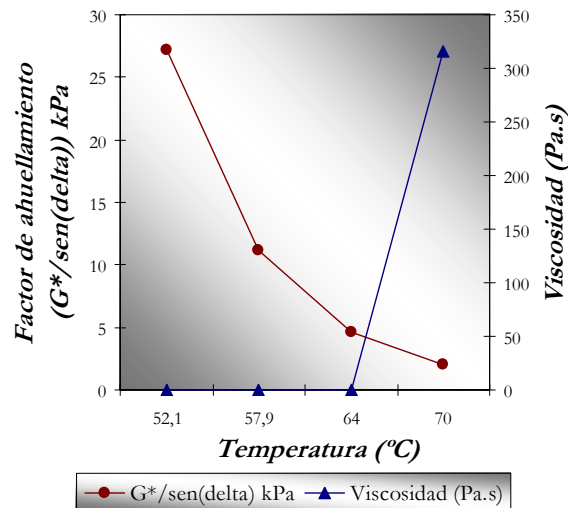


Figura 11. Curvas de correlación del factor de ahuellamiento ( $G^*/\text{sen } \delta$ ) y de la viscosidad en función de la temperatura de la mezcla asfáltica 6 (25% CPG + 75% Lagotreco).

En la figura 12, se ilustra la correlación del comportamiento de las curvas del factor de ahuellamiento ( $G^*/\text{sen } \delta$ ) y de la viscosidad en función de la temperatura de la mezcla asfáltica 6 (25% CPG + 75% Lagotreco) después del tratamiento oxidativo por RTFOT a 163°C. La curva del factor de ahuellamiento decrece con valores por encima de 2,20 kPa, entrando en el parámetro de que  $G^*/\text{sen } \delta \geq 2,20$  kPa y dentro de los rangos de temperaturas establecidos (52°C, 58°C, 64°C y 70°C), lo que beneficia a esta mezcla asfáltica para ser usada como pavimento, soportando así las altas temperaturas para

prevenir en este caso una deformación permanente. La viscosidad de la mezcla disminuye tratando de volver a su forma elástica (recuperable) y viscosa (no recuperable) estos comportamientos también se explican en los gráficos de las figuras 5, 6 y 7.

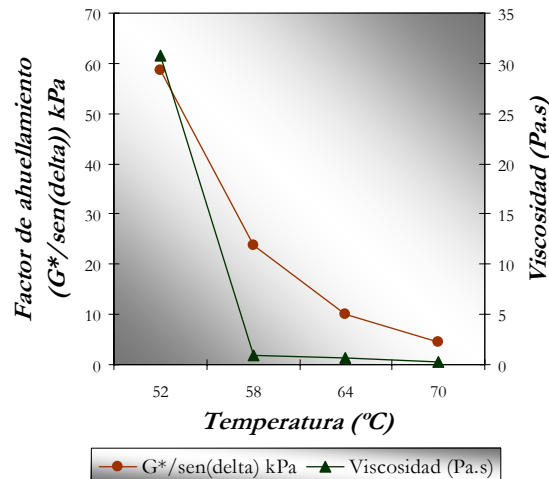


Figura 12. Curvas de correlación del factor de ahuellamiento ( $G^*/\text{sen } \delta$ ) y de la viscosidad en función de la temperatura de la mezcla asfáltica 6 (25% CPG + 75% Lagotreco) después del tratamiento oxidativo por RTFOT a 163°C.

En la figura 13, se ilustra la correlación del comportamiento de las curvas del factor de fisuración por fatiga ( $G^* \cdot \text{sen } \delta$ ) y de la viscosidad en función de la temperatura de la mezcla asfáltica 6 (25% CPG + 75% Lagotreco) después de un envejecimiento acelerado en el PAV de 10 años. El factor de fisuración por fatiga de la mezcla asfáltica 6 muestra más bien una forma lineal que una curva, indicando que sólo un valor entró en la condición  $G^* \cdot \text{sen } \delta \leq 5000$  kPa y a la temperatura de 22°C, los demás valores estuvieron muy elevados, trayendo como consecuencia que esta mezcla asfáltica produzca por debajo de 22°C deterioro por fisuración térmica o fatiga. La viscosidad varió por el cambio de temperatura y ocurre una respuesta distinta por el esfuerzo de carga, pudiéndose explicar por lo reflejado en los gráficos de las figuras 5, 6 y 7.

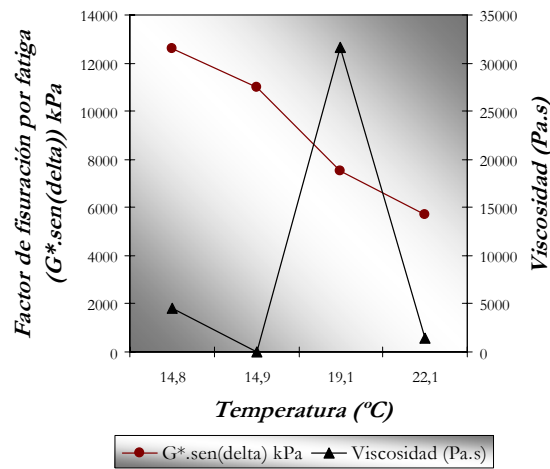


Figura 13. Curvas de correlación del factor de fisuración por fatiga ( $G^* \cdot \text{sen } \delta$ ) y de la viscosidad en función de la temperatura de la mezcla asfáltica 6 (25% CPG + 75% Lagoteco) después de un envejecimiento acelerado en el PAV de 10 años.

En la figura 14, se muestra la correlación del comportamiento de las curvas del factor de ahuellamiento ( $G^*/\text{sen } \delta$ ) y de la viscosidad en función de la temperatura de la mezcla asfáltica 9 (25% TJM-26 + 75% Lagoteco).

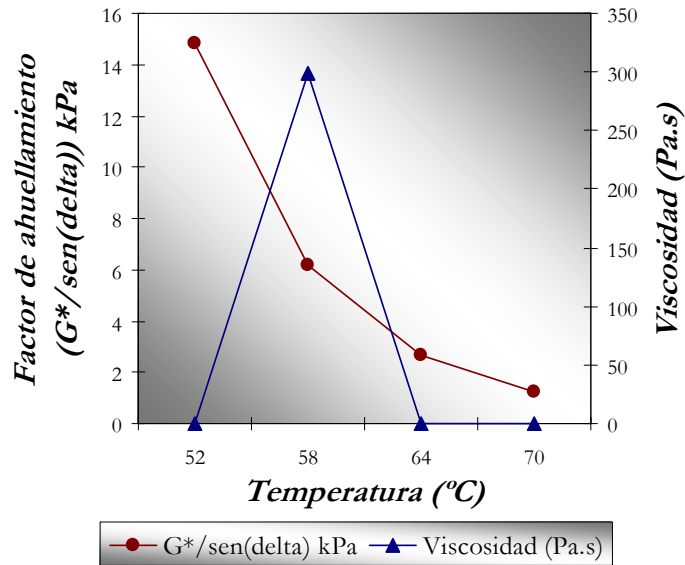


Figura 14. Curvas de correlación del factor de ahuellamiento ( $G^*/\text{sen } \delta$ ) y de la viscosidad en función de la temperatura de la mezcla asfáltica 9 (25% TJM-26 + 75% Lagoteco).

El factor de ahuellamiento da una curva decreciente cumpliendo con todos los valores dentro de la condición  $G^*/\text{sen } \delta \geq 1,00$  kPa y en los rangos de temperaturas establecidos (52°C, 58°C, 64°C y 70°C), de manera que se puede decir que esta mezcla

asfáltica es útil como asfalto para pavimentación. Haciendo mención que la mezcla asfáltica no ha pasado por algún ensayo o procedimiento previo. La viscosidad disminuye y en un sólo punto aumenta, siendo a esta temperatura de 58°C donde la mezcla asfáltica con esfuerzo interno de las moléculas del componente saturado resisten a la acción de la carga aplicada para este análisis y la influencia del componente duro estando en mayor proporción, como pudo verse en los gráficos de las figuras 5, 6 y 7.

En la figura 15, se ilustra la correlación del comportamiento de las curvas del factor de ahuellamiento ( $G^*/\text{sen } \delta$ ) y de la viscosidad en función de la temperatura de la mezcla asfáltica 9 (25% TJM-26 + 75% Lagotreco) después del tratamiento oxidativo por RTFOT a 163°C.

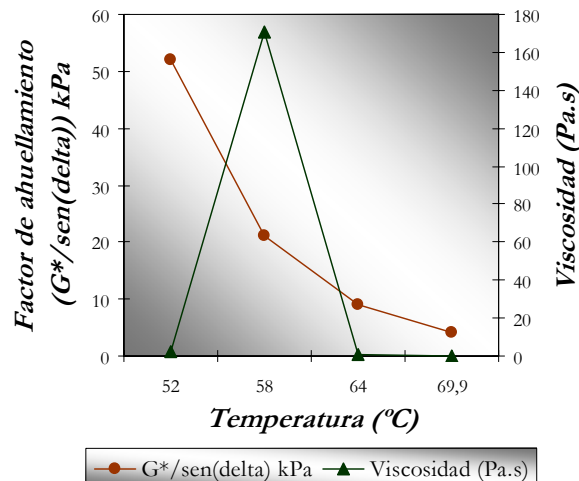


Figura 15. Curvas de correlación del factor de ahuellamiento ( $G^*/\text{sen } \delta$ ) y de la viscosidad en función de la temperatura de la mezcla asfáltica 9 (25% TJM-26 + 75% Lagotreco) después del tratamiento oxidativo por RTFOT a 163°C.

La mezcla asfáltica 9 con tratamiento oxidativo por RTFOT cumple con la condición  $G^*/\text{sen } \delta \geq 2,20$  kPa, donde todos los resultados del factor de ahuellamiento están dentro de las condiciones establecidas a temperaturas altas traduciéndose esto como un asfalto que puede ser usado como pavimento; esto quiere decir que difícilmente la mezcla asfáltica sufrirá falla por deformación permanente. La viscosidad desciende y en el punto donde la temperatura es 58°C es más elevada, manteniéndose así lo dicho en el gráfico anterior (figura 14) y lo explicado en los gráficos de las figuras 30, 32 y 34.

En la figura 16 se ilustra la correlación del comportamiento de las curvas del factor de fisuración por fatiga ( $G^* \cdot \text{sen } \delta$ ) y de la viscosidad en función de la temperatura de la mezcla asfáltica 9 (25% TJM-26 + 75% Lagotreco) después de un envejecimiento acelerado en el PAV de 10 años.



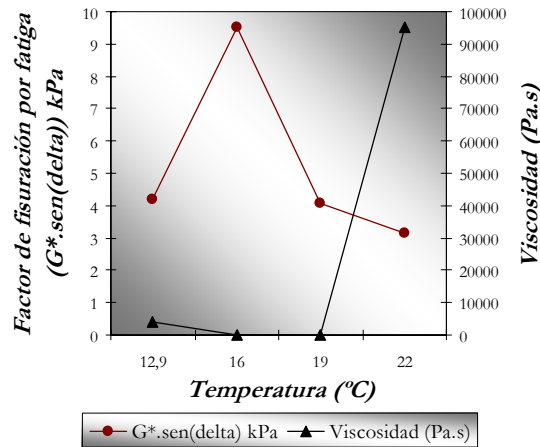


Figura 16. Curvas de correlación del factor de fisuración por fatiga ( $G^* \cdot \text{sen } \delta$ ) y de la viscosidad en función de la temperatura de la mezcla asfáltica 9 (25% TJM-26 + 75% Lagotreco) después de un envejecimiento acelerado en el PAV de 10 años.

En esta mezcla asfáltica 9 los valores obtenidos del factor de fisuración por fatiga cumplen con la condición  $G^* \cdot \text{sen } \delta \leq 5000$  kPa, a pesar de que no se observó una curva descendente, estos resultados dieron bastante pequeños, cumpliéndose a lo largo las temperaturas establecidas (13°C, 16°C, 19°C y 22°C), así la mezcla asfáltica 9 puede ser usada a temperaturas moderadas mostrando una excelente resistencia a la falla por fisuración térmica o fatiga, es decir, no ocurrirá este tipo de deterioro, en 10 años de servicio como pavimento. La viscosidad se incrementa en el último punto a 22°C perdiendo de esta forma la parte elástica, sin embargo todos los puntos poseen valores bastante elevados y se relaciona con lo explicado en los gráficos de las figuras 2, 5, 6 y 7.

En la figura 17, se muestra la correlación del comportamiento de las curvas del factor de ahuellamiento ( $G^*/\text{sen } \delta$ ) y de la viscosidad en función de la temperatura de la mezcla asfáltica 12 (50% TJM-26 + 25% CPG + 25% Lagotreco).

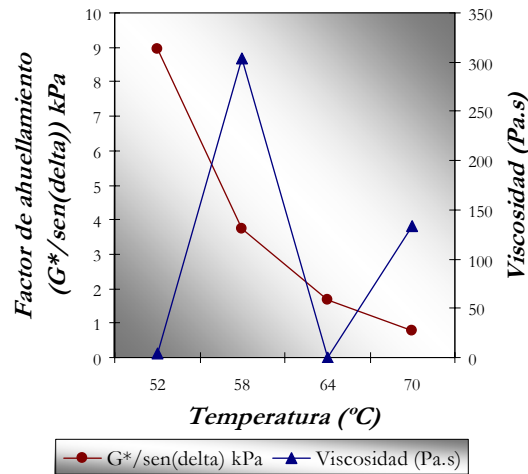


Figura 17. Curvas de correlación del factor de ahuellamiento ( $G^*/\text{sen } \delta$ ) y de la viscosidad en función de la temperatura de la mezcla asfáltica 12 (50% TJM-26 + 25% CPG + 25% Lagotreco).

El factor de ahuellamiento dio una curva decreciente cumpliendo con el parámetro  $G^*/\text{sen } \delta \geq 1,00$  kPa para las siguientes temperaturas establecidas 52°C, 58°C, 64°C y 70°C, reflejando que esta mezcla asfáltica es útil como asfalto y que puede ser usada como pavimento, siempre y cuando la temperatura de desempeño no pase de 70°C, lo cual podría sufrir de falla por deformación permanente o fisuración térmica. La viscosidad varía con el cambio de temperaturas a la que está expuesta la mezcla asfáltica, en ésta intervienen las reacciones que pudieran haberse presentado durante este análisis y se corrobora su comportamiento en los estudios anteriores apreciados en la tabla 5.

En la figura 18, se ilustra la correlación del comportamiento de las curvas del factor de ahuellamiento ( $G^*/\text{sen } \delta$ ) y de la viscosidad en función de la temperatura de la mezcla asfáltica 12 (50% TJM-26 + 25% CPG + 25% Lagotreco) después del tratamiento oxidativo por RTFOT a 163°C.

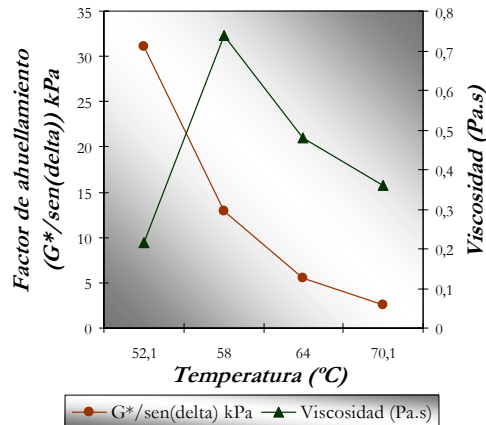


Figura 18. Curvas de correlación del factor de ahuellamiento ( $G^*/\text{sen } \delta$ ) y de la viscosidad en función de la temperatura de la mezcla asfáltica 12 (50% TJM-26 + 25% CPG + 25% Lagotreco) después del tratamiento oxidativo RTFOT a 163°C.

La curva que se observa del factor de ahuellamiento beneficia a esta mezcla asfáltica debido a que en todos los rangos de temperaturas establecidos (52°C, 58°C, 64°C y 70°C) se encontraron dentro de la condición  $G^*/\text{sen } \delta \geq 2,20$  kPa, resultando ser una mezcla asfáltica adecuada para su uso como pavimento. El comportamiento de ésta será excelente a altas temperaturas y se puede predecir que no dará inicio a la aparición de una deformación permanente, cumpliéndose a cabalidad con los requerimientos de mezcla asfáltica óptima. La viscosidad se incrementa en el segundo punto y luego desciende con valores menores a uno, indicando que se comporta como un sólido elástico a altas temperaturas siendo lo adecuado en este análisis, la influencia del TJM-26 es bastante notoria y se relaciona con lo explicado en la tabla 5.

En la figura 19, se ilustra la correlación del comportamiento de las curvas del factor de fisuración por fatiga ( $G^* \cdot \text{sen } \delta$ ) y de la viscosidad en función de la temperatura de la mezcla asfáltica 12 (50% TJM-26 + 25% CPG + 25%Lagotreco) después de un envejecimiento acelerado en el PAV de 10 años.

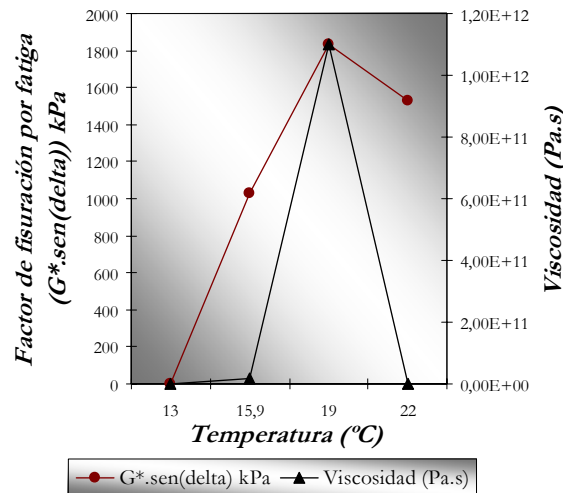


Figura 19. Curvas de correlación del factor de fisuración por fatiga ( $G^* \cdot \text{sen } \delta$ ) y de la viscosidad en función de la temperatura de la mezcla asfáltica 12 (50% TJM-26 + 25% CPG + 25% Lagotreco) después de un envejecimiento acelerado en el PAV de 10 años.

El factor de fisuración por fatiga respondió con una curva ascendente, y en el último punto a temperatura 22°C disminuyó un poco. Todos los valores de las temperaturas establecidas (13°C, 16°C, 19°C y 22°C) se encontraron dentro de la condición  $G^* \cdot \text{sen } \delta \leq 5000$  kPa, queriendo decir que aún con 10 años de servicio como pavimento la falla por fisuración térmica o fatiga no aparecerá, comportándose de esta manera como una mezcla asfáltica óptima, resistiendo las temperaturas moderadas, así como también mostró un excelente resultado en el estudio de este asfalto a bajas temperaturas, representado en el gráfico de la figura 10. La viscosidad reacciona de la misma forma aumentando y decreciendo en el último punto, aunque la mezcla está envejecida 10 años la viscosidad responde con valores elevados, indicando esto que las moléculas internas de su estructura buscan la forma de reaccionar para encontrar estabilidad, mientras pasa por las acciones de carga utilizando su parte elástica (recuperable) y viscosa (no recuperable), también se puede ver este comportamiento en la tabla 5.

Resumiendo, las mezclas asfálticas 6 (25% CPG + 75% Lagotreco), 9 (25% TJM-26 + 75% Lagotreco) y 12 (50% TJM-26 + 25% CPG + 25% Lagotreco), que resultaron como Asfalto de Grado Comercial, en su estado original sin ser sometidas a un proceso oxidativo o de envejecimiento, cumplieron la condición  $G^*/\text{sen } \delta \geq 1,00$  kPa en los rangos de temperatura establecidos de 52°C, 58°C, 64°C y 70°C reflejando a favor un factor de ahuellamiento adecuado para ser usadas como pavimento. Este análisis previo para estas mezclas no quiere decir que prevendría la aparición de fallas a altas y moderadas temperaturas; la mezcla asfáltica 6 (25% CPG + 75% Lagotreco) aumenta su viscosidad a medida que sube la temperatura por la proporción del componente duro Lagotreco donde las moléculas de las resinas reaccionan pasando a formar parte de la estructura de los asfaltenos y por ende incrementa su viscosidad; en la mezcla asfáltica 9 (25% TJM-26 + 75% Lagotreco), la viscosidad aumenta hasta la temperatura de 58°C

interviniendo el componente duro Lagotreco ocasionando la precipitación de más asfaltenos, sin embargo el componente blando TJM-26 le contribuye más moléculas de saturados y resinas provocando el descenso de la viscosidad como se puede apreciar en la gráfica de la figura 61; en la mezcla asfáltica 12 (50% TJM-26 + 25% CPG + 25% Lagotreco) la viscosidad a 58°C crece ocasionado por las moléculas de los asfaltenos provenientes del componente duro Lagotreco y luego disminuye a 64°C por las moléculas de los saturados presentes en el componente blando TJM-26 y después a 70°C vuelve a incrementarse la viscosidad, pero un poco menos, por la interacción de las moléculas de las resinas que mantienen el equilibrio producido por el componente menos blando CPG, ocasionando que cada uno de los componentes de la mezcla intervenga a cierta temperatura.

Después de un tratamiento oxidativo por el RTFOT a 163°C las mezclas asfálticas 6 (25% CPG + 75% Lagotreco), 9 (25% TJM-26 + 75% Lagotreco) y 12 (50% TJM-26 + 25% CPG + 25% Lagotreco), resultaron estar dentro del parámetro del factor de ahuellamiento cumpliendo la condición  $G^*/\sin \delta \geq 2,20$  kPa y los requerimientos para ser empleadas como material de pavimento. En la mezcla 6 (25% CPG + 75% Lagotreco) disminuye la viscosidad haciendo que ésta se comporte como un material elástico blando no apropiado para las altas temperaturas, atribuyendo este comportamiento a las reacciones que producen las moléculas de los saturados y las resinas, transformándolas en moléculas más grandes y complejas, debido a los compuestos aromáticos provenientes del CPG en su composición SARA; en la mezcla asfáltica 9 (25% TJM-26 + 75% Lagotreco) se incrementa la viscosidad a un máximo cuando la temperatura es de 58°C, lo cual es ocasionado por el nivel de asfaltenos que le atribuye el componente duro Lagotreco, luego decrece permitiendo la reacción de las moléculas de las resinas y los saturados del componente TJM-26, causando una fluidez de elástico blando no deseable para altas temperaturas; la mezcla asfáltica 12 (50% TJM-26 + 25% CPG + 25% Lagotreco) inicialmente presenta un comportamiento parecido al de la figura 64, alcanzando su viscosidad máxima a 58°C, debido al efecto del componente duro Lagotreco, el cual favorece la transformación de más moléculas de resinas a asfaltenos para disminuir el punto de fluidez, mientras que a 64°C, el componente CPG contribuye con la interacción de sus moléculas de resinas y saturados ascendiendo la fluidez, la cual se incrementa aun más con el aporte del componente blando TJM-26 por su mayor proporción en la mezcla.

Las mezclas asfálticas 6 (25% CPG + 75% Lagotreco), las cual fue envejecida por 10 años de servicio a través del PAV, sólo cumplió con el valor del factor de fisuración a la temperatura de 22°C bajo la condición establecida de  $G^* \cdot \sin \delta \leq 5000$  kPa, de acuerdo a esto se puede inferir que no es una mezcla óptima para soportar las temperaturas intermedias ya que sería susceptible a la generación de fallas por fisuración térmica o fatiga. La viscosidad de la mezcla 6 (25% CPG + 75% Lagotreco) mostró incrementos y

descensos con valores altos en la variación en su viscosidad, lo cual puede ser atribuido a la proporción del componente duro Lagotreco con los niveles más altos en las moléculas de los asfaltenos (figura 1).

Las mezclas asfálticas 9 (25% TJM-26 + 75% Lagotreco) y 12 (50% TJM-26 + 25% CPG + 25% Lagotreco) envejecidas a 10 años de servicio por el PAV, resultaron ser mezclas con las proporciones óptimas adecuadas para ser utilizadas como asfalto para pavimentación, cumpliendo en todos los rangos de temperaturas la condición del factor de fisuración  $G^* \cdot \sin \delta \leq 5000$  kPa que previene la aparición de la falla por fisuración térmica o fatiga. La viscosidad de la mezcla asfáltica 9 (25% TJM-26 + 75% Lagotreco) se incrementó y se obtuvieron valores apropiados de acuerdo a la temperatura, comportándose como un sólido blando a temperaturas intermedias debido al componente blando TJM-26, resistiendo la deformación al esfuerzo de cargas, comportamiento atribuible a la intervención de las resinas y las moléculas de los compuestos saturados, otorgándole a esta mezcla la proporción correcta de asfaltos de partida; la mezcla 12 (50% TJM-26 + 25% CPG + 25% Lagotreco) presenta una viscosidad ascendente trayendo consigo un comportamiento de sólido blando para temperaturas intermedias producto del componente blando TJM-26 que le aporta la mayor cantidad de resinas y saturados, y como consecuencia una mejor respuesta a las condiciones de servicio; se puede decir que esta es una mezcla asfáltica de proporciones deseables, ya que el componente duro Lagotreco le otorga una adecuada viscosidad por el incremento de los asfaltenos en cantidades apropiadas, haciéndola una mezcla óptima todos los sentidos.

## CONCLUSIONES

Los resultados de esta investigación permitieron establecer que existe una muy estrecha relación entre los componentes SARA (Saturados, Asfaltenos, Resinas, Aromáticos), las propiedades fisicoquímicas y las características reológicas de cada componente asfáltico en las mezclas.

Se determinó que los asfaltenos son los principales responsables de la alta viscosidad en los asfaltos y sus mezclas asfálticas, que los caracteriza como materiales viscoelásticos.

Los componentes duros influyen directamente en el comportamiento de las mezclas asfálticas incrementando los asfaltenos.

La mezcla CPG y Lagotreco presentaron mayor viscoelasticidad para la etapa de mezclado en caliente, por lo cual su adherencia a la compactación pudiera ser mayor siempre y cuando no se sobrepasen los límites de su rigidez.



Las tres mezclas 6 (25% CPG + 75% Lagotreco), 9 (25% TJM-26 + 75% Lagotreco) y 12 (50% TJM-26 + 25% CPG + 25% Lagotreco) y que se encuentran en la clasificación como Asfaltos Grado Comerciales, presentaron viscosidades rotacionales en el rango de 300 a 500 centipoises, lo cual las hace mezclas óptimas en el contexto del presente estudio.

La mezcla 12 (50% TJM-26 + 25% CPG + 25% Lagotreco) presenta una viscosidad ascendente trayendo consigo un comportamiento de sólido blando para temperaturas intermedias producto del componente blando TJM-26 que le aporta la mayor cantidad de resinas y saturados, y como consecuencia una mejor respuesta a las condiciones de servicio, constituyéndose así en la mejor combinación de proporción de asfaltos y de propiedades viscoelásticas del presente estudio.

## REFERENCIAS

1. Balige, M. y Sawyer, C. 2001. Caracterización integral de materiales asfálticos. Argentina, *Repsol YPF Derivados Latinoamérica*, 2: 6-10.
2. Roussel, J. y Boulet, R. 1995. Characterization of crude and petroleum fractions petroleum refining. Composition of crude oils and petroleum products. Editions technip- Paris, 1: 1-84.
3. Ludwig, U. 2006. Determinación del potencial asfáltico de un crudo de gravedad API 3,2 en el laboratorio del CRP-Amuay. Trabajo de pregrado. Programa de ingeniería química. Universidad Nacional Experimental Francisco de Miranda.
4. Ludwig, U. 2006. Evaluación de los equipos y ensayos reológicos de asfaltos realizados en el laboratorio de crudo de la refinería de Amuay del Centro de Refinación Paraguaná. Trabajo de pregrado. Programa de ingeniería química. Universidad Nacional Experimental Francisco de Miranda.
5. Minaya, S. y Ordóñez, A. 2003. SUPERPAVE y el diseño de mezclas asfálticas. Instituto de investigaciones de Lima – Perú. Facultad de ingeniería civil. Universidad Nacional de Ingeniería.
6. Jugo, A. y Urbáez, E. 1996. Las nuevas especificaciones “SUPERPAVE” para ligantes asfálticos y su posible uso en Venezuela. *Instituto Venezolano del Asfalto (INVEAS)*, 9.
7. Meleán, C.; Rosales, J.; Blanco, P.; Carbognani, O.; Scaglione, G.; Martínez, C.; Villalobos, J. y Rosquete, M. 1998. Comportamiento de asfaltos obtenidos por mezclas a partir de un componente duro del crudo Boscán y componentes blandos de Boscán y TJM-26. Informe Técnico. PDVSA-INTEVEP.
8. Fleitas, F. y Meleán, G. 1992. Estado del arte sobre técnicas de caracterización fisicoquímica y reológica de los cementos asfálticos. Informe Técnico. PDVSA-INTEVEP.
9. Brule, B. y Planche, J. 1990. Relationship between characterization of asphalt cements by differential scanning calorimetry and their physical properties. *American Chemical Society*, 200: 26-31.