



UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE SUCRE
ESCUELA DE CIENCIAS
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE ASFALTOS OBTENIDOS POR
MEZCLAS A PARTIR DE UN COMPONENTE DURO LAGOTRECO Y
COMPONENTES BLANDOS DE CRUDO DE PROPOSITOS GENERALES
(CPG) Y TÍA JUANA MEDIANO (TJM-26)
(Modalidad: Investigación)

FAVIA JOSÉ CABEZA ACOSTA

TRABAJO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA
OPTAR AL TÍTULO DE LICENCIADA EN QUÍMICA

CUMANÁ, 2010



UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE SUCRE
ESCUELA DE CIENCIAS
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE ASFALTOS OBTENIDOS POR
MEZCLAS A PARTIR DE UN COMPONENTE DURO LAGOTRECO Y
COMPONENTES BLANDOS DE CRUDO DE PROPOSITOS GENERALES
(CPG) Y TÍA JUANA MEDIANO (TJM-26)
(Modalidad: Investigación)

FAVIA JOSÉ CABEZA ACOSTA

TRABAJO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA
OPTAR AL TÍTULO DE LICENCIADA EN QUÍMICA

CUMANÁ, 2010

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE ASFALTOS OBTENIDOS POR
MEZCLAS A PARTIR DE UN COMPONENTE DURO LAGOTRECO Y
COMPONENTES BLANDOS DE CRUDO DE PROPOSITOS GENERALES
(CPG) Y TÍA JUANA MEDIANO (TJM-26)

APROBADO POR:

Dr. Benjamín Hidalgo Prada
Asesor Académico

Lcdo. Franklin Valles
Asesor Industrial

Jurado

Jurado

INDICE GENERAL

DEDICATORIA	I
AGRADECIMIENTO	II
LISTA DE TABLAS	III
LISTA DE FIGURAS	IV
RESUMEN.....	XI
INTRODUCCIÓN	1
El asfalto	1
Composición química	2
Propiedades químicas elementales.....	6
Propiedades fisicoquímicas.....	7
Punto de penetración.....	7
Viscosidades.....	7
Punto de ablandamiento.....	8
Envejecimiento oxidativo.....	8
Programa SHRP	9
Problema 1. Deformación permanente.....	11
Problema 2. Agrietamiento por fatiga.....	11
Problema 3. Agrietamiento a baja temperatura.....	12
Reología	14
Medidas de propiedades reológicas	15
METODOLOGÍA	17
Materiales.....	17
Proporciones de mezclas	18
Análisis químico elemental.....	18
Análisis fisicoquímico.....	21
Ensayos de envejecimiento	26
Análisis reológico.....	30
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	34
Ensayos de mezclas.....	34

Propiedades químicas elementales de las mezclas asfálticas.....	35
Propiedades fisicoquímicas y productividad de las mezclas asfálticas.....	47
Punto de penetración.....	47
Punto de ablandamiento.....	51
Viscosidad cinemática.....	56
Viscosidad absoluta.....	64
Envejecimiento oxidativo por horno de envejecimiento en película delgada rotativa (RTFOT) y cámara de envejecimiento a presión (PAV)	67
Análisis reológico de las mezclas asfálticas después del RTFOT y el PAV mediante el reómetro de flexión (BBR).....	71
Análisis reológicos de las mezclas asfálticas vírgenes, oxidadas (RTFOT) y envejecidas (PAV) mediante el reómetro de corte dinámico (DSR)	83
CONCLUSIONES	119
RECOMENDACIONES	121
BIBLIOGRAFÍA	122
APÉNDICES.....	125
HOJA DE METADATOS	141

DEDICATORIA

Te dedico este trabajo con mucha humildad Padre celestial, DIOS todo poderoso, Mi Señor Jesús te doy las gracias por bendecirme con esta tesis tan maravillosa, por abrir nuevas fronteras en el área de la química, donde me desenvuelvo porque no hay ni existe nada en este mundo que no lleve implícito una reacción química. ¡A TI PADRE GRACIAS!.

Vicenta Daméllis Acosta Marcano, mujer abnegada, trabajadora, incansable luchadora por el bienestar de sus hijas, forjadora de cinco bellas hijas, hembras todas, proveniente de tan maravilloso ser. Ésta es mi MADRE, GRACIAS por esa confianza infinita, por el apoyo incondicional, por estar siempre presente en todos mis momentos y etapas de crecimiento personal y profesional; a ti madre te lo debo todo y cuando leas esto quiero que sepas que vas a estar conmigo y, en mí siempre, a donde quiera que yo este se que estarás allí como ahora. Simplemente, ¡TE AMO!.

Jennitza Cabeza, Dianny Cabeza, Natacha Marcano y Diana Marcano, cuatro hermosas mujeres llenas de una gran capacidad de amar, dar y recibir. Estas son Mis Hermanas, GRACIAS por su apoyo incondicional. A ustedes por ser mis mejores compañeras en el aprendizaje de la vida.

José Gregorio Cabeza, mi padre a quien amo y respeto con todo mi corazón y a mi abuela Modesta Pereira por ser parte posible de que existiera.

Fabián Acosta, mi abuelo a quien debo mi nombre, a este gran señor quien amo profundamente y ocupa un lugar especial en mi corazón.

A mis tíos Rosa (Charo) y Adenis Martínez por quererme y tratarme como una hija más, brindándome el calor de su hogar y compartir conmigo el momento más crucial en mi carrera universitaria, GRACIAS.

Tía abuela Manuela Sánchez, mi Tía Maricela y Tío Alexander en su memoria, GRACIAS por haber formado parte de mi vida, por todos los hermosos momentos compartidos y sabios consejos. DIOS LOS BENDIGA.

Christopher D. J. Díaz Gutiérrez, a ti a quien amo profundamente por ser el hombre que siempre soñé para compartir la vida. Para nuestra hija Favia Daniela Díaz Cabeza que bendijo nuestra unión con su llegada, le sirvamos como prueba fidedigna de que los sueños se cumplen con fé, constancia, dedicación y esperanza.

AGRADECIMIENTO

Al Sr. Adie Arteaga, Sr. Pedro Blanco, Lic. Franklin Valles y Dr. Benjamín Hidalgo Prada por haberme apoyado en el desarrollo de mi Tesis de Grado en el Centro Refinador de Paraguaná (CRP- AMUAY) y por brindarme la oportunidad de tan especial experiencia de una labor tan hermosa como el campo de la investigación, por sus conocimientos, apoyo incondicional, su confianza depositada en mí, a ustedes muchísimas GRACIAS.

A la Universidad de Oriente por darme la oportunidad de ser formada como profesional con los mejores profesores del departamento de química, que ofrece esta casa de estudios a ustedes GRACIAS.

Al Instituto de Investigación en Biomedicina y Ciencias Aplicadas de la universidad de oriente (“Susan Tai” IIBCA- UDO), por abrirme las puertas desde el inicio de mi Tesis y nuevamente a mi muy querido asesor Dr. Benjamín Hidalgo Prada por aceptar asesorarme y de brindarme la oportunidad de ser parte de su equipo como Ayudante Técnico del Laboratorio de Materiales.

Dra. Doris Bruzco, Dra. Haydelba D’Armas, Prof. Saúl Mosqueda, Prof. José Lokibiri, Solange Paredes Msc., Sra. Elizabeth Morales, Dra. Mariela de Núñez, Lcda. María Eugenia, Sra. Yolanda, T.S.U. José Luís Prin, Lcda. Ileana, Dra. Blanca Rojas, GRACIAS por su gran amistad, sus consejos, su apoyo y su gran colaboración.

A Rosa Beatriz Acosta por su gran apoyo, colaboración, confianza y fortaleza brindada. A ti prima MUCHAS GRACIAS

A mis amigas, Isabeth López de Gil, Carmen María Castillo, Lidiana Rodríguez, Maryori Velázquez, Patricia Amaya, Briceida Yéndez, Norahidis, Mariangel Sosa, Ana González, Noheli, Desiree Maurera, Fanny López, Naire Chiquito por su gran apoyo, por creer en mí, porque de alguna u otra forma ustedes han estado siempre conmigo, a ustedes más que amigas hermanas GRACIAS.

Sra. Celia de Hidalgo, Sra. Neida de Rincones, Sra. Sonia de Castillo, Sra. María de Cordero, Delia de la Rosa, Dramelis Gutiérrez y Carol Díaz GRACIAS por abrirme las puertas de su corazón, su casa y tratarme como una hija más.

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Proporciones de las mezclas entre de TJM-26 y CPG.....	34
Tabla 2. Proporciones de las mezclas entre CPG y Lagotreco.	34
Tabla 3. Proporciones de las mezclas entre TJM-26 y Lagotreco.	35
Tabla 4. Proporciones de las mezclas entre CPG, TJM-26 y Lagotreco.....	35
Tabla 5. 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).....	41
Tabla 6. Composición elemental de los asfaltos y sus mezclas con relación a los hidrocarburos presentes para dos componentes blandos (TJM-26 y CPG).	43
Tabla 7. Composición elemental de los asfaltos y sus mezclas con relación a los hidrocarburos presentes para un componente duro y uno blando (Lagotreco y CPG).	44
Tabla 8. 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).	45
Tabla 9. 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).....	46
Tabla 10. Variación de masa (% m/m) de la etapa de envejecimiento oxidativo por RTFOT de las mezclas asfálticas 10, 11 y 12 y de los asfaltos de partida, componente duro Lagotreco y componentes blandos TJM-26 y CPG (mezclas 15, 14 y 13).	71

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Modelo de la estructura del asfalto según Nellensteyn en 1924 (7).....	4
Figura 2. Estructura molecular de asfaltenos propuesto por Speight y Moschopedis en 1981 (8).....	5
Figura 3. Estructura molecular de asfaltenos propuesto por Strausz y Murgich en 1999 (9, 10).....	6
Figura 4. Deformación permanente.....	11
Figura 5. Niveles de agrietamientos por fatiga (15).....	12
Figura 6. Grados de severidad del agrietamiento por fatiga térmica a bajas temperaturas (15).	13
Figura 7. Ensayo del punto de penetración.	21
Figura 8. Prueba de una mezcla de asfalto realizada.	22
Figura 9. Equipo para el punto de ablandamiento (A), anillo (B) y esfera metálica (C) y ensayo del punto de ablandamiento culminado (D).....	23
Figura 10. Diagrama del viscosímetro capilar CANNON de doble bulbo.	23
Figura 11. Diagrama del viscosímetro capilar CANNON de brazo cruzado.....	24
Figura 12. Equipo Brookfield.	25
Figura 13. Vista del ensayo de una mezcla de asfalto con el vástago en equilibrio. ..	26
Figura 14. Equipo de película fina rotativa en estufa (RTFOT).	27
Figura 15. Contenedor cilíndrico vacío (A), contenedor cilíndrico más mezcla asfáltica (B) y contenedor cilíndrico más mezcla asfáltica después de RTFOT (C). ..	28
Figura 16. Parte interna del RTFOT.	28
Figura 17. Equipo de cámara de envejecimiento a presión (A), materiales del PAV (B).	30
Figura 18. Reómetro de flexión (BBR).....	30

Figura 19. Láminas de aluminio para el molde (A), molde armado y listo para colocar la mezcla asfáltica de aluminio (B), molde listo para sumergir en el baño a -12°C (C) y mezcla asfáltica lista para el análisis (D).	31
Figura 20. Equipo de reómetro de corte dinámico (DSR).	32
Figura 21. Corte transversal de una mezcla asfáltica montada en el DSR.....	33
Figura 22. Ciclo del principio de operación del DSR.	33
Figura 23. Fracciones de los asfaltos y sus mezclas con relación a los hidrocarburos presentes para dos componentes blandos (TJM-26 y CPG).	36
Figura 24. Fracciones de los asfaltos y sus mezclas con relación a los hidrocarburos presentes para un componente blando y duro (CPG y Lagotreco).....	38
Figura 25. Fracciones de los asfaltos y sus mezclas con relación a los hidrocarburos presentes para un componente blando y uno duro (TJM-26 y Lagotreco).	39
Figura 26. 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.....	47
Figura 27. Propiedad fisicoquímica del punto de penetración a 25°C en función de las mezclas de los componentes blandos TJM-26 y CPG y el componente duro Lagotreco.	49
Figura 28. 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.	52
Figura 29. Propiedad fisicoquímica del punto de ablandamiento (°C) en función de la mezclas asfálticas de los componentes blandos TJM-26 y CPG y el componente duro Lagotreco.	55
Figura 30. 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.....	56

Figura 31. Propiedad fisicoquímica de la viscosidad cinemática a 135°C en función de las mezclas de los componentes blandos TJM-26 y CPG y el componente duro Lagotreco.	59
Figura 32. 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.....	60
Figura 33. Propiedad fisicoquímica de la viscosidad rotacional a 135°C en función de las mezclas asfálticas de los componentes blandos TJM-26, CPG y el componente duro Lagotreco.	62
Figura 34. 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.....	63
Figura 35. Propiedad fisicoquímica de la viscosidad absoluta a 60°C en función de las mezclas de los componentes blandos TJM-26, CPG y el componente duro Lagotreco.	67
Figura 36. Envejecimiento oxidativo por variación de pérdida de masa a 163°C en función de la variación de los componentes blandos CPG y TJM-26 y componen duro Lagotreco.	69
Figura 37. Correlación de las isotermas del índice de deflexión en función del tiempo de la mezcla asfáltica 1 (25% CPG +75% TJM-26) con un envejecimiento acelerado en el PAV de 10 años.....	72
Figura 38. Correlación de las isotermas del índice de deflexión en función del tiempo de la mezcla asfáltica 2 (50% CPG + 50% TJM-26) con un envejecimiento acelerado en el PAV de 10 años de servicio.....	73
Figura 39. Correlación de las isotermas del índice de deflexión en función del tiempo de la mezcla asfáltica 5 (50% CPG + 50% Lagotreco) con un envejecimiento acelerado en el PAV de 10 años.....	74

Figura 40. Correlación de las isothermas 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.....	76
Figura 41. Correlación de las isothermas del índice de deflexión en función del tiempo de la mezcla asfáltica 8 (50% TJM-26 + 50% Lagotreco) con un envejecimiento acelerado en el PAV de 10 años.....	77
Figura 42. Correlación de las isothermas 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.....	78
Figura 43. Isothermas 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.....	79
Figura 44. Correlación de las isothermas del índice de deflexión en función del tiempo de la mezcla asfáltica 13 (100% CPG) con un envejecimiento acelerado en el PAV de 10 años.	80
Figura 45. Correlación de las isothermas del índice de deflexión en función del tiempo de la mezcla asfáltica 15 (100% Lagotreco) con un envejecimiento acelerado en el PAV de 10 años.....	81
Figura 46. Curvas de correlación del factor de ahuellamiento ($G^*/\text{sen } \delta$) y de la viscosidad en función de la temperatura de la mezcla asfáltica 1 (75% TJM-26 + 25% CPG).....	84
Figura 47. Curvas de correlación del factor de ahuellamiento ($G^*/\text{sen } \delta$) y de la viscosidad en función de la temperatura de la mezcla asfáltica 1 (75% TJM-26 + 25% CPG) después del tratamiento oxidativo por RTFOT a 163°C.	86
Figura 48. 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 1 (75% TJM-26 + 25% CPG) después de un envejecimiento acelerado en el PAV de 10 años.....	87

Figura 49. Curvas de correlación del factor de ahuellamiento ($G^*/\text{sen } \delta$) y de la viscosidad en función de la temperatura de la mezcla asfáltica 2 (50% TJM-26 + 50% CPG).....	88
Figura 50. Curvas de correlación del factor de ahuellamiento ($G^*/\text{sen } \delta$) y de la viscosidad en función de la temperatura de la mezcla asfáltica 2 (50% TJM-26 + 50% CPG) después del tratamiento oxidativo por RTFOT a 163°C.	89
Figura 51. 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 2 (50% TJM-26 + 50% CPG) después de un envejecimiento acelerado en el PAV de 10 años.....	90
Figura 52. Curvas de correlación del factor de ahuellamiento ($G^*/\text{sen } \delta$) y de la viscosidad en función de la temperatura de la mezcla asfáltica 5 (50% CPG + 50% Lagotreco).	91
Figura 53. Curvas de correlación del factor de ahuellamiento ($G^*/\text{sen } \delta$) y de la viscosidad en función de la temperatura de la mezcla asfáltica 5 (50% CPG + 50% Lagotreco) después del tratamiento oxidativo por RTFOT a 163°C.....	92
Figura 54. 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 5 (50% CPG + 50% Lagotreco) después de un envejecimiento acelerado en el PAV de 10 años.	93
Figura 55. 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).	94
Figura 56. 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.....	95
Figura 57. 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% Lagotreco) después de un envejecimiento acelerado en el PAV de 10 años.	96

Figura 58. Curvas de correlación del factor de ahuellamiento ($G^*/\text{sen } \delta$) y de la viscosidad en función de la temperatura de la mezcla asfáltica 8 (50% TJM-26 + 50% Lagotreco).....	97
Figura 59. Curvas de correlación del factor de ahuellamiento ($G^*/\text{sen } \delta$) y de la viscosidad en función de la temperatura de la mezcla asfáltica 8 (50% TJM-26 + 50% Lagotreco) después del tratamiento oxidativo por RTFOT a 163°C.....	98
Figura 60. 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 8 (50% TJM-26 + 50% Lagotreco) después de un envejecimiento acelerado en el PAV de 10 años.	99
Figura 61. 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).....	100
Figura 62. 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.....	101
Figura 63. 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.	102
Figura 64. 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).	103
Figura 65. 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. .	104
Figura 66. 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.	106

Figura 67. Curvas de correlación del factor de ahuellamiento ($G^*/\text{sen } \delta$) y de la viscosidad en función de la temperatura de la mezcla asfáltica 13 (100% CPG).	106
Figura 68. Curvas de correlación del factor de ahuellamiento ($G^*/\text{sen } \delta$) y de la viscosidad en función de la temperatura de la mezcla asfáltica 13 (100% CPG) después del tratamiento oxidativo por RTFOT a 163°C.	108
Figura 69. 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 13 (100% CPG) después de un envejecimiento acelerado en el PAV de 10 años.	108
Figura 70. Curvas de correlación del factor de ahuellamiento ($G^*/\text{sen } \delta$) y de la viscosidad en función de la temperatura de la mezcla asfáltica 15 (100% Lagotrec).	109
Figura 71. Curvas de correlación del factor de ahuellamiento ($G^*/\text{sen } \delta$) y de la viscosidad en función de la temperatura de la mezcla asfáltica 15 (100% Lagotrec) después del tratamiento oxidativo RTFOT a 163°C.	110
Figura 72. 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 15 (100% Lagotrec) después de un envejecimiento acelerado en el PAV de 10 años.	111

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 $G^*/\text{sen}(\delta) \geq 1,00$ kPa, $G^*/\text{sen}(\delta) \geq 2,20$ kPa y $G^* \cdot \text{sen}(\delta) \leq 5000$ 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 o Frases Claves: asfalto, componentes SARA, reología

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).

El asfalto para pavimentación es impermeable y no lo afecta la mayoría de los ácidos, álcalis y sales. Es llamado un material termoplástico, porque se ablanda cuando es calentado y se endurece cuando se enfría. Esta combinación única de

características y propiedades es una razón fundamental para que el asfalto sea un material de pavimentación importante. La propiedad más relevante del asfalto, es su comportamiento viscoelástico, el cual, al comportarse como un fluido newtoniano, le permite conservar sus propiedades en un intervalo de temperatura (2).

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.

Composición química

El asfalto consta de tres componentes mayoritarios. El primero se describe como una mezcla de asfaltenos que son los hidrocarburos más pesados de moléculas complejas, con alta masa molecular, insoluble en hidrocarburos parafínicos y soluble en compuestos aromáticos como el Benceno. El segundo componente es una mezcla de resinas de hidrocarburos más ligeros; éstas rodean a las moléculas de asfaltenos sin que exista una separación entre ellas, sino una transición. El tercero, ocupando el espacio restante, es llamado aceite mineral. Estos tres constituyen un sistema coloidal (4).

De los asfaltenos, dependen las características estructurales y de dureza de los asfaltos; las resinas le proporcionan sus propiedades aglutinantes y los aceites la consistencia adecuada para hacerlos manejables. Los enlaces que mantienen unidas a estas moléculas son débiles, por lo que se rompen fácilmente con calor o presión, lo

que explica la viscosidad del asfalto. Las moléculas polares de éste forman redes, dándole propiedades elásticas y las no polares forman el cuerpo alrededor de la red contribuyendo con sus propiedades viscosas. Estas moléculas polares y no polares, se distribuyen de forma homogénea. La mezcla homogénea polar – no polar es esencial para el buen desenvolvimiento del asfalto. La estructura molecular del asfalto es extremadamente compleja y varía en tamaño y tipo de enlace químico con cada mezcla (5).

A pesar de su alto rendimiento en un amplio rango de climas, la temperatura ambiente es suficiente para causar deformaciones prematuras en el material. Los esfuerzos por mejorar estas propiedades en el asfalto han derivado en la búsqueda de mezclas a partir de dos o más componentes de diferente consistencia. La necesidad de construir este tipo de mezclas ha llevado a estudiar las características reológicas y propiedades fisicoquímicas de los asfaltos preparados a partir de un componente blando y un componente duro, los cuales pueden provenir de un mismo crudo, o de mezclas de crudos distintos (6).

El asfalto es considerado un sistema coloidal complejo de hidrocarburos, en el cual es difícil establecer una distinción clara entre la fase continua y la dispersa. Las primeras experiencias para describir su estructura fueron desarrolladas en 1924 (7). Se sugirió un modelo aún vigente como se muestra en la figura 1, basado en que la presencia de los asfaltenos se encuentran rodeados de los compuestos de la fase malténica denominado a este complejo de compuestos micelas; en tanto la fase continua está formada por los compuestos de la fase malténica denominándola fase intermicelar (7).

Si las micelas se encuentran bien peptizadas la mezcla asfáltica tendrá un comportamiento tipo sol, es decir, están separadas; en tanto que si se encuentran

interactuando entre ellas formando una estructura más o menos rígida, el comportamiento de las mezclas asfálticas será tipo gel. Esta condición depende de la concentración y carácter químico de las dos fases (7).

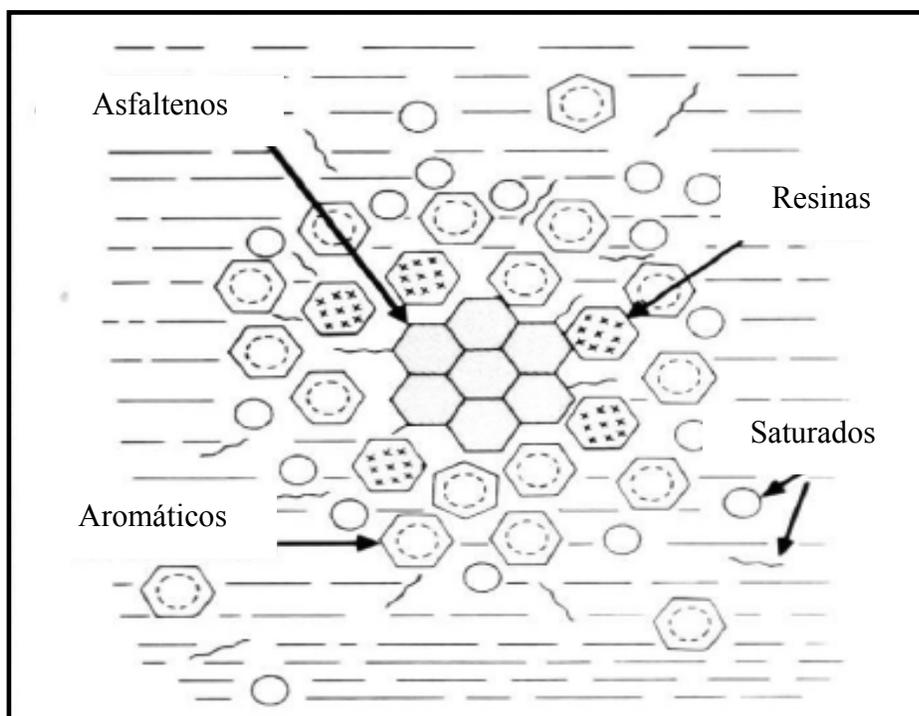


Figura 1. Modelo de la estructura del asfalto según Nellensteyn en 1924 (7).

Entre los diferentes modelos que coinciden con una estructura heterocíclica del asfalto, se describen entre ellos como un sistema de aromáticos, en donde las estructuras de los alifáticos es de 100 a 300 átomos de carbono, con sustitutos de grupos alquilo y elementos como el azufre, nitrógeno y oxígeno unidos covalentemente. Sin embargo, el número y la disposición de estos se diferencian de un modo significativo, ilustrado en la figura 2 (8), donde los asfaltenos son representados como un sistema de 6 a 20 o más estructuras aromáticas condensadas, unidas vía cadenas de alquilo.

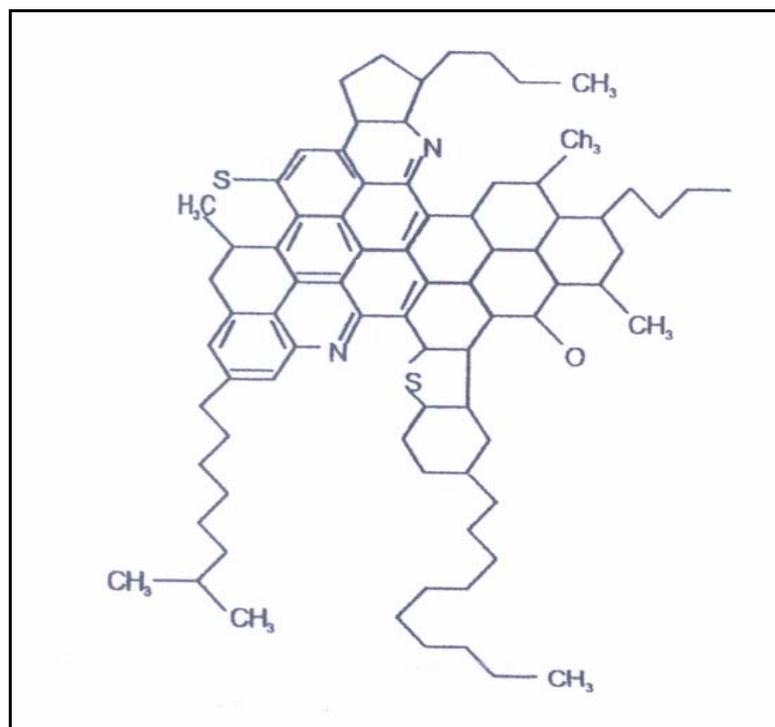


Figura 2. Estructura molecular de asfaltenos propuesto por Speight y Moschopedis en 1981 (8).

Comparado con el modelo de 9 y 10 que se ilustra en la figura 3 difiere en un importante factor: en vez de mostrar asfaltenos como un sistema de los numerosos aromáticos y estructuras de heterocíclicas, ellos los proponen como las pequeñas unidades, con un desarrollo de condensación bajo y unido por cadenas de alifáticos, con una variación longitudinal de 4 a 6 o más átomos de carbono y estos son unidos por carbonos aromáticos; es decir, aquellos incluidos en un anillo aromático. El nitrógeno, el azufre y átomos de oxígeno son incorporados a la estructura como componentes internos y grupos funcionales (11).

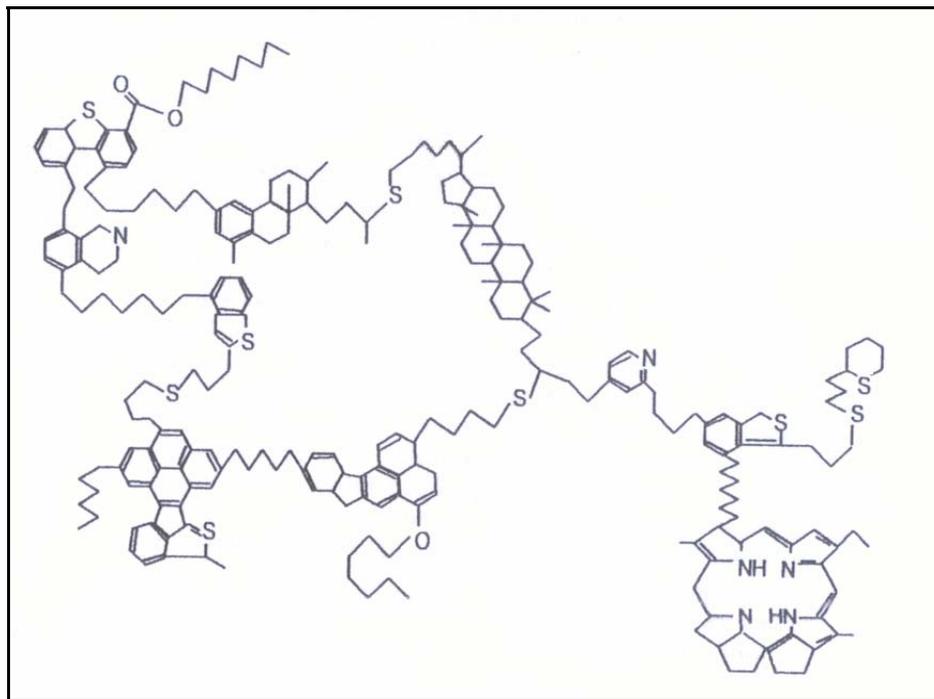


Figura 3. Estructura molecular de asfaltenos propuesto por Strausz y Murgich en 1999 (9, 10).

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 (13).

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 (apéndice A).

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 (12).

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 (12).

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 (14).

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

prematureo. 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 (15).

Los casos estudiados correspondientes a las muestras ligeramente oxidadas por RTFOT, sugieren que la oxidación ligera genera componentes oxidados capaces de estabilizar al asfalto. Es razonable presumir que se trate de oxidación de aromáticos hacia resinas, componentes estos últimos que han sido discutidos como claves para la estabilización de los asfaltenos (16).

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. Una vez que se ha envejecido la muestra en el horno de película delgada giratoria (RTFOT), se traslada la muestra de ligante asfáltico al PAV donde es sometida a alta presión (300 psi ó 2070 kPa) y temperatura (90°C, 100°C ó 110°C, según condiciones climáticas a las que se someta el asfalto) por espacio de 20 horas para simular los efectos del envejecimiento a largo plazo (14).

Programa SHRP

Fue un proyecto desarrollado en los EEUU a partir de 1987, obteniendo nuevas especificaciones para ligantes en mezclas asfálticas, las cuales presentan un sistema mejorado para la caracterización de materiales (ligantes y agregados), el análisis y diseño de mezclas que tomen en consideración su comportamiento en campo.

Estas nuevas especificaciones que conforman el sistema de diseño de mezclas asfálticas llamado SUPERPAVE, por sus siglas en inglés (SUPERior PERforming Asphalt PAVement), incorporan el comportamiento en servicio de los pavimentos basados en los principios básicos de ingeniería de materiales e incluyen además nuevos equipos de ensayos, metodologías y criterios de interpretación.

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 (17).

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.

Otra característica importante de los asfaltos está asociada con los procesos de oxidación y volatilización. El primero de estos se produce por la reacción de las moléculas orgánicas presentes en el asfalto con el oxígeno del medio ambiente y el segundo por la evaporación de los componentes livianos del ligante. Estas reacciones cambian tanto la estructura (la rigidiza) como la composición química de los asfaltos y producen un proceso de envejecimiento (endurecimiento) del mismo. Este proceso de envejecimiento ocurre lentamente en el pavimento y se acelera en climas cálidos, lo que debe ser considerado en las condiciones de Venezuela (16).

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 como se muestra en la figura 4.



Figura 4. Deformación permanente.

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. Un diseño inapropiado

o con deficiente calidad de construcción de las capas del pavimento, sometidas a altas deflexiones cuando son cargadas, genera deterioro por agrietamiento por fatiga.

La selección de materiales (propiedades del asfalto), el empleo de agregados o productos que puedan resistir a las deflexiones y a la humedad, ayudarán a que el asfalto pueda comportarse como un material elástico blando beneficiando así a la mezcla de asfalto.

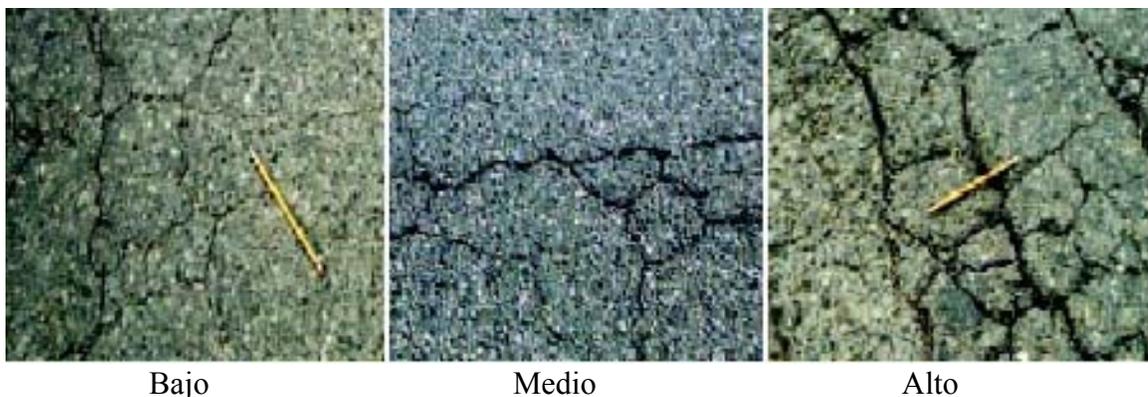


Figura 5. Niveles de agrietamientos por fatiga (15).

En el pasado se pensaba que el agrietamiento por fatiga se iniciaba en las capas inferiores y se propagaba hacia la superficie. Recientemente, se ha observado (15) también que puede iniciarse en la superficie y migra hacia abajo. En realidad el inicio del agrietamiento por fatiga dependerá de las características de la subrasante (capa de fundación de la estructura del asfalto) y el pavimento o del estado esfuerzo-deformación que se genere, tal como se ilustra en la figura 5.

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. La severidad de las grietas por fatiga térmica se muestra en la figura 6.



Figura 6. Grados de severidad del agrietamiento por fatiga térmica a bajas temperaturas (15).

El agrietamiento por baja temperatura se produce cuando el pavimento se contrae en climas fríos, iniciándose la deformación por tensión dentro de la capa de asfalto. En algunos puntos a lo largo de la carretera, el esfuerzo de tensión excede la resistencia a la tensión de la capa de asfalto, agrietándose; con frecuencia ocurre con un único evento de descenso de temperatura. El agrietamiento por baja temperatura puede también ser un fenómeno de fatiga resultando del efecto acumulativo de muchos ciclos de climas fríos. La magnitud y frecuencia de temperaturas bajas y rigidez de la mezcla asfáltica en la superficie, son los principales factores en la ocurrencia e intensidad del agrietamiento transversal por baja temperatura.

En climas fríos o bajo aplicaciones de carga rápida, el asfalto se comporta como un sólido elástico. Los sólidos elásticos son como ligas porque cuando cesa la carga que los deforma, regresan a su posición original; pero si el material se esfuerza más allá de su capacidad el sólido elástico puede romperse. En estos casos, las cargas aplicadas producen esfuerzos internos que se acumulan en el pavimento asfáltico que tenderá a contraerse mientras su movimiento es restringido por las capas inferiores.

Estos deterioros más frecuentes como lo son deformación permanente, el agrietamiento por fatiga y agrietamiento a bajas temperaturas, están directamente relacionados con el comportamiento del ligante asfáltico bajo diferentes condiciones de temperatura, presión y carga, que cambian su estructura tanto física como química (15).

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 (18).

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 (19).

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 (δ) de las mezclas asfálticas, para temperaturas altas e intermedias.

Las especificaciones SUPERPAVE utilizan de dos maneras los valores de G^* y δ . 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) (19).

En el presente trabajo se prepararon mezclas asfálticas con diferentes proporciones de un componente duro Lagotreco 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 Lagotrecó 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 siguientes equipos instalados en el Laboratorio de Amuay, en las áreas de Analítica I y de crudo del Centro Refinador Paraguaná, PDVSA (CRP-AMUAY):

1. Agitador de baja revolución, marca VELP, modelo DLH.
2. Penetrómetro, marca Presesión, modelo 73515, (ASTM D-5).
3. Medidor de punto de ablandamiento, marca Herzog, modelo Lauda, (ASTM D-36).
4. Medidas de viscosidad absoluta, Viscosímetro CANNON, modelo CT-1000, (ASTM D-2171).
5. Medidas de viscosidad cinemática, Viscosímetro CANNON, modelo CT-1000, (ASTM D-2170)
6. Medidas de viscosidad rotacional, Viscosímetro Brookfield, modelo DV-III, (ASTM D-4402).
7. Reómetro de flexión (BBR), CANNON, modelo 1020-C, (ASTM D-6648).
8. Reómetro de corte dinámico (DSR), marca TA instruments LTD, modelo CSAII instruments base unit, (AASHTO-TP5), (ASTM D-7175).

9. Rotación de la película fina en estufa (RTFOT), marca James Cox & Cons inc., modelo CS325-A, (ASTM D-2872).
10. Envejecimiento en el recipiente de presión (PAV), marca Prentex, modelo 9300, (AASHOPP-1), (ASTM D-6521).

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). Se aplicó a las mezclas de asfalto con un punto inicial de 220°C. El sistema de detección a la llama se mantuvo con un flujo de hidrógeno de 160 ml/min, suministrado por un generador de hidrógeno marca Hewlett Packard,

modelo 9200 y un flujo de aire de 2000 ml/min, suministrado por cilindros de aire comprimido de alta pureza. Los solventes para la corrida cromatográfica fueron n-heptano, tolueno, isopropanol y cloroformo. La determinación se realizó en dos etapas: en la primera, se separaron los compuestos saturados, aromáticos y polares, estos últimos agruparon las resinas y asfaltenos y se cuantificaron los compuestos saturados y aromáticos. En la segunda etapa, se separaron los maltenos (saturados, aromáticos y resinas) de los asfaltenos y se cuantificaron los asfaltenos. Las resinas se calcularon por diferencia con respecto al porcentaje en masa. En cada una de las mezclas de asfalto obtenidas se realizó este análisis, por duplicado.

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. En este método, el carbono, hidrógeno y nitrógeno fueron determinados para el mismo procedimiento analítico. La combustión de la muestra se produjo en un tubo de oxidación relleno de óxido de cobre en un horno a 950°C, donde se obtuvieron los productos de combustión como CO₂, H₂O, N₂ y SO_x. En este horno la muestra fue purgada con oxígeno para obtener una atmósfera libre de gases atmosféricos. Una porción de los gases mezclados, libre de óxidos de azufre, fueron arrastrados con helio y pasaron a través de un tubo de reducción empacado con cobre metálico, el cual tuvo la función de remover el oxígeno y reducir el NO_x a N₂, sobre NaOH para remover el CO₂ y sobre perclorato de magnesio para remover el H₂O. El nitrógeno elemental restante se midió a través de la celda de conductividad térmica. Simultáneamente, pero por separado de la medición del nitrógeno, las celdas selectivas de carbono e hidrógeno midieron los niveles de CO₂ y H₂O. Para cada una de las mezclas de asfalto obtenidas se realizó este método para extraer el carbono, el hidrógeno y el nitrógeno, de esta manera por duplicado.

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 (tungsteno, mallas -2 +40) como catalizadores. La muestra fue colocada en un pedestal que se introdujo en un horno calentado por inducción. Dentro del horno la muestra fue purgada con oxígeno para obtener una atmósfera libre de gases atmosféricos. Al iniciarse el calentamiento por inducción se produjo la combustión de la muestra y los gases de la misma fueron liberados. Estos gases fueron arrastrados por una corriente de helio mediante una serie de trampas en donde fue removido el vapor de agua y el dióxido de carbono, finalmente el dióxido de azufre fue llevado a la celda de detección de infrarrojo. El microprocesador hizo la conversión del dióxido de azufre a azufre total. Para cada una de las mezclas de asfalto obtenidas se realizó este método para extraer el azufre de esta manera, por duplicado.

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; este método fue aplicado a muestras de mezclas obtenidas a través de residuos de petróleo. Los valores obtenidos representaron el oxígeno total. Se llevó a cabo la pirólisis reductora de la muestra para convertir el oxígeno a monóxido de carbono. El helio como gas de arrastre transportó los productos de pirólisis a través de una combinación de depuradores para atrapar los gases ácidos y el vapor de agua. Los productos fueron transportados luego a una columna cromatográfica de tamiz molecular en la cual se separa el monóxido de carbono de los otros productos de la pirólisis. Un detector de conductividad térmica generó una respuesta que es proporcional a la cantidad de monóxido de carbono. Para cada una de las mezclas de asfalto obtenidas se realizó este método para extraer el oxígeno de esta manera, por duplicado.

Análisis fisicoquímico

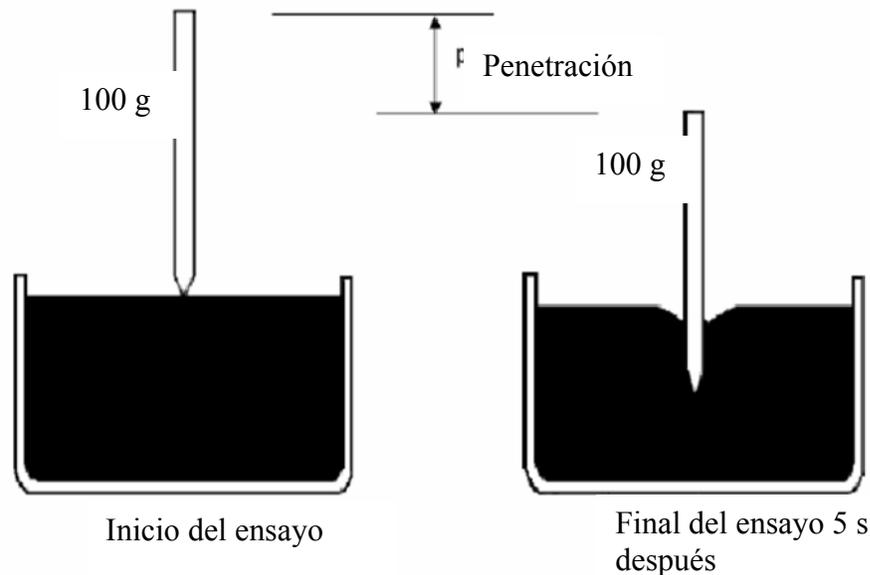


Figura 7. Ensayo del punto de penetración.

Para la determinación del punto de penetración se utilizó un penetrómetro, marca Precision, modelo 73515, bajo la norma ASTM D-5, que consistió en colocar en un recipiente 65,0 g de mezcla de asfalto precalentado a una temperatura no mayor de 90°C, se dejó a temperatura ambiente por 1 hora y luego se introdujo en un baño de agua a 25°C por 45 min con la temperatura controlada. Después de esto, la muestra fue colocada inmediatamente debajo de la aguja normalizada, de 100,0 g de masa, en la superficie de esta mezcla y se dejó caer durante 5 segundos como se muestra en la figura 7. La medida de la penetración fue la longitud que penetró la aguja en la mezcla de asfalto en unidades de décimas de milímetro (figura 8). Sin embargo, para puntos de penetración por encima de 100 mm fue utilizado un recipiente más grande con una capacidad de 165,0 g como el que se usó para la mezcla 14 (100% TJM-26).

Este ensayo se realizó tres veces para cada una de las mezclas asfálticas obtenidas.



Figura 8. Prueba de una mezcla de asfalto realizada.

Para el ensayo del punto de ablandamiento se utilizó un equipo marca Herzog, modelo Lauda, (figura 9 (A)), bajo la norma ASTM D-36, la cual consistió en calentar la mezcla asfáltica a temperatura no mayor a 90°C por 45 min, luego se rellenaron los anillos del atril con la mezcla asfáltica (figura 9 (B)), se dejó enfriar por 45 min a temperatura ambiente y se pesaron las esferas metálicas para asegurarse que las masas fuesen iguales como se muestra en la figura 9 (C). Luego, en el atril se colocaron los anillos y las esferas metálicas (no encima de los anillos), en un baño de María de agua con hielo hasta -5°C por 30 min. Después de alcanzada la temperatura se montó la muestra en el equipo y se realizó el ensayo según el manual de instrucciones; donde se pudo observar el momento en que las esferas metálicas atraviesan los anillos llenos de material asfáltico y tocan una placa de referencia, simultáneamente, (figura 9 (D)), después de haber recorrido una distancia de 24,5 mm. Este ensayo se realizó por triplicado para cada mezcla asfáltica obtenida.

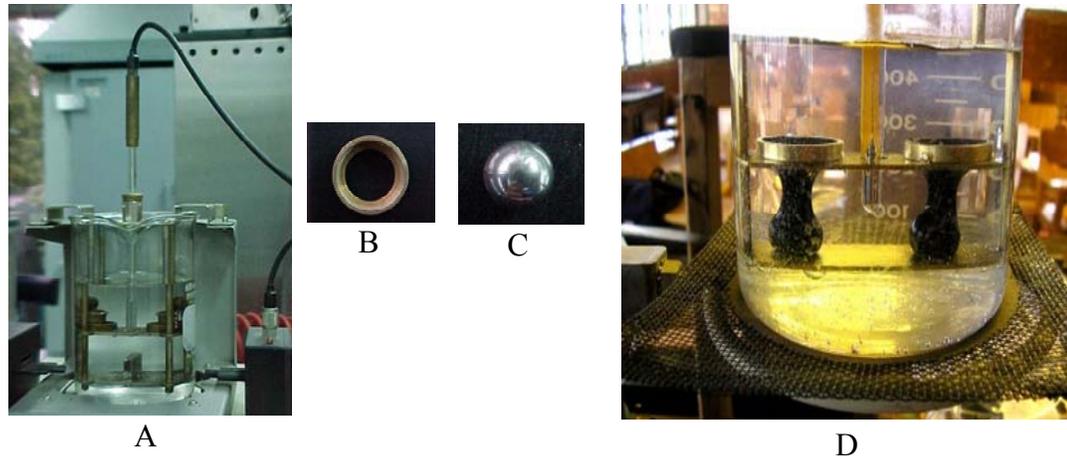


Figura 9. Equipo para el punto de ablandamiento (A), anillo (B) y esfera metálica (C) y ensayo del punto de ablandamiento culminado (D).

Para el ensayo de viscosidad absoluta a 60°C se empleó un viscosímetro de vacío CANNON de doble bulbo, (figura 10), modelo CT-1000, bajo la norma ASTM D-2171, se trabajó con los dos factores de conversión $(F_c)_a = 19,29$ y $(F_c)_b = 5,91$.

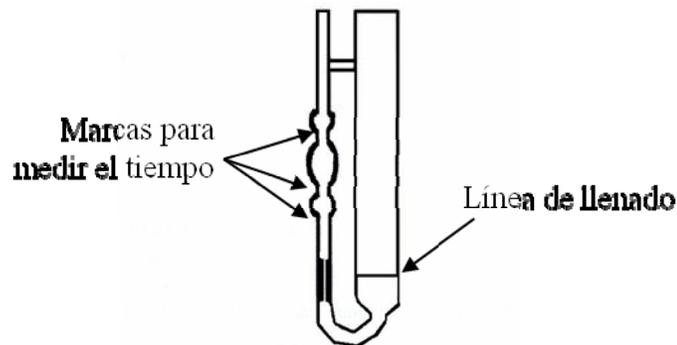


Figura 10. Diagrama del viscosímetro capilar CANNON de doble bulbo.

El viscosímetro fue montado en un baño con agua a temperatura constante controlado termostáticamente. Se añadió la mezcla de asfalto precalentada (90°C) en el viscosímetro hasta que alcanzó el nivel de llenado. Luego que el baño, el viscosímetro y la mezcla de asfalto se estabilizaron en 60°C por un tiempo de 45 minutos, se aplicó un vacío parcial de 300 mmHg para inducir el flujo y se midió con

un cronómetro el tiempo (en segundos) que tardó la mezcla asfáltica en fluir entre las tres marcas. Multiplicando los tiempos por cada uno de los factores de calibración correspondientes al viscosímetro, se obtuvo el valor de la viscosidad. Las medidas de este ensayo para cada una de las mezclas asfálticas obtenidas se realizaron por triplicado.

Para el ensayo de la viscosidad cinemática a 135°C se empleó un viscosímetro CANNON de brazo cruzado, (figura 11), modelo CT-1000, bajo la norma ASTM D-2170 de un factor de conversión de $F_c = 1,000$; en el cual se utilizó un aceite CANNON hecho por el fabricante para el baño. Se montó el viscosímetro en el baño hasta que alcanzó la temperatura de equilibrio (135°C) y se agregó la mezcla de asfalto en la abertura mayor hasta que llegó a la línea de llenado.

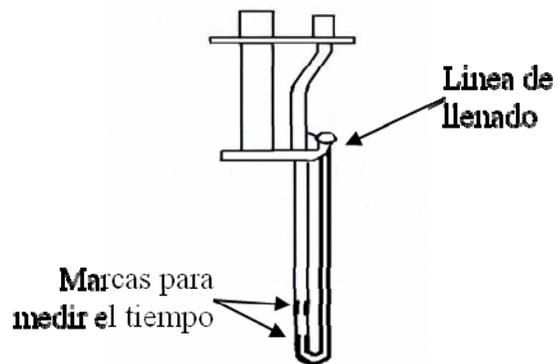


Figura 11. Diagrama del viscosímetro capilar CANNON de brazo cruzado.

Como antes se dejó que el sistema alcanzase la temperatura de equilibrio y luego se le aplicó una pequeña presión en la abertura menor con un ligero vacío y la mezcla asfáltica comenzó a descender por el sifón que está justo en la línea de llenado en la sección vertical del tubo capilar debido a la gravedad. Cuando la mezcla alcanzó la primera de las marcas, se comenzó a medir el tiempo hasta que alcanzó la segunda. El intervalo de tiempo, multiplicado por el factor de calibración del viscosímetro, dio la viscosidad cinemática en centistokes.

El ensayo de viscosidad cinemática se realizó por triplicado para cada muestra de las mezclas de asfaltos obtenidas.

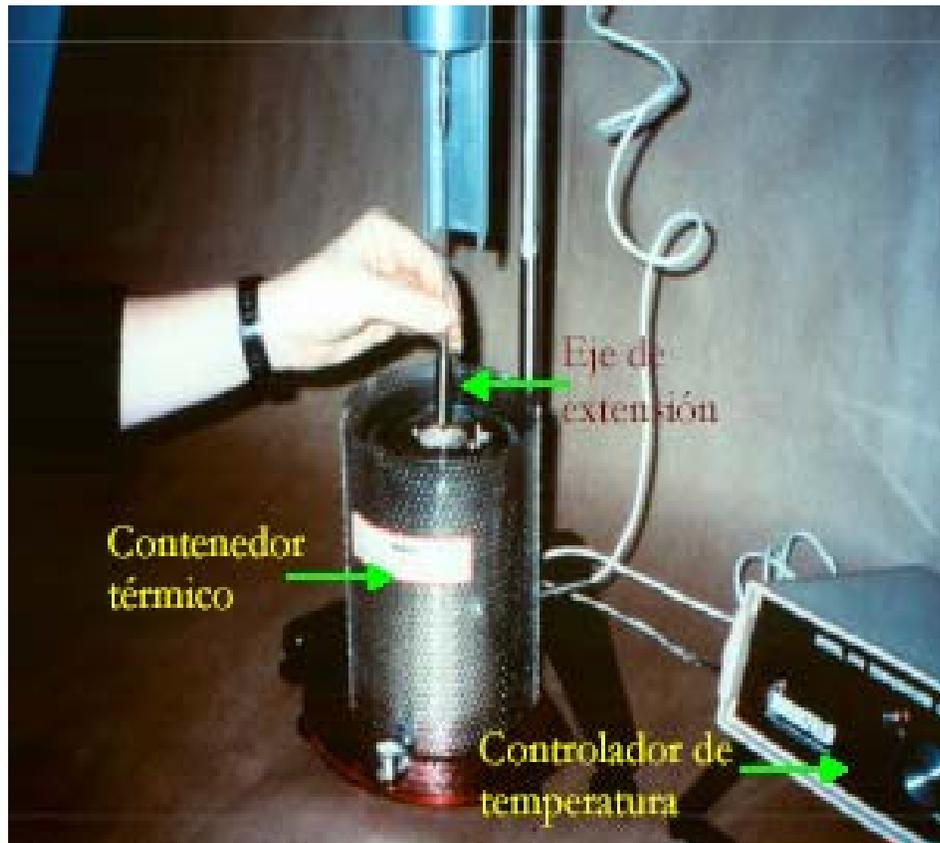


Figura 12. Equipo Brookfield.

Para el ensayo de la viscosidad rotacional, se utilizó un equipo Brookfield, modelo DV-III, ver figura 12, bajo la norma ASTM D-4402, consistió en calentar la mezcla de asfalto a una temperatura no mayor de 90°C para que fuese más manejable y se introdujo en el contenedor pesando alrededor de $10,0 \pm 0,5$ g, luego se introdujo en el equipo de viscosidad rotacional (previamente precalentado a la temperatura de equilibrio) se esperó un tiempo no mayor de 30 min y un mínimo de 10 min, para que alcanzase la temperatura de equilibrio. El vástago se colocó dentro de la muestra y éste empezó a girar esperándose un tiempo de 5 min para que alcanzase el centro de

la mezcla, luego se tomaron tres medidas, una por cada minuto que pasó y se escribió el valor promedio de las viscosidades como se muestra en la figura 13.

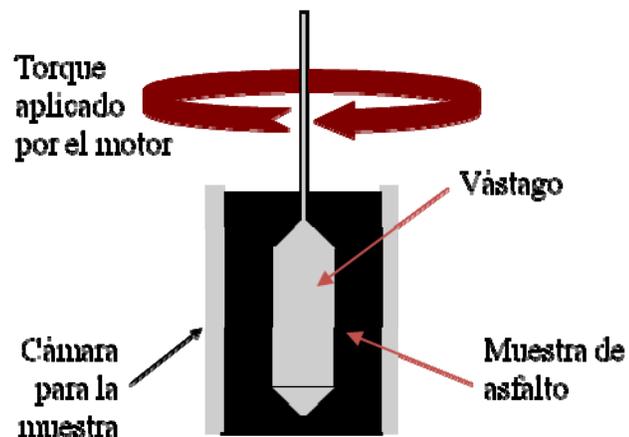


Figura 13. Vista del ensayo de una mezcla de asfalto con el vástago en equilibrio.

Este ensayo se realizó por triplicado a cada una de las mezclas de asfalto obtenidas.

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.



Figura 14. Equipo de película fina rotativa en estufa (RTFOT).

El mismo consistió en precalentar el horno y antes de colocar dentro del horno los contenedores cilíndricos de asfalto por un tiempo de 16 horas, estos fueron pesados para conocer su masa, figura 15 (A); luego las mezclas de asfaltos obtenidas fueron previamente precalentada a una temperatura no mayor de 90°C. Después se pesó una masa de $35,0 \pm 0,5$ g de mezcla asfáltica, en cada caso dentro del cilindro, esto por duplicado en el caso de cada muestra (figura 15 (B)); se colocaron los cilindros en forma horizontal en una parrilla de enfriamiento, se dejó enfriar por 60 minutos y luego, inmediatamente se introdujeron los cilindros dentro del horno en forma horizontal en un carrusel que gira a una velocidad de 15 revoluciones por minuto (rev/min) alrededor de un eje horizontal, a una temperatura de 163°C. Al rotar los cilindros, los asfaltos o mezclas fueron expuestos constantemente en películas nuevas de mezclas asfálticas. En cada rotación el orificio del frasco de la muestra pasó por un chorro de aire caliente continuo a 4000 ml/min que elimina los vapores acumulados y por un período de 85 min (figura 16). Este experimento se repitió dos veces por cada mezcla de asfalto obtenida. Una vez transcurrido el tiempo en el horno, los cilindros con la mezcla de asfalto) se colocaron en la parrilla de enfriamiento por un tiempo de 90 min (60 min mínimos a 180 min. máximos) tal como se ilustra en la figura 15 (C) y después fueron pesadas para determinarles

cambio de masa.

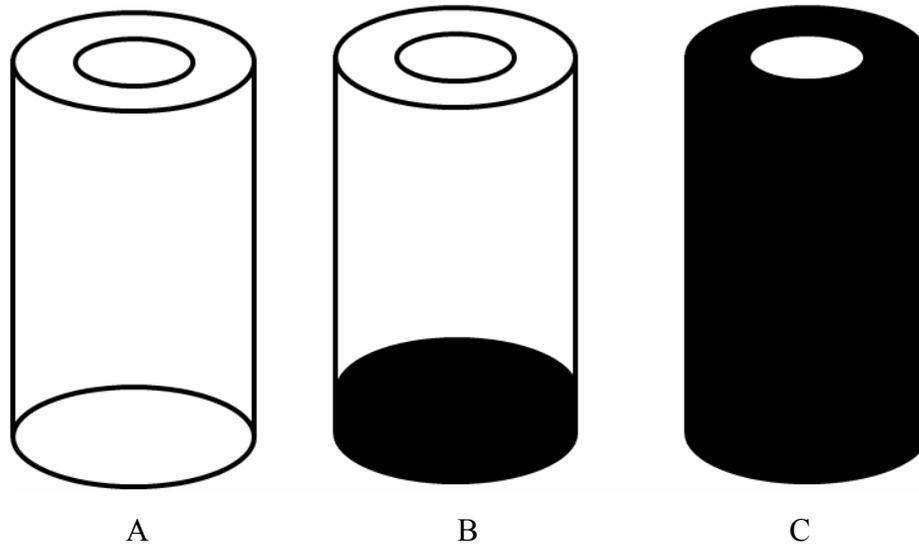


Figura 15. Contenedor cilíndrico vacío (A), contenedor cilíndrico más mezcla asfáltica (B) y contenedor cilíndrico más mezcla asfáltica después de RTFOT (C).

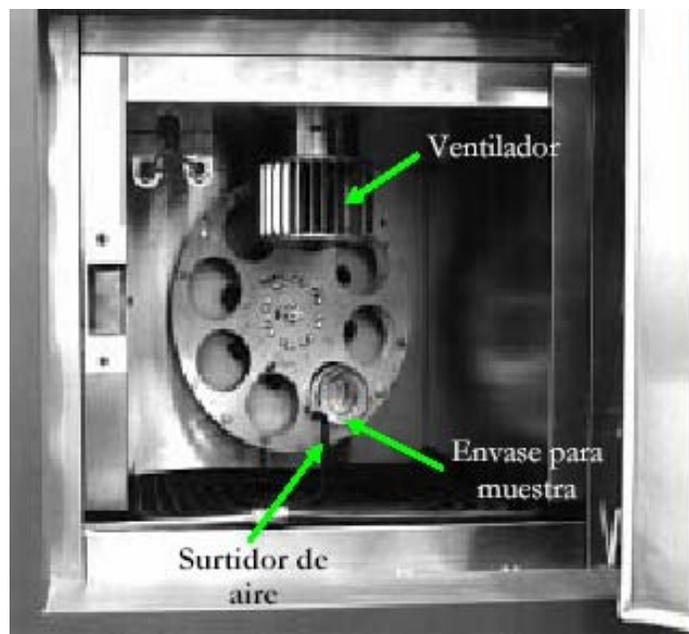


Figura 16. Parte interna del RTFOT.

Esta técnica permitió determinar la cantidad másica de compuestos volátiles perdidos por las mezclas durante el proceso mezclador-secador, lo cual fue un indicativo del envejecimiento de cada mezcla asfáltica obtenida calculado de la siguiente manera:

$$PM = \frac{(mc + m) - (mc + m)_{RTFOT}}{mc + m} \times 100$$

donde:

PM	Pérdida de Masa
mc+m	Masa del contenedor + mezcla de asfalto
(mc+m) _{RTFOT}	Masa del contenedor + mezcla de asfalto después del envejecimiento

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, como se muestra en la figura 17 (A); la prueba consistió en someter la muestra proveniente del RTFOT, pesando una masa de $85,0 \pm 0,5$ g de mezcla asfáltica en un cilindro de fondo plano con 10 mm de profundidad como se muestra en la figura 17 (B), sometiéndose luego a un calentamiento adicional de 100°C durante 20 horas (con un precalentamiento del equipo hasta que alcanzó la temperatura de equilibrio), el cual se realiza en un recipiente a presión de 2,1 MPa. Ésta es una técnica que se utiliza para determinar el envejecimiento a largo plazo en las mezclas de asfaltos. Este procedimiento se realizó dos veces por cada muestra de las mezclas asfálticas obtenidas.

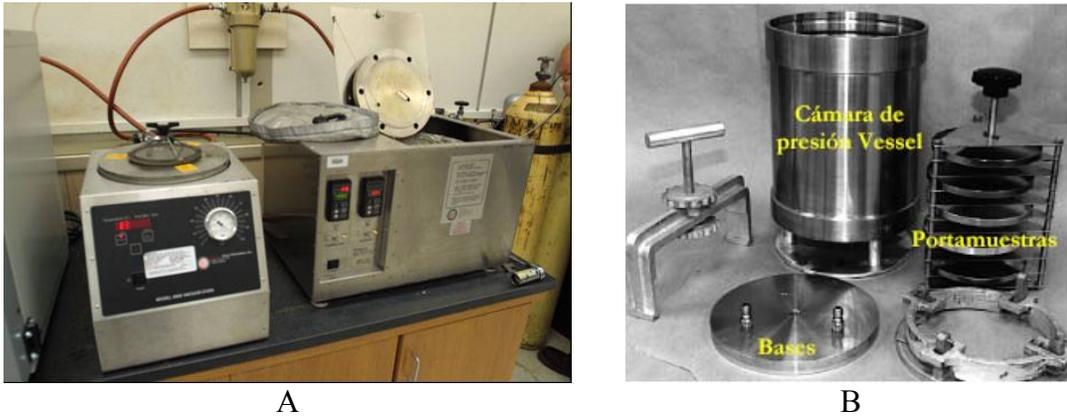


Figura 17. Equipo de cámara de envejecimiento a presión (A), materiales del PAV (B).

Análisis reológico

Para el análisis reológico, se utilizó un reómetro de flexión (BBR), marca CANNON, modelo 1020-C como se muestra en la figura 18, realizado bajo la norma ASTM D-6648 y especificación AASHTO TP-1. Este equipo se usó para evaluar las propiedades de las mezclas asfálticas a bajas temperaturas, midiendo la flexión en un punto de la viga prismática de las mezclas de asfaltos (envejecido después del PAV).



Figura 18. Reómetro de flexión (BBR).

Se prepararon las láminas de aluminio, con una mezcla de glicerina y talco en

una proporción 1:4 y se le untó a las láminas como se muestra en la figura 19 (A), para evitar que los asfaltos se adherieran a las láminas después de enfriarse; se calibró el equipo que se muestra en la figura 18, después de alcanzada la primera temperatura a -12°C , en el molde armado con las láminas (figura 19 (B)); se añadió la mezcla asfáltica en el molde armado con las láminas, observado en la figura 19 (C), el molde con la mezcla se introdujo dentro del baño por un tiempo de 1 minuto. Una vez transcurrido este tiempo se procedió a desmontar el molde de la mezcla asfáltica con sumo cuidado y fuera del baño ilustrado en la figura 19 (D); luego se introdujo dentro del baño nuevamente por un tiempo de $60,0 \pm 5,0$ minutos y después se procedió a realizar el ensayo a la muestra. El aparato aplicó, durante 4 minutos, una carga constante de 980 mN en el centro de una pequeña viga ($101,6 \times 12,7 \times 6,35 \text{ mm}^3$) de la mezcla asfáltica previamente envejecida y enfriada a la temperatura de ensayo (entre -36°C y 0°C). La deformación producida se midió continuamente calculando la resistencia a la deflexión del ligante (asfalto) a la acción de la carga y su velocidad de variación. Los valores obtenidos se relacionan con la resistencia a la fisuración térmica de las mezclas bituminosas o asfálticas.



Figura 19. Láminas de aluminio para el molde (A), molde armado y listo para colocar la mezcla asfáltica de aluminio (B), molde listo para sumergir en el baño a -12°C (C) y mezcla asfáltica lista para el análisis (D).

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.



Figura 20. Equipo de reómetro de corte dinámico (DSR).

Seguidamente, se calibró el equipo y por último las muestras fueron colocadas (comprimidas) entre dos placas paralelas, una fija y otra oscilante. Se removió el exceso de muestra con una espátula especial o cuchilla para que su grosor fuese uniforme como se muestra en la figura 21. La velocidad de oscilación (frecuencia) fue de 10 radianes por segundo (rad/s), lo que equivale aproximadamente a 1,59 Hz. Esto se llevó a cabo bajo tensión controlada, en la que el reómetro aplicó una fuerza de torsión constante para mantener la placa oscilante; ya que el asfalto es colocado entre una placa fija y una oscilante observado en la figura 22, la siguiente secuencia se inicia en el punto A hasta el punto B, regresa a A, luego C, y de nuevo a A,

completándose así un ciclo que se repite durante el ensayo. Esta prueba caracterizó tanto el comportamiento viscoso como elástico de las muestras, las cuales permanecieron por un tiempo de 2 horas y 45 min en el reómetro, obteniéndose los resultados transcurrido este lapso de tiempo.

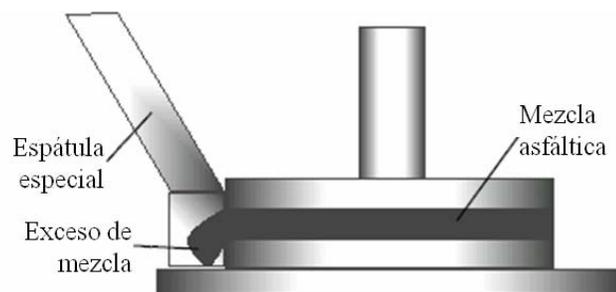


Figura 21. Corte transversal de una mezcla asfáltica montada en el DSR.

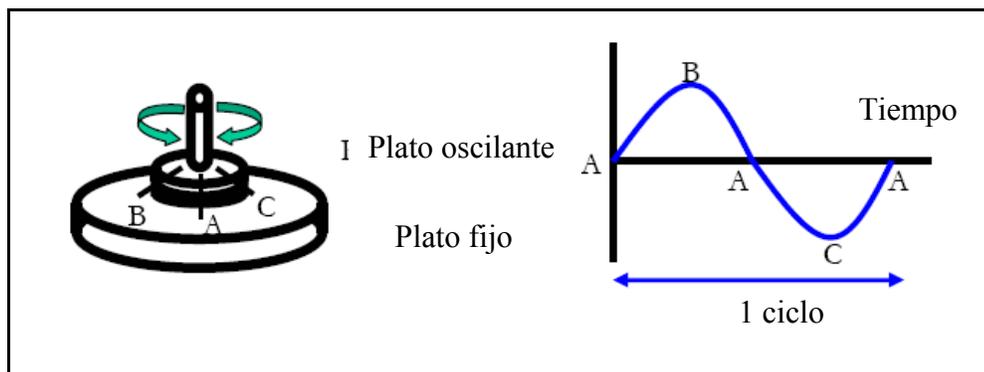


Figura 22. Ciclo del principio de operación del DSR.

Este ensayo se realizó tres veces a diferentes temperaturas por cada mezcla de asfalto obtenida (15 mezclas).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Ensayos de mezclas

En las tablas 1, 2, 3 y 4, se presentan los resultados de las proporciones de las mezclas asfálticas obtenidas para esta investigación, utilizando los asfaltos de Tía Juana Mediano (TJM-26), Lagotreco y Crudo de Propósitos Generales (CPG).

Tabla 1. Proporciones de las mezclas entre de TJM-26 y CPG.

Asfalto Mezcla	Componentes
TJM-26 (Mezcla 14)	100%
Mezcla 1	25% CPG + 75% TJM-26
Mezcla 2	50% CPG + 50% TJM-26
Mezcla 3	75% CPG + 25% TJM-26
CPG (Mezcla 13)	100%

Tabla 2. Proporciones de las mezclas entre CPG y Lagotreco.

Asfalto Mezcla	Componentes
CPG (Mezcla 13)	100%
Mezcla 4	75% CPG + 25% Lagotreco
Mezcla 5	50% CPG + 50% Lagotreco
Mezcla 6	25% CPG + 75% Lagotreco
Lagotreco (Mezcla 15)	100%

Tabla 3. Proporciones de las mezclas entre TJM-26 y Lagotreco.

Asfalto Mezcla	Componentes
TJM-26 (Mezcla 14)	100%
Mezcla 7	75% TJM-26 + 25% Lagotreco
Mezcla 8	50% Lagotreco + 50% TJM-26
Mezcla 9	25% TJM-26 + 75% Lagotreco
Lagotreco (Mezcla 15)	100%

Tabla 4. Proporciones de las mezclas entre CPG, TJM-26 y Lagotreco.

Asfalto Mezcla	Componentes
TJM-26 (Mezcla 14)	100%
Mezcla 10	25% TJM-26 + 25% CPG + 50% Lagotreco
Mezcla 11	25% TJM-26 + 50% CPG + 25% Lagotreco
Mezcla 12	50% TJM-26 + 25% CPG + 25% Lagotreco
CPG (Mezcla 13)	100%
Lagotreco (Mezcla 15)	100%

En las tablas 1, 2, 3 y 4 también se muestran los contenidos de cada mezcla asfáltica realizada en su componente blando y blando, duro y blando que las constituyen, con un total de 15 mezclas asfálticas obtenidas. Todas las mezclas se prepararon bajo los parámetros controlados de temperatura a 90°C, por 45 min a 200 revoluciones por minuto para su homogenización.

Propiedades químicas elementales de las mezclas asfálticas

En la figura 23, se ilustra el comportamiento de las isotermas a 220°C de los componentes SARA, expresados en porcentaje de masa (% m/m) en función de los componentes blandos CPG y TJM-26, para las cinco proporciones de mezclas asfálticas. De manera general, las isotermas mostraron un comportamiento de acuerdo a la cantidad presente de SARA (saturados, aromáticos, resinas y asfaltenos).

En este análisis de componentes SARA, las mezclas asfálticas realizadas de composición blandas que se ilustran en el gráfico, muestran un comportamiento dependiente por los componentes SARA (% m/m) debido a las reacciones que se estén produciendo dentro de ellas. La isoterma a 220°C en cuanto a las resinas disminuyen de izquierda a derecha porque aumenta en proporción el componente blando CPG; dándole a las mezclas 2 (50% CPG + 50% TJM-26), 3 (75% CPG + 25% TJM-26) y 13 (100% CPG) mayor aglutinamiento y menos espacios a sus moléculas internas permitiendo poca movilidad, hecho que pudiera estar provocando una mayor viscosidad en dichas mezclas, es decir, menor tendencia a fluir.

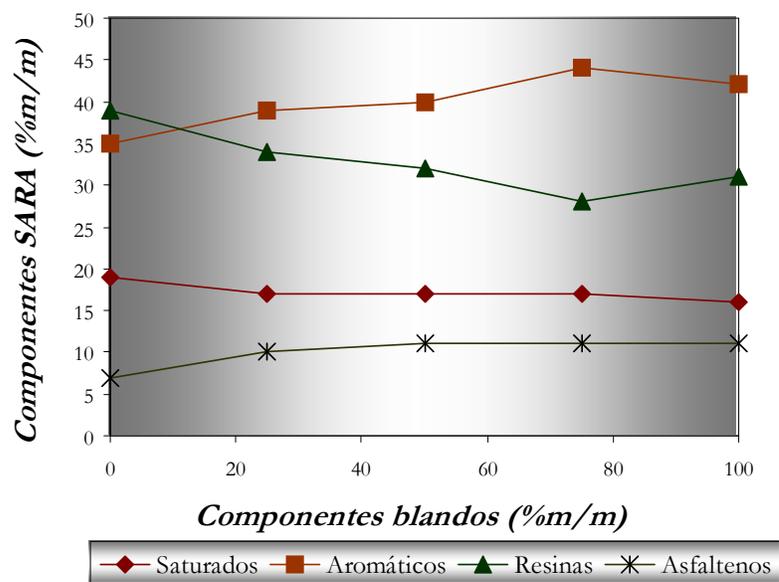


Figura 23. Fracciones de los asfaltos y sus mezclas con relación a los hidrocarburos presentes para dos componentes blandos (TJM-26 y CPG).

La isoterma a 220°C más alta muestra una gran cantidad de componentes aromáticos, lo que indica la complejidad molecular de estos hidrocarburos en su estructura interna. Debido al incremento en la cantidad de enlaces carbono-carbono presente en los compuestos aromáticos, los compuestos saturados se ven

desfavorecidos en vista de que estos disminuyen para formar parte de las estructuras cíclicas complejas de los compuestos aromáticos.

De izquierda a derecha se nota el incremento de la isoterma a 220°C de los asfaltenos dándole mayor dureza y viscosidad a la mezcla 3 (75% CPG + 25% TJM-26) y 13 (100% CPG) cuando se aumenta en proporción el componente CPG.

En estudios realizados sobre un tipo de asfalto líquido (20) se explica que la presencia simultánea de asfaltenos y resinas causan un cierto efecto sinérgico sobre la viscosidad; este hecho pone de manifiesto el desarrollo de un fenómeno de asociación intermicelar, mediante enlaces tipo puentes de hidrógeno entre asfaltenos y resinas, puesto que se sabe que dicha interacción da como resultado unas micelas inversas, termodinámicamente estables, de modo que los grupos hidrófilos de las moléculas de las resinas o monómeros queden libres del medio oleoso, protegidas por los grupos hidrófobos.

Dichas micelas inversas se encuentran en equilibrio dinámico con los monómeros del medio. El aumento de la proporción de asfaltenos y el descenso de las resinas produce un ascenso brusco en la viscosidad, atribuible al mayor número y tamaño de dichas micelas y por ende, a la contribución de las interacciones micelares (20). Sin embargo, con lo dicho anteriormente y con lo reflejado en la figura 23, se observa, que cuando se incrementa los asfaltenos las resinas disminuyen, lo cual se puede atribuir a que las resinas están reaccionando de tal manera que pasan a formar parte de los asfaltenos en su estructura cíclica interna.

En la figura 24, se ilustra el comportamiento de las isotermas 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 Lagotreco, 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.

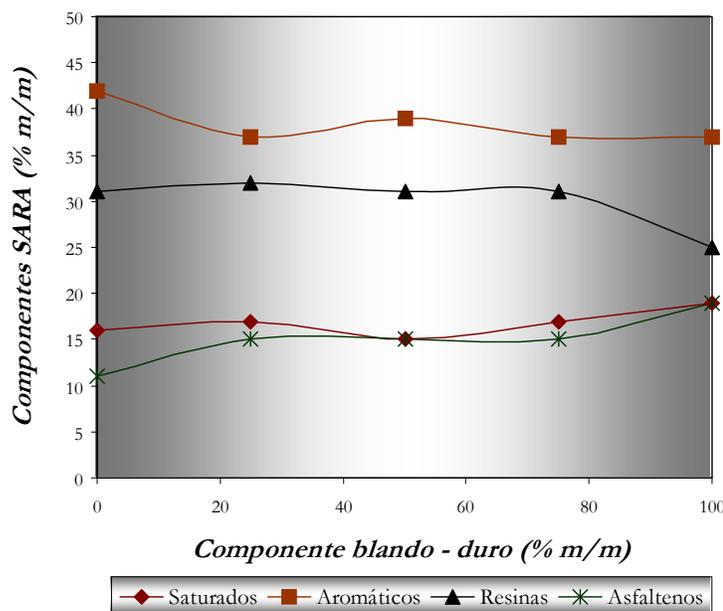


Figura 24. Fracciones de los asfaltos y sus mezclas con relación a los hidrocarburos presentes para un componente blando y duro (CPG y Lagotreco).

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 y coincide con lo explicado en la gráfica de la figura 23. 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.

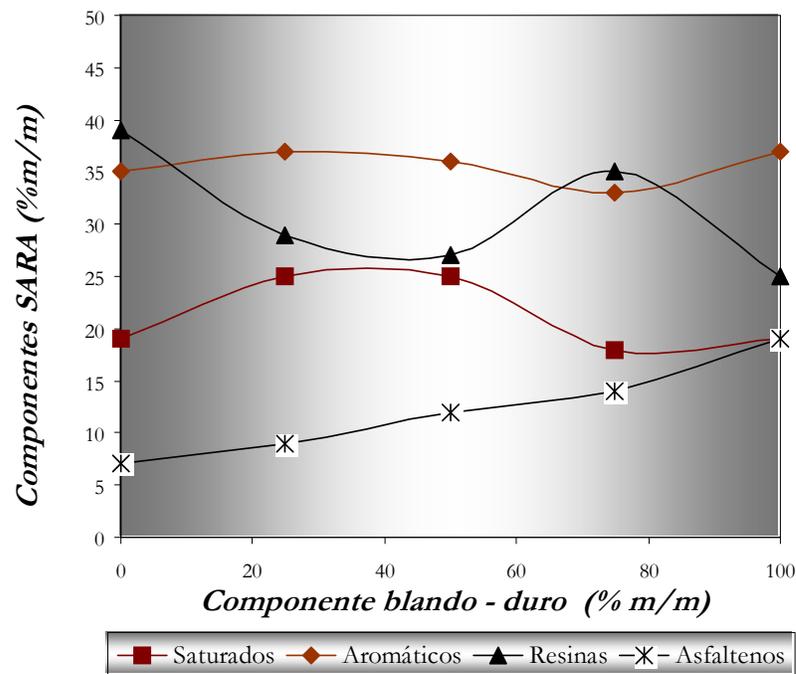


Figura 25. Fracciones de los asfaltos y sus mezclas con relación a los hidrocarburos presentes para un componente blando y uno duro (TJM-26 y Lagotreco).

Los resultados que se muestran en la figura 25 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.

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 25 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 5 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 5. 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 23, 24, 25 y lo reflejado en la tabla 5, 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 (17).

Desde el punto de vista de la composición elemental tanto los asfaltos de partida CPG, TJM-26 y Lagotreco como las mezclas obtenidas, el carbono es el elemento mayoritario del asfalto con niveles superiores al 80% en masa, seguido por el hidrógeno hasta 11% en masa y el azufre que puede alcanzar el 6% en masa para asfaltos provenientes de crudos agrios (alto contenido de azufre) como se presenta en las siguientes tablas 6, 7, 8 y 9; donde el nitrógeno y el oxígeno forman grupos funcionales en las cadenas moleculares de las estructuras internas de los asfaltos y sus mezclas (17).

Cuando la cantidad de nitrógeno y oxígeno son muy pequeñas (menor al 1% m/m) no pueden ser leídas por el detector de conductividad térmica que está acoplado con el cromatógrafo y por ende no da información cuantitativa exacta, como ocurrió experimentalmente en este caso. Solo se pudo registrar el nivel de nitrógeno en las mezclas asfálticas a proporciones diferentes y los asfaltos de partida no menores de 0,75%.

En la tabla 6 se muestran los resultados obtenidos de las mezclas 1, 2, 3, 13 y 14, provenientes de dos componentes blandos CPG y TJM-26 en cuanto a la composición elemental de carbono, hidrógeno, nitrógeno, azufre y oxígeno, expresados en porcentajes de masa (% m/m) en función de los componentes blandos CPG y TJM-26 para cinco proporciones de mezclas asfálticas.

Tabla 6. Composición elemental de los asfaltos y sus mezclas con relación a los hidrocarburos presentes para dos componentes blandos (TJM-26 y CPG).

Composición elemental	CPG (13)	Mezcla 3	Mezcla 2	Mezcla 1	TJM-26 (14)
Carbono (% m/m)	81,49	84,71	84,56	84,56	81,77
Hidrógeno (% m/m)	9,12	7,67	8,57	8,74	8,63
Nitrógeno (% m/m)	0,83	< 0,75	< 0,75	< 0,75	< 0,75
Azufre (% m/m)	3,30	3,25	3,22	2,74	2,88
Oxígeno (% m/m)	<1	<1	<1	<1	<1

Comparando las mezclas 1, 2 y 3, esta última resalta con la mayor cantidad de componente blando CPG, presentando más contenido de carbono, por lo tanto, cuando se incrementa en proporción dicho componente, se observa un comportamiento similar en el cantidad de azufre, lo cual debe estar relacionado con los compuestos aromáticos presentes en la mezcla 3 que contuvo la mayor cantidad de este compuesto, como se ilustró en la gráfica de la figura 23 en la isoterma de éste componente del análisis de SARA. También el contenido de resinas resultó ser el más bajo en esta mezcla 3 lo que pudiera explicar el incremento del azufre formado cuando asciende el CPG conteniendo mayor cantidad de este elemento.

En este caso podría estar ocurriendo que las moléculas diatómicas como el oxígeno, el azufre y el nitrógeno muchas veces reemplazan a los átomos de carbono en la estructura molecular del asfalto. Esto contribuye a muchas de las singulares propiedades químicas y físicas de los asfaltos, causando mucha interacción entre las moléculas. El tipo y cantidad de moléculas diatómicas que existan en el asfalto se deberá tanto a la fuente de crudo como a la edad de éste. Las moléculas como el azufre reaccionan más fácilmente que el carbono y el hidrógeno para incorporar oxígeno.

Los átomos metálicos, como el níquel, el vanadio o el hierro están presentes muy levemente, casi menos del 1%. La significancia de la presencia de los metales es

que actúan como huella digital de la fuente de crudo de la que proviene el asfalto (21). Lo explicado anteriormente confirma la gran interacción que existe dentro de la compleja estructura interna del asfalto y su comportamiento.

En la tabla 7, 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.

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 24, 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.

Tabla 7. 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

En la tabla 8 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 8. 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 25, 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 9 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 9. 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 6, 7, 8 y 9, 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 26 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).

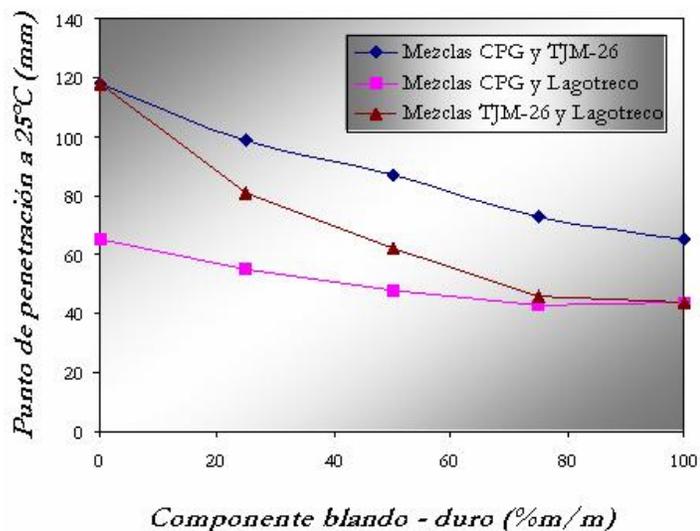


Figura 26. Isotermas a 25°C de la propiedad fisicoquímica del punto de penetración en función de la variación de los componentes blandos TJM-26 y CPG y el componente duro Lagotreco.

Punto de penetración.

El punto de penetración a 25°C es una prueba utilizada para medir la dureza de los asfaltos a temperatura ambiente, considerada también un ensayo de consistencia de dichos materiales. De igual manera, existen rangos de penetración para clasificar a

los asfaltos según la tabla de Asfaltos Grados Comerciales mostrada en el apéndice A (15).

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 26, 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 26 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 25), 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 26. 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 24, 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.

El punto de penetración para la isoterma a 25°C de las mezclas CPG y TJM-26 en la figura 26, decrece al igual que en las demás isotermas, aunque está influenciado

por el incremento del componente menos blando CPG, ya que a pesar de que ambos componentes son blandos, provienen de crudos distintos y por lo ende poseen propiedades, composición y comportamientos diferentes. El componente blando CPG hace que aumenten los asfaltenos como se mostró en el gráfico de los componentes SARA de la figura 23, de tal forma que resulta en mezclas de baja dureza, con puntos de penetración más altos, por encima de 60 mm, en comparación con las mezclas CPG-Lagotreco y TJM-26-Lagotreco, dando como resultado que las mezclas CPG y TJM-26 tengan menos rigidez y sean, a su vez, más manejables.

La gráfica de la figura 27, a continuación representa un sistema de cuatro componentes donde intervienen los tres sistemas de los asfaltos CPG, TJM-26 y Lagotreco para mezclarse y dar como resultado tres mezclas que difieren en sus propiedades.

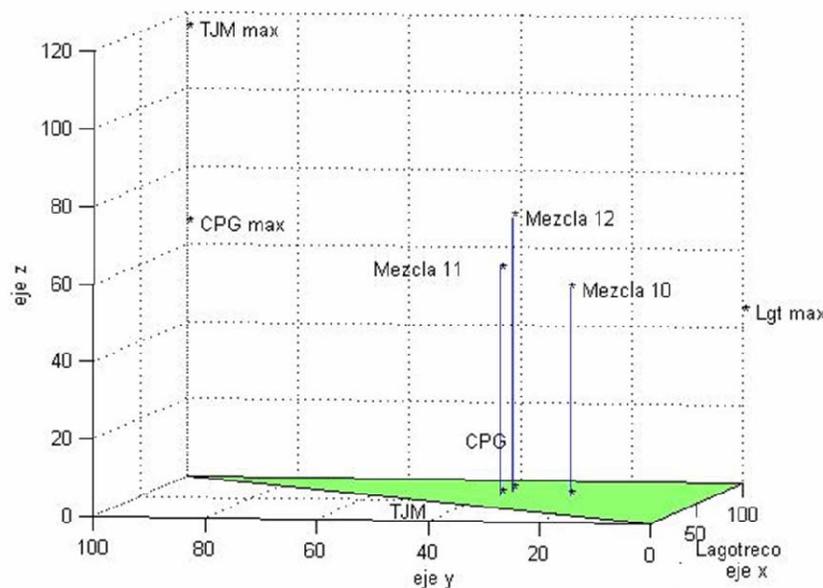


Figura 27. Propiedad fisicoquímica del punto de penetración a 25°C en función de las mezclas de los componentes blandos TJM-26 y CPG y el componente duro Lagotreco.

En la figura 27, se ilustra el punto de penetración (mm) en función del porcentaje de las mezclas empleadas para reflejar los puntos de los resultados representados en esta, utilizándose un sistema llamado Matlab 7.0, donde el eje Z representa al punto de penetración, el eje X al componente duro Lagotreco, el eje Y al TJM-26 y el eje donde X se hace igual al eje Y está ubicado el CPG, generando una pirámide de base triangular. Se observa que el punto más alto lo posee la mezcla 12 (50% TJM-26 + 25% CPG + 25% Lagotreco) con 70 mm de penetración a 25°C cuando hay mayor cantidad de TJM-26, siendo éste el componente más blando, incorporándole a la mezcla 12 mayor manejabilidad y fluidez. Este comportamiento se le atribuye al resultado que se muestra en la tabla 5, donde sus fracciones SARA le otorgan mayor cantidad de resinas permitiendo el arreglo molecular interno de sus moléculas y en menor proporción las moléculas de los asfaltenos brindándole a los aromáticos espacios, beneficiándose por los enlaces que le otorgan las resinas; como también se corrobora en la tabla 9 que su composición química elemental le da condiciones específicas de carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y azufre para producir interacciones entre los aromáticos y las resinas generando una mezcla óptima de contenido elemental. Las mezclas 10 (25% TJM-26 + 25% CPG + 50% Lagotreco) y 11 (25% TJM-26 + 50% CPG + 25% Lagotreco) presentaron puntos de penetración menores con 53 y 58 mm respectivamente, indicando mezclas viscosas y más duras, esto por el incremento del componente duro Lagotreco en la mezcla 10, ocasionando un aumento en el nivel de asfaltenos produciendo menos espacio para movilidad molecular interna de la estructura de esta mezcla tal como se muestra en la tabla 5. La mezcla 11 se ve influenciada por el CPG que es el componente menos blando conteniendo la mayor cantidad de aromáticos como también se refleja en la tabla 5 de las fracciones SARA, la cantidad de resinas es menor lo que ocasiona dificultad para las estructuras de los aromáticos en cuanto al desplazamiento de sus enlaces, donde estas moléculas se ven restringidas por los espacios menos disponibles.

En síntesis, se encontró que las mezclas 2 (50% CPG + 50% TJM-26) y 3 (25% CPG + 75% TJM-26) entran en la clasificación de Asfaltos Grados Comerciales, ya que sus puntos de penetración se hallan en el rango de 85/100 mm, mientras que la mezcla 13 (100% CPG) y la mezcla 8 (50% TJM-26 + 50% Lagotreco), entran en el rango 60/70 mm de esta clasificación. Las mezclas 5 (50% CPG + 50% Lagotreco), 6 (25% CPG + 75% Lagotreco), 9 (25% TJM-26 + 75% Lagotreco) y 15 (100% Lagotreco) entran en el rango 40/50 mm, todas representadas por las isotermas a 25°C del punto de penetración de la figura 26. Por su parte, la mezcla 12 (50% TJM-26 + 25% CPG + 25% Lagotreco) de la gráfica correspondiente a la figura 27 se encuentra en el rango 60/70 mm como asfalto comercial.

De los resultados anteriores se deduce que el 75% de las mezclas asfálticas obtenidas a partir de distintas proporciones de los componentes blandos CPG y TJM-26 y el componente duro Lagotreco, resultaron estar dentro del rango de los Asfaltos Grados Comerciales, lo cual indica una excelente productividad.

Punto de ablandamiento.

El punto de ablandamiento representa la temperatura a la cual un asfalto o mezcla asfáltica pasa del estado sólido o semisólido a la condición de reblandecimiento, siendo éste un ensayo de consistencia donde los asfaltos alcanzan un determinado estado de fluidez o termoplasticidad, debido a que son afectados por los cambios de temperatura (15).

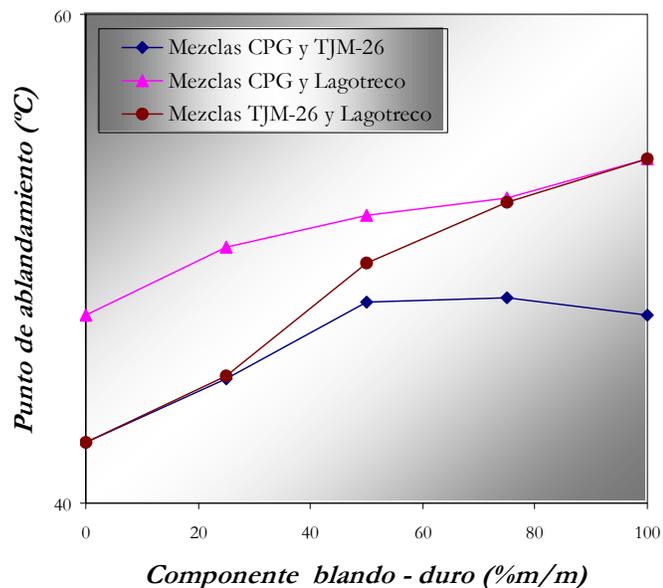


Figura 28. Curvas de la propiedad fisicoquímica del punto de ablandamiento en función de la variación de los componentes blandos TJM-26 y CPG y el componente duro Lagotreco.

En la figura 28, se muestra el comportamiento de las isotermas de la propiedad fisicoquímica del punto de ablandamiento ($^{\circ}\text{C}$), en función del componente blando y el componente duro para las quince proporciones de mezclas asfálticas, expresados en porcentajes de masa (% m/m).

La figura 28 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 25, 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 28 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 24. 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.

Las mezclas CPG y TJM-26 muestran un comportamiento donde el punto de ablandamiento se incrementa con la cantidad de componente blando CPG, como era de esperarse, pero permanece por debajo del ascenso de las curvas de las mezclas TJM-26-Lagotreco y CPG-Lagotreco, por ser mezclas de componente blando-blando, donde el consumo de energía es mucho menor, tal que no alcanza los 49°C de temperatura para pasar del estado sólido al estado reblandecido, lo cual desde el punto de vista práctico, indica un alto rendimiento por parte de éstas mezclas de composición blando-blando (CPG y TJM-26). La poca adsorción de calor en estas mezclas pudiera estar relacionada con la disminución de la cantidad de resinas que reaccionan para estabilizar el nivel de asfaltenos, cuando estos se incrementan en poca cantidad, tal como puede apreciarse en la figura 23, ayudando a la movilidad de las moléculas y requiriendo así menor cantidad de calor.

Se observa que las mezclas que entran en el rango del punto de penetración de las isotermas ilustradas en la figura 26, corresponden a un intervalo de temperatura de ablandamiento entre 45°C y 55°C, (figura 27) 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 la figura 29, se muestra el punto de ablandamiento (°C) en función del porcentaje de las mezclas empleadas para reflejar los puntos de los resultados representados en la gráfica, utilizándose el sistema llamado Matlab 7.0, donde el eje Z representa al punto de ablandamiento, el eje X al componente duro Lagotreco, el eje Y al TJM-26 y el eje donde X se hace igual al eje Y está ubicado el CPG, generando una pirámide de base triangular.

En este análisis fisicoquímico la mezcla 10 (25% TJM-26 + 25% CPG + 50% Lagotreco) obtuvo el valor más alto como punto de ablandamiento con 49,7°C de consumo de energía en forma de calor para alcanzar el estado plástico reblandecido debido a que el componente mayoritario de esta mezcla como lo es el componente duro Lagotreco le da esta característica ya que su punto de ablandamiento fue de 54,1°C y con el punto de penetración más bajo como se ilustra en la gráfica de la figura 27; este comportamiento se le atribuye a la interacción de las moléculas de asfaltenos en esta mezcla porque se requiere más adsorción de calor para el desplazamiento de estos y de las grandes moléculas aromáticas presentes en esta mezcla como se observa en la tabla 5. La mezcla 11 (25% TJM-26 + 50% CPG + 25% Lagotreco) se encuentra influenciada por el CPG que le da un incremento en el nivel de adsorción de calor ya que este componente es menos blando que el TJM-26 y

le confiere a las moléculas un aumento en los aromáticos como se observa en la tabla 5. Por el contrario, el menor requerimiento de calor en forma de energía fue para la mezcla 12 (50% TJM-26 + 25% CPG + 25% Lagotreco) viéndose favorecida por el componente más blando como lo es el TJM-26 que le otorgó un nivel de resinas bastante alto (tabla 5) permitiéndole a las moléculas internas de la estructura mejor movilidad entre ellas reaccionando fácilmente con la temperatura.

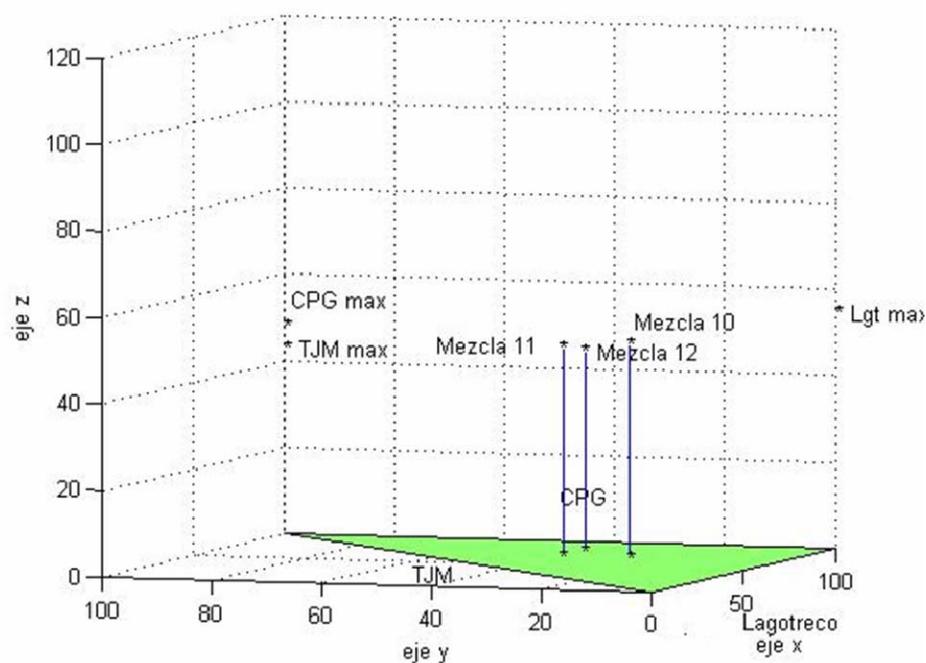


Figura 29. Propiedad fisicoquímica del punto de ablandamiento (°C) en función de la mezclas asfálticas de los componentes blandos TJM-26 y CPG y el componente duro Lagotreco.

Cada uno de los puntos en la figura 28 como en el gráfico de la figura 29, tanto para las mezclas asfálticas como para los asfaltos de partida utilizados, reflejan qué cantidad de energía en forma de calor debe ser empleada para su trasbordo y calentamiento al cual va hacer sometido desde su exportación en la refinería, hasta el lugar donde va a ser empleado.

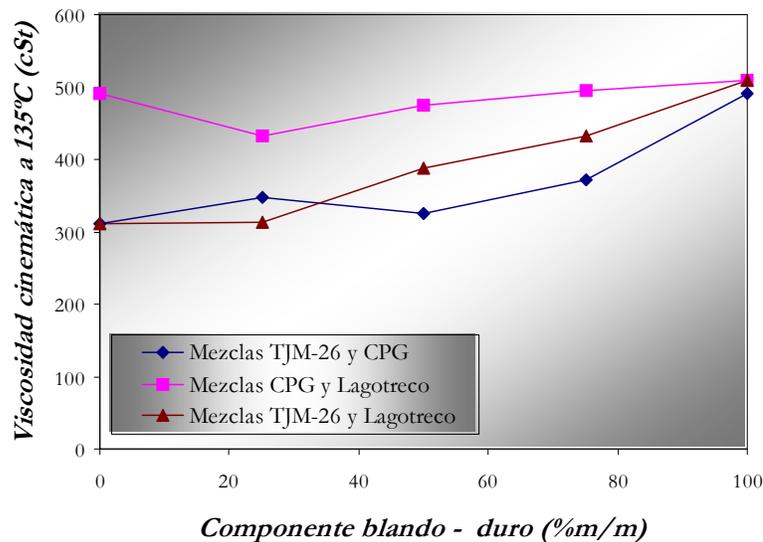


Figura 30. Isothermas de la propiedad fisicoquímica de la viscosidad cinemática a 135°C en función de la variación de los componentes blandos TJM-26 y CPG y el componente duro Lagotreco.

Viscosidad cinemática.

La viscosidad cinemática a 135°C es un ensayo en donde un asfalto o mezcla asfáltica es sometido a esta temperatura, la cual se aproxima a la de mezclado y distribución de mezclas asfálticas en caliente, por lo tanto esta propiedad de consistencia de los asfaltos describe su grado de fluidez a 135°C.

En los resultados de este análisis fisicoquímico, ilustrados en la figura 30 y realizados tanto a los asfaltos de partida como a las mezclas, se observa un incremento de las viscosidades cinemáticas en todas las isothermas a 135°C.

La isoterma de las mezclas CPG y TJM-26, muestra un ascenso a medida que decrece en proporción el componente blando TJM-26 y por consiguiente posee las viscosidades más bajas que las demás mezclas presentes, haciendo de esta relación blando-blando mezclas más fluidas, es decir, menos viscosas y en efecto son las que

requieren menor temperatura para su ablandamiento como se ilustró en el gráfico de la figura 30. En la etapa de mezclado en caliente para la pavimentación las mezclas blando-blando se vuelven viscosas, aunque en poca cantidad, a medida que aumenta en proporción el componente CPG. Este comportamiento puede explicarse porque a la temperatura de 135°C, a la cual fueron sometidas las mezclas de blando-blando, se produce una excitación de los enlaces moleculares por la energía en forma de calor transferida al realizar este ensayo, induciendo así la movilidad de los componentes SARA, acompañado por el incremento de los asfaltenos presentes en las mezclas blando-blando cuando disminuye el TJM-26, como se ilustró en la figura 23 y por la resistencia de estos asfaltenos al esfuerzo de flujo.

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 28, 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 24. 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 26 para esta isoterma a 25°C.

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 30.

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 25, 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 26 en relación al punto de penetración.

En la figura 31 se observa la viscosidad cinemática (cSt) en función del porcentaje de las mezclas empleadas para reflejar los resultados representados en la gráfica, utilizándose el sistema llamado Matlab 7.0, donde el eje Z representa la viscosidad cinemática, el eje X al componente duro Lagotreco, el eje Y al TJM-26 y el eje donde X se hace igual al eje Y está ubicado el CPG, generando una pirámide de base triangular.

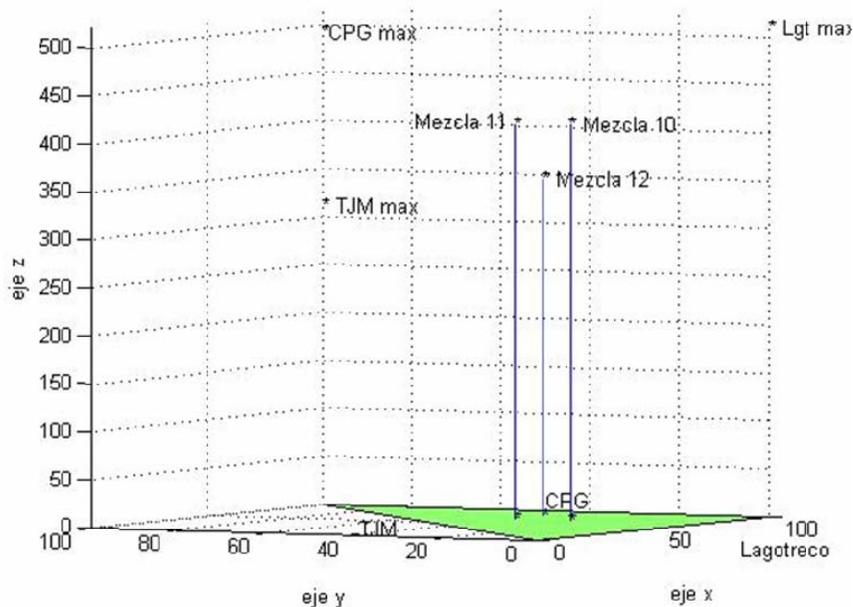


Figura 31. Propiedad fisicoquímica de la viscosidad cinemática a 135°C en función de las mezclas de los componentes blandos TJM-26 y CPG y el componente duro Lagotreco.

La mezcla 12 obtuvo el menor valor con 352,1 cSt, en este análisis de viscosidad cinemática a 135°C, queriendo decir que es la menos viscosa y más fluida de las mezclas obtenidas; por lo tanto va a requerir un consumo de calor más bajo como se muestra en la figura 29. Este comportamiento también se le atribuye a la cantidad de resinas como se muestra en la tabla 5 permitiendo el acomodo molecular interno dentro de la estructura de esta mezcla; atribuido a esto el componente más blando como lo es el TJM-26 que por estar en mayor proporción en esta mezcla la favorece dándole las características deseables para una mezcla óptima. En contraste, las mezclas 10 y 11 resultaron ser más viscosas, y corroborándose en la figura 29 que estas mezclas consumen y requieren más cantidad de energía en forma de calor para su reblandecimiento, es decir, son más duras como se muestra en la figura 27, para el punto de penetración de estas mezclas. La mezcla 11 se ve afectada por el componente CPG por estar en mayor proporción, en la mezcla lo que origina mayor

cantidad de moléculas aromáticas como se puede observar en la tabla 5, estas moléculas se caracterizan por ocupar grandes espacios porque forman grupos bastante grandes entre ellas y de gran masa molecular. La mezcla 10 posee más cantidad de moléculas de asfaltenos lo que le aporta la característica de ser la mezcla con más dureza al contener en mayor cantidad al componente duro Lagotreco.

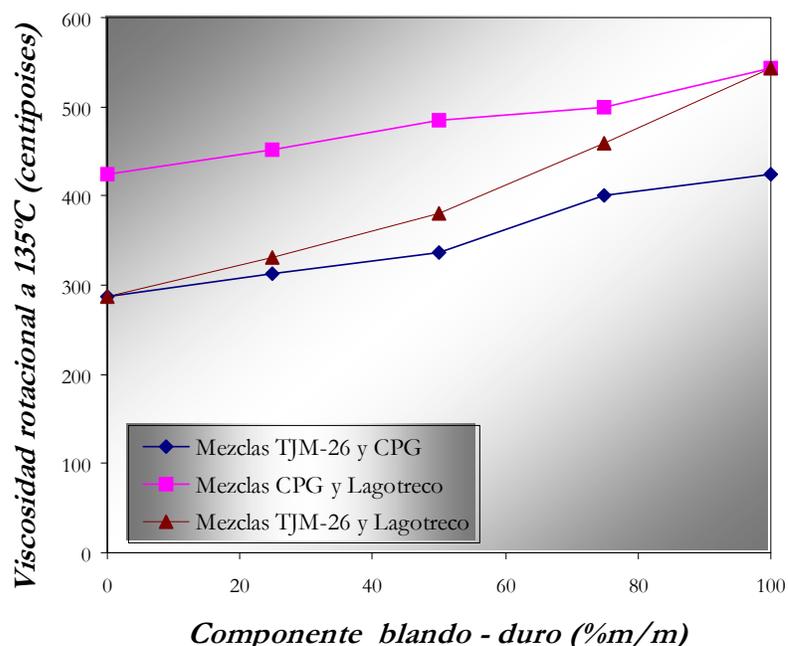


Figura 32. Isotermas de la propiedad fisicoquímica de la viscosidad rotacional a 135°C en función de la variación de los componentes blandos TJM-26, CPG y el componente duro Lagotreco.

La viscosidad rotacional a 135°C determina las características de flujo de los asfaltos y sus mezclas asfálticas por cuanto facilita información sobre las propiedades de manejabilidad y bombeo en caliente, durante las operaciones de planta. Este ensayo de consistencia mide la resistencia a la deformación en una mezcla de asfalto por efecto de un esfuerzo de torsión aplicado.

Los resultados de la viscosidad rotacional a 135°C medida en las diferentes mezclas se ilustran en la figura 32. 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 32 está siendo producido por el efecto ascendente de los asfaltenos (figura 24) provocado por las 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 25, así como también con el aumento de la viscosidad cinemática (figura 30) 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 28. Estas mezclas pueden ser empleadas para las operaciones en planta porque a pesar de las viscosidades medidas, aún están por debajo del límite necesario (≤ 3000 centipoises (15)).

La isoterma a 135°C de las mezclas TJM-26 y CPG presentó las viscosidades rotacionales más bajas, lo que indica que fluirán más fácilmente por las instalaciones de tuberías de la refinería. Por otro lado, la viscosidad crece con el incremento del componente blando CPG y a esta temperatura el número de reacciones implicadas son muchas, produciendo el descenso en uno de los componentes SARA, como lo son

las resinas, para equilibrar la cantidad de asfaltenos presentes en las mezclas, a medida que aumenta la proporción del CPG, como se muestra en la figura 23.

En la figura 33, se observa la viscosidad rotacional (centipoises) en función del porcentaje de las mezclas empleadas, los resultados también se graficaron, utilizándose el sistema Matlab 7.0, donde el eje Z representa la viscosidad rotacional, el eje X al componente duro Lagotreco, el eje Y al TJM-26 y el eje donde X se hace igual al eje Y está ubicado el CPG, generando una pirámide de base triangular.

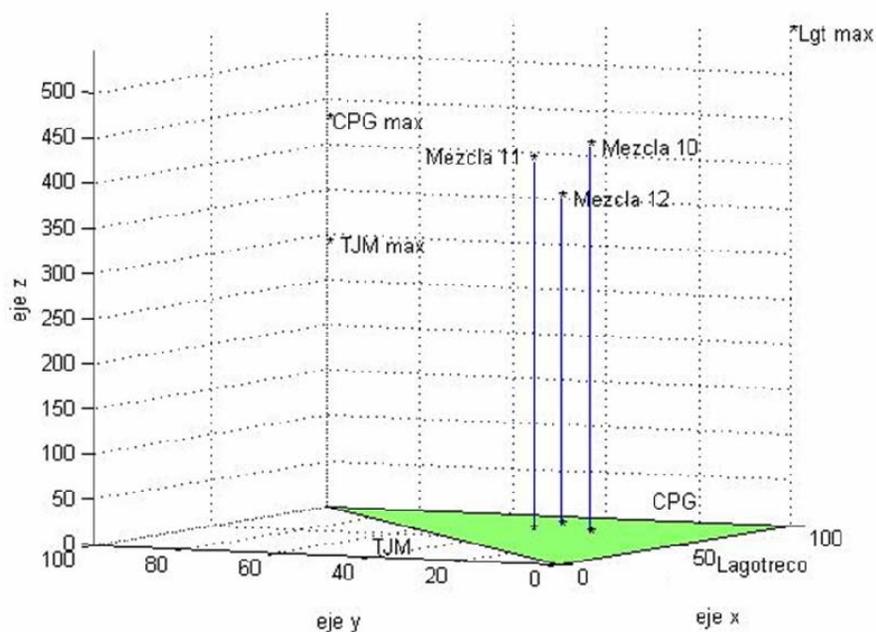


Figura 33. Propiedad fisicoquímica de la viscosidad rotacional a 135°C en función de las mezclas asfálticas de los componentes blandos TJM-26, CPG y el componente duro Lagotreco.

En este análisis fisicoquímico de viscosidad rotacional a 135°C, la mezcla 10 obtuvo el valor más alto con 428 centipoises demostrando su gran resistencia al torque que se le aplica a este ensayo, siendo esta mezcla la más dura y con más adsorción de energía como se puede observar en los gráficos de las figuras 27 y 29 respectivamente. Su alta viscosidad desfavorece su adherencia con los materiales de construcción debido a la cantidad de componentes saturados y la capacidad de estas

moléculas de formar enlaces dándole así menor elasticidad; teniendo en su composición el 50% de componente duro Lagotreco lo que le da la mayor influencia para este comportamiento. La menor viscosidad rotacional a 135°C y con baja resistencia al torque la obtuvo la mezcla 12 con un 50% de TJM-26 viéndose beneficiado por este componente blando lo que la favorece como asfalto de mezcla óptima con un excelente punto de penetración como puede apreciarse en la figura 27, con una estructura química interna bien distribuida en su composición elemental (tabla 9) y en cuanto a sus componentes SARA, debido al incremento de las resinas en esta mezcla 12 que le da mayor acoplamiento entre las moléculas. Para la mezcla 11 con un contenido del 50% de CPG, su resistencia al torque fue menor que la mezcla 10 con una viscosidad rotacional a 135°C de 404 centipoises más alta que la mezcla 12 lo que indica que es menos dura que la mezcla 10 como se ilustra en la figura 27, aquí se destaca un alto nivel de aglutinamiento por el nivel elevado de las moléculas aromáticas (tabla 5).

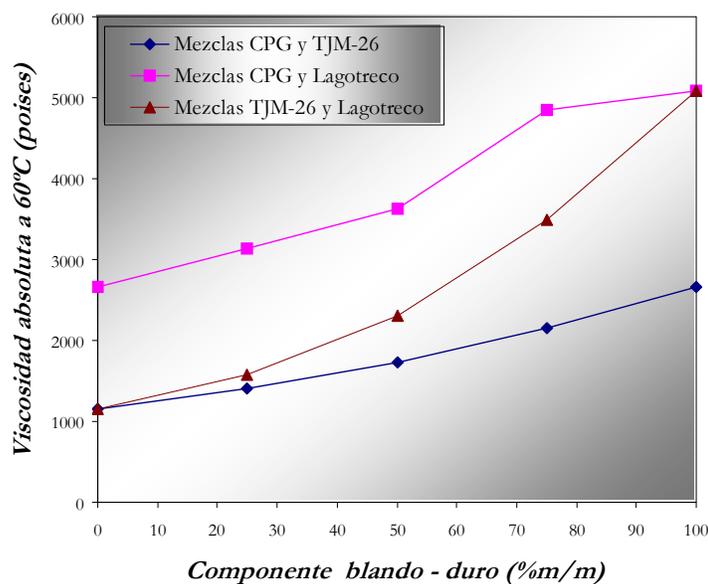


Figura 34. Isotermas de la propiedad fisicoquímica de la viscosidad absoluta a 60°C en función de la variación de los componentes blandos TJM-26, CPG y el componente duro Lagotreco.

Las nueve mezclas óptimas (1, 2, 13, 8, 5, 6, 9, 12 y 15) que se encuentran en la clasificación como asfaltos comerciales, presentaron viscosidades rotacionales en el rango de 300 a 500 centipoises y las mezclas que no entraron en la clasificación anterior (1, 4, 7, 10, 11 y 14) pero que sí se encuentran en este rango favorable de viscosidades, no cumplen con las especificaciones en cuanto a sus componentes químicos necesarios para tener el comportamiento característico de las mezclas óptimas.

A través de la figura 34, se observan las isoterma de la propiedad fisicoquímica viscosidad absoluta a 60°C con relación a la variación de los componentes blandos TJM-26 y CPG y el componente duro Lagotreco.

Viscosidad absoluta.

La viscosidad absoluta a 60°C es un ensayo de consistencia que se aproxima a la máxima temperatura superficial de las calzadas en servicios, pavimentadas con los asfaltos o mezclas asfálticas (15).

En esta figura se puede apreciar que hay un incremento de la isoterma a 60°C de las mezclas blando-blando (TJM-26 y CPG) cuando desciende en proporción el componente blando TJM-26, lo que indica que el mismo le confiere a la mezcla dándole menor movilidad a su estructura química interna a esta temperatura de pavimento, con lo cual puede considerarse que la mezcla asfáltica podría estar comportándose como un sólido elástico, que serían las propiedades necesarias para un asfalto a fin de evitar una posible deformación permanente a largo plazo. Como en todas las propiedades fisicoquímicas analizadas, esta isoterma posee los valores más bajos, aunque con un aumento progresivo de la viscosidad, como se ilustra en la figura 34.

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 34 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 32) y para la viscosidad cinemática a 135°C (figura 30).

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 32, 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.

En la figura 35, se observa la viscosidad absoluta (Poises) en función del porcentaje de las mezclas empleadas; para graficar estos resultados igualmente se

utilizó el sistema Matlab 7.0, donde el eje Z representa la viscosidad absoluta, el eje X al componente duro Lagotreco, el eje Y al TJM-26 y el eje donde X se hace igual al eje Y está ubicado el CPG, generando una pirámide de base triangular.

En esta representación gráfica de la viscosidad absoluta a 60°C ilustra que la mezcla 12 posee una viscosidad baja así como también se muestra en los demás gráficos de las figuras 31 y 33 y alto punto de penetración (figura 27) siendo la mezcla más blanda de las tres proporciones provenientes de la combinación de los tres asfaltos de partida. Se puede predecir en esta mezcla un comportamiento como un sólido elástico a altas temperaturas que sería el más apropiado para prevenir un deterioro permanente a la temperatura del pavimento. De acuerdo a lo discutido anteriormente en las figuras 31 y 33, este comportamiento se atribuyo a la influencia del componente blando TJM-26 y al incremento que éste hace en el nivel de resinas. La mezcla 10 presento la mayor viscosidad a 60°C, por contener en mayor cantidad el componente duro Lagotreco esto se puede verificar en las graficas 31 y 33 donde se observan las viscosidades más altas de las tres mezclas obtenidas con los tres componentes de partida, evidentemente causado por el nivel de asfaltenos que esta mezcla contiene. La mezcla 11 reflejo una viscosidad absoluta a 60°C mayor que la mezcla 12, esto debido a que el componente mayoritario en la mezcla 11 es el CPG que es menos blando que el TJM-26 lo que le da a esta mezcla un comportamiento de menor fluidez por el nivel de aromáticos, explicados en las figuras 31 y 35 referentes a sus viscosidades.

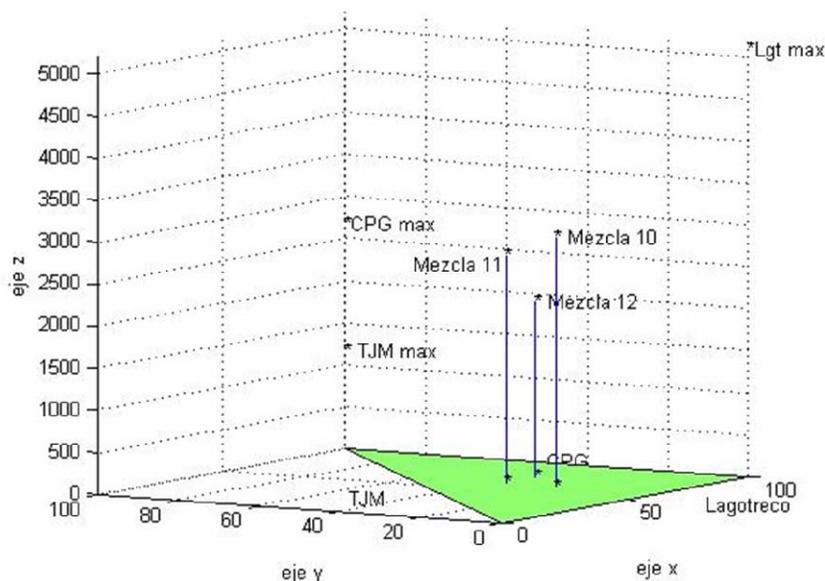


Figura 35. Propiedad fisicoquímica de la viscosidad absoluta a 60°C en función de las mezclas de los componentes blandos TJM-26, CPG y el componente duro Lagotreco.

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 26, 27, 28, 29 y 30, 31, 32, 33, 34 y 35 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.

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

Los resultados de la presente investigación permitieron establecer que la adición de un componente duro Lagotreco o blando TJM-26 y CPG en diferentes

proporciones, por un tiempo de 45 minutos de mezclado a 90°C y 200 revoluciones por minutos, tiene un efecto importante sobre los parámetros de mayor interés durante la fase de envejecimiento oxidativo, como lo son las propiedades fisicoquímicas, los análisis químicos elementales y el comportamiento reológico.

Este ensayo permite estimar la estabilidad intrínseca de asfaltos vírgenes e inferir sobre la compatibilidad de sus mezclas. También ha sido utilizado para investigar los efectos que introduce la oxidación por RTFOT y PAV, estableciendo comparaciones entre los asfaltos vírgenes y sus productos de oxidación a través de la norma ASTM D-287.

En la figura 36, se presenta el comportamiento de la isoterma a 163°C para las mezclas asfálticas 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 13, 14 y 15, obtenidas de los ensayos de envejecimiento oxidativo por medio del ensayo en horno de envejecimiento en película delgada rotativa RTFOT, con la variación de los componentes blandos CPG y TJM-26 y duro Lagotreco, expresado en porcentaje de masa (% m/m).

Pérdida de masa. En este ensayo de RTFOT se muestran las isotermas a 163°C, en un solo caso no ocurrió cambio de masa por pérdida de volátiles que fue la mezcla 13 (100% CPG), esto debido a la gran resistencia de este asfalto en sus propiedades fisicoquímicas consistentes, lo que también podría explicarse, si lo correlacionamos con el gráfico de la figura 23, donde las fracciones SARA en este asfalto se encontraron bien distribuidas dándole gran movilidad a su estructura interna, permitiendo que los enlaces se vuelvan un poco más resistentes a los cambios de temperatura, lo cual pudo haber influido en esta muestra que no presentó cambio o variación de masa. Sin embargo, en las demás muestras de mezclas asfálticas 1, 2, 3 y 14 se obtuvo una ganancia de la variación del porcentaje de masa, donde la mezcla 1 y 3 obtuvo una ganancia de masa igual a distintas proporciones, lo cual pudo deberse

a que ambas mezclas en proporciones de mezclado, son inversamente proporcionales entre sí.

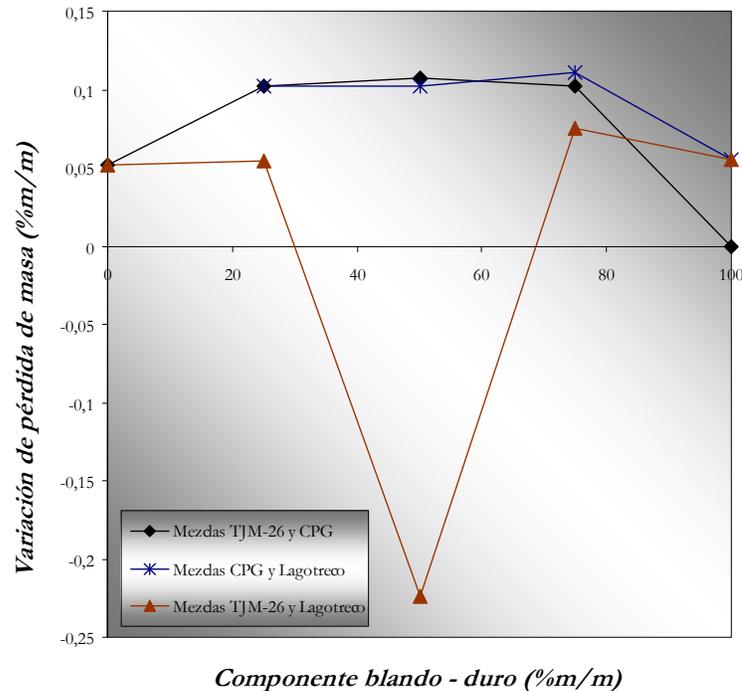


Figura 36. Envejecimiento oxidativo por variación de pérdida de masa a 163°C en función de la variación de los componentes blandos CPG y TJM-26 y componen duro Lagotrecó.

Las mezclas asfálticas 4, 5 y 6 presentaron ganancia de masa que se debe, según la norma ASTM D-2872, a que ocurre un proceso de oxidación de las muestras donde las resinas internamente precipitan como asfaltenos, dándole a su estructura interna menos movilidad, y por tanto más dureza a las mezclas asfálticas viéndose reflejado en sus viscosidades como se ilustró en los gráficos de las figuras 30, 32 y 34. También se observa en la gráfica de la figura 36 que en las mezclas 4 y 5 se obtuvo el mismo valor de ganancia de masa correspondientes a la isoterma de 163°C para las mezclas blando-duro (CPG y Lagotrecó), como las mezclas asfálticas 1 y 3 que coincidieron en sus valores de masa; sin embargo, las mezclas asfálticas 4 y 5 no son de proporciones inversas sino con proporciones de diferentes asfaltos de partida; como ya se dijo, esto pudo haber ocurrido gracias al proceso de oxidación con los

mismos niveles de transformación de resinas a asfaltenos explicado en la norma ASTM D-2872.

Los resultados de las mezclas 14 y 15 representados en las isotermas a 163°C de la figura 36, respectivamente, obtuvieron variaciones de menos de 0,06% m/m, lo que indica menor interacción a altas temperaturas.

El ensayo de RTFOT de la isoterma a 163°C para las mezclas del TJM-26 (14) y el Lagotreco (15), muestra que sólo la mezcla 8 (50% TJM-26 + 50% Lagotreco) tiene un valor negativo que representa la pérdida de masa por componentes volátiles muy por debajo del valor límite que es $\leq 1\%$, no viéndose afectado por esta condición. De modo que en las mezclas 7, 9, 14 y 15 fueron afectadas por la ganancia de masa, por debajo del 0.08% m/m, (bastante pequeño), inducido por el proceso de oxidación de las resinas a asfaltenos según la norma ASTM D-2872. Este resultado explica el aumento de sus viscosidades mostrados en las gráficas de las figuras 30, 32 y 34.

Finalmente, la tabla 10 recoge la variación de masa (% m/m) de las mezclas 10, 11, 12, 13, 14 y 15.

En el ensayo de RTFOT se observa en la tabla 10 que la mezcla 12 pierde componentes volátiles en un rango menor que lo establecido para este ensayo que es $\leq 1\%$ m/m, lo cual le da gran consistencia y resistencia a sus propiedades fisicoquímicas mostrados en la gráfica de la figura 36, caracterizándolo como un Asfalto de Grado Comercial. La mezcla 10 resultó tener la ganancia de masa por oxidación de las moléculas de resinas a asfaltenos con el más alto valor de todas las mezclas y por encima del 1% m/m. Se observa en la tabla 5 de los componentes SARA que esta mezcla asfáltica 10 posee mayor cantidad de asfaltenos y sus

reacciones internas a altas temperaturas podrían estar contribuyendo más hacia el estado micelar.

Tabla 10. Variación de masa (% m/m) de la etapa de envejecimiento oxidativo por RTFOT de las mezclas asfálticas 10, 11 y 12 y de los asfaltos de partida, componente duro Lagotreco y componentes blandos TJM-26 y CPG (mezclas 15, 14 y 13).

Mezclas asfálticas	Variación de masa (%m/m)
Mezcla 14 (100% TJM-26)	+0,052
Mezcla 10 (25% TJM-26 + 25% CPG + 50% Lagotreco)	+1,115
Mezcla 11 (25% TJM-26 + 50% CPG + 25% Lagotreco)	+0.126
Mezcla 12 (50% TJM-26 + 25% CPG + 25% Lagotreco)	-0.060
Mezcla 13 (100% CPG)	No hubo cambio de masa
Mezcla 15 (100% Lagotreco)	+0,055

Los resultados del 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)

El reómetro de flexión fue diseñado para medir propiedades reológicas a temperaturas extremadamente bajas con un grado razonable de precisión (22). La deflexión que presenta una muestra de asfalto al ser sometida a medios agresivos de temperatura está correlacionada con la resistencia ofrecida por el material al someterlo a dichas condiciones de carga y temperatura en un rango de 25°C a 40°C (15). De manera que, es uno de los modos principales de falla de los pavimentos asfálticos en países de clima frío. Aunque varios factores pueden influenciar el inicio y propagación del craqueo, estudios realizados en los últimos treinta años han mostrado que las propiedades reológicas de las mezclas asfálticas juegan el papel más importante en el control de este tipo de falla por fisuración térmica (16).

En la gráfica de la figura 37 se muestra la correlación del comportamiento de las isotermas de deflexión de la mezcla asfáltica 1 después de pasar por RTFOT y PAV mediante el reómetro de flexión (BBR) a tres distintas temperaturas en función del tiempo de resistencia.

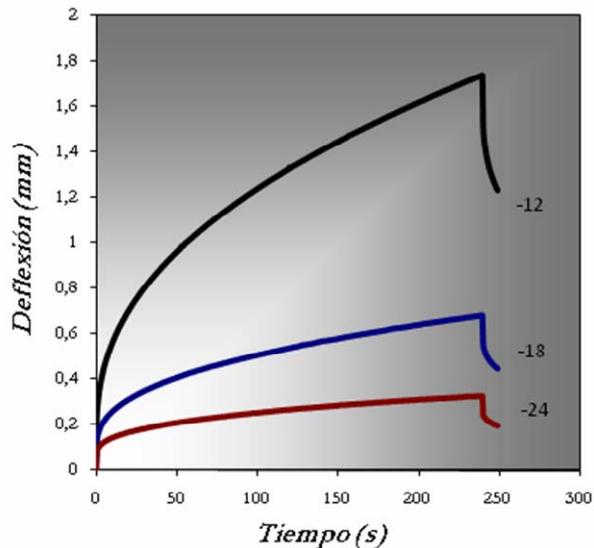


Figura 37. Correlación de las isotermas del índice de deflexión en función del tiempo de la mezcla asfáltica 1 (25% CPG +75% TJM-26) con un envejecimiento acelerado en el PAV de 10 años.

La correlación que se ilustra en la figura 37 sugiere que la isoterma a -12°C posee mucha más elasticidad al inicio de la curva, que luego deja observar la transición elástica-viscosa extendiéndose mucho más amplia y resistiendo de mejor forma gracias a su respuesta viscosa (lineal). La isoterma a -18°C y -24°C también muestra gran resistencia a través del tiempo de carga lo que beneficia a esta mezcla por contener en mayor proporción al componente blando TJM-26 que le proporciona esta respuesta satisfactoria y la intervención de los componentes SARA, en este caso las moléculas del componente saturado y resinas otorgándole mejor elasticidad y resistencia a la deflexión y tiempo de carga.

En la figura 38, se muestra la correlación del comportamiento de las isoterma de deflexión de la mezcla asfáltica 2 después de pasar por RTFOT y PAV mediante el BBR a tres distintas temperaturas en función del tiempo de resistencia.

Para la correlación que se ilustra en la figura 38, la isoterma a -12°C de la mezcla 2 dio una respuesta elástica inmediata y su resistencia a la acción de la carga influenciada por una transición elástica- viscosa que favorece a ésta mezcla; donde luego una respuesta viscosa (lineal) se deja observar a través del tiempo y cuando el tiempo de resistencia de carga cae, la restauración de la forma es muy lenta y ocurre una pérdida de forma (energía). La isoterma a -18°C de deflexión, la mezcla trata de utilizar su viscoelasticidad y ésta se ve impedida por el descenso de temperatura al igual que se observa en la isoterma a -24°C . No obstante, los tiempos de resistencia a estas temperaturas están muy bien favorecidos lo que indica que tiene poca posibilidad de sufrir agrietamiento o fisuración térmica.

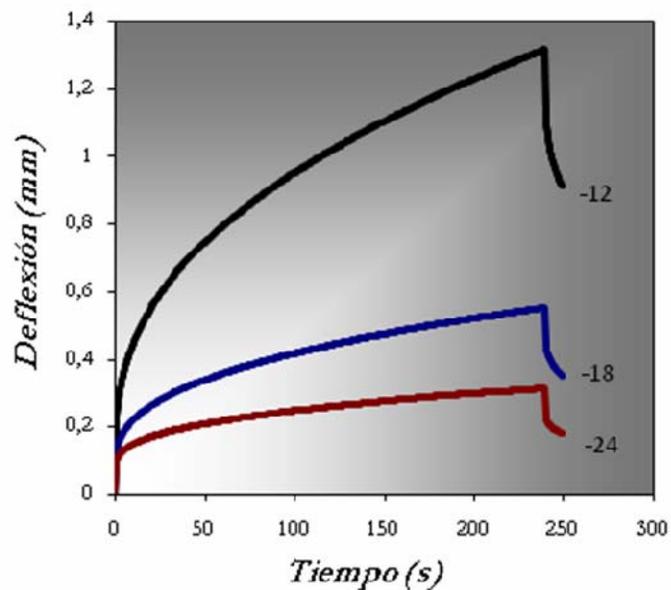


Figura 38. Correlación de las isoterma del índice de deflexión en función del tiempo de la mezcla asfáltica 2 (50% CPG + 50% TJM-26) con un envejecimiento acelerado en el PAV de 10 años de servicio.

En general, las mezclas 1 y 2 representadas en las figuras 37 y 38, respectivamente, se encontraron dentro del rango 80/100 mm por la clasificación como asfalto comercial, a través de la penetración, muestra gran concordancia con estos comportamientos a bajas temperaturas señalando la influencia que tiene el componente blando TJM-26 que le brinda mayor espaciamiento para la movilidad de sus moléculas y las beneficia con la disminución de los asfaltenos como se muestra en la figura 23.

Todo esto implica que los asfaltos clasificados en un rango de penetración 80/100 mm deberían cumplir con estas propiedades de mezclas óptimas.

En la figura 39, se muestra la correlación del comportamiento de las isotermas de deflexión de la mezcla asfáltica 5 después de pasar por RTFOT y PAV mediante el BBR a tres distintas temperaturas en función del tiempo de resistencia.

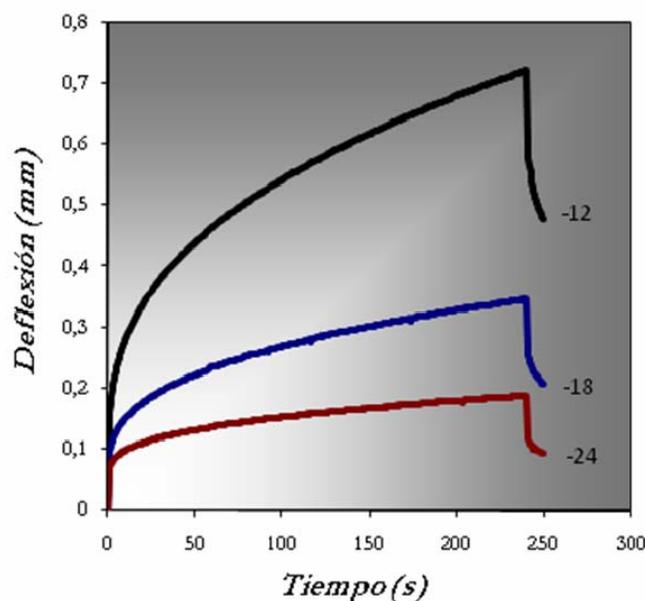


Figura 39. Correlación de las isotermas del índice de deflexión en función del tiempo de la mezcla asfáltica 5 (50% CPG + 50% Lagoteco) con un envejecimiento acelerado en el PAV de 10 años.

Esta figura 39 correlaciona el índice de deflexión en función del tiempo, se aprecia que este parámetro dependiente se mantiene relativamente con una gran resistencia a la deformación, iniciándose con una respuesta elástica que luego se ve reforzada por la transición elástica-viscosa. En contraste, se observa también que las isothermas a -18°C y a -24°C tuvieron más una respuesta viscosa que elástica. Sin embargo, con un gran tiempo de resistencia a estas tres temperaturas.

En la figura 40, se ilustra la correlación del comportamiento de las isothermas 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 40 muestra las isothermas 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).

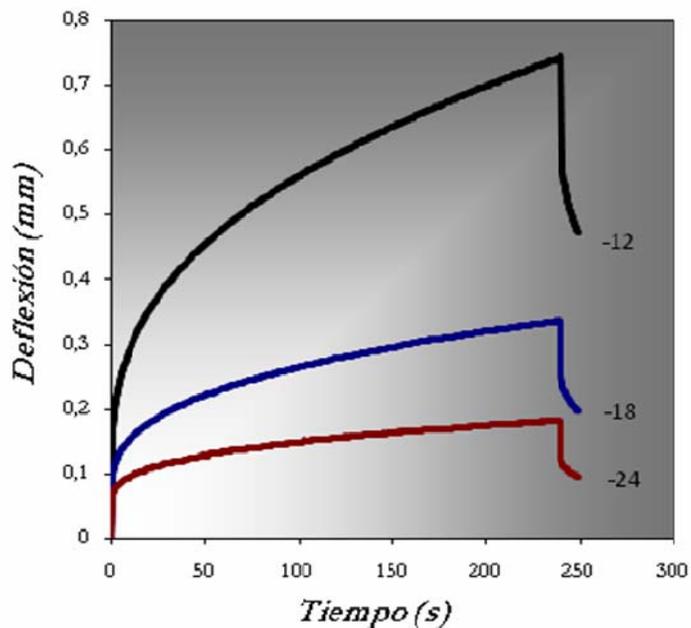


Figura 40. Correlación de las isotermas del índice de deflexión en función del tiempo de la mezcla asfáltica 6 (25% CPG + 75% Lagotreco) con un envejecimiento acelerado en el PAV de 10 años.

En los gráficos de las figuras 37 y 38 de las mezclas 2 (50% CPG + 50% TJM-26) y 3 (25% CPG + 75% TJM-26), respectivamente, se ilustra una mayor deflexión, es decir, más resistencia a la acción de la carga, dado que en los gráficos de las figuras 39 y 40 de las mezclas 5 (50% CPG + 50% Lagotreco) y 6 (25% CPG + 75% Lagotreco) disminuye el nivel resistencia a la deflexión ocasionado por los componentes SARA presentes en la estructura química de estas mezclas como se discutió en la gráfica de la figura 24.

En la figura 41, se observa la correlación el comportamiento de las isotermas de deflexión de la mezcla asfáltica 8 después de pasar por RTFOT y PAV mediante el BBR a tres distintas temperaturas en función del tiempo de resistencia.

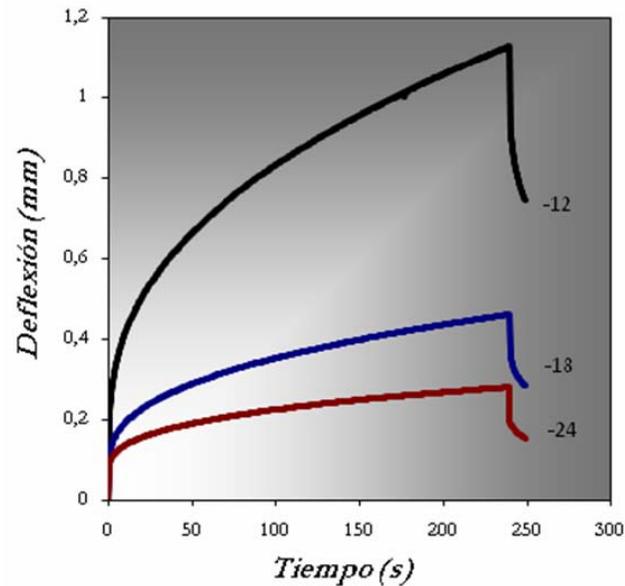


Figura 41. Correlación de las isotermas del índice de deflexión en función del tiempo de la mezcla asfáltica 8 (50% TJM-26 + 50% Lagotreco) con un envejecimiento acelerado en el PAV de 10 años.

Para la correlación que se ilustra en la figura 41, el índice de deflexión empieza por una rápida elasticidad en la isoterma a -12°C con una excelente resistencia a la aplicación de la carga, dando una respuesta viscosa bastante alargada y expandida a lo largo del tiempo requerido para una mezcla óptima. Las isotermas a -18°C y -24°C también dan una respuesta bastante satisfactoria con respecto al tiempo de resistencia de carga.

En la figura 42 se muestra la correlación del comportamiento de las isotermas de deflexión de la mezcla asfáltica 9 después de pasar por RTFOT y PAV mediante el BBR a tres distintas temperaturas en función del tiempo de resistencia.

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.

Las gráficas de las figuras 41 y 42 mostraron 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 Lagotrecó, 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.

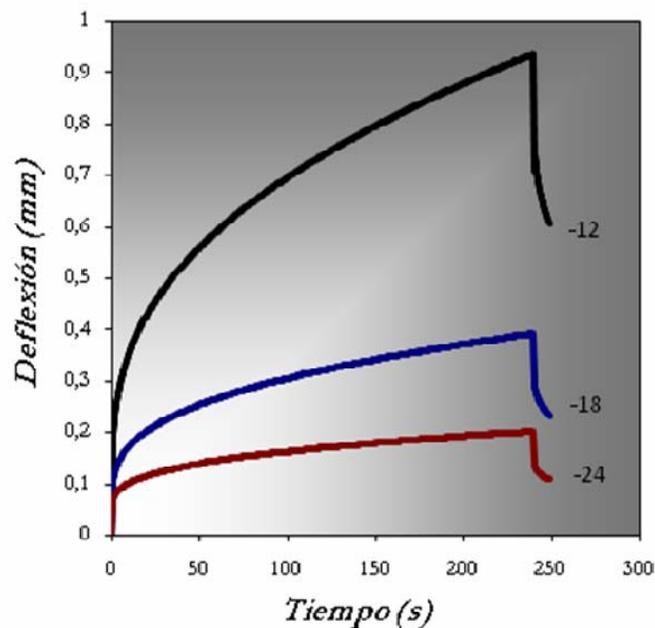


Figura 42. Correlación de las isotermas del índice de deflexión en función del tiempo de la mezcla asfáltica 9 (25% TJM-26 + 75% Lagotrecó) con un envejecimiento acelerado en el PAV de 10 años.

En la figura 43, 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 43, la isoterma a -24°C está prácticamente superpuesta a la isoterma de -18°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°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.

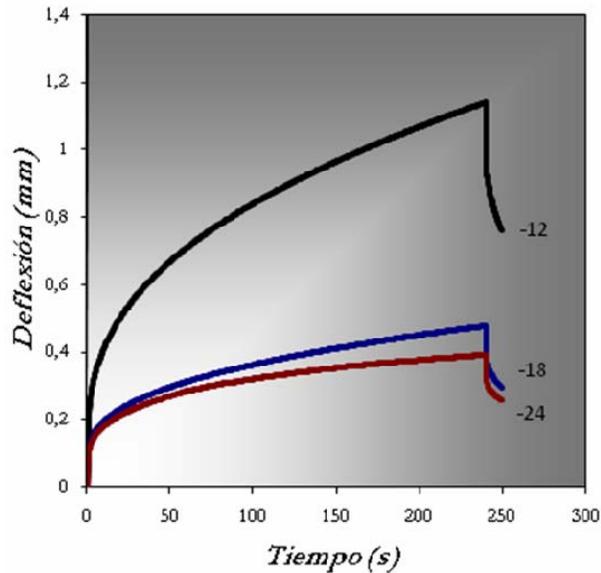


Figura 43. Isotermas del índice de deflexión en función del tiempo de la mezcla asfáltica 12 (50% TJM-26 + 25% CPG + 25% Lagotreco) con un envejecimiento acelerado en el PAV de 10 años.

En la figura 44, se observa la correlación del comportamiento de las isotermas de deflexión de la mezcla asfáltica 13 después de pasar por RTFOT y PAV mediante el BBR a tres distintas temperaturas en función del tiempo de resistencia.

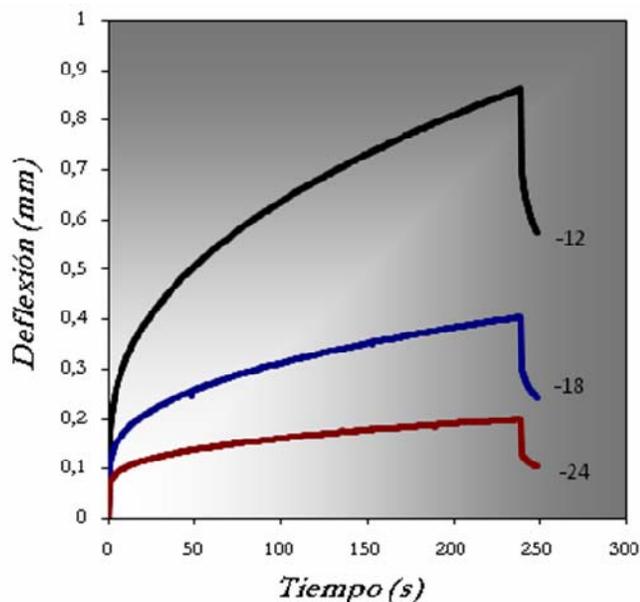


Figura 44. Correlación de las isotermas del índice de deflexión en función del tiempo de la mezcla asfáltica 13 (100% CPG) con un envejecimiento acelerado en el PAV de 10 años.

En la figura 44, se observa el comportamiento de la isoterma a -24°C en un estado completamente viscoso (lineal) en donde los enlaces poseen poca vibración y movimiento para tender a recuperar su forma o a resistir más carga, sin embargo tiene un excelente tiempo de resistencia como el que posee la isoterma a -12°C . La isoterma a -18°C muestra una pequeña transición elástica-viscosa que luego se ve favorecida por su respuesta viscosa (lineal) hasta que pierde su energía para intentar recuperar su forma, aunque al igual que las isotermas a -24°C y a -12°C que presentan el tiempo de resistencia a su favor. Por consiguiente, la isoterma a -12°C presenta un buen comportamiento a lo largo del gráfico que se incrementa con el tiempo y al final exhibe el máximo esfuerzo para no deformarse a bajas temperaturas.

De manera que las mezclas 13 y 12 representadas en las gráficas de las figuras 43 y 44, y en las gráficas de las figuras 26 y 27 del punto de penetración, respectivamente, se encuentran 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 y la mezcla 13 que es un componente blando, se ve beneficiada por el incremento de los aromáticos y las resinas como se muestra en la gráfica de la figura 23.

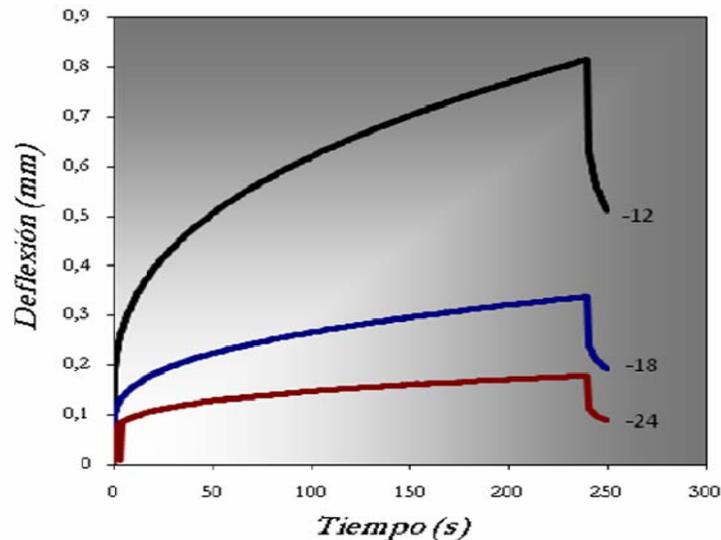


Figura 45. Correlación de las isotermas del índice de deflexión en función del tiempo de la mezcla asfáltica 15 (100% Lagotreco) con un envejecimiento acelerado en el PAV de 10 años.

En la figura 45, se muestra la correlación del comportamiento de las isotermas de deflexión de la mezcla asfáltica 15 después de pasar por RTFOT y PAV mediante el BBR a tres distintas temperaturas en función del tiempo de resistencia.

La figura 45 muestra un comportamiento muy parecido a las gráficas de las figuras 43 y 44 a pesar de ser el componente duro con más nivel de asfaltenos como se observó en la gráfica de la figura 24. Las isotermas a -12°C da una respuesta elástica inmediata, donde pasa por una transición elástica-viscosa y luego por acción de la carga se expande linealmente volviéndose viscosa y produciendo un tiempo de resistencia muy favorable. Las isotermas a -18°C y a -24°C pasan de una respuesta elástica inmediata a una viscosa observándose la linealidad de éstas, viéndose beneficiadas por la resistencia del tiempo del carga.

Por consiguiente, las mezclas 5 (50% CPG + 50% Lagotreco), 6 (25% CPG + 75% Lagotreco), 9 (25% TJM-26 + 75% Lagotreco), 13 (100% CPG) y 15 (100% Lagotreco) representadas en las figuras 26 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 8 (50% TJM-26 + 50% Lagotreco) y 12 (50% TJM-26 + 25% CPG + 25% Lagotreco) que resultaron ser 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.

Puntualizando se tiene que las mezclas asfálticas 1 (75% TJM-26 + 25% CPG) y 2 (50% TJM-26 + 50% CPG) de Grado Asfalto Comercial por el punto de penetración, obtuvieron el mayor índice de deflexión y un excelente tiempo de resistencia a bajas temperaturas, este comportamiento se le atribuye a la presencia del componente blando TJM-26 donde su composición química SARA le proporciona una mejor elasticidad y un nivel de viscosidad apropiado, producido por los componentes saturados y las resinas que están presentes confiriéndole movilidad y

espaciamiento a las moléculas internas de su estructura. Entonces, estas mezclas asfálticas poseen la estructura y composición de mezclas óptimas para ser usadas y previniendo la fisuración térmica a largo plazo.

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

El DSR evalúa el comportamiento de las mezclas asfálticas en funciones del tiempo de carga a temperaturas intermedias y altas. Este ensayo se aplica tanto al asfalto original como el asfalto envejecido (RTFOT y PAV) para simular el proceso constructivo y años de servicio; correlaciona la resistencia ofrecida por el material al someterlo a condiciones de tensión y temperatura (18). En cuanto al modo de falla relacionado con el ahuellamiento se establece un factor de ahuellamiento ($G^*/\sin \delta$) que representa la inflexibilidad o resistencia al ahuellamiento del asfalto a altas temperaturas, el G^* o módulo complejo y $\sin \delta$ o seno de ángulo se mide en el DSR.

En relación a la fisuración por fatiga, el factor de fisuración se obtiene en este caso multiplicando los parámetros de $G^* \cdot \sin \delta$ a partir de medidas con el DSR sobre el asfalto envejecido, dado que esta falla se produce después de un período de servicio a temperaturas moderadas y bajas (17).

En la figura 46, se muestra la correlación del comportamiento de las curvas del factor de ahuellamiento ($G^*/\sin \delta$) y de la viscosidad en función de la temperatura de la mezcla asfáltica 1 (75% TJM-26 + 25% CPG).

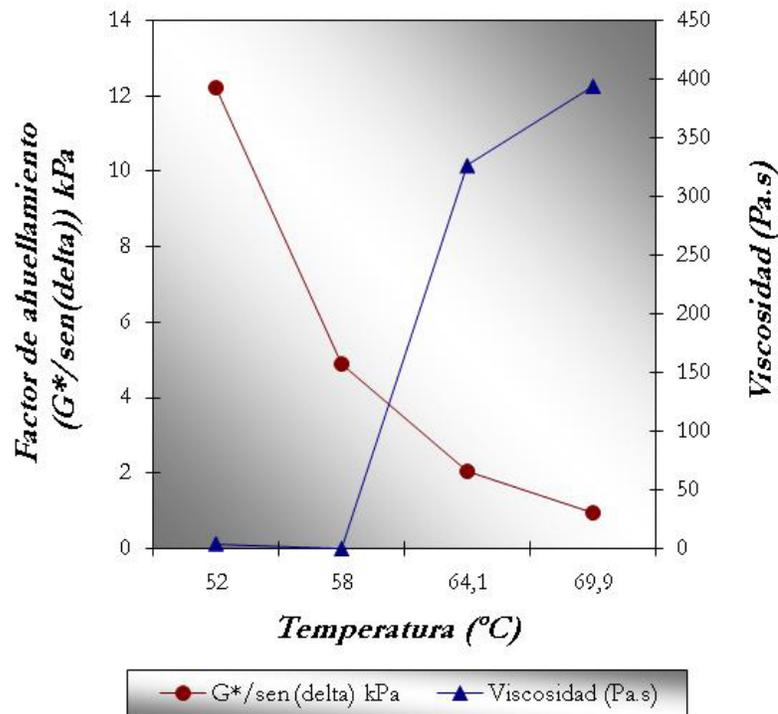


Figura 46. Curvas de correlación del factor de ahuellamiento ($G^*/\text{sen } \delta$) y de la viscosidad en función de la temperatura de la mezcla asfáltica 1 (75% TJM-26 + 25% CPG).

La curva del factor de ahuellamiento ($G^*/\text{sen } \delta$) de la mezcla asfáltica 1 desciende con el aumento de la temperatura en el rango siguiente 52°C, 58°C, 64°C, cumpliendo con la condición de $G^*/\text{sen } \delta \geq 1,00$ kPa. Por consiguiente, se puede predecir que a temperaturas por debajo de 64°C, se mantendrá en condiciones óptimas para ser usado como pavimento. A 70°C ya no cumple con la condición $G^*/\text{sen } \delta \geq 1,00$ kPa, esto puede deberse a que el componente blando TJM-26 esté en mayor proporción dado que a 70°C ya ha perdido su propiedad elástica ocasionando que se incremente la viscosidad producto de las interacciones entre las moléculas de los componentes saturados y resinas que pasan a formar parte de los asfaltenos, aumentando como resultado de esta interacción a los asfaltenos, y se corrobora con lo explicado en las gráficas de la figuras 23, 26 y 28. La viscosidad aumenta con los rangos de temperaturas usados, lo que indica que está ocurriendo una resistencia a la

deformación por el efecto de carga y se incrementan los asfaltenos como resultado de las reacciones internas de la estructura de esta mezcla asfáltica.

En la figura 47, 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 1 (75% TJM-26 + 250% CPG) después del tratamiento oxidativo por RTFOT a 163°C.

La mezcla asfáltica 1 con un tratamiento oxidativo por RTFOT, presentó valores que cumplieron con la condición $G^*/\text{sen } \delta \geq 2,20$ kPa en los rangos de temperatura establecidos, siendo estos, 52°C, 58°C y 64°C demostrando que esta mezcla asfáltica posee las condiciones necesarias para no presentar falla por deformación permanente. A 70°C no cumple con esta condición producto de la fluidez que presenta esta mezcla ocasionado por el componente blando TJM-26, aquí resaltan los componentes SARA, donde las resinas juegan el papel principal para que la viscoelasticidad disminuya. La viscosidad varía con el incremento de la temperatura ganando fluidez, con un comportamiento de sólido elástico adecuado para las altas temperaturas, en este caso sólo hasta 64°C y concuerda con lo explicado en los gráficos de las figuras 30, 32 y 34.

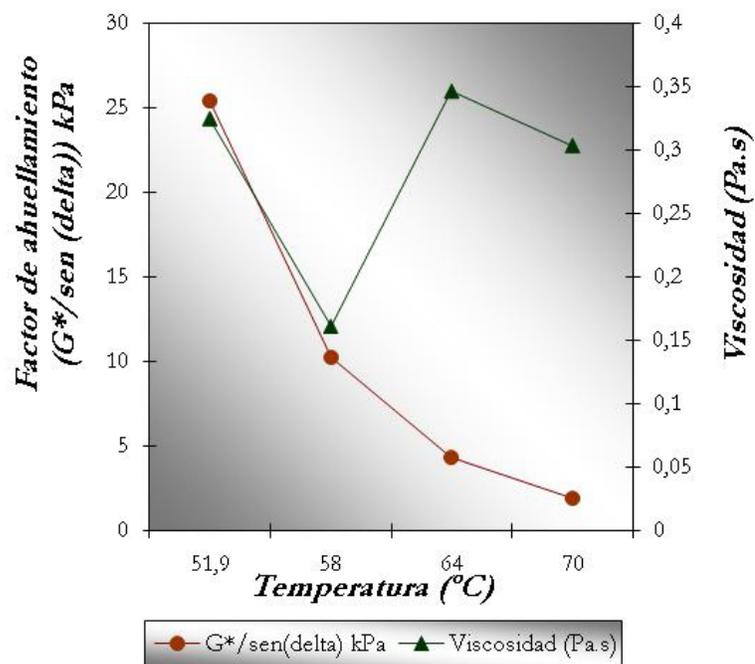


Figura 47. Curvas de correlación del factor de ahuellamiento ($G^*/\text{sen } \delta$) y de la viscosidad en función de la temperatura de la mezcla asfáltica 1 (75% TJM-26 + 25% CPG) después del tratamiento oxidativo por RTFOT a 163°C.

En la figura 48, 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 1 (75% TJM-26 + 25% CPG) después de un envejecimiento acelerado en el PAV de 10 años.

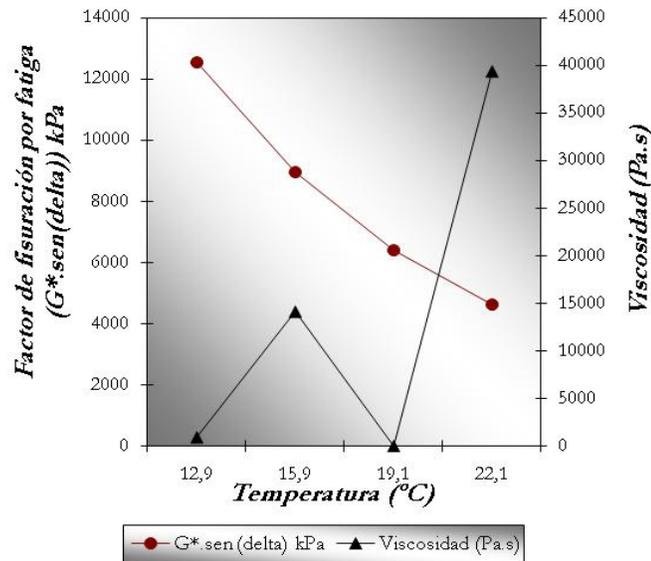


Figura 48. Curvas de correlación del factor de fisuración por fatiga ($G^* \cdot \text{sen } \delta$) y de la viscosidad en función de la temperatura de la mezcla asfáltica 1 (75% TJM-26 + 25% CPG) después de un envejecimiento acelerado en el PAV de 10 años.

La mezcla asfáltica 1 muestra un descenso en el factor de fisuración por fatiga donde sólo el último punto a 22°C cumple con la condición $G^* \cdot \text{sen } \delta \leq 5000$ kPa. Estos resultados revelan que a altas temperaturas y moderadas hasta 22°C esta mezcla asfáltica presentará condiciones favorables para ser usado como asfalto de pavimentación. Por lo tanto, podría predecirse que su tendencia a falla por fisuración térmica o fatiga es posible. Sin embargo, cabe destacar que el comportamiento de esta mezcla asfáltica a bajas temperaturas obtuvo un excelente rendimiento como se puede observar en el gráfico de la figura 37. La viscosidad en esta mezcla asfáltica por efecto de temperatura se incrementa sin ningún cambio que sería lo esperado, visto en las gráficas de las figuras 30, 32 y 34.

En la figura 49, 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 2 (50% CPG + 50% TJM-26).

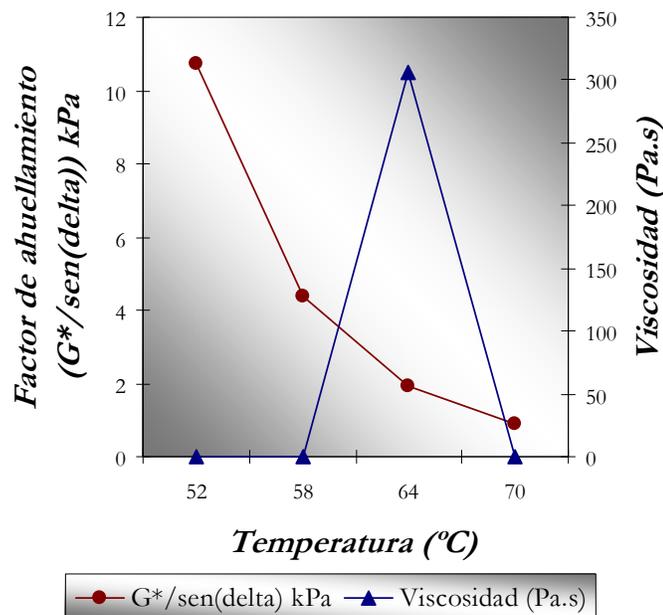


Figura 49. Curvas de correlación del factor de ahuellamiento ($G^*/\text{sen } \delta$) y de la viscosidad en función de la temperatura de la mezcla asfáltica 2 (50% TJM-26 + 50% CPG).

La figura 49 muestra que el factor de ahuellamiento disminuye a medida que aumenta la temperatura en los siguientes rangos 52°C, 58°C, 64°C y 70°C y los valores obtenidos cumplieron a cabalidad con lo establecido en este método donde $G^*/\text{sen } \delta \geq 1,00$ kPa, esto quiere decir que cumple con las condiciones necesarias para ser usado como pavimento. Sin embargo, hay que tomar en cuenta que ésta mezcla no ha sido sometida a la temperatura de proceso de mezclado. Cabe resaltar que la viscosidad fue aumentando a medida que se incrementaba la temperatura hasta caer drásticamente a 70°C debido a que perdió sus propiedades viscoelásticas para volverse fluida como consecuencia de la mezcla blando -blando, concordando de esta manera con lo explicado en los gráficos de las figuras 30, 32 y 34.

En la figura 50, 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 2 (50% TJM-26 + 50% CPG) después del tratamiento oxidativo por RTFOT a 163°C.

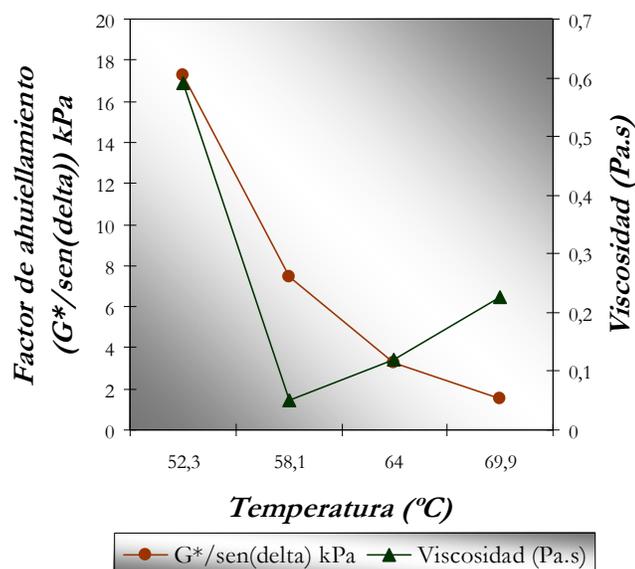


Figura 50. Curvas de correlación del factor de ahuellamiento ($G^*/\text{sen } \delta$) y de la viscosidad en función de la temperatura de la mezcla asfáltica 2 (50% TJM-26 + 50% CPG) después del tratamiento oxidativo por RTFOT a 163°C.

Como se muestra en la figura 50 los valores del factor de ahuellamiento ($G^*/\text{sen } \delta$) se incrementaron, aunque de igual forma la curva decrece cuando aumenta la temperatura en los siguientes rangos 52°C, 58°C, 64°C y 70°C y cumplen con la condición de que el factor de ahuellamiento sea mayor o igual a 2,20 kPa ($G^*/\text{sen } \delta \geq 2,20$ kPa), resistiendo de esta manera una de las principales fallas como lo es la deformación permanente, a excepción del último punto de 70°C, esta respuesta se explica debido a que la mezcla asfáltica 2 recibió un tratamiento oxidativo por RTFOT a 163°C, simulando el proceso de fabricación de la mezcla en caliente en condiciones similares del tambor mezclador –secador y con lo explicado en la gráfica de la figura 36, lo cual trae como consecuencia que la mezcla asfáltica 2 sólo pueda cumplir hasta una temperatura de 64°C sin ocasionar este tipo de falla o deterioro a altas temperaturas y dar un comportamiento de mezcla óptima. Se aprecia que la viscosidad disminuye en los dos primeros puntos y luego se incrementa en los

próximos puntos intentando recuperar su viscoelasticidad después de un tratamiento oxidativo como lo es el RTFOT.

En la figura 51, 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 2 (50% TJM-26 + 50% CPG) después de un envejecimiento acelerado en el PAV de 10 años.

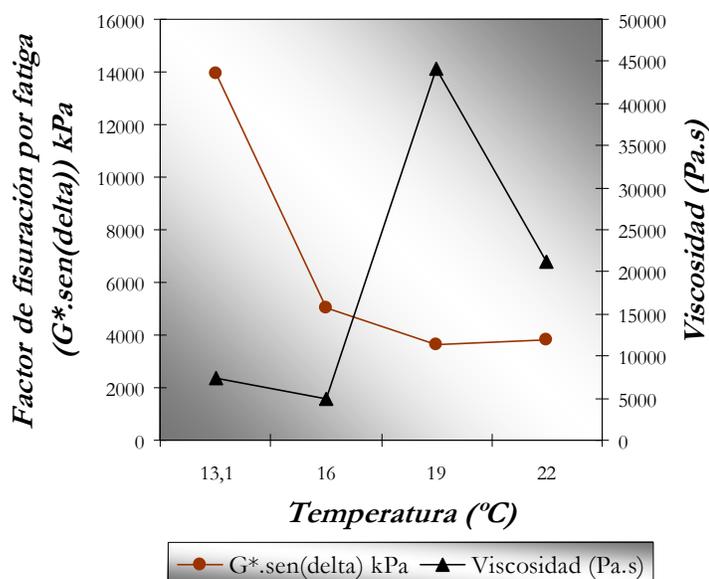


Figura 51. Curvas de correlación del factor de fisuración por fatiga ($G^* \cdot \text{sen } \delta$) y de la viscosidad en función de la temperatura de la mezcla asfáltica 2 (50% TJM-26 + 50% CPG) después de un envejecimiento acelerado en el PAV de 10 años.

La curva de correlación del factor de ahuellamiento de la mezcla asfáltica 2 envejecida 10 años por el PAV disminuye a temperaturas moderadas en el siguiente rango 13°C, 16°C, 19°C y 22°C. Sin embargo, sólo cumplieron con los valores establecidos a 16°C, 19 °C y 22 °C donde el factor de fisuración es menor o igual a 5000 kPa ($G^* \cdot \text{sen } \delta \leq 5000$ kPa), es decir, que a temperaturas inferiores de 16°C se podría predecir que la mezcla asfáltica 2 después de años de servicio como pavimento sufriría falla por fisuración térmica o fatiga a temperaturas moderadas por debajo de 16°C; aún cuando su comportamiento a bajas temperaturas fue bastante

satisfactorio como se puede apreciar en el gráfico de la figura 38. La viscosidad para esta mezcla asfáltica 2 envejecida es variante debido a que ésta mezcla se resiste a la deformación ocasionando así decrecimiento y crecimiento cuando aumenta la temperatura.

En la figura 52, 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 5 (50% CPG + 50% Lagotreco).

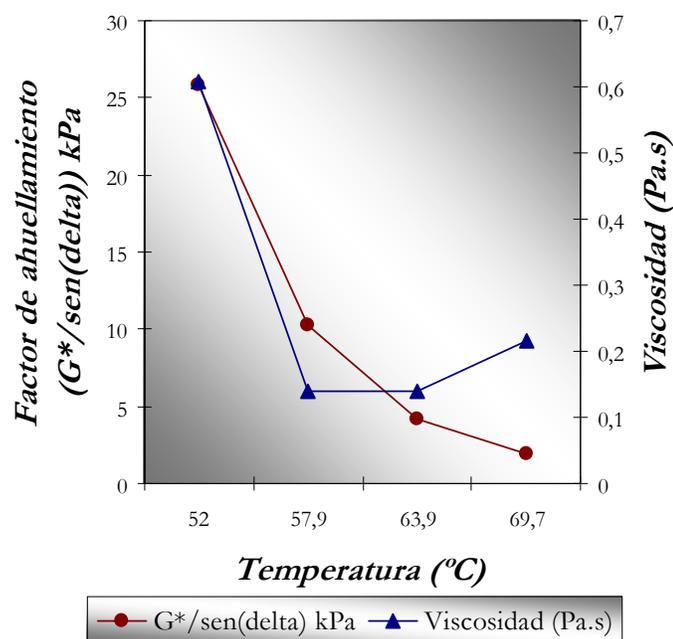


Figura 52. Curvas de correlación del factor de ahuellamiento ($G^*/\text{sen}(\delta)$) y de la viscosidad en función de la temperatura de la mezcla asfáltica 5 (50% CPG + 50% Lagotreco).

La figura 52 de la mezcla asfáltica 5 muestra que la curva del factor de ahuellamiento disminuye y cumple con la condición $G^*/\text{sen}(\delta) \geq 1,00$ kPa a lo largo de los rangos de temperaturas establecidos (52°C, 58°C, 64°C y 70°C), reflejando que es un asfalto apto para su uso en el servicio vial de carreteras. En la curva de la viscosidad se observa un comportamiento similar al de la curva del factor de ahuellamiento, es decir, la mezcla asfáltica está siendo más fluida conservando sus

propiedades elásticas condición que le aporta el componente duro Lagotreco, concordando con lo explicado en los gráficos de las figuras 30, 32 y 34.

En la figura 53, 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 5 (50% CPG + 50% Lagotreco) después del tratamiento oxidativo por RTFOT a 163°C.

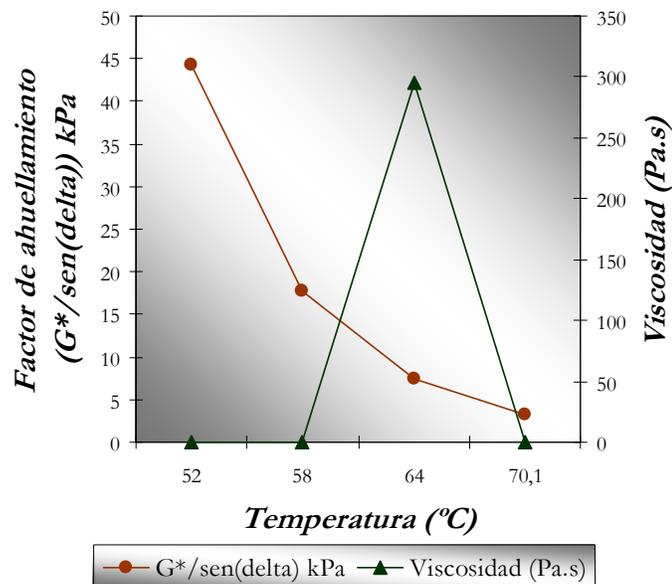


Figura 53. Curvas de correlación del factor de ahuellamiento ($G^*/\text{sen } \delta$) y de la viscosidad en función de la temperatura de la mezcla asfáltica 5 (50% CPG + 50% Lagotreco) después del tratamiento oxidativo por RTFOT a 163°C.

En la figura 53 de la mezcla asfáltica 5 da una curva del factor de ahuellamiento que desciende cuando aumenta la temperatura en los rangos establecidos que son 52°C, 58°C, 64°C y 70°C, los valores resultaron estar dentro del parámetro $G^*/\text{sen } \delta \geq 2,20$ kPa, estos resultados indican que difícilmente presentaría falla por deformación permanente. Esta mezcla asfáltica se comportará como un sólido elástico a altas temperaturas y es la condición ideal para resistir deformaciones futuras. La viscosidad se incrementa con la temperatura disminuyendo en el último punto de

temperatura a 70°C y este comportamiento se debe a la influencia del componente duro Lagotreco como se explica en los gráficos de las figuras 30, 32 y 34.

En la figura 54, 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 5 (50% CPG + 50% Lagotreco) después de un envejecimiento acelerado en el PAV de 10 años.

La curva descendiente del factor de fisuración por fatiga de la mezcla asfáltica 5 dio valores muy elevados, mayores a 5000 kPa, es decir, no cumple con la condición de que $G^* \cdot \text{sen } \delta \leq 5000$ kPa. De manera que a temperaturas moderadas esta mezcla asfáltica podría dar origen a falla por fisuración térmica o fatiga. Sin embargo, en el gráfico de la figura 39 ésta mezcla asfáltica presentó un excelente comportamiento a bajas temperaturas y a altas temperaturas como se vio en el gráfico de la figura 53. En este caso la viscosidad también produjo valores bastante elevados donde se muestra la dureza o rigidez incrementada en esta mezcla asfáltica y también se explica en los gráficos de las figuras 30, 32 y 34.

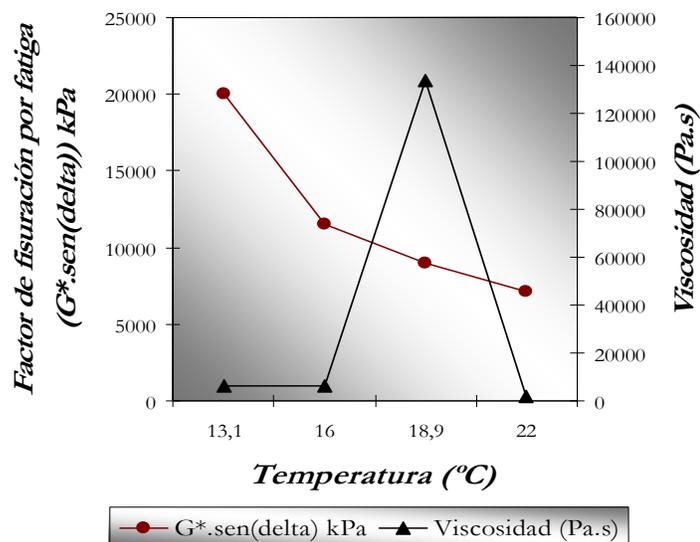


Figura 54. Curvas de correlación del factor de fisuración por fatiga ($G^* \cdot \text{sen } \delta$) y de la viscosidad en función de la temperatura de la mezcla asfáltica 5 (50% CPG + 50% Lagotreco) después de un envejecimiento acelerado en el PAV de 10 años.

En la figura 55, 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 55 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 30, 32 y 34.

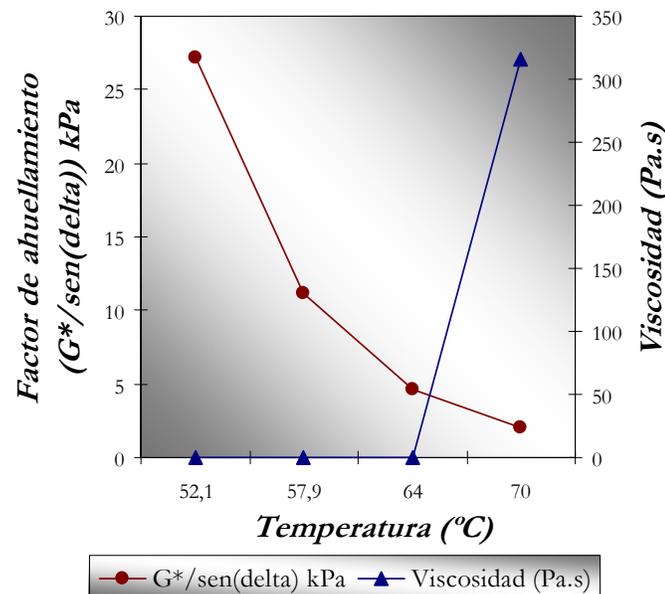


Figura 55. Curvas de correlación del factor de ahuellamiento ($G^*/\text{sen } \delta$) y de la viscosidad en función de la temperatura de la mezcla asfáltica 6 (25% CPG + 75% Lagotreco).

En la figura 56, 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 30, 32 y 34.

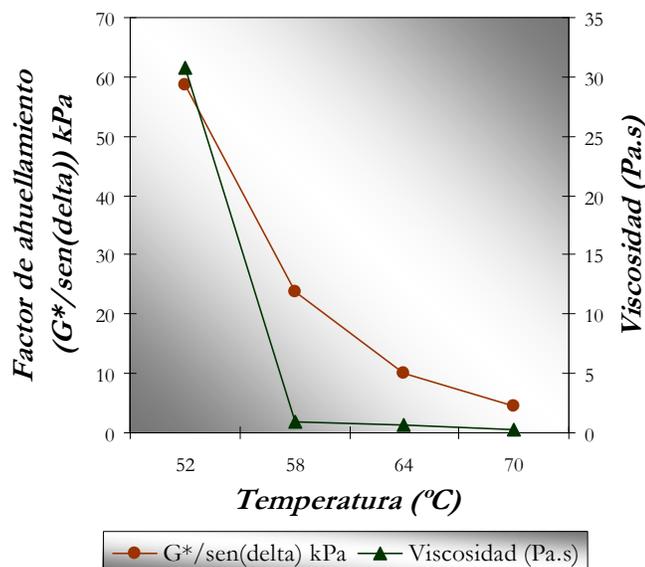


Figura 56. Curvas de correlación del factor de ahuellamiento ($G^*/\text{sen } \delta$) y de la viscosidad en función de la temperatura de la mezcla asfáltica 6 (25% CPG + 75% Lagotreco) después del tratamiento oxidativo por RTFOT a 163°C.

En la figura 57, 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.

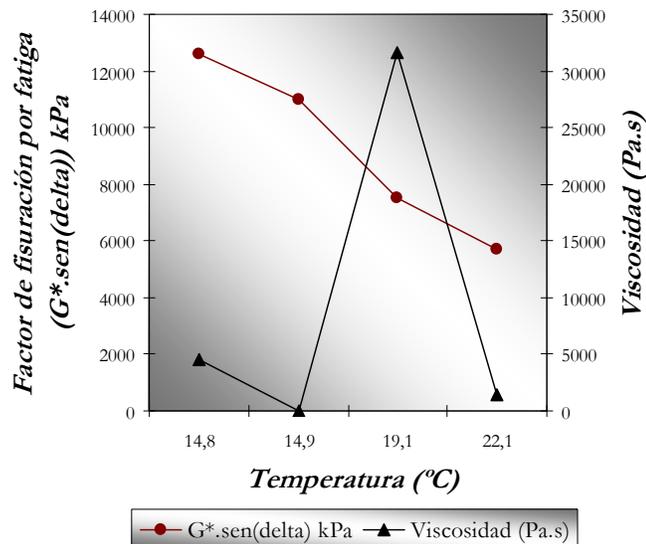


Figura 57. Curvas de correlación del factor de fisuración por fatiga ($G^* \cdot \text{sen } \delta$) y de la viscosidad en función de la temperatura de la mezcla asfáltica 6 (25% CPG + 75% Lagotreco) después de un envejecimiento acelerado en el PAV de 10 años.

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 30, 32 y 34.

En la figura 58, 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 8 (50% TJM-26 + 50% Lagotreco).

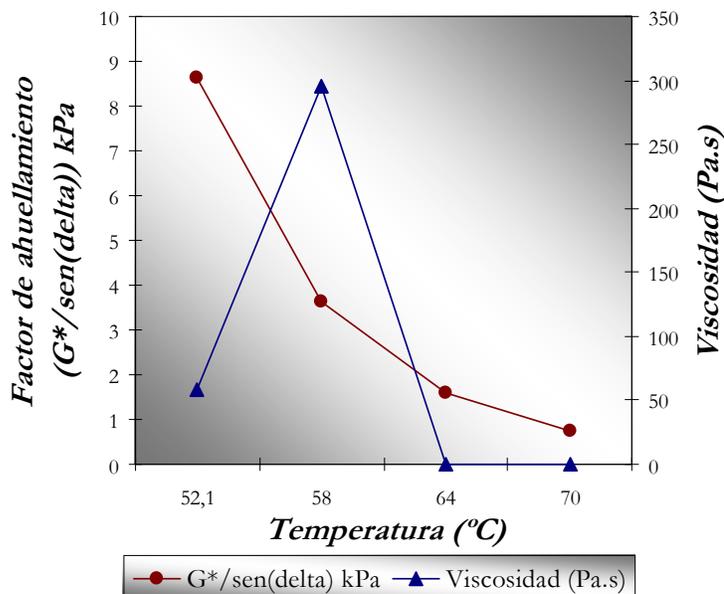


Figura 58. Curvas de correlación del factor de ahuellamiento ($G^*/\text{sen}(\delta)$) y de la viscosidad en función de la temperatura de la mezcla asfáltica 8 (50% TJM-26 + 50% Lagotreco).

El comportamiento de la mezcla asfáltica 8 resultó una curva descendente en el factor de ahuellamiento, en un rango de temperatura de 52°C, 58°C y 64°C, cumpliendo con el parámetro de $G^*/\text{sen}(\delta) \geq 1,00$ kPa. La temperatura a la cual no se cumplió con esta condición fue a 70°C, lo que se puede decir que por encima de 64°C esta mezcla asfáltica no funcionaría como asfalto para pavimentación. La viscosidad se incrementa a la temperatura de 58°C debido a que esta mezcla asfáltica trata de recuperar su forma elástica, pero, no logra vencer el esfuerzo y decrece en los siguientes rangos de temperatura, viéndose la influencia que ejerce el componente duro Lagotreco, explicado esto en los gráficos de las figuras 30, 32 y 34.

En la figura 59, 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 8 (50% CPG + 50% Lagotreco) después del tratamiento oxidativo por RTFOT a 163°C.

La curva de correlación del factor de ahuellamiento descende en los rangos de temperatura establecidos (52°C, 58°C y 64°C), tanto aquí como en el gráfico de la figura 58 a 70°C el valor no cumple con la condición $G^*/\text{sen } \delta \geq 2,20$ kPa, de manera que a temperaturas por debajo de 64°C esta mezcla asfáltica no sufrirá de deformación permanente, resistiendo los esfuerzos de cargas a altas temperaturas solo por debajo de 64°C. El comportamiento de la viscosidad es similar al de la figura 58 siendo ésta la misma mezcla asfáltica pero sin el tratamiento oxidativo por RTFOT, correspondiéndose también a los gráficos de las figuras 30, 32 y 34.

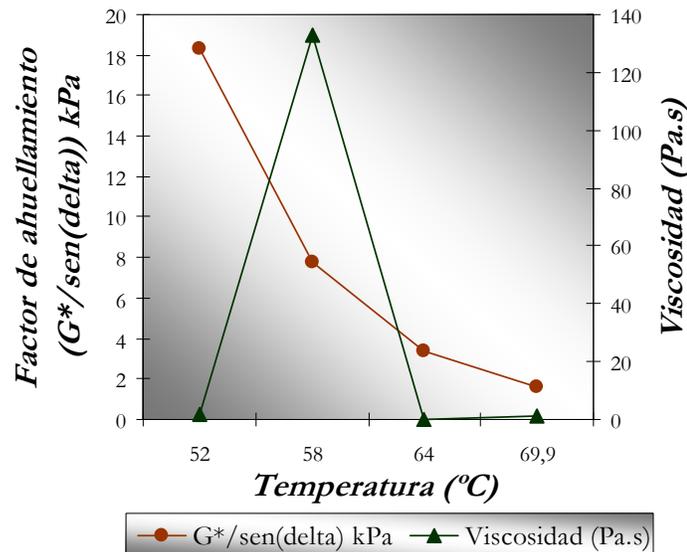


Figura 59. Curvas de correlación del factor de ahuellamiento ($G^*/\text{sen } \delta$) y de la viscosidad en función de la temperatura de la mezcla asfáltica 8 (50% TJM-26 + 50% Lagotreco) después del tratamiento oxidativo por RTFOT a 163°C.

En la figura 60, 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 8 (50% TJM-26 + 50% Lagotreco) después de un envejecimiento acelerado en el PAV de 10 años.

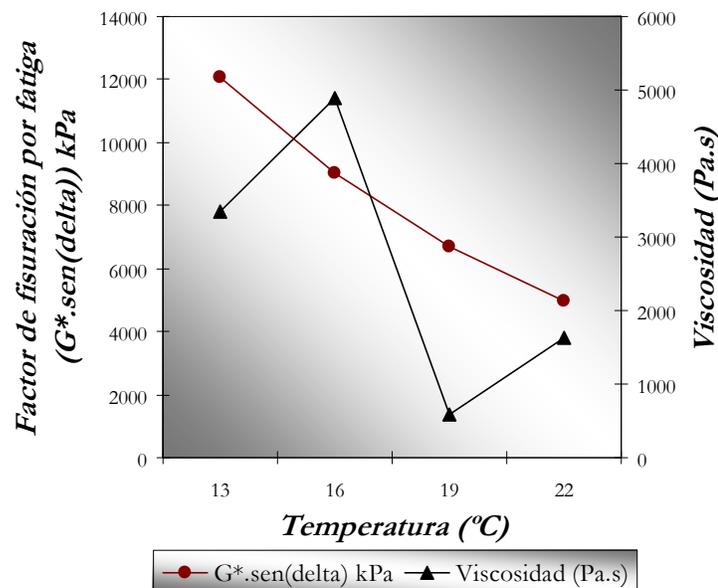


Figura 60. Curvas de correlación del factor de fisuración por fatiga ($G^* \cdot \text{sen } \delta$) y de la viscosidad en función de la temperatura de la mezcla asfáltica 8 (50% TJM-26 + 50% Lagotreco) después de un envejecimiento acelerado en el PAV de 10 años.

A 22°C el factor de fisuración por fatiga cumple con la condición $G^* \cdot \text{sen } \delta \leq 5000$ kPa, es decir, los demás puntos de los rangos de temperaturas establecidos (13°C, 16°C y 19°C) obtuvieron valores por encima de lo requerido, de forma que se puede predecir que a temperaturas intermedias por debajo de 22°C se presentará falla por fisuración por fatiga. Observándose la linealidad del factor de fisuración, y la viscosidad con valores bastante altos producto de la resistencia de la mezcla asfáltica a la deformación por la carga aplicada, puede verse también esta relación representada en los gráficos de las figuras 30, 32 y 34.

En la figura 61, 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% Lagotreco).

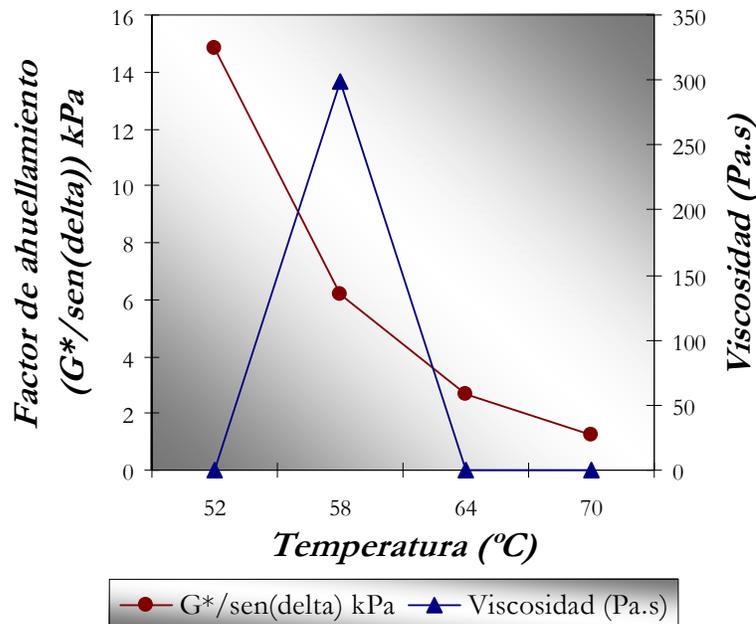


Figura 61. Curvas de correlación del factor de ahuellamiento ($G^*/\text{sen}(\delta)$) y de la viscosidad en función de la temperatura de la mezcla asfáltica 9 (25% TJM-26 + 75% Lagotreco).

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 30, 32 y 34.

En la figura 62, 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.

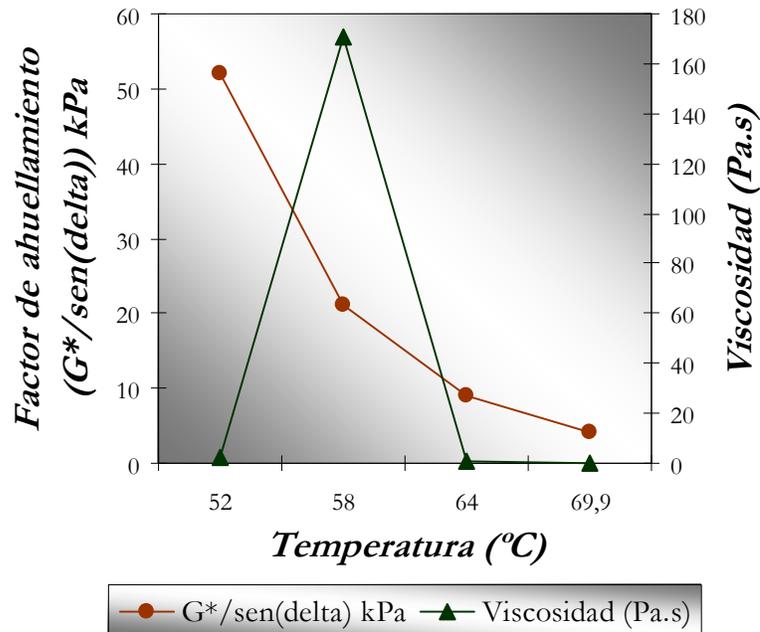


Figura 62. Curvas de correlación del factor de ahuellamiento ($G^*/\text{sen } \delta$) y de la viscosidad en función de la temperatura de la mezcla asfáltica 9 (25% TJM-26 + 75% Lagotreco) después del tratamiento oxidativo por RTFOT a 163°C.

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 61) y lo explicado en los gráficos de las figuras 30, 32 y 34.

En la figura 63 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.

En esta mezcla asfáltica 9 los valores obtenidos del factor de fisuración por fatiga cumplen con la condición $G^* \cdot \text{sen } \delta \leq 5000 \text{ kPa}$, a pesar de que no se observó una curva descendiente, 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 25, 30, 32 y 34.

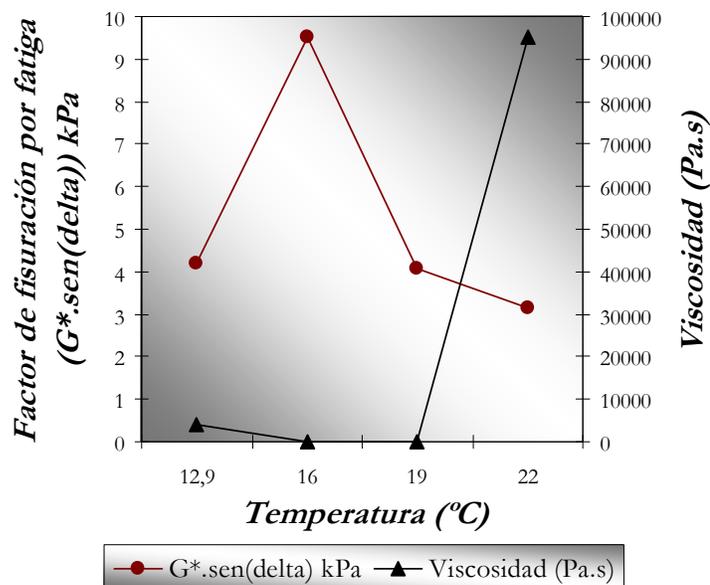


Figura 63. Curvas de correlación del factor de fisuración por fatiga ($G^* \cdot \text{sen } \delta$) y de la viscosidad en función de la temperatura de la mezcla asfáltica 9 (25% TJM-26 + 75% Lagotreco) después de un envejecimiento acelerado en el PAV de 10 años.

En la figura 64, 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).

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 los gráficos de las figuras 31, 33 y 35 y en la tabla 5.

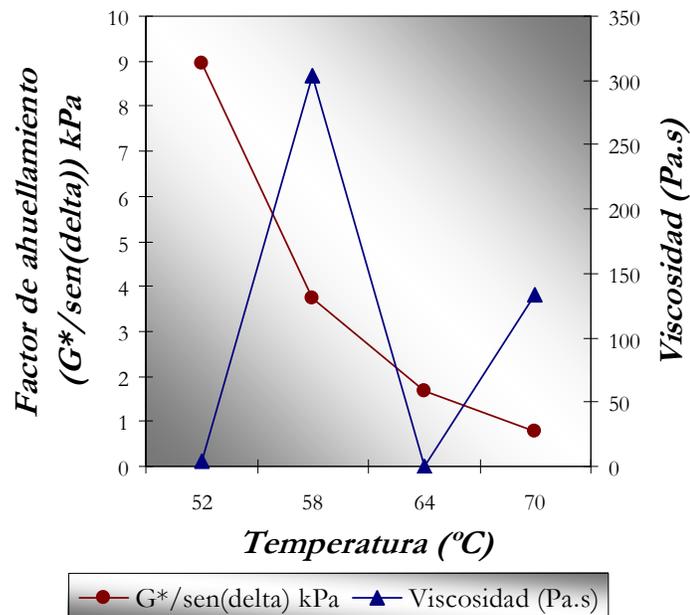


Figura 64. Curvas de correlación del factor de ahuellamiento ($G^*/\text{sen } \delta$) y de la viscosidad en función de la temperatura de la mezcla asfáltica 12 (50% TJM-26 + 25% CPG + 25% Lagotreco).

En la figura 65, 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.

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 y en los gráficos de las figuras 31, 33 y 35.

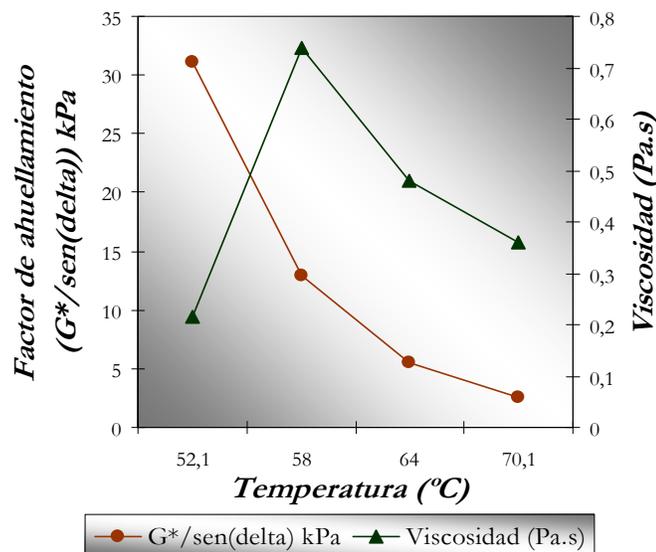


Figura 65. Curvas de correlación del factor de ahuellamiento ($G^*/\text{sen } \delta$) y de la viscosidad en función de la temperatura de la mezcla asfáltica 12 (50% TJM-26 + 25% CPG + 25% Lagotreco) después del tratamiento oxidativo RTFOT a 163°C.

En la figura 66, se ilustra la correlación del comportamiento de las curvas del factor de fisuración por fatiga ($G^* \cdot \sin \delta$) 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 $G^* \cdot \sin \delta \leq 5000$ 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 43. 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 y en los gráficos de las figuras 31, 33 y 35

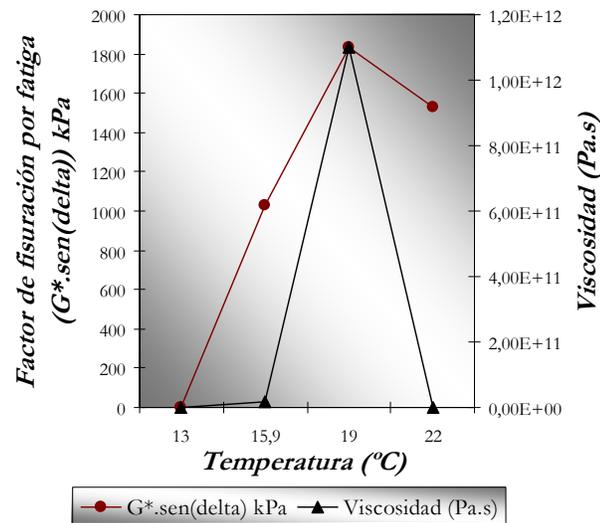


Figura 66. Curvas de correlación del factor de fisuración por fatiga ($G^* \cdot \text{sen } \delta$) y de la viscosidad en función de la temperatura de la mezcla asfáltica 12 (50% TJM-26 + 25% CPG + 25% Lagotreco) después de un envejecimiento acelerado en el PAV de 10 años.

En la figura 67, 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 13 (100% CPG).

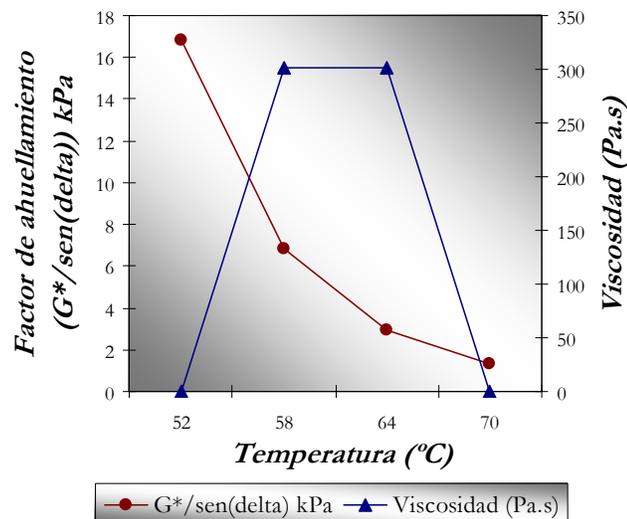


Figura 67. Curvas de correlación del factor de ahuellamiento ($G^*/\text{sen } \delta$) y de la viscosidad en función de la temperatura de la mezcla asfáltica 13 (100% CPG).

La mezcla asfáltica 13 presentó una curva decreciente en el factor de ahuellamiento, cuyos valores correspondieron a la siguiente condición $G^*/\text{sen } \delta \geq 1,00$ kPa bajo los rangos de temperaturas establecidos (52°C, 58°C, 64°C y 70°C), esto refleja que se puede usar como pavimento; pero esto, no garantiza que esta mezcla no vaya a presentar fallas a altas y moderadas temperaturas. La viscosidad crece, se mantiene y al final disminuye, aquí intervienen las interacciones químicas internas de las moléculas, siendo éste el componente menos blando donde la cantidad de asfaltenos presentes fue mayor como se vio en el gráfico de la figura 23, y con lo explicado en los gráficos de las figuras 30, 32 y 34.

En la figura 68, 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.

La curva que se observa en la mezcla asfáltica 13 del factor de ahuellamiento es decreciente y sus valores correspondieron a la condición $G^*/\text{sen } \delta \geq 2,20$ kPa en todos los rangos de temperaturas establecidos (52°C, 58°C, 64°C y 70°C). Con esto, la muestra pasa la prueba de resistencia en la falla por deformación permanente y puede ser utilizada como pavimento soportando las altas temperaturas. La viscosidad se presenta como una curva ascendente con valores bastante bajos, mostrando implícitamente su alto grado de fluidez visto en los gráficos de las figuras 30, 32 y 34, comportándose así como un sólido elástico a altas temperaturas, que es lo que se quiere para su buen desempeño en las carreteras asfaltadas con esta mezcla asfáltica, aún después de 10 años en servicio.

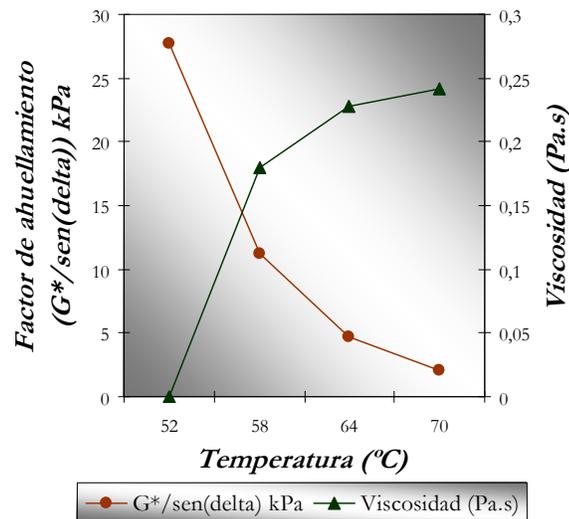


Figura 68. Curvas de correlación del factor de ahuellamiento ($G^*/\text{sen}(\delta)$) y de la viscosidad en función de la temperatura de la mezcla asfáltica 13 (100% CPG) después del tratamiento oxidativo por RTFOT a 163°C.

En la figura 69, 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 13 (100% CPG) después de un envejecimiento acelerado en el PAV de 10 años.

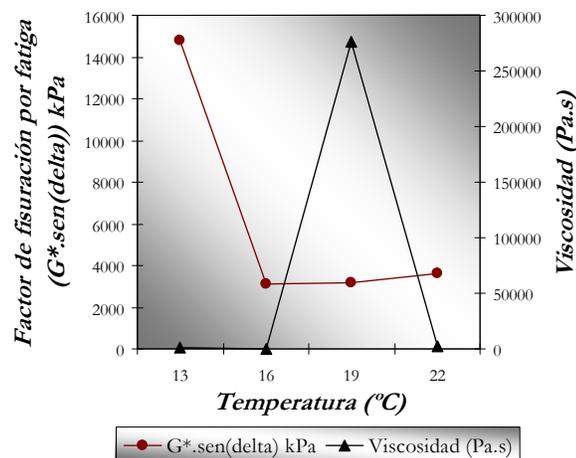


Figura 69. Curvas de correlación del factor de fisuración por fatiga ($G^*\cdot\text{sen}(\delta)$) y de la viscosidad en función de la temperatura de la mezcla asfáltica 13 (100% CPG) después de un envejecimiento acelerado en el PAV de 10 años.

Esta correlación muestra que el factor de fisuración por fatiga de la mezcla asfáltica 13 desciende rápidamente en el rango de temperatura de 13°C a 16°C. En donde a la temperatura de 13°C está fuera de la condición para ser un asfalto que soporte después de 10 años la falla por fisuración por fatiga. Sin embargo, en los demás rangos de temperaturas establecidas (16°C, 19°C y 22°C), se encontraron dentro del parámetro $G^* \cdot \text{sen } \delta \leq 5000$ kPa, dando a conocer la resistencia de esta mezcla asfáltica a la fisuración por fatiga o térmica a temperaturas moderadas por encima de 16°C. La viscosidad se incrementa a 19°C y luego decrece considerablemente, notándose el esfuerzo de la parte recuperable y no recuperable por soportar los esfuerzos de cargas aplicados en este análisis, la causa de este comportamiento ya fue explicado en los gráficos de las figuras 23, 30, 32 y 34.

En la figura 70, 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 15 (100% Lagotreco).

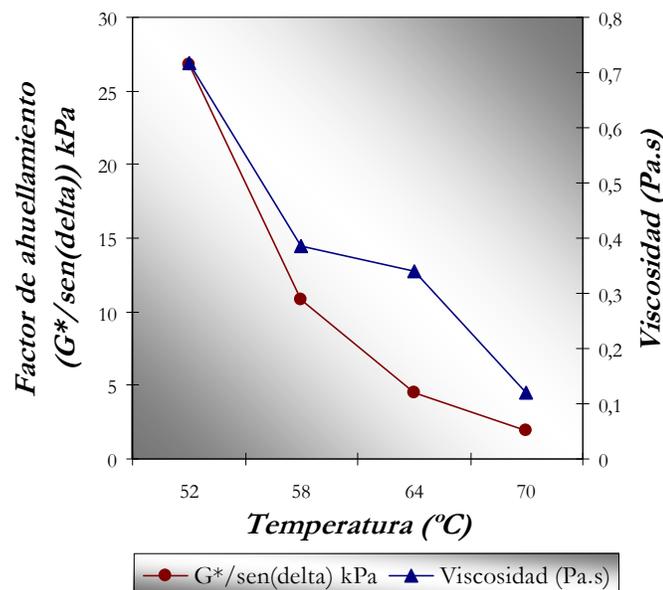


Figura 70. Curvas de correlación del factor de ahuellamiento ($G^*/\text{sen } \delta$) y de la viscosidad en función de la temperatura de la mezcla asfáltica 15 (100% Lagotreco).

El factor de ahuellamiento forma una curva descendiente en los rangos de temperatura establecidos que son los siguientes 52°C, 58°C, 64°C y 70°C, y todos los resultados obtenidos se encontraron dentro del parámetro $G^*/\text{sen } \delta \geq 1,00$ kPa, es decir, que a altas temperaturas esta mezcla asfáltica puede ser utilizada como pavimento, sin que aparezcan fallas o deterioros, haciendo mención que la mezcla asfáltica en este análisis no ha sido sometida a ensayos oxidativo o envejecimiento previo. La viscosidad disminuye, por la acción de la carga aplicada y, al esfuerzo elástico (recuperable) y viscoso (no recuperable) producido por las moléculas internas en su estructura, discutido en los gráficos de las figuras 25, 30 32 y 34.

En la figura 71, 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 15 (100% Lagotreco) después del tratamiento oxidativo por RTFOT a 163°C.

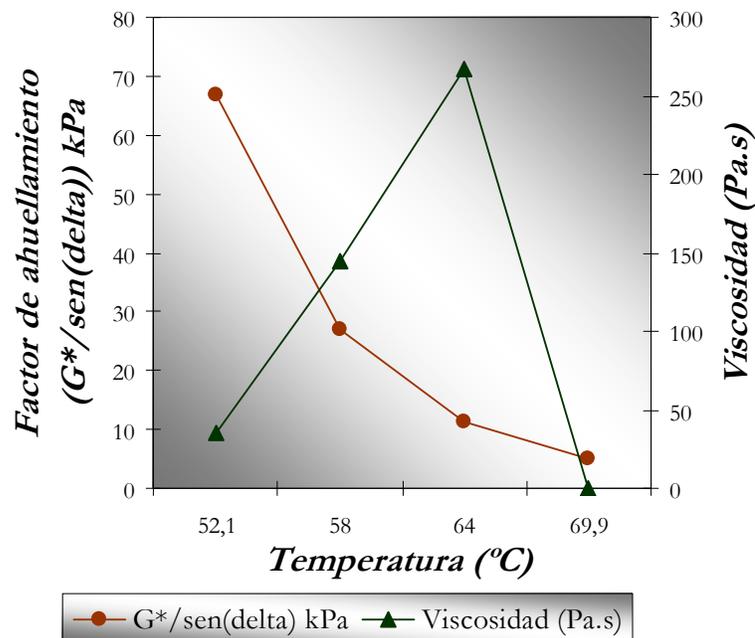


Figura 71. Curvas de correlación del factor de ahuellamiento ($G^*/\text{sen } \delta$) y de la viscosidad en función de la temperatura de la mezcla asfáltica 15 (100% Lagotreco) después del tratamiento oxidativo RTFOT a 163°C.

Los valores de la curva que muestra el factor de ahuellamiento en los diferentes rangos de temperatura establecidos (52°C, 58°C, 64°C y 70°C) cumplieron con la condición $G^*/\text{sen } \delta \geq 2,20 \text{ kPa}$, de manera que a altas temperaturas se comportará como un sólido elástico previniendo la falla por deformación permanente, cumpliendo así los requerimientos para ser empleado como pavimento, resistiendo las altas temperaturas. En la figura 71 se observa que la viscosidad se incrementa hasta 64°C, debido al proceso oxidativo, lo cual produjo menos interacción con ganancia de masa, siendo éste el componente duro explicado en el gráfico de la figura 36. De 64°C a 70°C la viscosidad disminuye tratando de recuperar su forma elástica, como aparece mencionado en la discusión de los gráficos de las figuras 30, 32 y 34.

En la figura 72, 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 15 (100% Lagotreco) después de un envejecimiento acelerado en el PAV de 10 años.

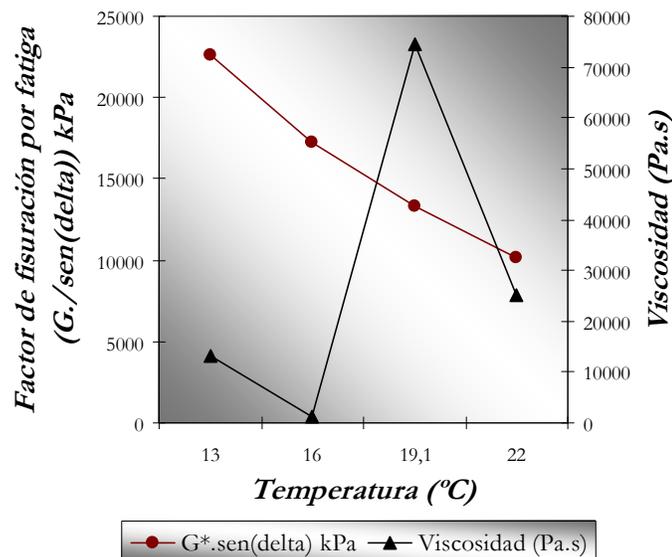


Figura 72. Curvas de correlación del factor de fisuración por fatiga ($G^* \cdot \text{sen } \delta$) y de la viscosidad en función de la temperatura de la mezcla asfáltica 15 (100% Lagotreco) después de un envejecimiento acelerado en el PAV de 10 años.

La correlación del factor de fisuración por fatiga presenta una linealidad decreciente en los rangos de temperaturas establecidos (13°C, 16°C, 19°C y 22°C) y los resultados obtenidos se encontraron fuera de la condición $G^* \cdot \sin \delta \leq 5000$ kPa, es decir, esta mezcla asfáltica no funciona a temperaturas moderadas presentando un comportamiento inadecuado, con poca resistencia al esfuerzo de carga aplicado. Por otra parte, a bajas temperaturas mostró un buen desempeño como se puede apreciar en el gráfico de la figura 45. Se puede predecir que antes de que pueda llegar a este bajo nivel de temperatura la mezcla asfáltica ya se ha producido la falla por fisuración térmica o fatiga. Los valores que alcanzó la viscosidad de la mezcla asfáltica 15 fueron extremadamente altos, notándose la pérdida de elasticidad y fluidez; variando a lo largo de las temperaturas establecidas.

Resumiendo, las mezclas asfálticas 2 (50% TJM-26 + 50% CPG), 5 (50% CPG + 50% Lagotreco), 6 (25% CPG + 75% Lagotreco), 9 (25% TJM-26 + 75% Lagotreco), 12 (50% TJM-26 + 25% CPG + 25% Lagotreco), 13 (100% CPG) y 15 (100% 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 $G^*/\sin \delta \geq 1,00$ 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. Las viscosidades de estas mezclas asfálticas juegan un papel importante como el caso de la mezcla 2 (50% TJM-26 + 50% CPG) donde a 70°C su viscosidad desciende dejando de ser un sólido elástico para comportarse como un elástico blando debido a la proporción del componente TJM-26 que le aporta mayor fluidez, lo cual hace que las moléculas de saturados y resinas interaccionen para ocasionar este estado que no la favorece.

La mezcla asfáltica 5 (50% CPG + 50% Lagotreco) con una viscosidad que desciende y en el último punto tiende a recuperarse con un índice de fluidez muy alto y poco adecuado a temperaturas elevadas, causado por el componente duro Lagotreco queriendo decir esto que las moléculas de los saturados están interactuando formando grandes moléculas y pasan a formar parte de los aromáticos perdiendo así la elasticidad; 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, en la mezcla asfáltica 13 (100% CPG) se produce un aumento en la viscosidad debido a que las moléculas de las resinas pasan a formar parte de los asfaltenos ocasionando un equilibrio entre 58°C y 64°C, pero desciende ganando fluidez por las reacciones internas entre los componentes SARA debido al nivel alcanzado por las moléculas aromáticas; en la mezcla asfáltica 15 (100% Lagotreco) la viscosidad decrece como producto del rompimiento de los enlaces entre las moléculas de los compuestos saturados y resinas, permitiendo la acción de las moléculas grandes, en este caso, los aromáticos, perdiendo elasticidad y alcanzando una fluidez poco apropiada para esta mezcla.

A 70°C las mezclas asfálticas 1 (75% TJM-26 + 25% CPG) y 8 (50% TJM-26 + 50% Lagotreco), sin ningún tratamiento, siendo asfaltos de grado comercial, no cumplieron con la condición $G^*/\text{sen } \delta \geq 1,00$ kPa de lo cual se puede predecir que a esta temperatura sufrirán falla por deformación permanente. La viscosidad de la mezcla 1 (75% TJM-26 + 25% CPG) asciende por el incremento de los asfaltenos debido a las reacciones dentro de la estructura de esta mezcla, influyendo así el componente menos blando CPG ; en la mezcla 8 (50% TJM-26 + 50% Lagotreco) ocurre un incremento de la viscosidad por el componente duro Lagotreco a 58°C, actuando aquí las moléculas de los asfaltenos y después desciende por la actividad del componente blando TJM-26 que le da alta fluidez por las moléculas de saturados y resinas del componente SARA, por lo cual no sería recomendada para usos a altas temperaturas, como se puede ver en el gráfico de la figura 59.

Después de un tratamiento oxidativo por el RTFOT a 163°C las mezclas asfálticas 2 (50% TJM-26 + 50% CPG), 5 (50% CPG + 50% Lagotreco), 6 (25% CPG + 75% Lagotreco), 9 (25% TJM-26 + 75% Lagotreco), 12 (50% TJM-26 + 25% CPG + 25% Lagotreco), 13 (100% CPG) y 15 (100% Lagotreco), resultaron estar dentro del parámetro del factor de ahuellamiento cumpliendo la condición $G^*/\text{sen } \delta \geq 2,20$ kPa y los requerimientos para ser empleadas como material de pavimento. La viscosidad de la mezcla 2 (50% TJM-26 + 50% CPG) disminuye por la presencia del componente blando TJM-26, comportándose como un material elástico blando poco favorable para esta mezcla, dado que las moléculas de los saturados y resinas reaccionan de tal manera que ocasionan esta fluidez; la mezcla asfáltica 5 (50% CPG + 50% Lagotreco) incrementa su viscosidad hasta una temperatura de 64°C por el componente duro Lagotreco y a 70°C disminuye ascendiendo su fluidez debido al componente CPG, esto debido a que las moléculas de los saturados están interactuando para formar moléculas grandes y convirtiéndose en parte de los aromáticos perdiendo así su elasticidad.

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; la mezcla asfáltica 13 (100% CPG) presenta un incremento en su viscosidad apropiado para las altas temperaturas, comportándose como un sólido elástico ocasionado por la transformación de las resinas en asfaltenos, resistiendo la deformación permanente; en la mezcla asfáltica 15 (100% Lagotreco) ocurre un ascenso de la viscosidad por el nivel de asfaltenos presentes y también debido al proceso oxidativo al cual fue sometida donde obtuvo ganancia de masa (figura 36), a 70°C la fluidez de esta mezcla crece permitiendo que las moléculas de los saturados y resinas pasen a formar parte de la estructura de los aromáticos.

Los valores del factor de ahuellamiento de las mezclas asfálticas 1 (75% TJM-26 + 25% CPG) y 8 (50% TJM-26 + 50% Lagotreco) a la temperatura de 70°C no

cumplieron con la condición $G^*/\text{sen } \delta \geq 2,20$ kPa, es decir, la falla por deformación permanente prevendría sólo en el rango de temperatura de 52°C - 64°C, por encima de estas temperaturas no es recomendable su utilización. La viscosidad en la mezcla asfáltica 1 (75% TJM-26 + 25% CPG) disminuye a 58°C por la interacción de los resinas que le otorga el componente blando TJM-26 al bajar las moléculas de los asfaltenos, a 64°C asciende la viscosidad por la proporción del componente menos blando CPG y los asfaltenos influenciado por las reacciones moleculares de las resinas y los saturados dándole menos fluidez a esta mezcla; en la mezcla asfáltica 8 (50% TJM-26 + 50% Lagotreco) la viscosidad se incrementa por el componente duro Lagotreco a una temperatura de 58°C producido por las moléculas de los asfaltenos y a partir 64°C desciende por la actividad del componente blando TJM-26 que le otorga alta fluidez por las moléculas de saturados y resinas del componente SARA.

Las mezclas asfálticas 1 (75% TJM-26 + 25% CPG), 6 (25% CPG + 75% Lagotreco) y 8 (50% TJM-26 + 50% Lagotreco), las cuales fueron envejecidas por 10 años de servicio a través del PAV, sólo cumplieron con el valor del factor de fisuración a la temperatura de 22°C bajo la condición establecida de $G^* \cdot \text{sen } \delta \leq 5000$ kPa, de acuerdo a esto se puede inferir que no son mezclas óptimas para soportar las temperaturas intermedias ya que serían susceptibles a la generación de fallas por fisuración térmica o fatiga. La viscosidad de la mezcla asfáltica 1 (75% TJM-26 + 25% CPG) asciende y desciende en el rango de temperatura establecido de 13°C, 16°C, 19°C y 22°C con valores muy altos, mostrándose la inestabilidad que otorga el componente menos blando CPG debido a la interacción molecular de los componentes SARA reaccionando las resinas para formar asfaltenos y a su vez reaccionan también con los saturados para formar parte de los aromáticos; la mezcla 6 (25% CPG + 75% Lagotreco) mostró igualmente 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 24), mientras las resinas y los saturados reaccionan para

formar parte de los aromáticos perdiendo elasticidad en el último punto a la temperatura de 70°C; la mezcla asfáltica 8 (50% TJM-26 + 50% Lagotreco) presentó, igualmente variación en la viscosidad aumentando y disminuyendo sus valores a las distintas temperaturas, ocasionado por los asfaltenos provenientes del componente duro Lagotreco y el componente blando TJM-26 que aporta las interacciones de las moléculas de los saturados y las resinas para contribuir la parte elástica, aunque sus valores de viscosidad son muy elevados.

Las mezclas asfálticas 2 (50% TJM-26 + 50% CPG) y 13 (100% CPG) envejecidas a 10 años de servicio por el PAV a la temperatura de 13°C no cumplió con el parámetro $G^* \cdot \sin \delta \leq 5000$ kPa para temperaturas intermedias, lo cual se traduce en mezclas poco óptimas para resistir el deterioro por fisuración térmica o fatiga. La viscosidad de la mezcla 2 (50% TJM-26 + 50% CPG) es bastante alta presentando inestabilidad debido a sus incrementos y descensos producidos por el componente menos blando CPG con el aumento de los asfaltenos en sus interacciones con las resinas que aporta el componente blando TJM-26; en la mezcla asfáltica 13 (100% CPG) la viscosidad ascendió hasta la temperatura de 19°C ocasionado por el notablemente crecimiento de las moléculas de los asfaltenos dentro de la estructura de este asfalto, a 22°C la viscosidad baja rápidamente como consecuencia el colapso de las moléculas de composición SARA perdiendo una fluidez adecuada para la recuperación de la elasticidad.

Después de envejecimiento a 10 años de servicio por el PAV, el parámetro $G^* \cdot \sin \delta \leq 5000$ kPa de las mezclas asfálticas 5 (50% CPG + 50% Lagotreco) y 15 (100% Lagotreco) no se cumplió a temperaturas intermedias, quedando todos los valores del factor de fisuración fuera de la condición establecida, por lo cual a pesar de cumplir otros requisitos para mezclas óptimas (punto de penetración, BBR a bajas temperaturas), sus proporciones no son adecuadas porque favorecen la aparición de

falla por fisuración térmica o fatiga. La viscosidad de la mezcla 5 (50% CPG + 50% Lagotreco) fue extremadamente alta ocasionada por las moléculas de asfaltenos aportados por el componente duro Lagotreco y a 22°C desciende drásticamente perdiendo la viscoelasticidad debido a la interacción de las moléculas aromáticas; en la mezcla asfáltica 15 (100% Lagotreco) se observa una alta viscosidad que varía aumentando y disminuyendo con la temperatura debido a las interacciones de las resinas y las moléculas de los saturados, ocasionando un incremento en el nivel de los asfaltenos.

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 optima 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.

El 75% de las mezclas asfálticas obtenidas a distintas proporciones de los componentes blandos CPG y TJM-26 y el componente duro Lagotreco, resultaron estar dentro del rango de los Asfaltos Grados Comerciales.

La mezcla CPG y Lagotreco presentaron mayor viscoelásticidad 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 nueve mezclas 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) 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.

RECOMENDACIONES

Deseable modelar la relación existente entre los componentes SARA de los asfaltos base, sus propiedades fisicoquímicas y reológicas para la obtención de mezclas asfálticas óptimas según criterios normados.

Desarrollar un programa para correlacionar propiedades de mezclas asfálticas de 3 componentes, a través de gráficos tridimensionales y generar superficies de respuestas viscoelásticas.

BIBLIOGRAFÍA

1. Balige, M. y Sawyer, C. 2001. Caracterización integral de materiales asfálticos. Argentina, *Repsol YPF Derivados Latinoamérica*, 2: 6-10.
2. The Asphalt Institute, 1985. Manual del Asfalto. *Productos Asfálticos*, 2: 146-148, 271-284.
3. Anderson, D. A.; Christensen, D. W. y Kennedy, T. K. 1992. On the development of SHRP binder specifications. *Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 62: 64-88.
4. Brule, B.; Ramond, G. y Such, C. 1990. Relationship between composition, structure, and properties of road asphalt. *Transportation Research Record*, 1096: 22-34.
5. Astorm, D.; Brumsif, R. J. y Sheri, E. Y. 1998. Development of solid properties and thermochemistry of asphalt binders in the 25-65°C Temperature range. *Energy & Fuels*, 10: 855-864.
6. Kenndy, T. W. y Harrigan, E. 1990. The SHRP asphalt research program products. *Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 59: 610-620.
7. Corbett, L.W. 1970. AAPT. *Relation between composition and physical properties of asphalt*, 39.
8. Speight, J. G. y Moschopedis, S. E. 1981. On the molecular nature of petroleum asphaltene. *Chemistry of asphaltene*, 1-15.
9. Strausz, P. O.; Mojelsky, W. T.; Faraji, F., Lown, M. E. y Peng, P. 1999. Additional structural details on Athabasca asphaltene and their ramifications. *Energ. Fuel*, 13: 207-227.
10. Murgich, J.; Abanero, A. J. y Strausz, P. O. 1999. Molecular recognition in aggregates formed by asphaltene and resin molecules from the Athabasca oil sand. *Energ. Fuel*, 13: 278-286.

11. Peng, P.; Morales-Izquierdo, A.; Lown, E. M. y Strausz, O. P. 1999. Chemical structure and biomarker content of jinghan asphaltene and kerogens. *Energ. Fuel*, 13: 248-265.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. 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.
17. 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.
18. Fleitas, F. y Meleán, G. 1992. Estado del arte sobre técnicas de caracterización fisicoquímica y reológica de los cementos asfálticos. Informe Técnico. PDVSA-INTEVEP.
19. 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.
20. Reerink. H. y Lijzenga, J. 1975. Gel-Permeation chromatography calibration curve for asphaltenes and bituminous resins. *Analytical Chemistry*, 47: 2160-2167.

21. Goodwin, W. 1982. Colloid dispersions. *Royal Society Chemistry*, 165-195.
22. Marquez, G.; Alejandre, F. y Bencomo, M. 2006. Influencia de asfaltos y resinas en la viscosidad de petróleos bituminosos utilizables como pinturas asfálticas de imprimación. *Materiales de Construcción*, 56: 41-47,281.

APÉNDICES

APÉNDICE A
CLASIFICACIÓN POR PUNTO DE PENETRACIÓN DE LOS ASFALTOS Y
SUS MEZCLAS

Tabla A1. Estándares para la clasificación de los Asfaltos Grados Comerciales

Asfaltos Grados Comerciales		
40/50	60/70	85/100

APÉNDICE B
REÓMETRO DE CORTE DINÁMICO DSR PARA LOS ASFALTOS Y SUS
MEZCLAS

Tabla B1. Criterios del Reómetro de corte dinámico DSR para los asfaltos y sus mezclas.

Asfalto original	
Temperaturas (°C)	46, 52, 58, 64, 70, 76, 82
Reómetro de corte dinámico, $G^*/\text{sen } \delta$	$G^*/\text{sen } \delta \geq 1,00 \text{ kPa}$
Asfalto envejecido – Resíduo RTFOT	
Temperaturas (°C)	46, 52, 58, 64, 70, 76, 82
Reómetro de corte dinámico, $G^*/\text{sen } \delta$	$G^*/\text{sen } \delta \geq 2,20 \text{ kPa}$
Asfalto envejecido – Resíduo RTFOT + PAV	
Temperaturas (°C)	40, 37, 34, 31, 28, 25, 22, 19, 16, 13, 10, 7, 4
Reómetro de corte dinámico, $G^* \cdot \text{sen } \delta$	$G^* \cdot \text{sen } \delta \leq 5000 \text{ kPa}$

APÉNDICE C
MEZCLAS ASFÁLTICAS 1, 4, 7, 10,11 Y 14 DESPUÉS DE PASAR POR
RTFOT Y PAV MEDIANTE EL BBR A TRES DISTINTAS
TEMPERATURAS EN FUNCIÓN DEL TIEMPO DE RESISTENCIA

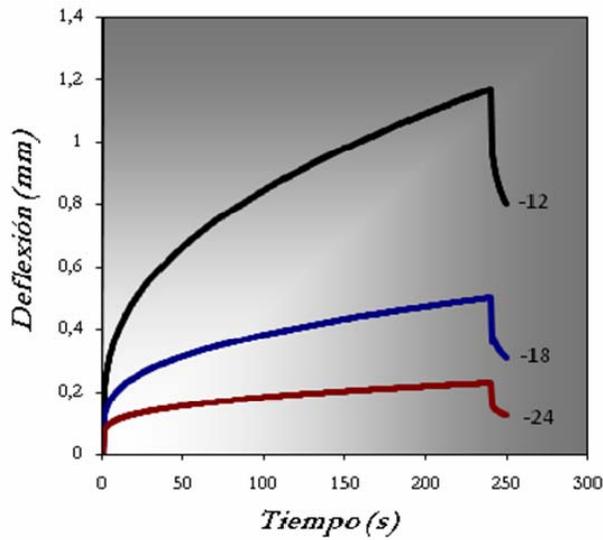


Figura C1. Correlación de las Isotermas del índice de deflexión en función del tiempo de la mezcla asfáltica 3 (75% CPG+25% TJM-26) con un envejecimiento acelerado en el PAV de 10 años de servicio.

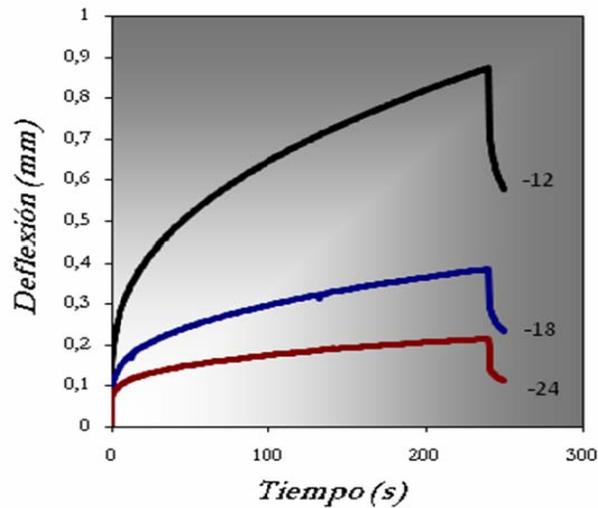


Figura C2. Correlación de las Isotermas del índice de deflexión en función del tiempo de la mezcla asfáltica 4 (25% CPG+75% Lagotreco) con un envejecimiento acelerado en el PAV de 10 años de servicio.

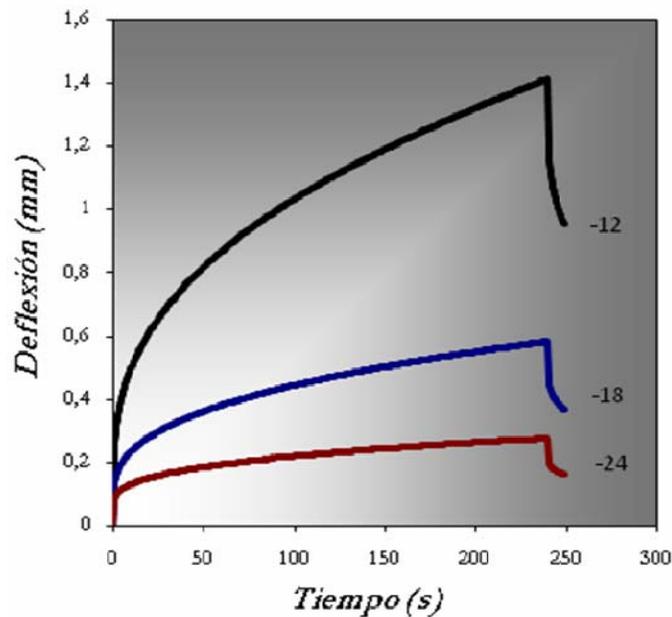


Figura C3. Correlación de las Isotermas del índice de deflexión en función del tiempo de la mezcla asfáltica 7 (75% TJM-26+25% Lagotreco) con un envejecimiento acelerado en el PAV de 10 años de servicio.

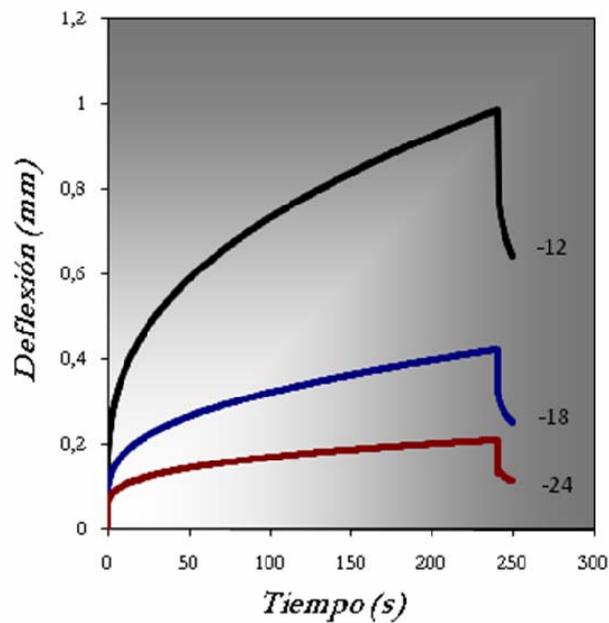


Figura C4. Correlación de las Isotermas del índice de deflexión en función del tiempo de la mezcla asfáltica 10 (25% TJM-26+ 25% CPG + 50% Lagotreco) con un envejecimiento acelerado en el PAV de 10 años de servicio.

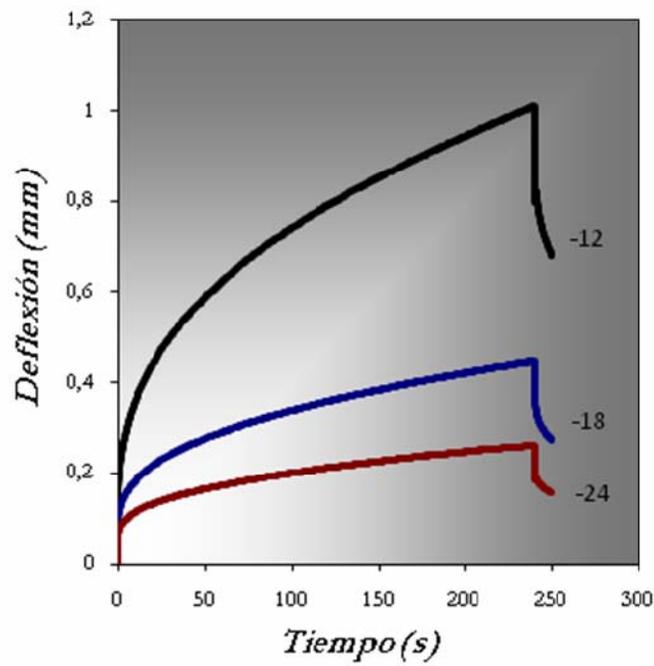


Figura C5. Correlación de las Isotermas del índice de deflexión en función del tiempo de la mezcla asfáltica 11 (25% TJM-26+ 50% CPG + 25% Lagotreco) con un envejecimiento acelerado en el PAV de 10 años de servicio.

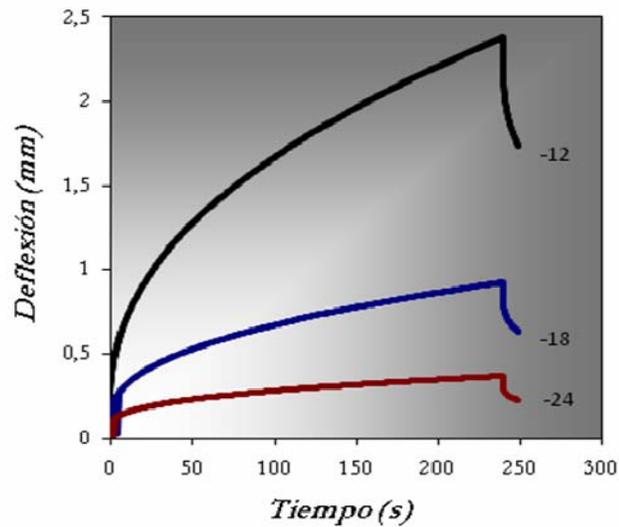


Figura C6. Correlación de las Isotermas del índice de deflexión en función del tiempo de la mezcla asfáltica 14 (100% TJM-26) con un envejecimiento acelerado en el PAV de 10 años de servicio.

APÉNDICE D

MEZCLAS ASFÁLTICAS 1, 4, 7, 10,11 REPRESENTADAS POR CURVAS DE CORRELACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL FACTOR DE AHUELLAMIENTO ($G^*/\text{sen}(\delta)$) Y LA VISCOSIDAD EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS ANTES Y DESPUÉS DE PASAR POR RTFOT Y PAV MEDIANTE EL REÓMETRO DE CORTE DINÁMICO (DSR) A CUATRO DISTINTAS TEMPERATURAS EN FUNCIÓN DEL TIEMPO DE RESISTENCIA

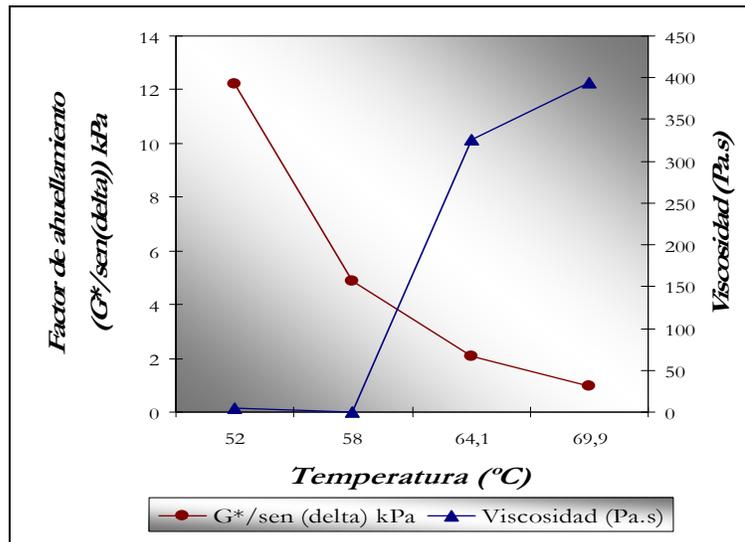


Figura D1. Curvas de correlación del factor de ahuellamiento ($G^*/\text{sen} \delta$) y la viscosidad en función de la temperatura de la mezcla asfáltica 3 (75% CPG+25% TJM-26).

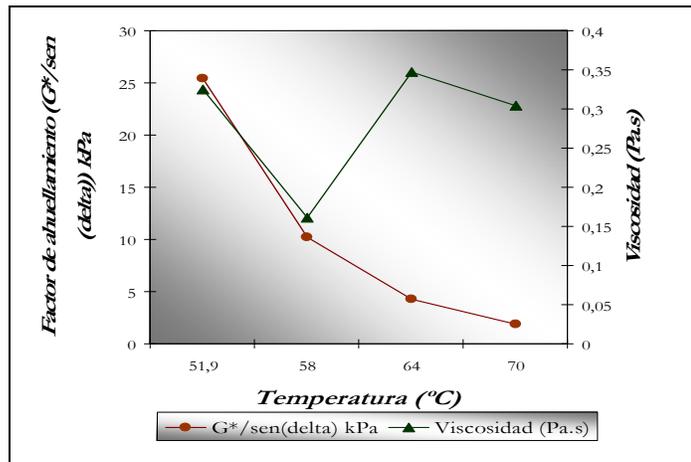


Figura D2. Curvas de correlación del factor de ahuellamiento ($G^*/\text{sen } \delta$) y la viscosidad en función de la temperatura de la mezcla asfáltica 3 (75% CPG + 25% TJM-26) después del tratamiento oxidativo RTFOT a 163°C.

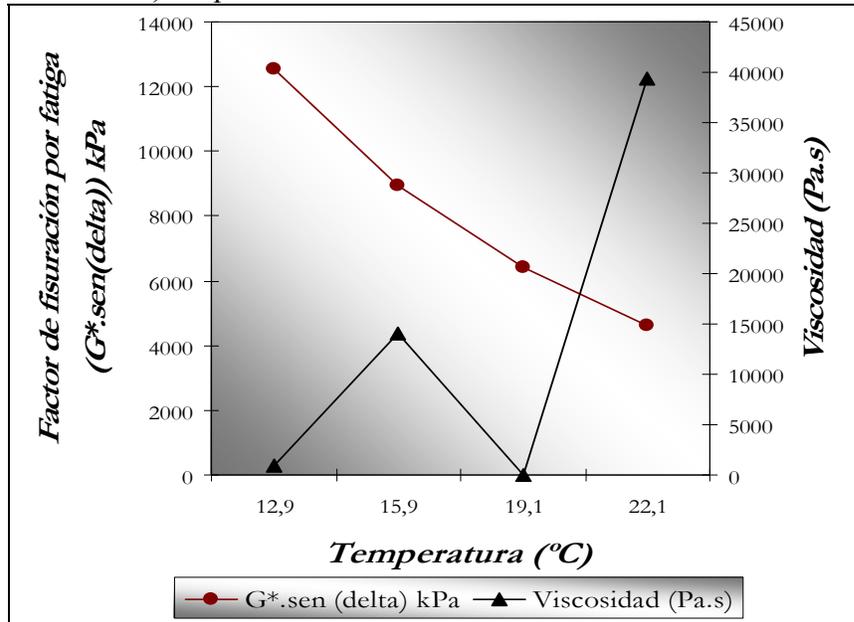


Figura D3. Curvas de correlación del factor de ahuellamiento ($G^* \cdot \text{sen } \delta$) y la viscosidad en función de la temperatura de la mezcla asfáltica 3 (75% CPG + 25% TJM-26) después de un envejecimiento acelerado en el PAV de 10 años.

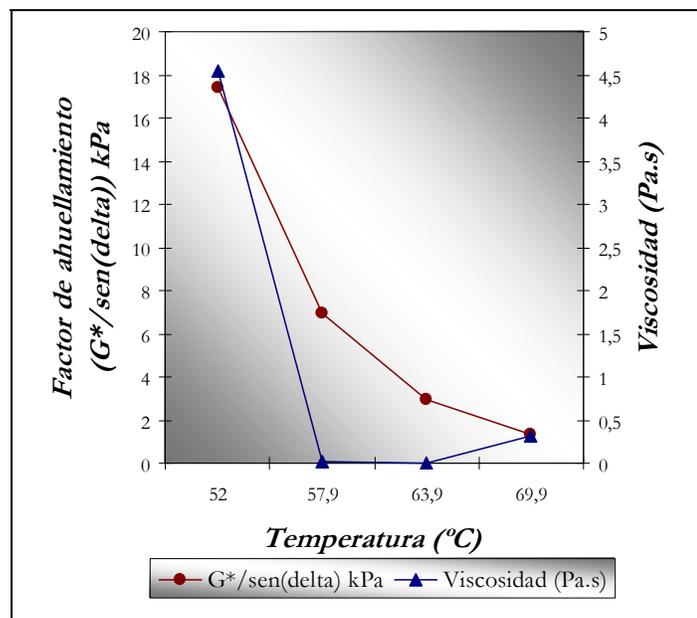


Figura D4. Curvas de correlación del factor de ahuellamiento ($G^*/\text{sen}(\delta)$) y la viscosidad en función de la temperatura de la mezcla asfáltica 4 (75% CPG+25% Lagotreco).

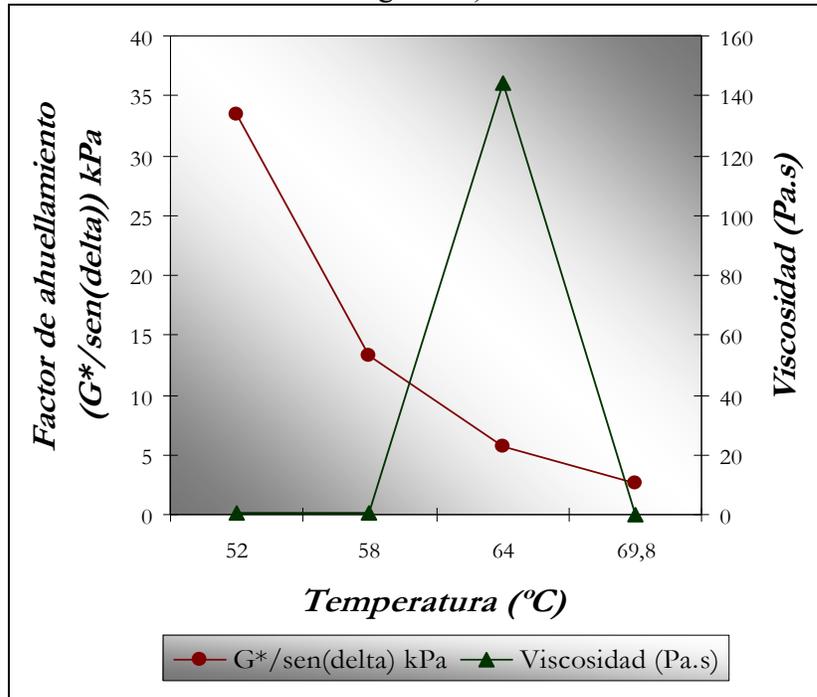


Figura D5. Curvas de correlación del factor de ahuellamiento ($G^*/\text{sen}(\delta)$) y la viscosidad en función de la temperatura de la mezcla asfáltica 4 (75% CPG + 25% Lagotreco) después del tratamiento oxidativo RTFOT a 163°C.

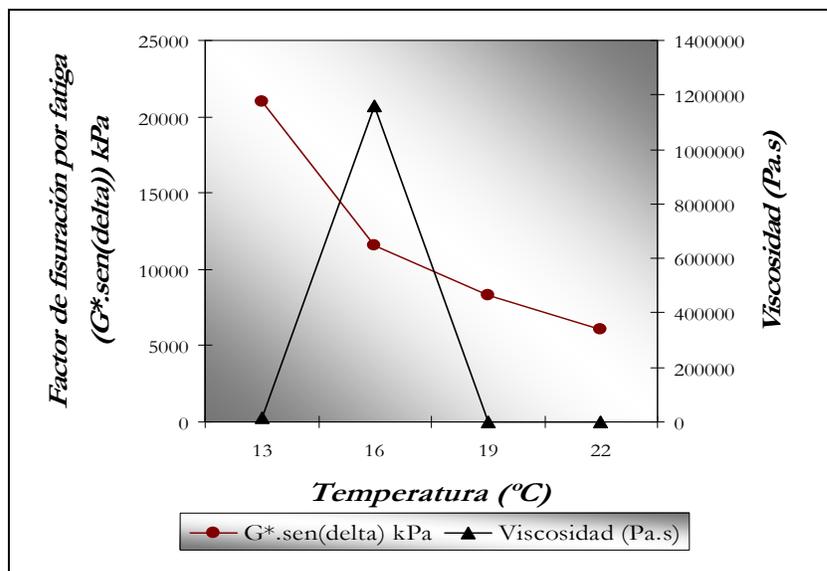


Figura D6. Curvas de correlación del factor de ahuellamiento ($G^* \cdot \text{sen } \delta$) y la viscosidad en función de la temperatura de la muestra 4 (75% CPG + 25% Lagotreco) después de un envejecimiento acelerado en el PAV de 10 años.

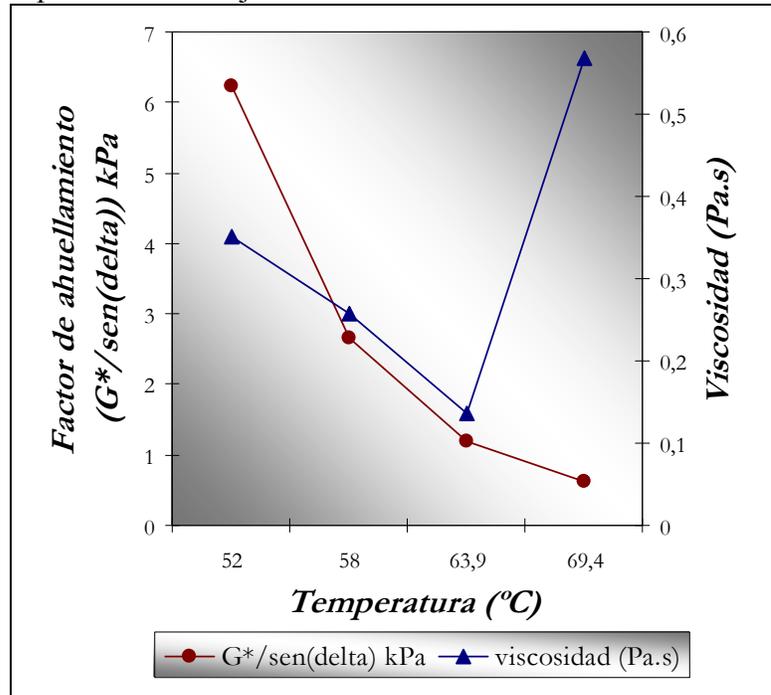


Figura D7. Curvas de correlación del factor de ahuellamiento ($G^*/\text{sen } \delta$) y la viscosidad en función de la temperatura de la mezcla asfáltica 7 (75% TJM-26+25% Lagotreco).

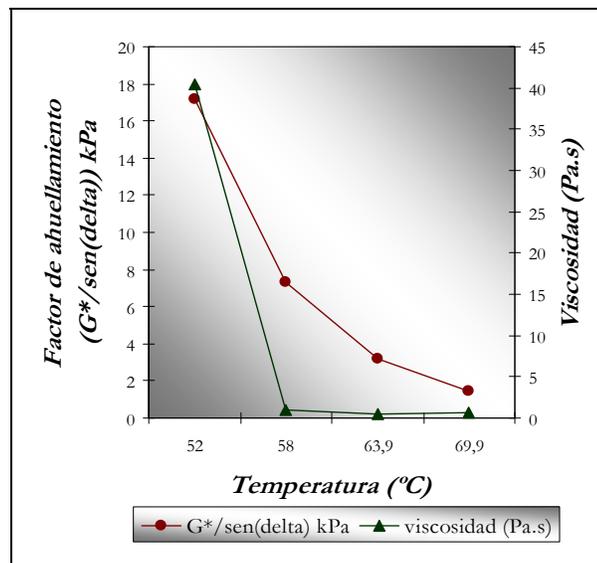


Figura D8. Curvas de correlación del factor de ahuellamiento ($G^*/\text{sen } \delta$) y la viscosidad en función de la temperatura de la mezcla asfáltica 7 (75% TJM-26 + 25% Lagotreco) después del tratamiento oxidativo RTFOT a 163°C.

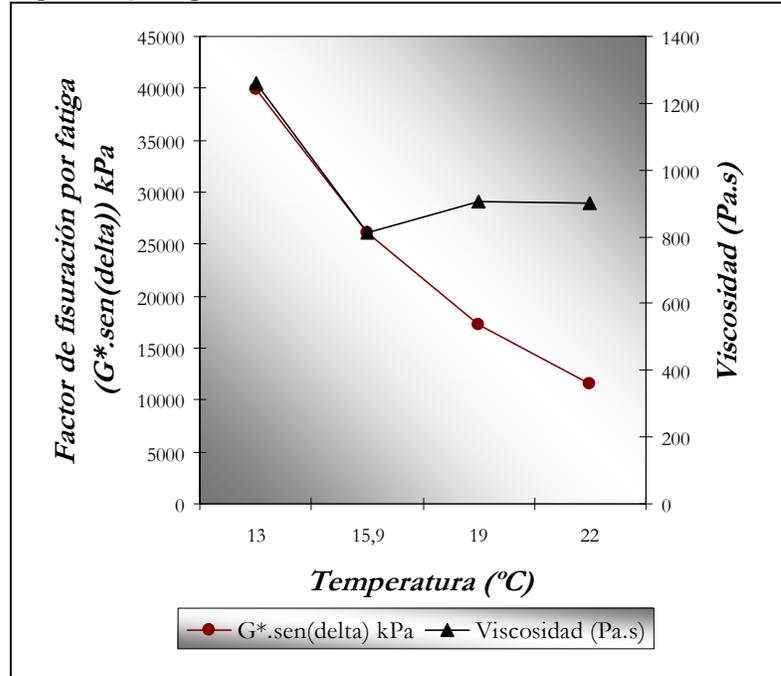


Figura D9. Curvas de correlación del factor de ahuellamiento ($G^* \cdot \text{sen } \delta$) y la viscosidad en función de la temperatura de la mezcla asfáltica 7 (75% CPG + 25% TJM-26) después de un envejecimiento acelerado en el PAV de 10 años.

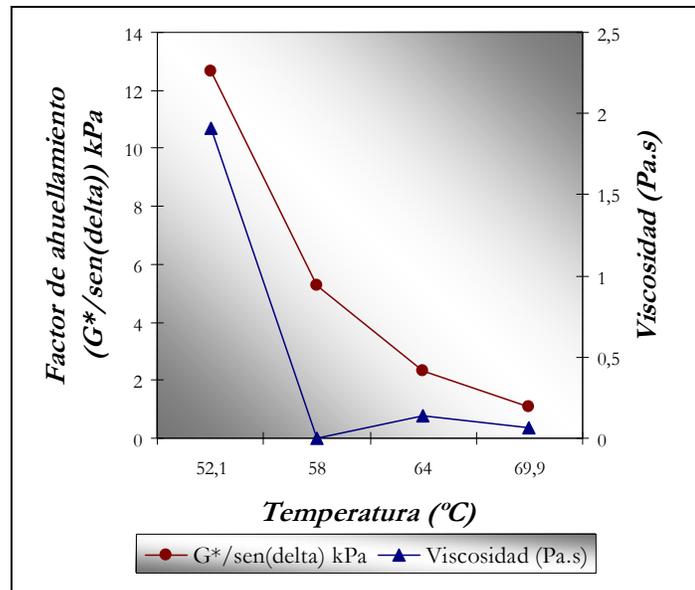


Figura D10. Curvas de correlación del factor de ahuellamiento ($G^*/\text{sen } \delta$) y la viscosidad en función de la temperatura de la mezcla asfáltica 10 (25% TJM-26 + 25% CPG + 50% Lagotreco).

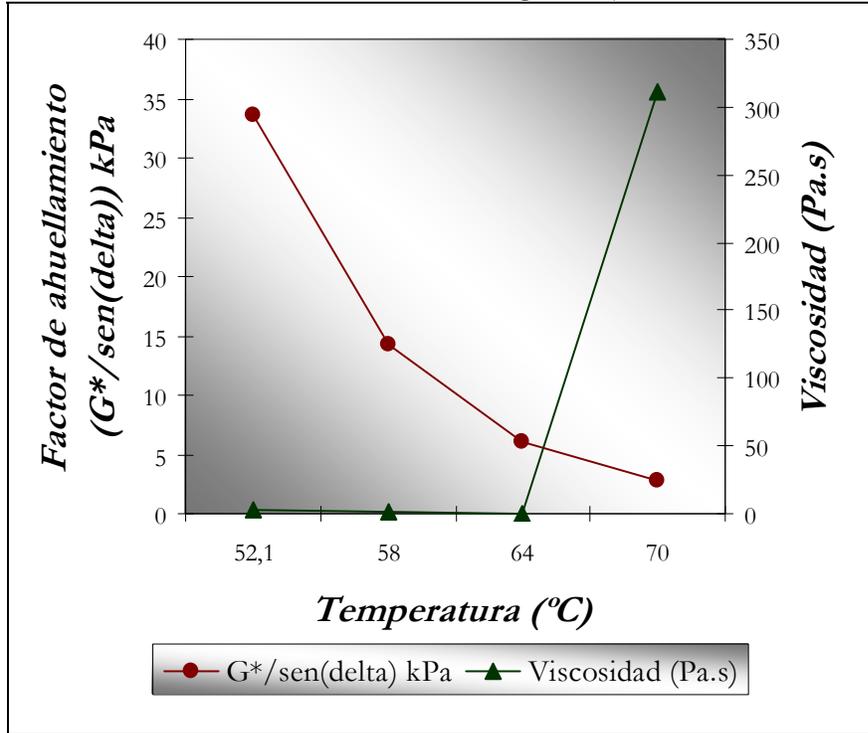


Figura D11. Curvas de correlación del factor de ahuellamiento ($G^*/\text{sen } \delta$) y la viscosidad en función de la temperatura de la mezcla asfáltica 10 (25% TJM-26 + 25% CPG + 50% Lagotreco) después del tratamiento oxidativo RTFOT a 163°C.

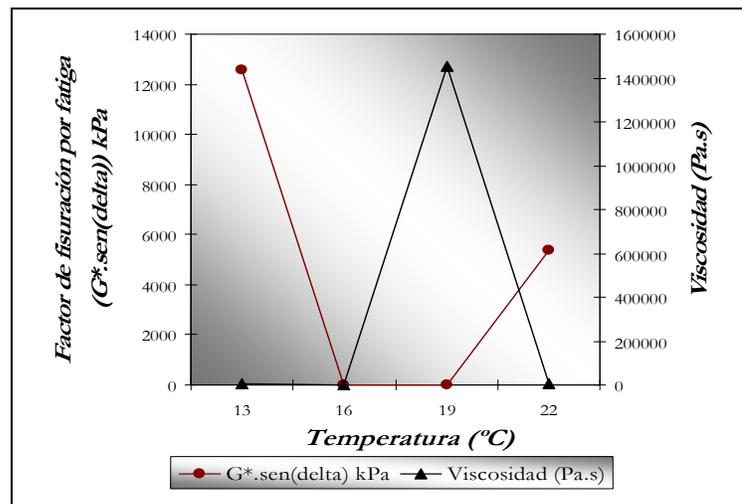


Figura D12. Curvas de correlación del factor de ahuellamiento ($G^* \cdot \text{sen } \delta$) y la viscosidad en función de la temperatura de la mezcla asfáltica 10 (25% TJM-26 + 25% CPG + 50% Lagotreco) después de un envejecimiento acelerado en el PAV de 10 años.

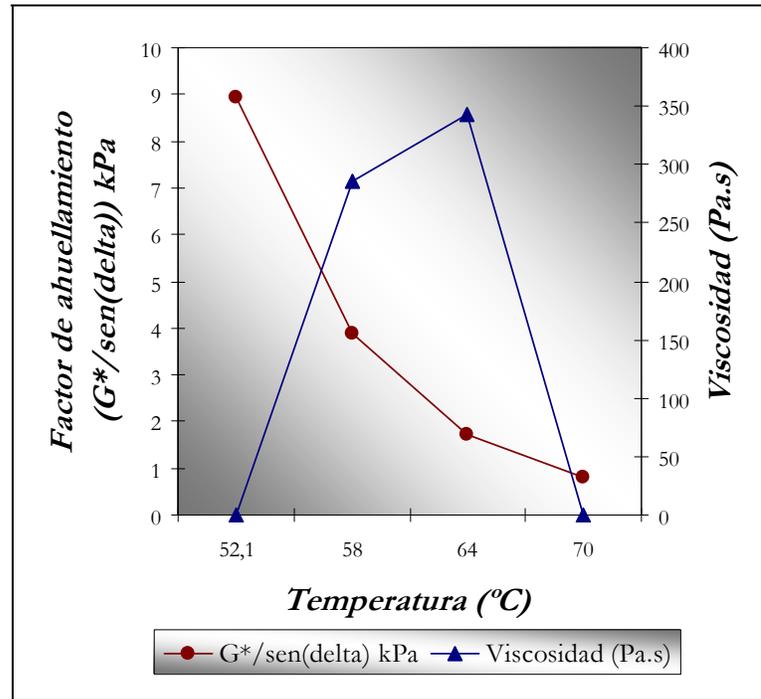


Figura D13. Curvas de correlación del factor de ahuellamiento ($G^* \cdot \text{sen } \delta$) y la viscosidad en función de la temperatura de la mezcla asfáltica 11 (25% TJM-26 + 50% CPG + 25% Lagotreco).

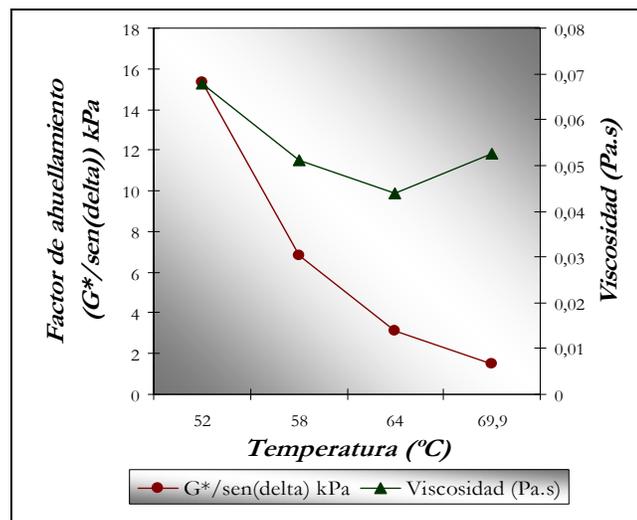


Figura D14. Curvas de correlación del factor de ahuellamiento ($G^*/\text{sen } \delta$) y la viscosidad en función de la temperatura de la mezcla asfáltica 11 (25% TJM-26 + 50% CPG + 25% Lagotrec) después del tratamiento oxidativo RTFOT a 163°C.

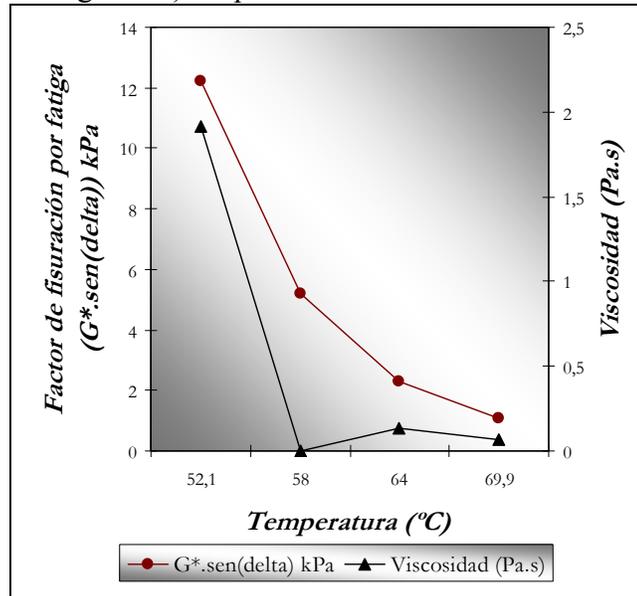


Figura D15. Curvas de correlación del factor de ahuellamiento ($G^* \cdot \text{sen } \delta$) y la viscosidad en función de la temperatura de la mezcla asfáltica 11 (25% TJM-26 + 50% CPG + 50% Lagotrec) después de un envejecimiento acelerado en el PAV de 10 años.

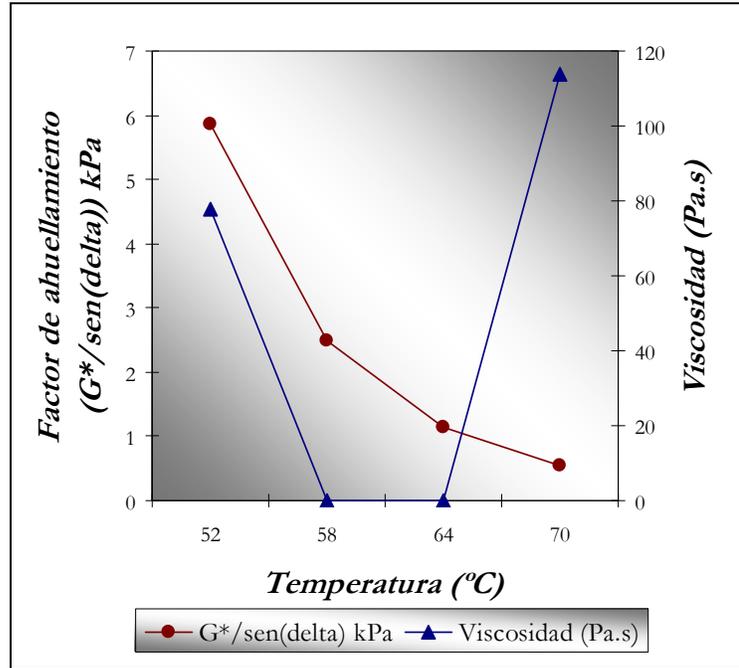


Figura D16. Curvas de correlación del factor de ahuellamiento ($G^*/\text{sen } \delta$) y la viscosidad en función de la temperatura de la mezcla asfáltica 14 (100% TJM-26).

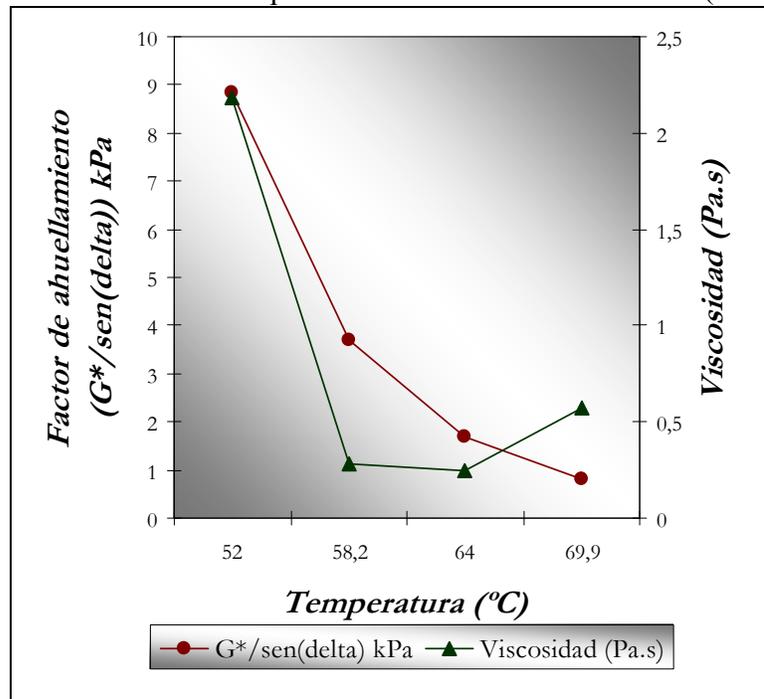


Figura D17. Curvas de correlación del factor de ahuellamiento ($G^*/\text{sen } \delta$) y la viscosidad en función de la temperatura de la mezcla asfáltica 14 (100% TJM-26) después del tratamiento oxidativo RTFOT a 163°C.

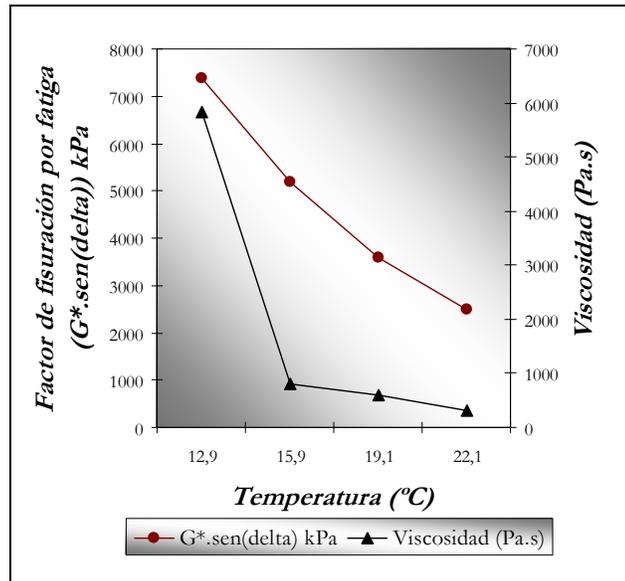


Figura D18. Curvas de correlación del factor de ahuellamiento ($G^* \cdot \text{sen } \delta$) y la viscosidad en función de la temperatura de la mezcla asfáltica 14 (100% TJM-26) después de un envejecimiento acelerado en el PAV de 10 años.

HOJA DE METADATOS

Hoja de Metadatos para Tesis y Trabajos de Ascenso – 1/5

Título	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)
---------------	---

Autor(es)

Apellidos y Nombres	Código CVLAC / e-mail	
Cabeza Acosta Favia José	CVLAC	15.114.468
	e-mail	faviacabeza@gmail.com
	e-mail	faviacabeza@yahoo.es

Palabras o frases claves:

Asfalto
Reología
Componentes SARA

Líneas y sublíneas de investigación:

Área	Subárea
Química	Ciencia de los materiales

Resumen (abstract):

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.

Hoja de Metadatos para Tesis y Trabajos de Ascenso – 3/5

Contribuidores:

Apellidos y Nombres	ROL / Código CVLAC / e-mail				
Hidalgo Prada, Benjamín	ROL	CA <input type="checkbox"/>	AS <input checked="" type="checkbox"/>	TU <input type="checkbox"/>	JU <input type="checkbox"/>
	CVLAC	V-19.738.638			
	e-mail	hidalgoben@gmail.com			
Valles, Franklin	ROL	CA <input checked="" type="checkbox"/>	AS <input type="checkbox"/>	TU <input type="checkbox"/>	JU <input type="checkbox"/>
	CVLAC	V-5.751.512			
	e-mail	vallesf@pdvsa.com			
López, Francisco	ROL	CA <input type="checkbox"/>	AS <input type="checkbox"/>	TU <input type="checkbox"/>	JU <input checked="" type="checkbox"/>
	CVLAC	V-2.112.768			
	e-mail	Flopez200@yahoo.com			
Albertina Ferreira	ROL	CA <input type="checkbox"/>	AS <input type="checkbox"/>	TU <input type="checkbox"/>	JU <input checked="" type="checkbox"/>
	CVLAC	V-8.425.652			
	e-mail	Falbertina@hotmail.com			

Fecha de discusión y aprobación:

Año Mes Día

2010	07	27
-------------	-----------	-----------

Lenguaje: SPA

Hoja de Metadatos para Tesis y Trabajos de Ascenso – 4/5

Archivo(s):

Nombre de archivo	Tipo MIME
Tesis – faviac.doc	Application/Word

Alcance:

Espacial : Internacional (Opcional)

Temporal: Temporal (Opcional)

Título o Grado asociado con el trabajo:

Licenciado en Química

Nivel Asociado con el Trabajo: Licenciatura

Área de Estudio:

Química

Institución(es) que garantiza(n) el Título o grado:

UNIVERSIDAD DE ORIENTE

Hoja de Metadatos para Tesis y Trabajos de Ascenso – 5/5

Derechos:

Los autores se reservan el derecho de dominio sobre cualquier resultado comercial o patente que pudiera resultar del presente trabajo de investigación. Los resultados de este trabajo no han sido publicados. Solo se otorga el derecho de ver el resumen.


AUTOR


ASESOR


COASESOR


JURADO 1


JURADO 2

POR LA SUBCOMISIÓN DE TESIS:

