

**ASFALTO MODIFICADO CON POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD
(RECICLADO A PARTIR DE BOLSAS PLASTICAS DE USO DOMESTICO)**

ALEX LEONEL DAGUA MOSQUERA

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACION
DEPARTAMENTO DE QUIMICA
POPAYAN
2007**

**ASFALTO MODIFICADO CON POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD
(RECICLADO A PARTIR DE BOLSAS PLASTICAS DE USO DOMESTICO)**

ALEX LEONEL DAGUA MOSQUERA

**Directora: M.Sc CRUZ MARINA TORRES CAICEDO
Profesora Titular Departamento de Química**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACION
DEPARTAMENTO DE QUIMICA
POPAYAN
2007**

Nota de aceptación

Directora del Trabajo de Grado

M.Sc CRUZ MARINA TORRES CAICEDO

Jurado

Ingeniero HUGO LEON ARENAS

Jurado

Ingeniero RENÉ ZÚÑIGA

Fecha de sustentación: Popayán, 14 de Febrero de 2007

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi sincera gratitud a:

- A Dios, por darme la vida, la salud y las fuerzas para poder cumplir con una de mis metas.
- La Magíster Cruz Marina Torres por su dedicación, orientación y sus valiosos consejos al dirigir y llevar a feliz término este trabajo. Por su amistad y voluntad. Por los conocimientos impartidos y por confiar en mis capacidades.
- Al Geotecnólogo Oscar J. Orozco por la realización de los ensayos de las pruebas físicas en el laboratorio de Materiales Suelos y Pavimentos.
- Patricia Mosquera de la unidad de Microscopia, por su invaluable asistencia y paciencia durante la observación y toma de microfotografías.
- Al Magíster Nelson Rojas del Departamento de Biología, por facilitarnos el uso del espectrofotómetro de Ultravioleta y Visible.
- A los jurados: Ingeniero Hugo León Arenas y el Ingeniero René Zúñiga por su tiempo, aportes y conocimientos impartidos.
- A los tecnólogos de los laboratorios del departamento de Química, por su valiosa colaboración.
- A mis compañeras de laboratorio Victoria, Leidy, Betina, Yohana y Geovani, por su inmensa colaboración.
- Al Geotecnólogo Jaime Obando por sus aportes y experiencia compartida durante el desarrollo de este trabajo.
- A mis profesores por su valiosos aportes y conocimientos impartidos durante el transcurso de mi carrera.
- A la universidad del Cauca por brindarme las herramientas necesarias para construir mi camino que elegí, por que dentro de la institución pude crecer personal y profesionalmente.

- Especialmente a mi familia , mis padres, mis hermanos por que son el soporte vital para cumplir mis sueño. Gracias al esfuerzo de mis padres he podido culminar una de mis metas, este triunfo se los dedico de todo corazón a ellos, que han sido los pilares fundamentales para alcanzar uno de mis sueños.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	22
1 MARCO REFERENCIAL	23
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	23
1.2 OBJETIVOS	25
1.2.1 OBJETIVO GENERAL	25
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	25
1.3 JUSTIFICACIÓN	26
1.4 MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE	27
1.4.1 PETROLEO CRUDO – INICIO DE LA HISTORIA - QUIMICA	27
1.4.2 EL ASFALTO	28
1.4.2.1 Proceso de obtención del cemento asfáltico	28
1.4.2.2 Composición química del asfalto	29
1.4.2.3 Propiedades más relevantes de los componentes macros del asfalto	30
1.4.2.4 Problemas con el asfalto	32
1.4.2.5 Asfaltos modificados	33
1.4.2.6 Modificación del asfalto	34
1.4.2.7 Características de los asfaltos modificados	35

1.4.3	POLÍMEROS	36
1.4.3.1	Elastómeros	36
1.4.3.2	Plastómeros	36
1.4.3.2.1	Polietileno de baja y alta densidad	37
1.4.3.3	Características del polímero utilizado en la modificación de asfaltos	40
1.4.3.4	Estudios realizados sobre asfaltos modificados con Polietileno de baja densidad	40
1.4.4	TÉCNICAS DE ANÁLISIS	41
1.4.4.1	Métodos cromatográficos	41
1.4.4.1.1	Clasificación de los métodos cromatográficos	41
1.4.4.2	Norma ASTM D- 2007	41
1.4.4.3	Espectroscopía infrarroja	42
1.4.4.4	Espectroscopía Ultravioleta-visible	43
1.4.4.5	Microscopía de Fluorescencia	45
2	SECCIÓN EXPERIMENTAL	46
2.1	METODOLOGIA PROPUESTA	46
2.1.1	ETAPA 1: ESTUDIO DEL ASFALTO ORIGINAL	46
2.1.1.1	Procedimiento número 1 (Norma ASTM D- 2007)	46
2.1.1.2	Procedimiento número 2. propiedades físicas del asfalto	46
2.1.2	ETAPA II ESTUDIO DEL ASFALTO MODIFICADO	47
2.1.2.1	Procedimiento para el análisis químico del polímero reciclado	47
2.1.2.2	Procedimiento para la modificación del asfalto	48

2.1.2.3 Almacenamiento del asfalto (Norma I.N.V.E-726)	49
2.2 MATERIALES E INSTRUMENTAL	50
2.2.1 REACTIVOS	50
2.2.2 EQUIPOS	51
2.3 PARTE EXPERIMENTAL	52
2.3.1 DISOLUCIÓN DEL POLÍMERO	52
2.3.1.1 Análisis químico y espectroscópico del polímero reciclado	52
2.3.2 MODIFICACIÓN DEL ASFALTO	53
2.3.3 ALMACENAMIENTO DEL ASFALTO	53
2.3.4 SEPARACIÓN DEL ASFALTO EN SUS COMPONENTES	54
2.3.4.1 Separación de los componentes malténicos	55
2.3.5 PRUEBAS DE CARACTERIZACIÓN PARA LAS FRACCIONES DEL ASFALTO OBTENIDAS POS EL MÉTODO CROMATOGRÁFICO	56
2.3.5.1 Análisis cualitativo de compuestos saturados	56
2.3.5.2 Análisis cualitativo de resinas	57
2.3.5.3 Análisis cualitativo de aromáticos	57
3 DISCUSIÓN DE RESULTADOS	59
3.1 ANÁLISIS DEL POLÍMERO, POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD	59
3.1.1 ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL POLÍMERO POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD	59
3.1.2 ANÁLISIS DEL ESPECTRO INFRARROJO DEL POLÍMERO POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD	60
3.2 ESTUDIO DEL ASFALTO ORIGINAL	61
3.2.1 ANÁLISIS PRELIMINAR DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y	

QUÍMICAS DEL ASFALTO ORIGINAL	61
3.2.2 ANÁLISIS DEL ESPECTRO INFRARROJO DEL ASFALTO ORIGINAL	62
3.2.3 SEPARACIÓN DEL ASFALTO EN ASFALTENOS Y MALTENOS MEDIANTE LA PRECIPITACIÓN CON N-HEXANO	64
3.2.3.1 Estudio de la fracción asfáltica del asfalto original por espectroscopía Infrarroja	64
3.2.3.2 Separación de los maltenos por Cromatografía de columna	66
3.2.3.2.1 Análisis de espectroscopía Infrarroja para la fracción de las resinas	67
3.2.3.2.2 Análisis de espectroscopía Infrarroja para aromáticos	69
3.2.3.2.3 Análisis de espectroscopía infrarroja para parafinas o saturados	70
3.2.3.3. Análisis de espectroscopía Uv-vis para la fracción malténica del asfalto original	71
3.2.3.3.1 Análisis del espectro Ultravioleta-visible para resinas	72
3.2.3.3.2 Análisis del espectro Ultravioleta-visible para aromáticos	73
3.2.3.3.3 Análisis del espectro Ultravioleta-visible para parafinas o saturados	73
3.3 ANÁLISIS DE LA MODIFICACIÓN DEL ASFALTO CON EL POLÍMERO POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD (PBD)	74
3.3.1. ANÁLISIS PRELIMINAR DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL ASFALTO MODIFICADO A DIFERENTES CONCENTRACIONES DE POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD (PBD)	74
3.3.2. ANÁLISIS DEL ASFALTO ORIGINAL Y MODIFICADO CON POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD (PBD), POR MICROSCOPIA DE FLUORESCENCIA	75
3.4 ANÁLISIS DEL ASFALTO ORIGINAL DURANTE EL PERÍODO DE ALMACENAMIENTO (NORMA I.N.V. E-76)	77
3.4.1 ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL ASFALTO ORIGINAL AL DÍA CERO, CINCO Y CUARENTA DE ALMACENAMIENTO	77
3.4.2. ANALISIS DEL ASFALTO ORIGINAL POR MICROSCOPIA DE	

FLUORESCENCIA AL DÍA CINCO Y CUARENTA DE ALMACENAMIENTO	79
3.4.3. ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES QUÍMICAS DEL ASFALTO ORIGINAL (SARA), AL DÍA CERO, CINCO Y CUARENTA DE ALMACENAMIENTO	79
3.4.4. ANÁLISIS DE ESPECTROSCOPIA IR PARA LAS FRACCIONES ASFALTENICA Y MALTÉNICA DEL ASFALTO ORIGINAL AL DÍA CERO, CINCO Y CUARENTA DE ALMACENAMIENTO	80
3.4.4.1 Análisis de espectroscopía Infrarroja para la fracción de asfaltenos, durante el proceso de almacenamiento	80
3.4.4.2 Análisis de espectroscopía Infrarroja para resinas, durante el proceso de almacenamiento	82
3.4.4.3 Análisis de espectroscopía Infrarroja para aromáticos, durante el proceso de almacenamiento	85
3.4.4.4 Análisis de espectroscopía Infrarroja para la fracción saturada, durante el proceso de almacenamiento	88
3.4.5. ANÁLISIS DE ESPECTROSCOPIA UV-VIS PARA LA FRACCIÓN MALTÉNICA DEL ASFALTO ORIGINAL, DURANTE EL PROCESO DE ALMACENAMIENTO	90
3.4.5.1 Análisis del espectro Ultravioleta-visible para resinas del asfalto original, en el proceso de almacenamiento	90
3.4.5.2 Análisis del espectro Ultravioleta-visible para aromáticos del asfalto original, en el proceso de almacenamiento	92
3.4.5.3 Análisis del espectro Ultravioleta-visible para saturados del asfalto original, en el proceso de almacenamiento	93
3.5 ANÁLISIS DEL ASFALTO MODIFICADO DURANTE EL PERIODO DE ALMACENAMIENTO	94
3.5.1 ASFALTO MODIFICADO CON EL 0.5% DE PBD	94
3.5.1.1 Análisis de las propiedades físicas del asfalto modificado, durante el proceso de almacenamiento	94
3.5.1.2 Análisis del asfalto modificado con Polietileno de baja densidad (PBD) al 0.5%, por microscopía de Fluorescencia, durante el período de	

almacenamiento	95
3.5.1.3 Análisis de las propiedades químicas del asfalto modificado con polietileno de baja densidad (PBD) al 0.5%, en el período de almacenamiento	96
3.5.1.4 Análisis de espectroscopía IR para las fracciones asfáltica y malténica del asfalto modificado con Polietileno de baja densidad (PBD) Al 0.5%, durante el almacenamiento	98
3.5.1.4.1 Análisis de espectroscopía IR para las fracción asfáltica del asfalto modificado con Polietileno de baja densidad (PBD) al 0.5%, durante el almacenamiento	98
3.5.1.4.2 Análisis de espectroscopía Infrarroja para la fracción de las resinas del asfalto modificado al 0.5% con Polietileno de baja densidad (PDB), durante el período del almacenamiento	100
3.5.1.4.3 Análisis de espectroscopía Infrarroja para la fracción aromática, del asfalto modificado al 0.5% con Polietileno de baja densidad (PBD), durante el período del almacenamiento	103
3.5.1.4.4 Análisis de espectroscopía Infrarroja para la fracción saturada, del asfalto modificado al 0.5% con Polietileno de baja densidad (PBD) durante el período del almacenamiento	105
3.5.1.5. Análisis de Uv-vis para la fracción malténica del asfalto modificado con Polietileno de baja densidad (PBD) al 0.5%, durante el proceso de almacenamiento	108
3.5.1.5.1. Análisis de espectroscopia Uv-vis para las resinas, del asfalto modificado con Polietileno de baja densidad (PBD), durante el proceso de almacenamiento	108
3.5.1.5.2. Análisis de espectroscopia Uv-vis para los aromáticos, del asfalto modificado con Polietileno de baja densidad (PBD), durante el proceso de almacenamiento	109
3.5.1.5.3. Análisis de espectroscopia Uv-vis para los saturados, del asfalto modificado con Polietileno de baja densidad (PBD), durante el proceso de almacenamiento	111
3.5.2. ESTUDIO DEL ASFALTO MODIFICADO CON POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD (PBD) AL 1.5%, DURANRE EL PROCESO DE ALMACENAMIENTO	113

3.5.2.1 Análisis de las propiedades físicas del asfalto modificado con Polietileno de baja densidad (PBD) al 1.5%, durante el proceso de almacenamiento	113
3.5.2.2 Análisis del asfalto modificado con Polietileno de baja densidad (PBD) al 1.5% por microscopía de fluorescencia, durante el período de almacenamiento	114
3.5.2.3 Análisis de las propiedades químicas del asfalto modificado con Polietileno de baja densidad (PBD) al 1.5%, en el período de almacenamiento	115
3.5.2.4 Análisis de espectroscopía IR para las fracciones del asfalto modificado con Polietileno de baja densidad (PBD) al 1.5%, durante el almacenamiento	116
3.5.2.4.1 Análisis de espectroscopía IR para la fracción asfáltica del asfalto modificado con Polietileno de baja densidad (PBD) al 1.5%, durante el almacenamiento	116
3.5.2.4.2 Análisis de espectroscopía IR para la fracción de las resinas del asfalto modificado con Polietileno de baja densidad (PBD) al 1.5%, durante el almacenamiento	118
3.5.2.4.3 Análisis de espectroscopía IR para la fracción aromática del asfalto modificado con polietileno de baja densidad (PBD) al 1.5%, durante el almacenamiento	120
3.5.2.4.4 Análisis de espectroscopía IR para la fracción saturada del asfalto modificado con Polietileno de baja densidad (PBD) al 1.5%, durante el almacenamiento	122
3.5.2.5 Análisis de Uv-vis para la fracción malténica del asfalto modificado con Polietileno de baja densidad (PBD) al 1.5%, durante el proceso de almacenamiento	124
3.5.2.5.1 Análisis de espectroscopía Uv-vis para resinas, del asfalto modificado con polietileno de baja densidad (PBD), antes y después del almacenamiento	125
3.5.2.5.2 Análisis de espectroscopía Uv-vis para los aromáticos, del asfalto modificado con Polietileno de baja densidad (PBD), durante el almacenamiento	126
3.5.2.5.3 Análisis de espectroscopia Uv-vis para los saturados, del asfalto	

modificado con Polietileno de baja densidad (PBD), durante el almacenamiento	127
CONCLUSIONES	129
BIBLIOGRAFÍA	131
ANEXOS	134

LISTA DE TABLAS

	Pág
Tabla 1. Propiedades químicas de los componentes del asfalto	31
Tabla 2. Transiciones típicas y longitud de onda aproximadas del espectro de absorción	45
Tabla 3. Propiedades físicas y químicas del polímero Polietileno de baja densidad	59
Tabla 4. Bandas características del espectro Infrarrojo para el Polietileno de baja densidad	60
Tabla 5. Propiedades físicas de consistencia y peso específico del cemento asfáltico original	62
Tabla 6. Grupos principales constituyentes de un asfalto y sus absorciones principales en el Infrarrojo (cm^{-1})	63
Tabla 7. Absorciones características en el Infrarrojo del asfalto original	64
Tabla 8. Bandas características del espectro Infrarrojo para asfaltenos del asfalto original	65
Tabla 9. Características de las fracciones separadas del asfalto por cromatografía de columna	67
Tabla 10. Pruebas de caracterización de compuestos malténicos	67
Tabla 11. Bandas características del espectro Infrarrojo para resinas del asfalto original	68
Tabla 12. Bandas características del espectro Infrarrojo para aromáticos del asfalto original	69
Tabla 13. Bandas características del espectro Infrarrojo para saturados del asfalto original	71
Tabla 14. Propiedades física de consistencia del asfalto modificado con Polietileno de baja densidad (PBD)	75

Tabla 15.	Propiedades físicas de consistencia del asfalto original, al día cero, cinco y cuarenta	78
Tabla 16.	Composición química de las fracciones separadas del asfalto original por Cromatografía de columna, al día cero, cinco y cuarenta	80
Tabla 17.	Bandas características del espectro Infrarrojo para asfaltenos del asfalto original, al día cero, cinco y cuarenta	82
Tabla 18.	Bandas características del espectro Infrarrojo para resinas del asfalto original, al día cero, cinco y cuarenta	83
Tabla 19.	Bandas características del espectro Infrarrojo para aromáticos del Asfalto original, al día cero, cinco y cuarenta	87
Tabla 20.	Bandas características del espectro Infrarrojo para saturados del asfalto original, al día cero, cinco y cuarenta	88
Tabla 21.	Absorciones de los espectros UV-Vis para la fracción malténica del asfalto original al día cero y cinco	90
Tabla 22.	Propiedades físicas de consistencia del asfalto modificado, durante el periodo de almacenamiento	95
Tabla 23.	Fracciones separadas del asfalto modificado con Polietileno de baja densidad (PBD) por Cromatografía de columna, al día cero, cinco y cuarenta	97
Tabla 24.	Bandas características del espectro Infrarrojo para asfaltenos del asfalto modificado al 0.5% con Polietileno de baja densidad, almacenado al día cero, cinco y cuarenta	100
Tabla 25.	Bandas características del espectro Infrarrojo para esinas del asfalto modificado con Polietileno de baja densidad al 0.5%, durante el almacenamiento	102
Tabla 26.	Bandas características del espectro Infrarrojo para aromáticos del asfalto modificado con Polietileno de baja densidad al 0.5%, en el proceso de almacenamiento	105
Tabla 27.	Bandas características del espectro Infrarrojo para saturados del asfalto modificado con Polietileno de baja densidad al 0.5%, en el proceso de almacenamiento	106

Tabla 28.	Bandas de absorción de UV-Vis para el asfalto modificado con Polietileno de baja densidad al 0.5%, durante el almacenamiento	107
Tabla 29.	Propiedades físicas de consistencia del asfalto modificado con Polietileno de baja densidad al 1.5%, durante el período de almacenamiento	113
Tabla 30.	Características de las fracciones separadas del asfalto modificado con Polietileno de baja densidad al 1.5%, por Cromatografía de columna, al día cero, cinco y cuarenta	116
Tabla 31.	Bandas características del espectro Infrarrojo para asfaltenos del asfalto modificado con Polietileno de baja densidad al 1.5%, al día cero, cinco y cuarenta	118
Tabla 32.	Bandas características del espectro Infrarrojo para resinas del asfalto modificado con Polietileno de baja densidad al 1.5 %, al día cero, cinco y cuarenta	120
Tabla 33.	Bandas características del espectro infrarrojo para aromáticos del asfalto modificado con Polietileno de baja densidad al 1.5%, al día cero, cinco y cuarenta	122
Tabla 34.	Bandas características del espectro Infrarrojo para saturados del asfalto modificado, al día cero, cinco y cuarenta	124
Tabla 35.	Bandas de absorción para UV-Vis del asfalto modificado con Polietileno de baja densidad al 1.5%, durante el almacenamiento	124

LISTA DE DE FIGURAS

	Pág
Figura 1. Componentes químicos del petróleo	27
Figura 2. Compuestos macro del petróleo	28
Figura 3. Procesamiento del petróleo para la obtención del asfalto	29
Figura 4. Modelo micelar de la composición química del asfalto: Asfaltenos, Resinas y aceites	30
Figura 5. Componentes de un bitumen (asfalto)	31
Figura 6. Problema típicos del asfalto cuando es puesto en la vía	33
Figura 7. Asfalto modificado con polímeros	35
Figura 8. Polietileno de alta densidad	37
Figura 9. Polietileno de baja densidad	38
Figura 10. Transiciones electrónicas de los electrones σ , π , n en las moléculas	44
Figura 11. Tratamiento químico efectuado a los asfaltos	47
Figura 12. Disolución del polímero	48
Figura 13. Adición del polímero al asfalto	49
Figura 14. Esquema del recipiente para el ensayo de estabilidad al almacenamiento de asfaltos	50
Figura 15. Estado sólido del Polietileno de baja densidad	53
Figura 16. Almacenamiento del asfalto original y modificado con Polietileno de baja densidad	53
Figura 17. Separación de asfaltenos y maltenos mediante la precipitación con n-hexano	55

Figura 18.	Separación de la fracción malténica por cromatografía líquida de columna	56
Figura 19.	Espectro Infrarrojo del polietileno de baja densidad	60
Figura 20.	Espectro Infrarrojo del asfalto original	63
Figura 21.	Espectro Infrarrojo de los asfaltenos del asfalto original	65
Figura 22.	Espectro Infrarrojo de resinas del asfalto original	68
Figura 23.	Espectro Infrarrojo de aromáticos del asfalto original	69
Figura 24.	Espectro Infrarrojo de saturados del asfalto original	71
Figura 25.	Espectro Ultravioleta de resinas del asfalto original	72
Figura 26.	Espectro Ultravioleta de aromáticos del asfalto original	73
Figura 27.	Espectro Ultravioleta de saturados del asfalto original	74
Figura 28.	Microfotografías del asfalto original y modificado con Polietileno de baja densidad (PDB), tomadas a 10 aumentos (filtro azul)	76
Figura 29.	Microfotografías del asfalto original, al día cinco y cuarenta, tomadas a 10 aumentos (filtro azul)	79
Figura 30.	Espectro Infrarrojo de asfaltenos del asfalto original al día cero, cinco y cuarenta	81
Figura 31.	Espectro Infrarrojo de resinas del asfalto original, al día cero, cinco y cuarenta	84
Figura 32.	Espectro Infrarrojo de aromáticos del asfalto original, al día cero, cinco y cuarenta	86
Figura 33.	Espectro Infrarrojo de saturados del asfalto original, al día cero, cinco y cuarenta	89
Figura 34.	Espectro UV-Vis de resinas del asfalto original, al día cero y cinco	91
Figura 35.	Espectro UV-Vis de aromáticos del asfalto original	92
Figura 36.	Espectro UV-Vis de saturados del asfalto original	93

Figura 37	Microfotografías del asfalto modificado con Polietileno de baja densidad al 0.5%, tomadas a 10 aumentos (filtro azul), durante el período de almacenamiento, días cero, cinco y cuarenta	96
Figura 38	Espectro Infrarrojo de asfaltenos del asfalto modificado con el 0.5% de Polietileno de baja densidad al día cero, cinco y cuarenta	99
Figura 39	Espectro Infrarrojo de las resinas del asfalto modificado con el 0.5% de Polietileno de baja densidad al día cero, cinco y cuarenta	101
Figura 40	Espectro Infrarrojo de los aromáticos del asfalto modificado con el 0.5% de Polietileno de baja densidad al día cero, cinco y cuarenta	104
Figura 41	Espectro Infrarrojo de los saturados del asfalto modificado con el 0.5% de Polietileno de baja densidad al día cero, cinco y cuarenta	106
Figura 42	Espectros UV-Vis de las resinas para el asfalto modificado con Polietileno de baja densidad 0.5%, durante el almacenamiento	109
Figura 43	Espectros UV-Vis de aromáticos para el asfalto modificado con polietileno de baja densidad al 0.5%, durante el almacenamiento	110
Figura 44	Espectros UV-Vis de los saturados para el asfalto modificado con Polietileno de baja densidad al 0.5%, durante el almacenamiento	112
Figura 45	Microfotografías del modificado con Polietileno de baja densidad, al 1.5%, tomadas a 10 aumentos (filtro azul), durante el periodo de almacenamiento, días cero, cinco y cuarenta	115
Figura 46	Espectros IR de asfaltenos del asfalto modificado con Polietileno de baja densidad al 1.5%, al día cero, cinco y cuarenta, cinco y cuarenta	117
Figura 47	Espectros IR de las resinas del asfalto modificado con Polietileno de baja densidad al 1.5 %, al día cero, cinco y cuarenta	119
Figura 48	Espectros IR de los aromáticos del asfalto modificado con Polietileno de baja densidad al 1.5 %, al día cero, cinco y	

	cuarenta	121
Figura 49	Espectro infrarrojo de saturados del asfalto modificado con Polietileno de baja densidad al 1.5%, al día cero, cinco y cuarenta	123
Figura 50	Espectros UV-Vis de resinas para el asfalto modificado con Polietileno de baja densidad al 1.5%, durante del almacenamiento	125
Figura 51	Espectros UV-Vis de aromáticos para el asfalto modificado con Polietileno de baja densidad 1.5%, durante el almacenamiento	126
Figura 52	Espectros UV-Vis de saturados para el asfalto modificado con Polietileno de baja densidad al 1.5% durante el almacenamiento	128

ANEXOS

	Pág
Anexo 1. VISCOSIDAD SAYBOLT DE ASFALTOS, NORMA I.N.V. E-714	134
Anexo 2. PENETRACION DE LOS MATERIALES ASFALTICOS, NORMA, I.N.V. E- 706	135
Anexo 3. PESO ESPECIFICO Y PESO UNITARIO DE PRODUCTOS ASFALTICOS SÓLIDOS Y SEMISÓLIDOS, NORMA I.N.V. E -707	135
Anexo 4. PUNTO DE ABLANDAMIENTO DE MATERIALES BITUMINOSOS (APARATO DE ANILLO Y BOLA),NORMA I.N.V. E- 712	136
Anexo 5. DUCTILIDAD DE LOS MATERIALES ASFALTICOS, NORMA I.N.V. E- 702	137
Anexo 6. ESTABILIDAD AL ALMACENAMIENTO DE ASFALTOS, NORMA I.N.V. E- 726	137
Anexo 7. CURA REOLÓGICA DEL ASFALTO ORIGINAL	141

RESUMEN

Nos encontramos actualmente en una época en la que los pavimentos viales están sometidos a exigencias cada vez mayores. El fuerte incremento de los volúmenes del tráfico, cargas más pesadas y mayor presión de los neumáticos son factores que contribuyen a un deterioro más rápido de las capas de rodadura. Las consecuencias son problemas como: el ahuellamiento (o acanalamiento) por deformación plástica del ligante bituminoso, rotura por diferencias térmicas y también por fatiga, así como el desprendimiento de agregados. La incidencia de estos problemas se ha podido reducir considerablemente mediante el empleo de asfaltos o ligantes modificados con polímeros en general: elastómeros, plastómeros, entre otros.

Esta investigación esta dirigida a modificar el asfalto con un tipo de polímero denominado **polietileno de baja densidad**, reciclado a partir de bolsas plásticas de uso doméstico, con el propósito de mejorar las propiedades reológicas y químicas de modo que garantice la durabilidad y la elasticidad al ser usados como cemento asfáltico.

El asfalto modificado con el polímero tipo **polietileno de baja densidad**, contribuye a elevar la vida útil del pavimento, como también a disminuir los costos de producción y además constituye una alternativa de reciclaje que ayudaría a disminuir en cierto grado la contaminación ambiental por residuos poliméricos ya que no tienen desactivación inmediata.

El material después de aditivado y almacenado puede presentar una separación entre el asfalto y el polímero agregado, por ello se busca que el asfalto y el tipo de polímero utilizado sean compatibles, para lo cual se le practicará al nuevo material pruebas químicas de estabilidad, empleando la técnica de cromatografía líquida de columna (Norma ASTM D-2007) con el propósito de observar los cambios en los componentes: Saturados, Aromáticos, Resinas y asfáltenos (SARA) presentes en el asfalto, prueba que se efectuará antes y después de aditarlo. Además al nuevo material con ayuda de las técnicas espectroscópicas: Espectroscopia Infrarroja por Transformada Rápida de Fourier, UV-Visible, Microscopía de Fluorescencia y mediante pruebas físicas como capilaridad, viscosidad adherencia y penetración se le verificarán y analizarán los cambios que pueda presentar durante el almacenamiento.

INTRODUCCIÓN

Las vías en Colombia, se han construido con un alto porcentaje de concreto asfáltico aproximadamente un 80%; razón por la cual es importante desarrollar una tecnología de los materiales usados en su construcción y así obtener una mejor calidad para generar un beneficio en la comunicación terrestre de nuestro país.

La deficiencia de los asfaltos producidos en Colombia contribuye al deterioro prematuro de los pavimentos de concreto asfáltico, debido al aumento de tráfico pesado y a las condiciones climáticas, hacen que la vida útil de los pavimentos cada vez sea menor, además influye en el deterioro del parque automotor, congestión vehicular e incremento de los accidentes automovilísticos, por lo tanto, para mejorar el desempeño de los asfaltos se hace necesario modificar con diferentes tipos de materiales, siendo los polímeros uno de los mejores aditivos que mejoran propiedades físicas, químicas y reológicas de los asfaltos aditivados. Un asfalto bien aditivado evita:

- ❖ El ahuellamiento y deformaciones permanentes causados por la disminución de la viscosidad a altas temperaturas.
- ❖ Así mismo el fisuramiento y las hendiduras con sus posteriores grietas y huecos causado por el aumento de la rigidez a bajas temperaturas.
- ❖ El desprendimiento de los agregados que generan pequeños cráteres, causados por la pérdida de adhesión de los asfaltos con los pétreos.

En algunos casos, cuando el asfalto aditivado es almacenado a altas temperaturas y sin un proceso de agitación, ocurre una separación entre el asfalto y el polímero, esto debido a la diferencia en sus propiedades físicas y químicas de los materiales o la falta de un solvente adecuado que permita una mayor interacción entre el asfalto y el polímero, evitando así la precipitación del material.

El propósito de este estudio, es evaluar la compatibilidad y estabilidad química del asfalto antes y después de aditarlo con un polímero residual tipo polietileno de baja densidad, durante el proceso de almacenamiento (Norma I.N.V. E-726). Para tal fin se emplearon técnicas cromatográficas, espectroscópicas, microscopia de fluorescencia y ensayos de caracterización física tradicional.

1. MARCO REFERENCIAL

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El asfalto es un compuesto termoplástico sumamente complejo y derivado de la refinación del petróleo crudo. Este material es de gran importancia para la industria de la construcción de carreteras, por sus propiedades de consistencia, adhesividad y permeabilidad.

Para garantizar la calidad del asfalto se debe tener en cuenta el comportamiento reológico, que depende de: su origen, proceso, refinación y composición química. El asfalto es un material susceptible a los cambios de temperatura, sufre envejecimiento por intemperismo, es afectado por la oxidación, la fotodegradación, fisuramiento por temperatura, fatiga, ahuellamiento, entre otras. Por estas razones, el material debe reunir los requisitos suficientes y necesarios para desempeñarse como asfalto de buena calidad, por ello se ha creado una nueva técnica utilizada para el aprovechamiento de este material en la pavimentación de vías. Esta técnica consiste en la adición de polímeros al asfalto con el propósito de obtener mezclas de mayor durabilidad y elasticidad; debido a que el polímero absorbe gran parte de la energía de deformación que sufre el material al ser sujeto a esfuerzos externos, como por ejemplo, cuando se usa en la construcción de vías pavimentadas, se hace indispensable aditivarlo o modificarlo para mejorar substancialmente sus propiedades.

Actualmente por el uso masivo de materiales plásticos, el medio ambiente sufre contaminación de residuos poliméricos de diferente índole, procedentes de bolsas plásticas que están hechas a base de polímeros como lo es el polietileno de baja densidad; debido a su estructura y estabilidad química no son biodegradables durante muchos años, por lo tanto contribuyen en gran medida a la contaminación ambiental. Teniendo en cuenta esto, se busca obtener un polímero a partir de desechos (poliméricos) que sea compatible con el asfalto, mejorando sus propiedades físicas, químicas y reológicas al ser mezclado con el cemento asfáltico. Con ello se contribuye a disminuir contaminación del medio ambiente, buscándole otro que hacer a estos residuos poliméricos.

Para poder utilizar estos residuos poliméricos se buscarán solventes adecuados, capaces de formar una red polimérica estable que impida la precipitación del ligante y, de esta manera, mejorar las propiedades viscoelásticas del asfalto.

Por medio de técnicas espectroscópicas tales como: espectroscopia infrarroja por Transformada Rápida de Fourier, UV-Visible y Microscopia de Fluorescencia se verificarán y se analizarán los cambios que se presenten en: los componentes del asfalto modificado, el solvente empleado y el grado de compatibilidad entre el bitumen y el polímero, además, por medio de pruebas físicas se evaluará la influencia de la modificación en las propiedades físicas del asfalto modificado tales como: Viscosidad, capilaridad, densidad, adherencia, resistencia y penetración durante el almacenamiento.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar la compatibilidad y estabilidad química del asfalto después de aditivarlo con un polímero residual tipo polietileno de baja densidad, mediante técnicas cromatográficas, espectroscópicas y ensayos de caracterización física tradicional.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Mejorar las propiedades reológicas del asfalto mediante la adición de un polímero tipo **polietileno de baja densidad**.
- Contribuir en la búsqueda de solventes que permitan mejorar las propiedades viscoelásticas, adherentes y aglutinantes del asfalto modificado, evitando la precipitación del material.
- Verificar y analizar los cambios que se presentan en los componentes del asfalto modificado haciendo uso de las técnicas espectroscópicas de infrarrojo y UV-Visible y Microscopia de Fluorescencia.
- Evaluar la influencia que presenta la adición del polímero reciclado sobre las propiedades físicas del asfalto: viscosidad, densidad, adherencia, resistencia y penetración durante el almacenamiento.
- Analizar de que forma se alteran los componentes químicos del asfalto modificado con el **polietileno de baja densidad**, aplicando cromatografía de columna mediante la Norma ASTM-D 2007.

1.3 JUSTIFICACIÓN

La durabilidad del concreto asfáltico depende principalmente de las propiedades del asfalto, por esta razón el asfalto es el principal componente de la carpeta asfáltica, que produce una íntima unión entre los agregados, confiriendo una alta resistencia a condiciones climáticas, a los altos volúmenes de tráfico y carga.

Actualmente nuestros pavimentos tienen un periodo corto de vida media, que genera un mantenimiento prematuro e incrementa los costos de inversión y de construcción, debido a la acción de la carga del tránsito y las implacables condiciones ambientales, las vías pavimentadas cada vez se deterioran con facilidad; por lo tanto se hace necesario modificar el asfalto con determinado tipo de materiales como polímeros que mejoren las propiedades físicas, químicas y reológicas; esto garantiza una resistencia a la acción conjunta del tránsito y el clima, confiere al asfalto un buen desempeño, como también aumenta el tiempo de vida útil cuando es puesto en la vía.

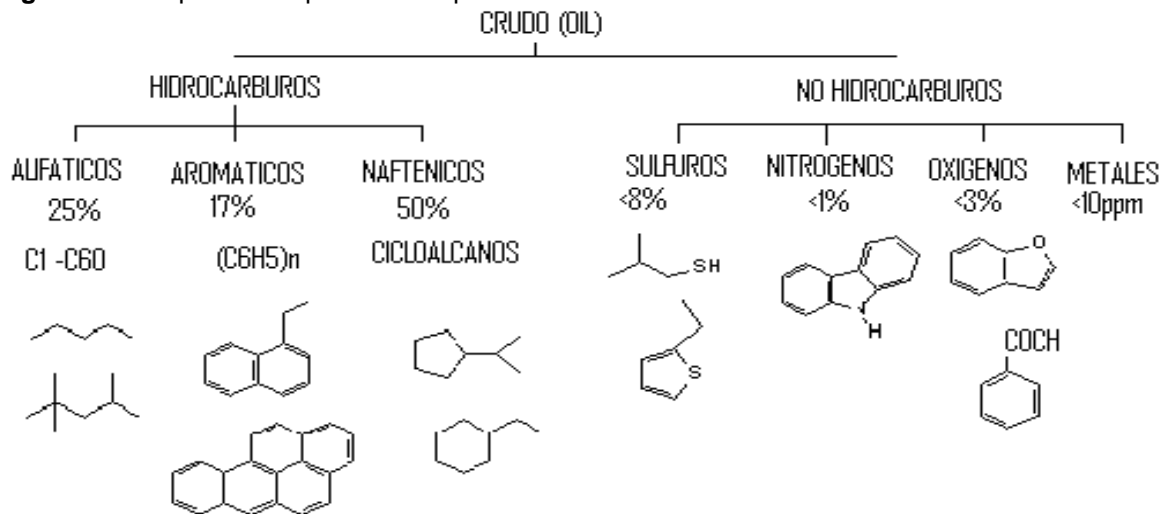
La modificación con el polímero (***polietileno de baja densidad***) produce un nuevo material que ayuda a corregir deficiencias de las propiedades antes mencionadas, abarata los costos de producción, ya que es un material reciclado a partir de bolsas plásticas de uso doméstico, y lo más importante quizá, es una nueva alternativa que ayuda a minimizar la contaminación por dichos polímeros.

1.4 MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

1.4.1 PETRÓLEO CRUDO – EL INICIO DE LA HISTORIA – QUÍMICA

Actualmente la ruta para la producción de cualquier plástico comienza en un carburante fósil, gas natural y/ o carbón. La mayoría de los polímeros se producen a partir de materia prima petroquímica que constituyen los productos finales del refinado y reformado del petróleo crudo. El petróleo crudo, propiamente llamado petróleo, es una mezcla compleja de miles (¡quizás millones!) de compuestos. Mientras que la mayoría de ellos son hidrocarburos, algunos contienen oxígeno, nitrógeno o azufre y trazas de metales, normalmente presentes en moléculas grandes llamadas porfirinas. El esquema siguiente (Fig. 1) muestra la composición media del petróleo crudo junto con algunos de los tipos más representativos de compuestos.

Figura 1. Componentes químicos del petróleo crudo



El petróleo se ha formado durante millones de años como un material orgánico procedente de organismos terrestres y marinos y depositados en ambientes sedimentarios que han ido madurando por la acción de microbios, calor y presión. Por consiguiente, los tipos de compuestos presentes reflejan el origen. Como resultado, la naturaleza del petróleo varía con su localización geográfica, su origen y su historial geológico. El siguiente esquema (Fig.2) resume estos compuestos según se describen en la industria del petróleo (4).

Figura 2. Componentes macro del petróleo



1.4.2. EL ASFALTO

El asfalto se define como un material cementicio de estado semisólido, con consistencia viscoelástica, de color negro o café oscuro en el cual los componentes que predominan son los betunes y conforma un sistema tipo sol-gel. Químicamente esta constituido aproximadamente por un 90% de hidrocarburos de alto peso molecular y el 10% restante por algunas trazas de azufre, nitrógeno, oxígeno y metales como níquel, hierro, vanadio, cobre, magnesio y calcio(1).

El asfalto procede de yacimientos naturales o como residuo de la destilación fraccionada del petróleo, sus cualidades aglutinantes y propiedades físicas y químicas lo hacen apto para un sin número de aplicaciones.

Es un material termoplástico, es decir, su condición de estado es dependiente de la temperatura, así en ambientes fríos se comporta como un sólido elástico, a temperaturas intermedias (ambiente normal 0°C a 70°C) presenta una condición viscoelástica y a medida que se eleva la temperatura pasa a ser un material de flujo plástico muy viscoso, para tornarse francamente líquido a temperaturas sobre los 110°C ó 180°C (15).

1.4.2.1 PROCESO DE OBTENCIÓN DEL CEMENTO ASFÁLTICO

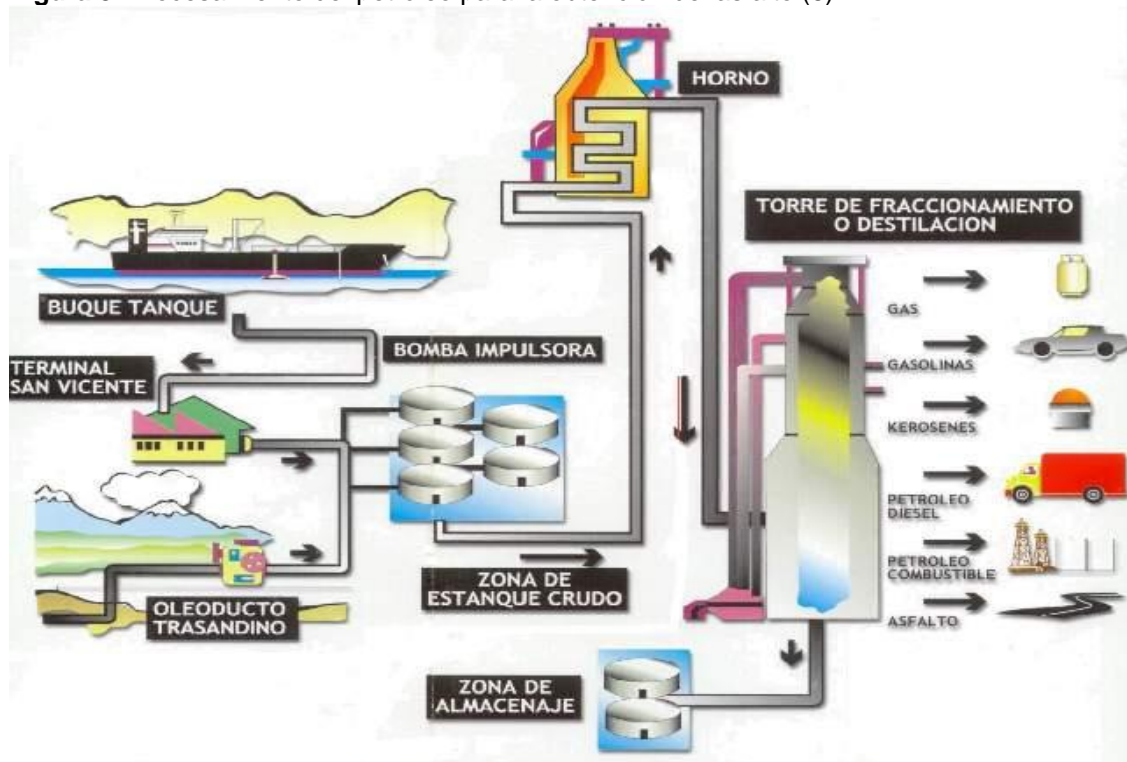
Actualmente, más del 90% de los asfaltos utilizados como ligante en la mezcla asfáltica son producidos por la destilación fraccionada del petróleo crudo, comienza con la llegada del petróleo crudo a la refinería (Fig.3) por vía marítima (buques tanque) y por vía terrestre (Oleoducto), donde se almacena en tanques especiales. Luego es enviado hacia las plantas de refinería para su transformación.

El proceso inicial de la refinación es la destilación del crudo que consiste en:

- a) Calentar el petróleo en un horno en altas temperaturas.

- b) Circula por torres de fraccionamiento, en las que la temperatura baja gradualmente desde el fondo hasta el tope de la torre. Las torres están provistas de dispositivos llamados “bandejas” en los que los productos se condensan y se separan de acuerdo a su peso molecular.
- c) Los distintos productos se extraen en forma continua. Por la parte superior de la torre se obtiene el gas licuado y la gasolina (bencina), por la parte baja le siguen los llamados productos intermedios: kerosene domestico (parafina) y de aviación, el petróleo diesel usado como combustible en camiones locomoción colectiva y maquinaria pesada. Al fondo de la torre, se extrae el crudo reducido, que sometido a nuevos procesos de fraccionamiento permite obtener pitch asfáltico, que es la base para preparar asfaltos utilizados en pavimentación de carreteras, calles y caminos (6).

Figura 3. Procesamiento del petróleo para la obtención del asfalto (6)



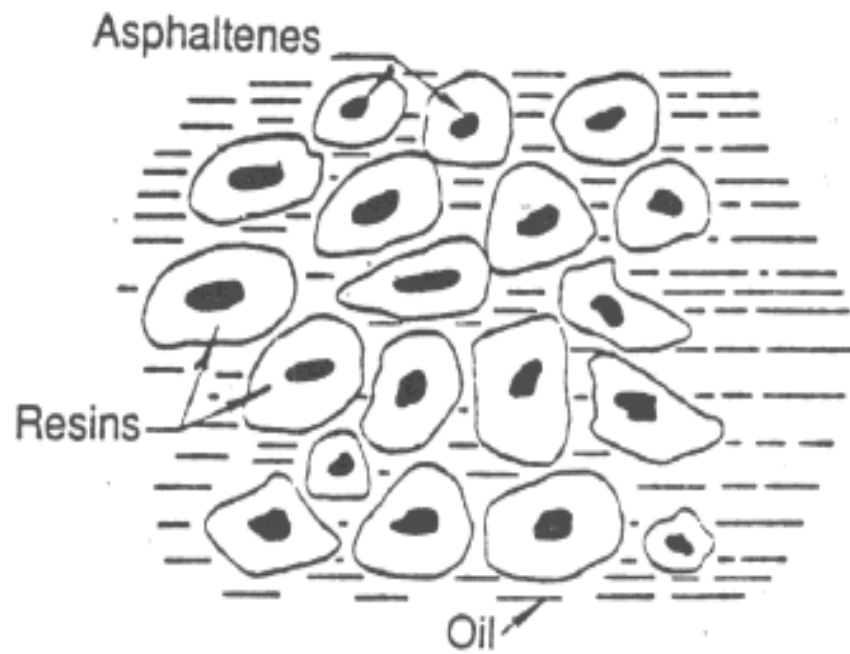
1.4.2.2 COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL ASFALTO

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 por Nellensteyn en 1924, cuyo modelo fue mejorado más tarde por Pfeiffer y Saal en

1940, con base en limitados procedimientos analíticos disponibles en aquellos años.

El modelo adoptado para configurar la estructura del asfalto se denomina modelo micelar (Fig.4), el cual provee una razonable explicación de dicha estructura en la cual existen dos fases: una discontinua (aromática) formada por asfáltenos y una continua que rodea y solubiliza a los asfáltenos, denominada maltenos. Las resinas contenidas en los maltenos son intermediarias en el asfalto, cumpliendo la misión de proteger a los asfáltenos (8).

Figura 4. Modelo micelar de la composición química del asfalto: asfáltenos, resinas y aceites(8).



1.4.2.3 PROPIEDADES MÁS RELEVANTES DE LOS COMPONENTES MACROS DEL ASFALTO

Entre los componentes relevantes del bitumen (asfalto) tenemos los **maltenos** y los **asfáltenos** (Tabla 1). Los **Maltenos** son la fracción soluble en hidrocarburos saturados de bajo punto de ebullición.

Tabla 1. Propiedades químicas de los componentes del asfalto.

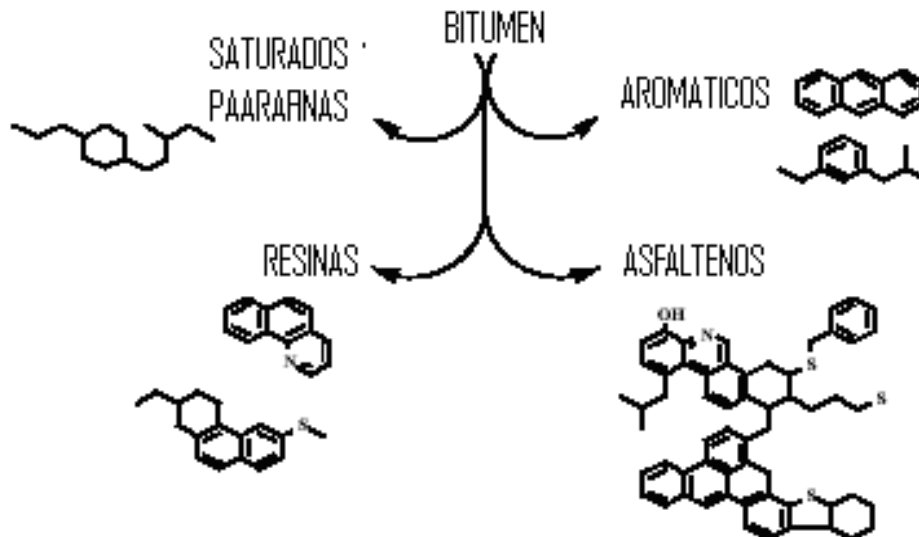
Asfaltenos	Maltenos
❖ Compuestos Polares	❖ No polares
❖ Hidrocarburos Aromáticos	❖ Hidrocarburos Alifáticos Nafténicos y Aromáticos
❖ Peso molecular mayor 1.000 UMAS	❖ Peso molecular hasta 1.000 UMAS
❖ Precipitan como sustancias oscuras por dilución con parafinas de bajo punto de ebullición (pentano-heptano)	Medio continuo

Los **maltenos** están constituidos por anillos aromáticos, anillos nafténicos y pocas cadenas parafínicas; generalmente existe mayor proporción de maltenos que asfaltenos. El mayor contenido de estos le da la calidad a un asfalto, o sea que regulan en gran parte las propiedades químicas de los asfaltos. Los maltenos están constituidos por tres grupos principales: **RESINAS, AROMATICOS Y SATURADOS** (Fig. 5).

Las resinas o aromáticos polares tienen un peso molecular de 1.100 UMA, con un mayor poder de adsorción y actúan como agente estabilizador de los asfaltenos.

Los aceites, a su vez, poseen un menor poder de adsorción. Son compuestos aromáticos de nafta y componentes saturados, con un peso molecular de 700 UMA. El nivel de compuestos saturados es importante en el asfalto, ya que las ceras o parafinas se consideran, como componentes no deseables en él.

Figura 5. Componentes de un bitumen (asfalto)



Los **asfáltenos** se definen como los compuestos solubles que se precipitan del petróleo crudo por la adición de un mínimo de 40 volúmenes de n- pentano. Son partículas sólidas, cuyo color va desde el café oscuro hasta el negro, sin punto de fusión definido; al calentarse forman una masa viscosa que se descompone, se hincha y aglutina, dejando un residuo de carbón. Son hidrocarburos de molécula de alto peso molecular (103 a 105 Unidades de Masa Atómica), de carácter predominantemente aromático, y su razón C/H (número de átomos de carbono /número de átomos de hidrógeno) es aproximadamente 0,8 a 0.9. Su grado de aromaticidad aumenta con el valor de la relación C/H. De ahí su tendencia a absorber compuestos de naturaleza aromática para formar la micela.

Diversos estudios analíticos muestran que los asfáltenos están formados por sistemas de anillos aromáticos polinucleares, rodeados de cadenas alquílicas con un peso molecular que varía de 1000 a 4000 unidades de masa atómica (UMA), con estructura plana, generalmente conocida como microestructura. Estas moléculas se agrupan en capas de cinco o seis para formar un cristal o partícula con un peso molecular que varía de 4000 a 10000 UMA. A su vez, varios de estos cristales se agrupan para formar las llamadas micelas con peso molecular que varía de 40000 a 40000000 UMA, que contiene en su interior metales como el níquel y el vanadio. A estos agrupamientos se les conoce como la macroestructura de los asfáltenos (Figura 5).

Un asfalto de buena calidad requiere que sus componentes químicos estén en una relación que garantice su estabilidad una vez se encuentre en servicio.

Si el asfalto es tratado con un hidrocarburo saturado de bajo punto de ebullición (por ejemplo: N-Pentano), se presentará un rompimiento de la estructura coloidal, disolviéndose una parte del material, mientras que el resto precipitará en forma de partículas grumosas de color oscuro. Los cuerpos precipitados son los asfáltenos y los que quedan disueltos los maltenos; filtrando la disolución obtenida antes, a través de un filtro de arcilla activada, se retienen las resinas quedando los aceites en disolución. De este proceso de descomposición se concluye que los asfáltenos son los principales componentes del núcleo de las micelas, los aceites predominan en el líquido intermicelar y las resinas constituyen una fase intermedia entre núcleo y líquido intermicelar (19).

1.4.2.4 PROBLEMAS CON EL ASFALTO

El asfalto es muy susceptible a los cambios de temperatura y sufre envejecimiento por intemperismo debido a largos tiempos de exposición, es también afectado por la oxidación y la fotodegradación. Sus propiedades mecánicas son muy pobres: es quebradizo a bajas temperaturas y fluyen a temperaturas un poco superiores a la temperatura ambiente y tiene una baja recuperación elástica. Todos estos factores limitan ampliamente su rango de utilidad (22).

Una vez colocado el asfalto en la capa de rodadura, puede presentar problemas típicos como (Fig. 6):

- ❖ Deformación permanente (ahuellamiento)
- ❖ Fisuramiento por temperatura y fatiga
- ❖ Endurecimiento a edad prematura, tornándose quebradizo
- ❖ Pérdida de agregado (21).

Figura 6. Problemas típicos del asfalto cuando es puesto en la vía.



Como consecuencia de las alteraciones producidas tanto en el mezclado en planta como en el pavimento, el asfalto modifica sus propiedades físicas, químicas y reológicas, del mismo modo puede aumentar su consistencia. Cuando esta consistencia alcanza valores muy elevados el asfalto se torna frágil y quebradizo, especialmente a bajas temperaturas, produciéndose la rotura de la película que recubre los agregados, permitiendo que el agua penetre y desplace el asfalto, reduciendo de esta manera su poder cementante y cohesivo, lo que lleva a un deterioro de la mezcla (19).

1.4.2.5 ASFALTOS MODIFICADOS

La modificación de asfalto es una nueva técnica utilizada para el aprovechamiento efectivo de asfaltos en la pavimentación de vías. Esta técnica consiste en la adición de polímeros a los asfaltos convencionales con el fin de mejorar sus características mecánicas, es decir, su resistencia a las deformaciones por factores climatológicos y del tránsito (peso vehicular).

Uno de los objetivos que se persigue con la modificación de los asfaltos con polímeros es: contar con ligantes más viscosos a temperaturas elevadas para reducir las deformaciones permanentes (ahuellamiento) de las mezclas que componen las capas de rodamiento, aumentando la rigidez. Por otro lado, disminuir el fisuramiento por efecto térmico a bajas temperaturas y por fatiga, aumentando su elasticidad. Finalmente, contar con un ligante de mejores características adhesivas (2).

1.4.2.6 MODIFICACIÓN DEL ASFALTO

Un asfalto puede modificarse con rellenos minerales, cauchos, plásticos o hidrocarburos naturales.

Los asfaltos se caracterizan por variar su comportamiento según la temperatura a la que se encuentren, es por ello que a distintas temperaturas el asfalto posee distintas consistencias, propiedad que se denomina susceptibilidad térmica. Esta propiedad debería ser lo más baja posible, de modo que a bajas temperaturas y tiempos cortos de aplicación de cargas sean lo suficientemente flexibles para evitar el fisuramiento y a tiempos prolongados de aplicación de cargas sean resistentes a las deformaciones. La situación ideal es aquella en la que el asfalto mantiene su consistencia en un amplio intervalo de temperatura.

La acción de los modificadores es colaborar en la tendencia a disminuir las variaciones de consistencia del asfalto para los cambios de temperatura registrados. Se han identificado diferentes acciones según el modificador empleado. Así por ejemplo, la utilización de filler reduce las deformaciones plásticas o ahuellamiento, producidas por las altas temperaturas. De ahí la importancia de aditivar el asfalto con polímeros ya que le permite mejorar en las siguientes propiedades:

- ❖ Mayor intervalo de plasticidad.
- ❖ Mayor cohesión.
- ❖ Mejora de la respuesta elástica.
- ❖ Mayor resistencia a la acción del agua.
- ❖ Mayor resistencia al envejecimiento (10).

1.4.2.7 CARACTERÍSTICAS DE LOS ASFALTOS MODIFICADOS

Los asfaltos modificados con polímeros elevan la vida útil de un pavimento entre dos y tres veces (según el caso a aplicar), con un costo adicional de hasta un 25% sobre la mezcla asfáltica. Está plenamente probado que los asfaltos convencionales poseen propiedades satisfactorias tanto mecánicas como de adhesión en una amplia gama de aplicaciones y bajo distintas condiciones climáticas y de tránsito. Sin embargo, el creciente incremento de volumen del tránsito, la magnitud de las cargas, la necesidad de optimizar las inversiones, provoca que en algunos casos dichas propiedades resulten insuficientes. Por ejemplo, con los asfaltos convencionales, aun con los grados más duros, no es posible eliminar el problema de las deformaciones producidas por el tránsito canalizado (ahuellamiento), especialmente cuando se deben afrontar condiciones de alta temperatura. Además, con la simple adopción de asfaltos más duros se corre el riesgo de fisuraciones por efectos térmicos cuando las temperaturas son muy bajas.

Figura 7. Asfalto modificado con polímero



En ciertas mezclas abiertas, alternativa generada por razones de confort y seguridad, con los ligantes convencionales no se alcanzaría una resistencia mecánica suficiente a causa de una insuficiente cohesión y adhesividad, lo que unido al bajo contenido de ligante de estas mezclas podría redundar en una disminución en la durabilidad. Del mismo modo, las nuevas capas superficiales delgadas serían menos durables cuando se vean sometidas a altas intensidades de tránsito (9).

1.4.3 POLÍMEROS

Los polímeros son moléculas orgánicas gigantes, compuestas de muchas unidades más pequeñas (monómeros), que se repiten y se unen entre sí. Conforme aumenta el tamaño del polímero se incrementa el punto de fusión o de reblandecimiento y el polímero se hace más resistente y rígido.

La importancia de los polímeros en la vida actual se puede vislumbrar cuando se considera la infinidad de aplicaciones que tienen los materiales que se fabrican con ellos.

En la modificación de asfaltos sobresalen dos tipos de polímeros estos son: los elastómeros y plastómeros.

1.4.3.1 ELASTÓMEROS

Son aquellos materiales que tienen como cualidad mostrar una gran deformación elástica cuando se le aplica una fuerza. La deformación elástica se debe a dos mecanismos: estiramiento y distorsión de los enlaces dentro de la cadena y movimiento recuperable de segmentos completos de la cadena. Ejemplos de estos son:

- Caucho natural
- Estireno – Butadieno (SB)
- Terpolímero elastomérico reactivo de etileno (TERE).

Normalmente, los polímeros que cumplen estos requisitos tienen pesos moleculares elevados, temperaturas de transición vítrea muy bajas y son amorfos en el estado relajado. Sin embargo, un requisito fundamental es la existencia de entrecruzamientos entre las cadenas de los polímeros, que impiden el desplazamiento molecular.

1.4.3.2 PLASTÓMEROS

Son polímeros que se reblandecen con el calor y dependiendo de su intensidad pueden llegar a fluir. La deformación plástica de los polímeros ocurre cuando las cadenas del polímero se deslizan una sobre otra, rompiendo las débiles interacciones de Van der Waals. Cuando se retira el esfuerzo las cadenas permanecen en sus nuevas posiciones y el polímero se deforma permanentemente. La facilidad con la que ocurre la deformación permanente esta relacionada con la viscosidad del polímero. Los polímeros con una alta viscosidad

requieren mayores esfuerzos para causar deformación plástica (14). Pertenecen a este grupo:

- Polietileno (PE)
- Poliestireno (PP)
- Polipropileno
- EVA (etileno – vinilacetato)
- EE-2 (Eastman -2)

Existen algunos polímeros que presentan características combinadas de termoplásticos y elastómeros; entre estos se encuentran:

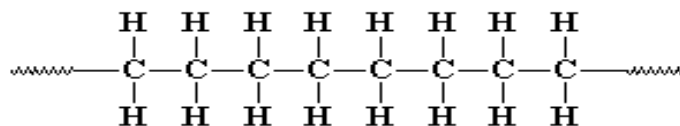
- SBS (estireno – butadieno – estireno)
- SIS (estireno – isopreno – estireno) (13).

1.4.3.2.1. POLIETILENO DE BAJA Y DE ALTA DENSIDAD

Se denomina **polietileno** a cada uno de los polímeros del etileno. La fabricación de polímeros consume el 60% del etileno que se produce. El polietileno es probablemente el polímero que más se ve en la vida diaria. Pertenecce a la familia de los termoplásticos con estructura molecular ramificada, lo cual se refleja en las densidades del polímero. Según esta característica el polietileno se clasifica en polietileno de Baja Densidad (de 0.941 a 0.925 g/cc), de Media Densidad (de 0.926 a 0.940 g/cc) y de Alta Densidad (de 0.941 a 0.965 g/cc). Es el plástico más popular del mundo. Existen, básicamente, dos tipos de polietileno, **el polietileno de baja densidad (Low Density PolyEthylene LDPE)** y **el polietileno de alta densidad (High Density PolyEthylene HDPE)**. También se pueden distinguir el **polietileno lineal de baja densidad** y el **polietileno de peso molecular ultra-alto (Ultra High Molecular Weight PolyEthylene UHMWPE)**(11).

El polietileno de alta densidad es un polímero de cadena lineal ramificada (Fig.8).

Figura 8. Polietileno de alta Densidad

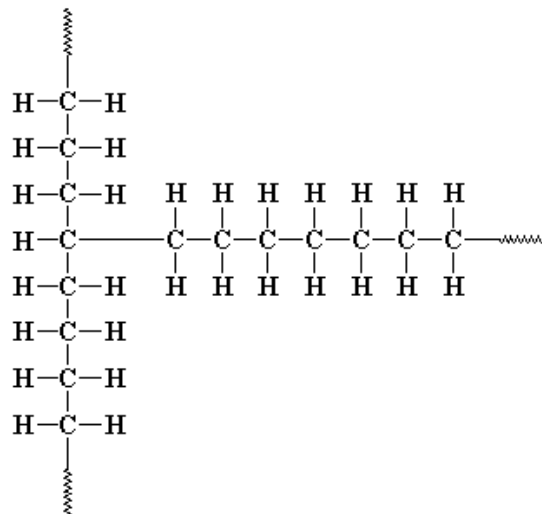


Se obtiene por polimerización del etileno a presiones relativamente bajas (1-200 atm), con catalizador alquilmetálico (catálisis de Ziegler) o un óxido metálico sobre sílice o alúmina (procesos Phillips y Standard Oil). Su resistencia química y

térmica, así como su opacidad, impermeabilidad y dureza son superiores a las del polietileno de baja densidad. Se emplea en la construcción y también para fabricar prótesis, envases, bombonas para gases y contenedores de agua y combustible. Los objetos fabricados con HDPE se identifican, en el sistema de identificación americano SPI (Society of the Plastics Industry), con el siguiente símbolo en la parte inferior o posterior:

El polietileno de baja densidad es un polímero de cadena ramificada (Fig.9) Se obtiene por polimerización del etileno a altas presiones (aproximadamente 1200 atm y 200° C) con oxígeno o catalizador de peróxido y por mecanismo de radicales libres.

Figura 9 Polietileno de baja Densidad



Es un sólido más o menos flexible, según el grosor, ligero y buen aislante eléctrico. Se trata de un material plástico que por sus características y bajo coste se utiliza mucho en envasado, revestimiento de cables y en la fabricación de tuberías (5).

El polietileno lineal de baja densidad se obtiene polimerizando el etileno con un alqueno (especialmente 1-buteno) a baja presión, en disolución, suspensión o fase gaseosa y en presencia de catalizadores. Se trata de un polímero con ramificaciones muy cortas y uniformes que hacen que su temperatura de fusión y su resistencia a la tracción y al agrietamiento sean superiores a las del polietileno de baja densidad. Se utiliza en el recubrimiento de cables y en la fabricación de objetos moldeados por extrusión o soplado.

El polietileno de alta densidad se produce normalmente con un peso molecular que se encuentra en el rango entre 200.000 y 500.000, pero puede ser mayor. El polietileno con peso molecular entre 3.000.000 y 6.000.000 se denomina UHMWPE (Ultra High Molecular Weight Polyethylene). Con este material se producen fibras, tan fuertes, que pueden utilizarse para fabricar chalecos a prueba de balas (12).

El polietileno es un **polímero vinílico**, hecho a partir del monómero etileno. El polietileno de baja densidad se obtiene por polimerización *1.

***1 reacción química en la que 2 o más moléculas se combinan para formar otra en la que se repiten unidades estructurales de las primitivas y su misma composición porcentual cuando estas son iguales.**

Algunos de los usos del polietileno de baja densidad son: Bolsas de todo tipo, Películas para el agro, Envasamiento automático de alimentos, Bolsas para sueros, Tubos y pomos para cosméticos, medicamentos y otras industrias, tuberías para riego.

Algunas de sus ventajas son:

- No es tóxico, es Flexible,
- Liviano, Impermeable,
- Económico y Transparente.

Estos productos no requieren precauciones especiales en su manejo ya que no son peligrosos ni por contacto ni por ingestión, sin embargo se resaltan, las siguientes propiedades químicas:

- **Actividad química:** Los polietilenos son inertes a una gran variedad de productos químicos, no deben emplearse para empacar solventes debido a que con el tiempo pueden permitir el paso de gases y ciertos líquidos.
- **Combustibilidad:** Estas resinas deben almacenarse y manejarse evitando el contacto con llamas y otras fuentes de calor tales como metales al rojo vivo puesto que con el suministro de calor y oxígeno del aire pueden hacer combustión. Al producirse la ignición se genera mucho calor y abundante humo denso y de color negro. Los medios adecuados para extinguir este fuego, son el agua como refrigerante y la espuma de sofocación. Las personas que extingan el fuego deben usar máscara con equipo de oxígeno.
- **Manejo de desechos:** Debido a la baja biodegradabilidad de los plásticos, se recomienda identificarlos con su respectivo código 4 PEBD para facilitar su reutilización o reciclado para producir otros artículos y así evitar que contaminen el entorno. Si no pueden ponerse en práctica las alternativas antes

mencionadas, pueden incinerarse y aprovechar su elevado contenido calórico (7).

1.4.3.3 CARACTERÍSTICAS DEL POLÍMERO UTILIZADO EN LA MODIFICACIÓN DE LOS ASFALTOS

Un modificador (polímero) de asfaltos debe prolongar la vida de las carreteras y caminos, aumentando la unión entre el asfalto y los agregados.

El polímero debe tener cierto grado de compatibilidad con el asfalto, de tal forma que no ocurra una completa separación de fases, ya que en este caso las propiedades del compuesto no son mejoradas. Esta compatibilidad se logra mediante la disolución parcial del polímero por los aceites malténicos del asfalto, es decir, logrando una verdadera mezcla asfalto-polímero, formando una sola fase entre estos dos materiales (19).

Un polímero modificador efectivo debe ser práctico, económico, fácilmente aplicable, resistente a la degradación térmica, mezclable con el asfalto y debe mejorar la resistencia a la influencia de altas temperaturas de los pavimentos sin hacer que el asfalto sea demasiado viscoso a las temperaturas de mezcla y de compactación o demasiado “liviano” o quebradizo a bajas temperaturas (18), (19).

Para extender el rango de aplicaciones del asfalto es necesario conocer la manera en que el polímero esta interactuando con él. Una de las formas de conocer el grado de compatibilidad entre estos dos materiales es visualizando la microestructura del compuesto ó a través de las respuestas térmicas y/o viscoelásticas del material compuesto (20).

1.4.3.4 ESTUDIOS REALIZADOS SOBRE ASFALTOS MODIFICADOS CON POLIETILENOS DE BAJA DENSIDAD

Estudios recientes sobre la modificación de asfaltos con polímeros tipo **polietileno de baja densidad** realizado por el Departamento de Ingeniería Química de la Universidad de Pisa Italia y el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Calgary Canadá. Los resultados demuestran que la adición del polímero realza fuertemente las propiedades mecánicas del asfalto (16).

El empleo de desperdicios plásticos para el diseño de una mezcla asfáltica drenante ha sido realizado por el grupo de investigación de Geotecnia Vial de la Universidad Militar Nueva Granada, grupo CETACA Pontificia Universidad Javeriana. Los resultados obtenidos demuestran que el uso de desperdicio plásticos (polietilenos de baja densidad) de bolsas de leche mejora propiedades

disminuye fatiga, mejora susceptibilidad térmica, así como la mitigación en el impacto ambiental, entre otros (17).

1.4.4 TÉCNICAS DE ANÁLISIS

1.4.4.1 MÉTODOS CROMATOGRÁFICOS

La cromatografía es una técnica de separación extraordinariamente versátil que presenta distintas variantes. En toda separación cromatográfica hay dos fases (sólida, líquida o gaseosa) una móvil y otra estacionaria, que se mueven una con respecto a la otra, manteniendo un contacto íntimo. La muestra se introduce en la fase móvil y los componentes de la muestra se distribuyen entre la fase estacionaria y la móvil. Los componentes de la mezcla a separar invierten un tiempo diferente en recorrer cada una de las fases, con lo que se produce la separación. Si un componente está en la mayor parte de tiempo en la fase móvil el producto se mueve rápidamente, mientras que si se encuentra la mayor parte en la fase estacionaria, el producto queda retenido y su salida es mucho más lenta.

1.4.1.1 CLASIFICACIÓN DE LOS MÉTODOS CROMATOGRÁFICOS

Las distintas técnicas de cromatografía, se pueden dividir según como esté dispuesta la fase estacionaria, así:

❖ Cromatografía plana

En la cromatografía plana se usa como fase estacionaria un sólido como gel de sílice o alúmina, conteniendo algún material que hace que se mantenga la fase estacionaria sobre un soporte plano o papel. Las principales técnicas son: cromatografía en papel y cromatografía en capa fina.

❖ Cromatografía en columna

En este tipo de cromatografía, la fase estacionaria se sitúa dentro de la columna. Según el fluido empleado como fase móvil se distinguen: cromatografía de líquidos, cromatografía de gases y cromatografía de fluidos supercríticos.

1.4.4.2 Norma ASTM D-2007

La sigla ASTM significa "American Standard for Testing and materials", es una asociación que desarrolla los estándares para materiales y métodos de prueba.

Estos estándares consisten en pruebas químicas o físicas que verifican las propiedades y composición del material en cuestión, para determinar su calidad. Específicamente, la norma ASTM D-2007 empleada para evaluar asfaltos, utiliza como adsorbentes arcilla y sílica gel, distribuidos en una columna superior y una inferior, respectivamente. En el diagrama esquemático de la figura 11 se aprecia que la fracción malténica del asfalto, obtenida de la separación por precipitación con n-pentano u o n-hexano, es incorporada a la columna y eluída con este mismo solvente, obteniéndose en primera instancia los compuestos saturados (parafinas) debido a que, por su baja polaridad, presentan afinidad por el solvente. En las columnas quedan retenidos otros compuestos de mayor polaridad, los hidrocarburos aromáticos polares (columna arcilla) y los aromáticos (columna de sílica gel), los cuales son desorbidos mediante la adición de solventes adecuados (mezcla benceno / acetona 1:1 y tolueno respectivamente) (8).

1.4.4.3 ESPECTROSCOPIA INFRARROJA

La espectroscopia infrarroja o IR, es un tipo de espectroscopia vibracional, donde se analizan las vibraciones moleculares. Para comprender cabalmente la espectroscopia IR, se deberá entender los principios de movimiento armónico simple, tomando como ejemplo dos esferas o masa, conectadas por medio de un resorte, una vez puestas en movimiento, la esferas comenzaran a oscilar o vibrar de un lado a otro a lo largo del resorte, a una cierta frecuencia que dependerá de las masa de las esferas y de la rigidez del resorte. una esfera de masa pequeña se moverá con mayor facilidad que otra de masa mayor. por lo tanto las masa mas pequeñas oscilan a mayor frecuencia que las masa mas grandes. Un resorte sumamente rígido es difícilmente deformable y rápidamente retorna a su forma original cuando se deja de aplicar la fuerza deformante. Por otro lado un resorte débil se deforma fácilmente y demora mucho tiempo en volver a su forma original.

De ahí que un resorte más rígido oscilara a mayor frecuencia que uno débil. El enlace químico entre dos átomos puede ser considerado como un oscilador armónico simple. El enlace seria el resorte y los dos átomos grupos de átomos conectados por el enlace, serian las masas. Cada átomo tiene una masa diferente y los enlaces simples, dobles o triples poseen bastante rigidez por lo que cada combinación de átomos y enlaces poseen su propia frecuencia armónica característica.

Cuando un objeto vibra a una cierta frecuencia y encuentra otra vibración de exactamente la misma frecuencia, el oscilador absorberá esa energía. A cualquier temperatura por encima de cero absoluto, todos los pequeños osciladores armónicos simples que constituye una molécula se encuentran en vigorosa vibración. Dada la casualidad que la luz infrarroja esta en el mismo rango de frecuencia que la molécula en vibración. De modo que si irradiamos una molécula en vibración con luz infrarroja, absorberá aquellas frecuencias de la luz

que sean exactamente iguales a las frecuencias de los distintos osciladores armónicos que constituyen dicha molécula. Cuando la luz es absorbida, los pequeños osciladores de la molécula seguirán vibrando a la misma frecuencia, pero dado que han absorbido la energía de la luz tendrán una amplitud de vibración más grande. Esto significa que los “resortes” se estiraran más que antes de absorber la luz. La luz que no fue absorbida por ninguno de los osciladores de la molécula, es transmitida desde la muestra aun detector y una computadora la analizara y determinara las frecuencias que fueron absorbidas.

Antes, solo era posible obtener buena información irradiando la molécula por una sola frecuencia de luz IR por vez. Esto llevaba mucho tiempo por que existe una gran cantidad de frecuencias y debían realizarse muchos barridos para obtener un buen espectro. Pero ahora, gracias al sorprendente algoritmo de la transformada de Fourier, pude irradiarse una molécula con cada frecuencia de luz IR a la vez y obtener un espectro perfecto en cuestión de minutos o segundos.

La región del infrarrojo

Es una determinada zona del espectro electromagnético, correspondiente a frecuencias que van desde valores inferiores a las frecuencias del visible, hasta valores que colindan con las frecuencias más altas de microondas y radar, región comprendida entre 0.75 y 1000 μm (números de onda entre 13333 y 10 cm^{-1}) esta amplia zona suele dividirse en tres regiones:

Infrarrojo cercano: comprendido entre 0.75 y 2.5 μm ($13333 - 4000\text{ cm}^{-1}$).

Infrarrojo medio: ubicado entre 2.5 y 25 μm ($4000-400\text{ cm}^{-1}$). En esta región aparecen las bandas de absorción debidas a las vibraciones fundamentales de las moléculas, por lo que es la mas importante y empleada en espectroscopia infrarroja.

Infrarrojo lejano: comprendido entre 25 y 1000 μm ($400-10\text{cm}^{-1}$) (23).

1.4.4.4 ESPECTROSCOPIA ULTRAVIOLETA Y VISIBLE

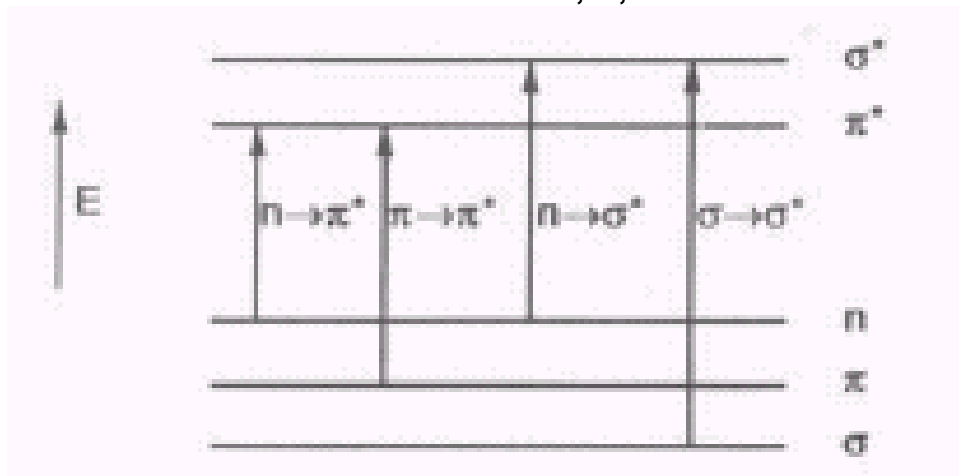
Utiliza la radiación del espectro electromagnético, cuya longitud de onda esta comprendida entre los 100 y los 800 nm y su efecto, es producir transiciones electrónicas entre los orbitales atómicos y / o moleculares de las sustancias.

Las longitudes de onda de la luz ultravioleta que en una molécula absorben, están determinadas por las diferencias de energía entre los orbitales de la misma. Los enlaces sigma (σ) son muy estables y los electrones de estos enlaces normalmente no se afectan por las longitudes de onda mayores de 200 nm. Los enlaces pi (π) tienen electrones que se excita mas fácilmente y pasan a orbitales

de mayor energía. Cuando la molécula tiene electrones de no enlace (**n**) estos se ubican en la orbital **n** desde donde puede ocurrir transiciones de tipo:

n → **π** o **n** → **σ***, de menor energía que las transiciones **π** → **π*** o **σ** → **σ***
 En la figura 10 se pueden apreciar dichas transiciones.

Figura 10. Transiciones electrónicas de los electrones **σ**, **π**, **n** en las moléculas.



Las transiciones, $\sigma \rightarrow \sigma^*$ requiere de una energía muy grande debido a la fortaleza de los enlaces, son características de compuestos saturados y aparecen en la región del vacío del ultravioleta lejano, mientras que las transiciones $\pi \rightarrow \pi^*$ requieren de menos energía y son características de sustancias insaturadas, sus bandas de absorción se encuentran en la región ultravioleta y parte en la visible (dependiendo de la conjugación). Las transiciones **n** → σ^* o (por ejemplo en el CH_3NH_2) y **n** → π , (en cetonas), se realizan en orbitales atómicos no enlazados del estado fundamental de la molécula, hasta orbitales σ^* y π^* antienlazados respectivamente.

Las transiciones **n** → π^* requieren de menor energía que las transiciones **n** → σ^* , por lo tanto sus bandas aparecen en la región de mayor longitud de onda del espectro.

La tabla 1 muestra las transiciones típicas y sus longitudes de onda aproximadas en el espectro de absorción UV-Visible (24).

Tabla 2. Transiciones típicas y longitud de onda aproximadas del espectro de absorción.

TRANSICION	REGION APROXIMADA DE ABSORCION
$\sigma \rightarrow \sigma^*$	150 nm
$n \rightarrow \sigma^*$	< 200 nm
$\pi \rightarrow \pi^*$ si conjugar	< 200 nm
$\pi \rightarrow \pi^*$ conjugado	Uv cercano y visible
$n \rightarrow \pi^*$	300 nm

1.4.4.2 MICROSCOPIA DE FLUORESCENCIA

La microscopía de fluorescencia se basa en la propiedad de algunas sustancias fluorescentes (**fluorocromos**) que tienen la capacidad de absorber determinadas longitudes de onda corta y emitir luminiscencia, es decir una radiación luminosa de mayor longitud.

Las moléculas fluorescentes absorben la luz a una determinada longitud de onda y emiten luz de otra longitud de onda mas larga. Si un componente de este tipo es iluminado a su longitud de onda absorbente y visualizado a través de un filtro que solo permite pasar la luz de longitud de onda igual a la luz emitida, el componente aparece brillante sobre un fondo oscuro. La intensidad y el color de la luz es una propiedad característica de la molécula fluorescente utilizada, detectado con ayuda del microscopio de fluorescencia.

El microscopio de fluorescencia es similar al óptico pero posee dos filtros muy potentes que le permiten detectar un colorante fluorescente en forma de luz. Uno de estos filtros, ubicado entre la fuente de luz y el objeto, deja pasar solo luz de longitud de onda tal que sea absorbida y excite el material fluorescente que estamos utilizando como colorante en el espécimen. El otro, ubicado entre el objeto y el ocular, solo deja pasar la luz con longitud de onda correspondiente a la de la luz emitida por ese material fluorescente. La utilización de un determinado fluorocromo exige la utilización de un determinado bloque constituido por un filtro de excitación, espejo divisor dicromático y filtro barrera (19).

2 SECCIÓN EXPERIMENTAL

2.1 METODOLOGIA PROPUESTA

2.1.1 ETAPA I: ESTUDIO DEL ASFALTO ORIGINAL.

Se toma muestras representativas del asfalto original proporcionado por el grupo de Investigación de Geotecnia Vial y Pavimentos de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad del Cauca. Se realizaron los procedimientos descritos a continuación:

2.1.1.1 PROCEDIMIENTO NÚMERO 1 CROMATOGRAFÍA DE COLUMNA SEGÚN NORMA ASTM-D 2007

Separación de los componentes, mediante tratamiento químico (extracción con n-hexano) obteniendo dos partes (soluble e insoluble) como se ilustra en la figura 11.

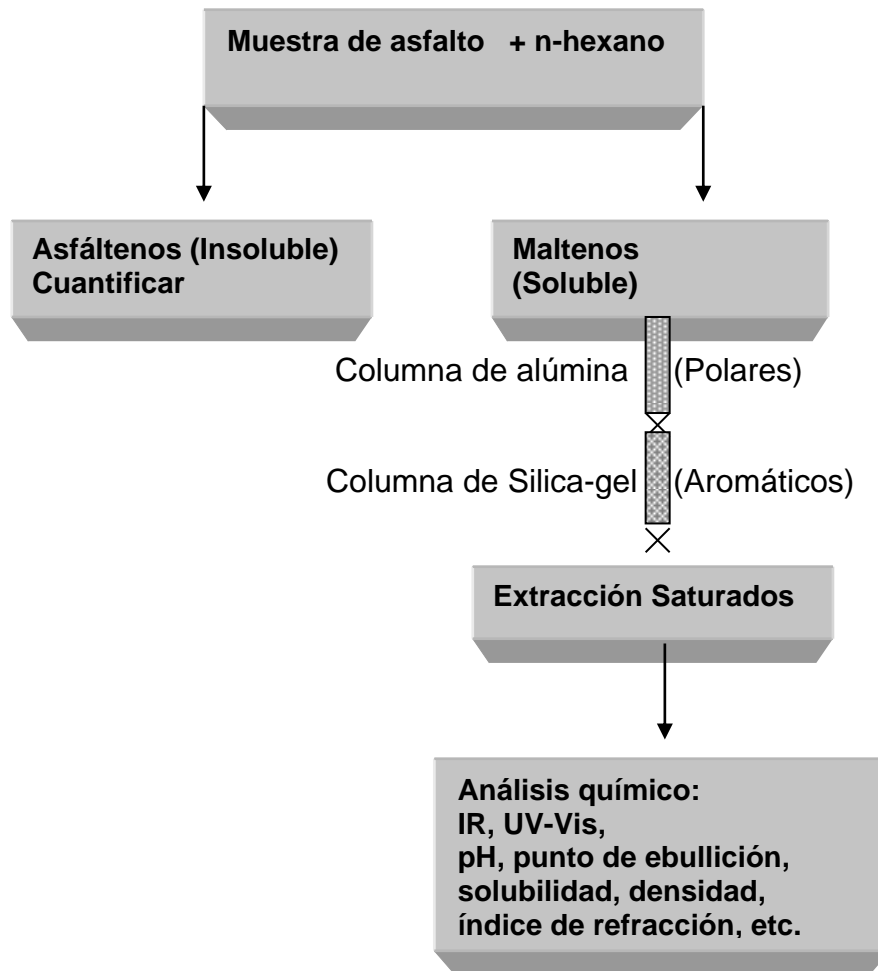
A las fracciones obtenidas en el procedimiento número 1 se le realizaron pruebas químicas de caracterización y se analizaron los resultados con el propósito de clasificar el tipo de origen del asfalto.

A cada extracto obtenido se cuantificó y se les tomaron espectros de infrarrojo para confirmar grupos funcionales de los componentes del asfalto.

2.1.1.2 PROCEDIMIENTO NÚMERO 2. PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS ASFALTOS.

Se tomaron muestras representativas del asfalto original por triplicado, a cada muestra se realizaron ensayos de física tradicional tales como: penetración, viscosidad capilar a 60 °C, densidad, adherencia, resistencia, punto de ablandamiento, anillo y bola. Las pruebas fueron realizadas en el laboratorio de Suelos, pavimentos y materiales de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad del Cauca.

Figura 11. Transiciones electrónicas de los electrones σ , π , n en las moléculas.



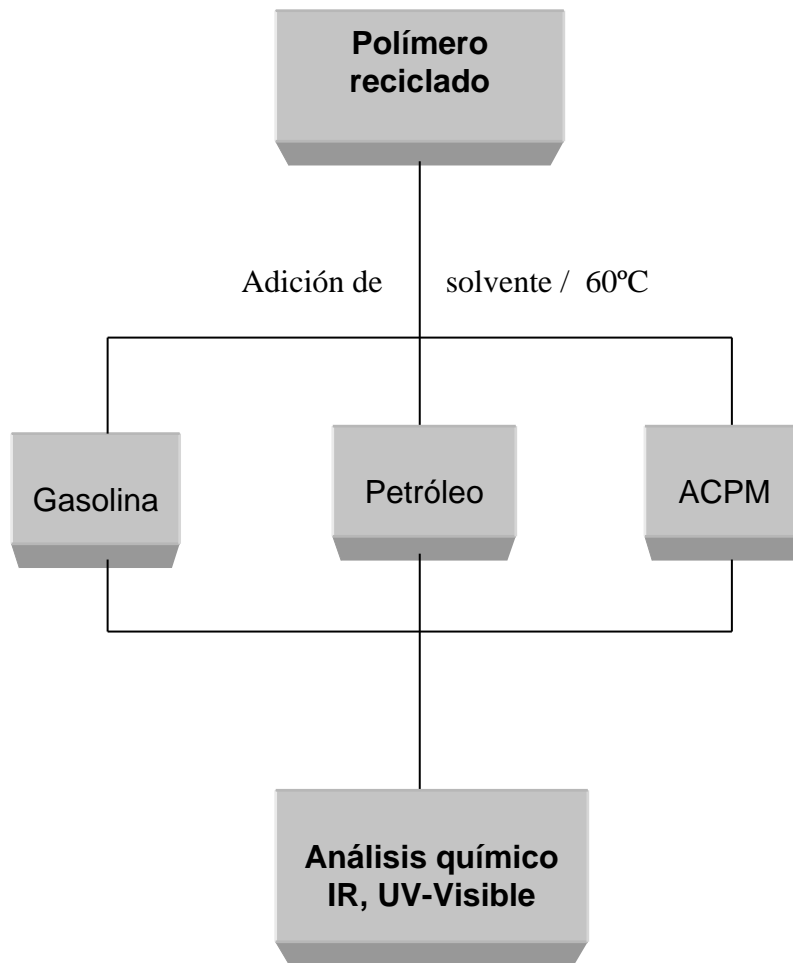
2.1.2 ETAPA II. ESTUDIO DEL ASFALTO MODIFICADO

En esta etapa se estudia y se prepara el polímero polietileno de baja densidad, luego se modifica y se almacena el asfalto.

2.1.2.1 PROCEDIMIENTO PARA EL ANÁLISIS QUÍMICO DEL POLÍMERO RECICLADO.

Se reutilizó las bolsas plásticas de uso domestico, estas se picaron en partículas muy pequeñas, luego se disolvió en diferentes solventes orgánicos a una temperatura aproximada de 60° C, disuelto el polímero en cada uno de los solventes, se realizaron el análisis químico y espectroscópico para dilucidar grupos funcionales, como se muestra en la figura 12.

Figura 12. Disolución del polímero

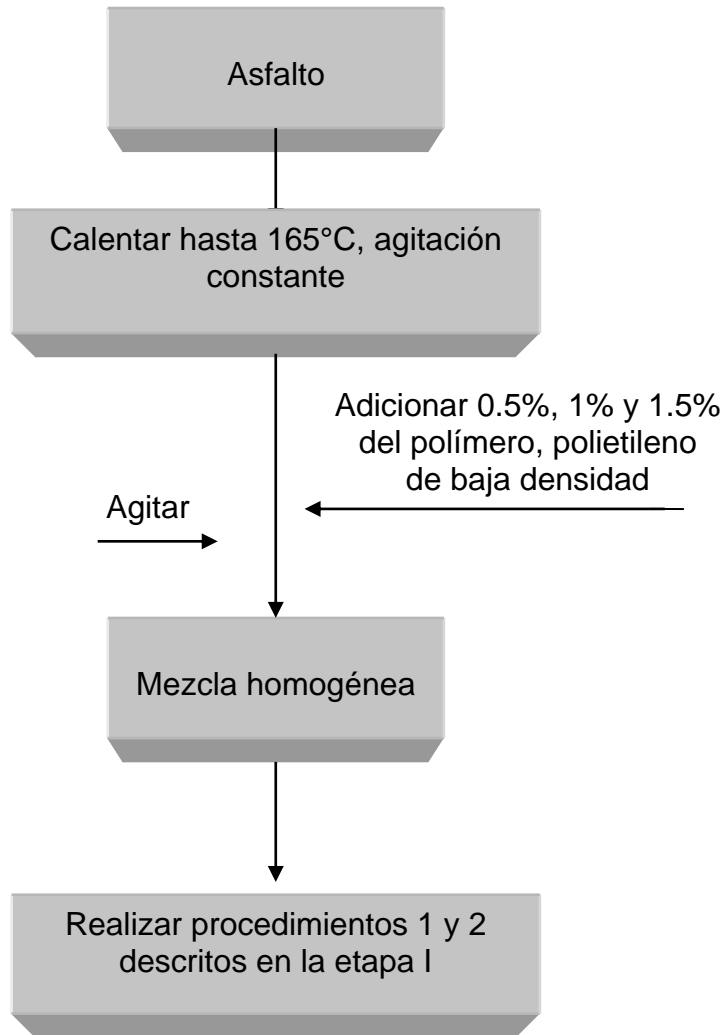


2.1.2.2 PROCEDIMIENTO PARA LA MODIFICACIÓN DEL ASFALTO.

Se pesan 650 gramos de asfalto, se calienta hasta alcanzar una temperatura de 165 °C (según Norma I:N:V: E-726) con una agitación constante, se le adiciona el 0.5% de polímero en forma sólida, seguida de una agitación constante por media hora, hasta lograr una buena homogenización de la mezcla, luego se deja la mezcla en reposo durante tres días y se le realiza los procedimientos 1 y 2 descritos en la etapa 1. Para la comparación de los resultados se modifica el asfalto al 1% y 1.5% de polímero de acuerdo al siguiente procedimiento.

El procedimiento sugerido en la modificación de asfalto con el polímero ***polietileno de baja densidad*** se puede apreciar en la figura número 13.

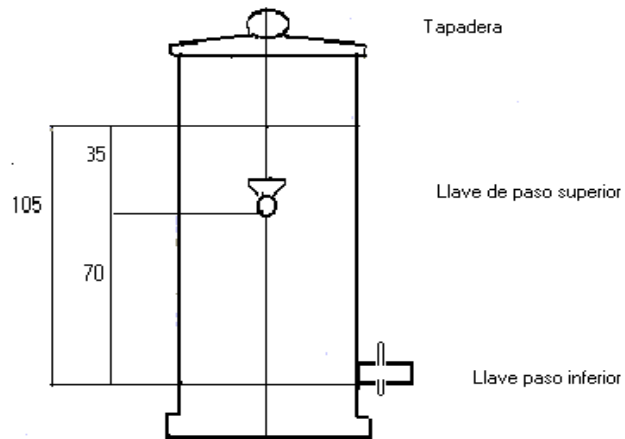
Figura 13. Adición del polímero al asfalto



2.1.2.3 ALMACENAMIENTO DEL ASFALTO (NORMA I.N.V.E-726)

Se tomaron muestras representativas de asfalto original, asfalto modificado al 0.5 y 1.5% de polímero a temperatura ambiente, fueron transferidos a cada recipiente de ensayo como se muestra en la figura 14, se cierran herméticamente, posteriormente se calentó hasta 165 °C durante 5 días y finalmente se dejó en reposo a temperatura ambiente hasta el día 35. Se tomaron muestras de asfalto por cada salida del recipiente al día cero, cinco y cuarenta, a las cuales se le realizó los procedimientos 1 y 2 descritos en la etapa I

Figura 14. Esquema del recipiente para el ensayo de estabilidad al almacenamiento de asfaltos



Nota: medidas en mm. Norma I.N.I.V. E-726

Las dos etapas fueron realizadas simultáneamente con el fin de mantener las mismas condiciones de laboratorio.

2.2 MATERIALES E INSTRUMENTAL

2.2.1 REACTIVOS

En el trabajo de investigación se utilizaron los siguientes reactivos químicos.

- ❖ N-hexano (grado analítico)
- ❖ Acetona (99% pureza)
- ❖ Tolueno (grado analítico)
- ❖ Sílica gel (grado analítico)
- ❖ Alúmina
- ❖ Diesel
- ❖ Petróleo
- ❖ Gasolina
- ❖ Ácido sulfúrico.

- ❖ Hidróxido de sodio
- ❖ Permanganato de potasio
- ❖ Bencidina
- ❖ Fenol
- ❖ Sulfato cúprico penita hidratado
- ❖ Parafina
- ❖ Yoduro de metilo
- ❖ Etanol
- ❖ Cloruro férrico
- ❖ Ácido clorhídrico

Los reactivos pertenecen a las siguientes marcas: Analyticals, Merck, Carlo Erba Reagenti, C.A.F KAHLBAUM, Baker Analyzed, entre otras.

Otros materiales empleados son:

- ❖ Muestra de asfalto proporcionado por el complejo Industrial de Barrancabermeja(CBI), al Grupo de Investigación de Geotecnia vial y Pavimentos de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad del Cauca.
- ❖ Polietileno de baja densidad reciclado

2.2.2 EQUIPOS

- ❖ Refractómetro ABBE MARK II. Reichert-Jung. Laboratorio de Órgano metálica. Universidad del Cauca.
- ❖ Espectrofotómetro GEMINI FTIR MATTSON (ATI). Resolución (4000-400cm⁻¹). Laboratorio de Órganometálica. Universidad del Cauca.
- ❖ Spectronic GENESIS 5 UV-Vis (200-100nm). Laboratorio de Biología Celular. Universidad del Cauca.
- ❖ Microscopia de Fluorescencia NIKON. Unidad de Microscopia Electrónica. Universidad del Cauca.

- ❖ Controlador de temperatura BARNANT COMPANY, modelo 689-0000. Laboratorio Departamento de Química. Universidad del Cauca.
- ❖ Balanza METTER PJ-360, Delta Range. Laboratorio de Órganometálica. Universidad del Cauca.
- ❖ Plancha de calentamiento CORNING, modelo PC-320. Laboratorio de Órganometálica. Universidad del Cauca.
- ❖ Estufa HACEB, modelo EM-2. Laboratorio de Órganometálica. Universidad del Cauca.

2.3 PARTE EXPERIMENTAL

2.3.1 DISOLUCIÓN DEL POLIMERO

100g de polietileno de baja densidad en tiras (figura 15) se disolvió en 200ml de ACPM a 60°C, se agitó constantemente por 30 minutos hasta alcanzar una temperatura de 80°C, posteriormente se llevó a un recipiente para su sequedad. El mismo procedimiento se realizó con los siguientes solventes: gasolina y petróleo.

2.3.1.1 ANÁLISIS QUÍMICO Y ESPECTROSCÓPICO DEL POLÍMERO RECICLADO

Se le practicó espectroscopia infrarroja a una muestra del polímero polietileno de baja densidad con el fin de identificar los grupos funcionales más representativos presentes en el polímero. En el análisis químico se realizaron las siguientes pruebas:

Prueba de Baeyer: a 2ml de agua en etanol o acetona, se le añade 5 ml de la muestra, enseguida se añade gota a gota una solución de permanganato de potasio al 2% mientras se agita, hasta que persista el color púrpura del permanganato. Si hay presencia de enlaces etilénicos o acetilénicos, el permanganato de potasio se decolora.

Pruebas de solubilidad con ácidos y bases fuertes: a un volumen igual al de la prueba anterior se le adicionan 2ml de ácido sulfúrico concentrado, con el fin de probar su reactividad, debido a que los alcanos son inertes frente a la mayoría de los reactivos en condiciones normales de presión y temperatura, se repite el mismo procedimiento utilizando como solventes ácido nítrico, hidróxido de sodio entre otros. Para estas pruebas se tomaron como blanco parafina analítica.

Figura 15. Polietileno de baja densidad



Polímero original



Polímero tratado

2.3.2 MODIFICACIÓN DEL ASFALTO

1000g de asfalto se calentó hasta 160°C, se adicionó lentamente y con agitación constante 5g de polímero que corresponden a 0,5%, la agitación se mantuvo por 30 minutos para asegurar una mezcla homogénea, posteriormente se pasó a un recipiente para realizar las correspondientes pruebas físicas y químicas. Se realizó el mismo procedimiento agregando el mismo polímero en las siguientes proporciones 1%, 1.5% y 2% con el fin de comparar los resultados.

2.3.3 ALMACENAMIENTO DEL ASFALTO

En el almacenamiento del asfalto se utilizaron tres recipientes como el de la figura 14, cada recipiente de almacenamiento se llenó aproximadamente con 1000 g de asfalto sin modificar y asfalto modificado a 0.5% y 1.5% de polímero reciclado.

Los recipientes se sometieron a un baño de arena, manteniendo a una temperatura constante de 165°C con la ayuda de un estabilizador de temperatura Barnad Company durante cinco días, como se observa en la figura 16. Se tomaron muestras de 150g aproximadamente de cada recipiente para aplicar los procedimientos descritos en la etapa I.

Figura 16. Almacenamiento del asfalto original y modificado con polietileno de baja densidad



Adicionalmente se tomaron pequeñas muestras de asfalto original y modificado en placas de vidrio y se les tomó microfotografías mediante la microscopia de fluorescencia para observar la homogenización o separación de la mezcla asfalto-polímero.

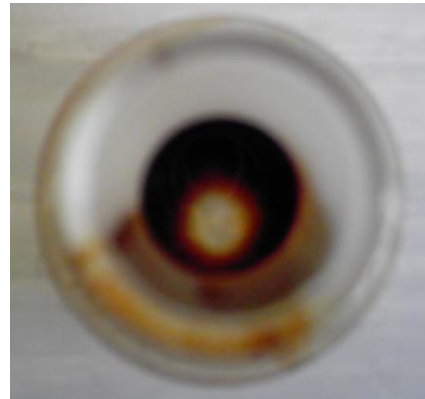
2.3.4 SEPARACIÓN DEL ASFALTO EN SUS COMPONENTES

La separación del asfalto original se llevó a cabo tomando 0.5g de muestra, se le adicionaron 10ml de n-hexano se dejó en reposo la mezcla por cuatro horas en la oscuridad, con el fin de separar los asfaltenos de los maltenos. Transcurrido este tiempo se filtró por gravedad la mezcla obteniendo dos partes: solubles (maltenos) y e insolubles (asfaltenos), ver figura 17. El mismo procedimiento anterior se realizó para el asfalto modificado con 0.5% y 1.5% de Polietileno de baja densidad modificado.

Figura17. Separación de asfaltenos y maltenos mediante la precipitación con n-hexano.



Asfaltenos



Maltenos

2.3.4.1 SEPARACIÓN DE LOS COMPONENTES MALTENICOS

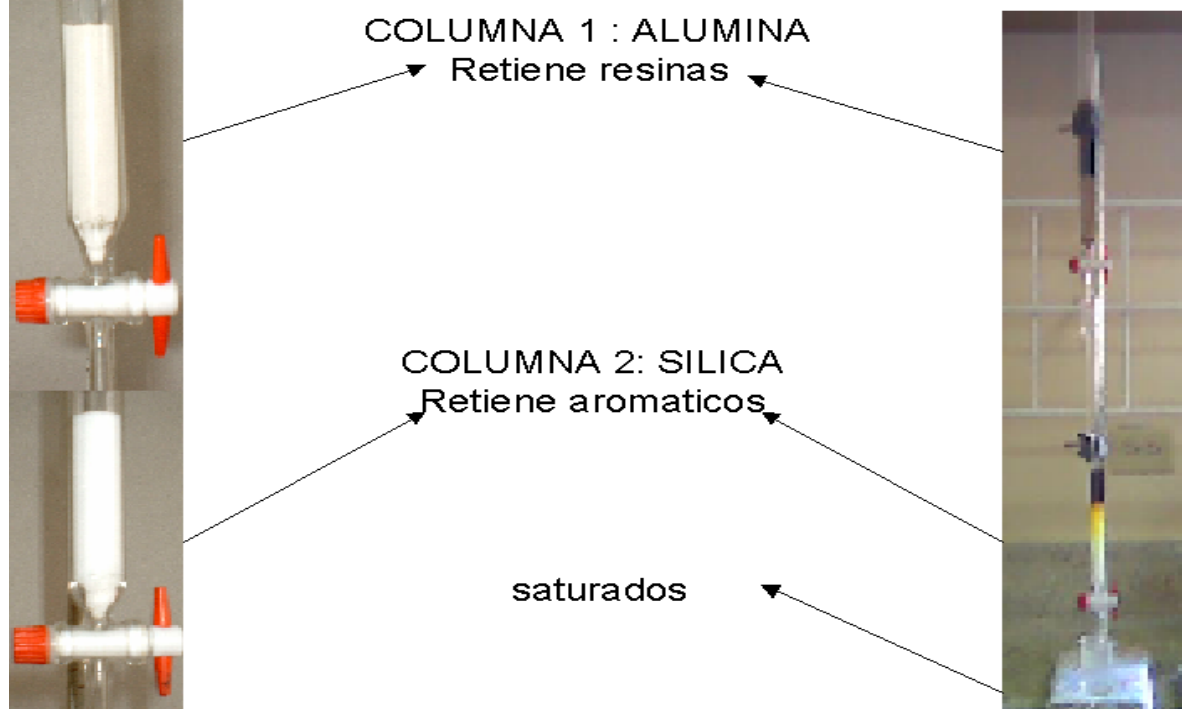
Los componentes malténicos se separaron mediante la cromatografía líquida de columna, la cual consta de dos columnas como se indica a continuación.

- ❖ La columna 1: Se empacó empleando aproximadamente 20g de alúmina.
- ❖ La columna 2: Se empacó empleando aproximadamente 10g de sílica.

Se colocó la columna 1 sobre la 2 como lo muestra la figura 18 y se humedecieron completamente con la adición de n-hexano, seguidamente se le adicionó la solución que contiene los componentes malténicos, la solución de la columna 1 eluye sobre la columna 2 y la solución que eluye de la columna 2 se recoge en un vaso de precipitado, el proceso termina cuando el solvente eluye en forma incolora, finalmente se procedió a cerrar la llave cortando el flujo de la fase móvil, de este modo se logra separar del primer fraccionamiento de las parafinas o los saturados.

Se desconectan las columnas, la columna que tiene alúmina retuvo los compuestos polares o resinas y la columna que tiene sílica retuvo los compuestos aromáticos. El contenido de cada columna se secó completamente a temperatura ambiente, luego se pesó tanto la alúmina como la sílica y por diferencia de peso se determinó el contenido de resinas y de aromáticos. Finalmente se procedió a desorber los compuestos (resinas) de la columna 1 con una mezcla 1:1 acetona /tolueno, la columna 2 se desorbió con tolueno para obtener los compuestos aromáticos.

Figura 18. Separación de la fracción malténica por cromatografía líquida de columna.



Los compuestos obtenidos como: saturados, aromáticos y resinas se analizaron mediante espectroscopía infrarroja y UV-Visible y se le realizaron pruebas químicas para verificar los grupos funcionales.

2.3.5 PRUEBAS DE CARACTERIZACIÓN PARA LAS FRACCIONES DEL ASFALTO OBTENIDAS POR EL MÉTODO CROMATOGRÁFICO

2.3.5.1 ANÁLISIS CUALITATIVO DE COMPUESTOS SATURADOS

La primera fracción obtenida, de la cromatografía líquida de columna correspondiente a los saturados, se realizaron las siguientes pruebas con el fin caracterizar y verificar la presencia de dichos compuestos.

❖ Prueba de Baeyer

A 2mL de agua, etanol o acetona, se le adicionan 5mL de muestra. Seguidamente se le adiciona gota a gota una solución de permanganato de potasio al 2%, se agita constantemente hasta que persista el color púrpura del permanganato. Si hay presencia de enlaces dobles o triples la solución de permanganato se decolora.

❖ **Prueba de solubilidad con ácidos y bases fuertes**

A un volumen igual de la prueba anterior se le adicionan 2mL de ácido sulfúrico concentrado, la ausencia de reacción indica la presencia de saturados debido a que dichos compuestos son inertes frente a la mayoría de los reactivos en condiciones normales de presión y temperatura. Se repite el mismo procedimiento utilizando otros solventes como ácido nítrico o hidróxido de sodio.

2.3.5.2 ANÁLISIS CUALITATIVO DE RESINAS

Las resinas que se encuentran retenidas en la alúmina, son extraídas con un mezcla 1:1 de acetona / tolueno. A estos compuestos se les realizaron las siguientes pruebas de identificación de núcleos para determinar la presencia de ácidos crecí licos.

❖ **Prueba de identificación de fenoles mediante la adición de hidróxido de sodio.**

Se toma 1ml de la muestra y se le adicionan 3mL de hidróxido de sodio 6N. La formación de un precipitado de color blanco en la fase acuosa, indica que se ha formado la sal de fenol.

❖ **Prueba para identificación de aromáticos.**

A 1mL de la muestra se le adicionó unos cristales de cloruro férrico, anhidro y 2.5mL de ácido clorhídrico concentrado, se agita la muestra. Si hay formación de un anillo de color rojo/ violeta, indica que se ha efectuado una halogenación en el anillo.

2.3.5.3 ANALISIS CUALITATIVO DE COMPUESTOS AROMÁTICOS

Los compuestos aromáticos son la fracción retenida por la sílica en la separación cromatográfica de los asfaltos. Su desorción se realiza mediante la adición de tolueno. Para la caracterización e identificación de los compuestos aromáticos se efectuaron las siguientes pruebas:

❖ **Reacción de L' Rosen para la identificación de aromáticos**

A un mL de muestra se acidifica con ácido sulfúrico, se le adiciona 0.5mL de formaldehído y se agita. La presencia de aromáticos se detecta por un cambio en la coloración de la solución.

❖ **Reacción Hoffmann.**

2mL de muestra se calientan suavemente, luego se adicionan 2mL de yoduro de metilo, seguidamente se le añade poco a poco, una solución de hidróxido de potasio diluido hasta formar una pasta espesa. La coloración roja de la solución y el desprendimiento de un olor picante indica la presencia de anillos piridínico.

3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

3.1 ANÁLISIS DEL POLÍMERO, POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD

Para el estudio del polímero se realizaron pruebas físicas y químicas, para determinar el comportamiento reológico cuando es empleado como aditivo en el proceso de la modificación del asfalto, se utilizaron técnicas de espectroscopia infrarroja IR para identificar los grupos funcionales presentes en el polímero.

3.1.1 ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL POLÍMERO POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD (PBD)

El polímero, polietileno de baja densidad proviene del reciclado de bolsas plásticas de uso doméstico. El polímero tiene una estructura ramificada, las ramificaciones (zonas amorfas), dificultan la aproximación de las cadenas dejando grandes espacios entre ellas generando así su baja densidad, además las fuerzas de atracción entre cadenas adyacentes no pueden actuar plenamente y por consiguiente, al disminuir la fuerza de cohesión y por acción del calor se separan con mayor facilidad las cadenas y el polímero se reblandece a menor temperatura. Las propiedades físicas y químicas inherentes al polímero se resumen en la tabla 3.

Tabla 3. Propiedades físicas y químicas del polímero Polietileno de baja densidad.

PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD				
Estado		Sólido		
Color		Semicristalino		
Olor		Inodoro		
Densidad		0.92 cm ³ a 25 °C		
Índice de refracción		1.5 a 25 °C		
Punto de fusión		115°C		
SULUBILIDAD				
Hidrocarburos ACPM, petróleo, gasolina	Solventes orgánicos Benceno, hexano	Ácidos H ₂ SO ₄ , HNO ₃ , HCl	Bases NaOH, NH ₄ OH	Agua
Insoluble	Insoluble	Insoluble	Insoluble	Insoluble

Los resultados de las pruebas químicas del polímero reciclado, descrita en la sección 2.3.1.1, referente a la prueba de Baeyer, para determinar insaturaciones

dio negativa, ya que la solución de permanganato de potasio no reacciona, debido a que no hay insaturaciones. En cuanto a las pruebas de solubilidad según la tabla 3, los resultados son negativos, debido a la poca reactividad que tienen los compuestos saturados o parafinas a temperatura ambiente frente a los ácidos, bases fuertes y soluciones salinas.

3.1.2 ANÁLISIS DEL ESPECTRO INFRARROJO DEL POLÍMERO POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD

El polietileno de baja densidad está conformado por compuestos saturados o parafinas, las cuales conforman una estructura amorfa debido a las ramificaciones o sustituyentes como metilos, etilos, propilos entre otros. Cada una de estas ramificaciones tiene bandas de absorción en el infrarrojo que son características de los compuestos saturados. Las principales bandas de absorción en el Infrarrojo se resumen en la tabla 4 y en la figura 19.

Figura 19. Espectro infrarrojo del Polietileno de baja densidad

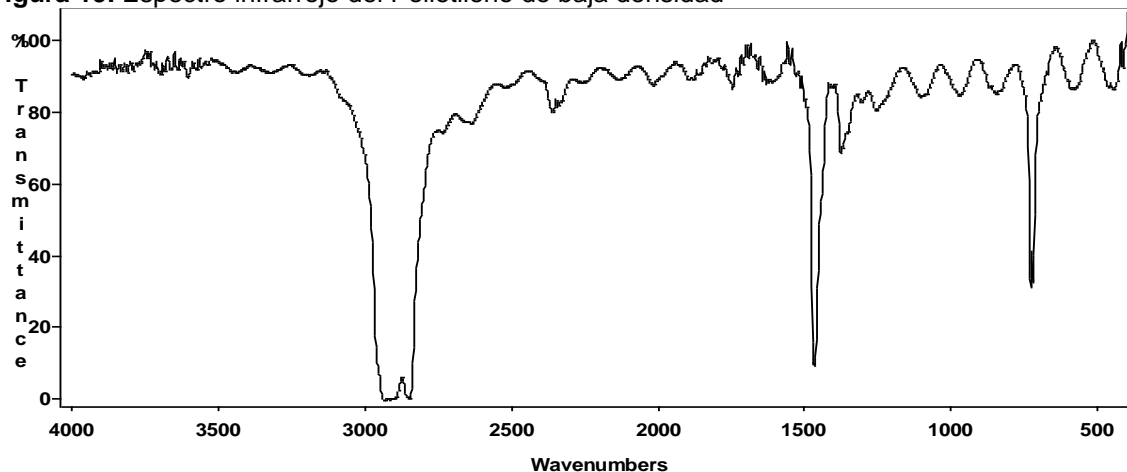


Tabla 4. Bandas características del espectro Infrarrojo para el Polietileno de baja densidad.

ABSORCIÓN(cm^{-1})	ENLACE	GRUPO FUNCIONAL
3183	Tensión C-H	Epóxidos
2933 y 2852	Tensión C-H	Metil y metileno
1473,1376,1256	Deformación C-H simétrica	Metileno y metil
972 y 846	Tensión C-O	Epóxidos
729	Deformación de balanceo C-H	Metileno
579,446	Deformación C-C	Etil, metil

En el espectro infrarrojo se pueden identificar la presencia de compuestos saturados, debido a las bandas de absorción características tales como:

A 3183 cm^{-1} aparece una banda de tensión C-H, debida a la presencia de compuestos epóxidos, esta banda se complementa con dos bandas de absorción que aparecen a 972 y 846cm^{-1} debidas a la deformación C-O.

Las bandas a 2933 y 2852 cm^{-1} debidas a las vibraciones tensión simétrica y asimétrica de C-H, son típicas de metilenos o metilos de hidrocarburos saturados, estas se complementan con bandas que aparecen cerca de 1473 , 1376 y 1256 cm^{-1} , correspondientes a las vibraciones debidas a las deformaciones simétricas y asimétricas del enlace C-H.

La banda de absorción a 729 cm^{-1} debidas a las deformaciones de balanceo del C-H se atribuye a los metilenos.

A 579 y 446 cm^{-1} se localiza dos bandas de deformación C-C que corresponden a la presencia de grupos etil y metil.

3.2 ESTUDIO DEL ASFALTO ORIGINAL

3.2.1 ANÁLISIS PRELIMINAR DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL ASFALTO ORIGINAL

La calidad de un cemento asfáltico viene afectada por las propiedades del crudo de origen, que puede variar mucho aun dentro de un mismo yacimiento y también por el sistema de refinación que se haya empleado.

El cemento asfáltico ideal debe cumplir con unos requerimientos reológicos mínimos, durante el proceso de elaboración, puesto al servicio, que garantice un buen comportamiento, una vez se encuentre sometida a la acción del transito y clima.

Para evaluar la calidad de cualquiera de los tipos de asfalto se han ideado una serie de ensayos físicos y químicos de laboratorio de acuerdo a las normas INVIAS y ASTM.

En la tabla 5 se presentan los resultados de los ensayos realizados en el laboratorio de suelos y pavimentos de la Facultad de Ingeniería Civil- Departamento de Geotecnia.

De acuerdo a su consistencia definida con base al ensayo de penetración, se clasifica dentro de los cinco grados de asignación corriente de asfaltos,

correspondiente al grado AC 85-100, que significa cemento asfáltico con penetración 85 y 100 décimas de milímetro (Normas: ASTM, INVIAS).

Tabla 5. Propiedades físicas de consistencia y peso específico del cemento asfáltico original.

PROPIEDAD FISICA	VALOR	NORMA
Viscosidad Saybolt 60° C, 45 min	97391 cP (973.91 P)	I.N.V. E - 714 ASTM D - 88
Penetración a 25° C, 100g, 5s	100 (0.1 mm)	I.N.V. E - 706 ASTM D - 5
Punto de Ablandamiento (agua destilada)	46.1 ° C	I.N.V. E - 712 ASTM D - 36
Ductilidad a 25° C, 5 cm/min	+100 cm	I.N.V. E - 702 ASTM D - 113
Peso específico del asfalto sólido a 25° C	1.00986 g/mL	I.N.V. E - 707 ASTM D - 70

Actualmente es uno de los grados mas empleados en los pavimentos asfálticos. De acuerdo a los demás resultados estos están dentro del rango según especificaciones de las normas INVIAS y ASTM.

3.2.2 ANÁLISIS DEL ESPECTRO INFRARROJO DEL ASFALTO ORIGINAL

El asfalto puede ser considerado como una mezcla compleja de hidrocarburos, por lo que el análisis químico se reporta en términos de dos fracciones principales; la primera se refiere a la fracción de los **asfaltenos**, la segunda fracción ligera que corresponde a los **maltenos**, esta comprende tres fracciones principales: **parafinas, resinas y aceites aromáticos**.

De acuerdo a los estudios espectroscópicos realizados a diferentes asfaltos en el laboratorio de química Organometálica del Departamento de Química, los principales constituyentes del asfalto presentan las siguientes absorciones típicas.

En la tabla 6 se resumen los grupos más importantes que constituyen los componentes del asfalto y sus principales absorciones en el infrarrojo (cm^{-1}).

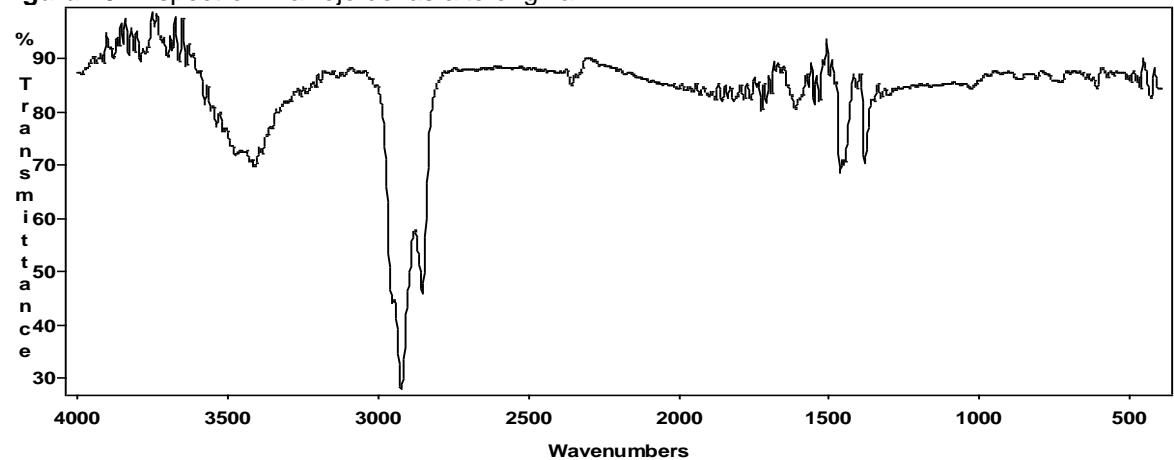
Estos estudios han permitido elaborar una carta de referencia para estudiar la composición química de los asfaltos colombianos mediante la ESPECTROSCOPIA INFRARROJA POR TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER. Dicho estudios ha sido la base para comparar los resultados de esta investigación.

Tabla 6. Grupos principales constituyentes de un asfalto y sus absorciones principales en el infrarrojo (cm^{-1}).

ENLACE	GRUPO FUNCIONAL	ABSORCIÓN (cm^{-1})
C-H, C-C, CH_3	Saturados	2960-2850, 1470-1350, doblete a 1380
Anillos	Naftenos aromáticos	3120-3000, 1600 y 1500
Anillos sustituidos	Polares aromáticos N-H C-N	2000-1600, 870-675 1650-1580 1340-1020
Metal-Oxigeno	Asfaltenos	Por debajo de 700
C-O	Ácidos carboxílicos Éteres y esterés	1260-100
C=O	Ácidos carboxílicos Cetonas ,esterés Aldehídos	1760-1670

En la figura 20 aparece el espectro infrarrojo del asfalto original y las bandas de absorción se resumen en la tabla 7.

Figura 20. Espectro infrarrojo del asfalto original



En el espectro se observan cuatro bandas características a: 2928 cm^{-1} y 2852 cm^{-1} , 1463 cm^{-1} y 1381 cm^{-1} , son debidas a los enlaces de tensión y flexión C-H de compuestos saturados, los cuales contribuyen a dar flexibilidad al asfalto y son necesarios para protegerlo en cierto modo de la oxidación por tratarse de parafinas.

En cuanto aromáticos se aprecian dos bandas características a 1613 cm^{-1} se pueden atribuir a vibraciones de tensión tipo C=C del anillo y las vibraciones entre $750-700 \text{ cm}^{-1}$, se atribuyen a la deformación C-H fuera del plano.

Tabla 7. Absorciones características en el infrarrojo del asfalto original.

ABSORCION (cm ⁻¹)	ENLACE	GRUPO FUNCIONAL
2928-2922 y 2852	Tensión C-H	Saturados
1700	Tensión C=O	Ácidos carboxílicos, cetonas esteres y aldehídos
1613	Tensión C=C	Aromáticos
1463	Flexión C-H intermedio (CH ₂)	Saturados
1381	Oscilaciones CH terminales (CH ₃)	Saturados
1014	iones con azufre	Sulfuros
870 – 810	Metales (Vanadio)	
750 – 700	Deformación C-H	aromáticos y saturados
650	Oscilaciones C-H intermedios (CH ₂)	
606 – 465	-M (V, Fe, Cu, Ni)	Porfirinas

Alrededor de 1700 cm⁻¹ aparece una banda débil de tensión C=O correspondiente a un grupo carbonilo de: aldehídos, cetonas, ácidos carboxílicos, o esterres que son compuestos, característicos de los asfaltenos.

Otro tipo de bandas que aparecen entre 870-810 cm⁻¹ y 606-465 cm⁻¹, se pueden atribuir a enlaces C-O-M correspondiente a compuestos organometálicos, donde CO representa el compuesto orgánico y M el metal como: vanadio, hierro, cobre y níquel.

3.2.3 SEPARACIÓN DEL ASFALTO EN ASFALTENOS Y MALTENOS, MEDIANTE PRECIPITACIÓN CON N-HEXANO

El asfalto esta constituido por hidrocarburos saturados, y compuestos aromáticos. El asfalto es soluble en n-pentano, n-hexano o n-heptano y se separa en dos grupos importantes: **asfaltenos** (fracción insoluble, de alto peso molecular), **maltenos** (muy solubles, de bajo peso molecular). La separación se llevo acabo utilizando n-hexano como solvente, en las cuales por un proceso de filtración se logra separar el precipitado (asfaltenos) de la parte líquida (maltenos). El precipitado obtenido es un sólido de color negro que corresponde a los asfaltenos. La fracción líquida viscosa, es de color marrón oscura corresponde a los maltenos.

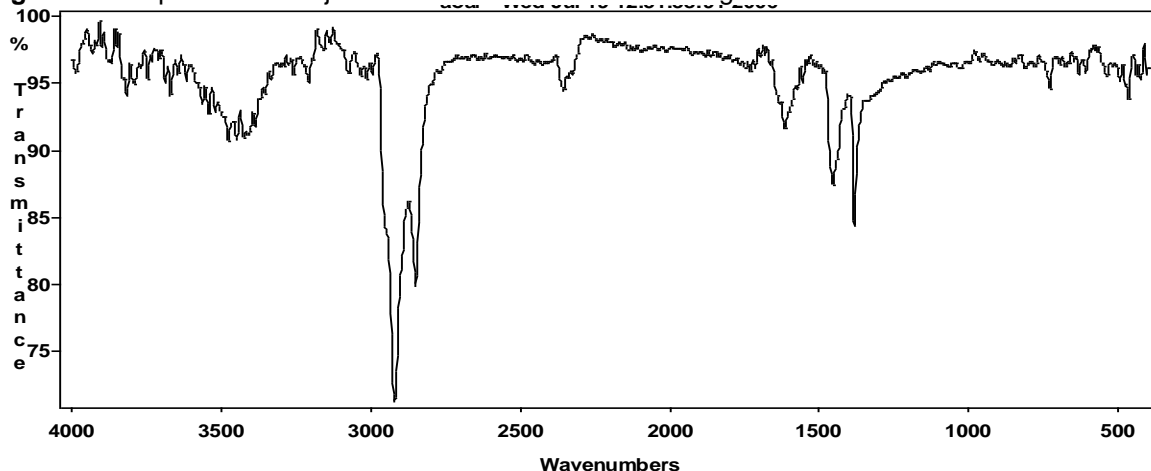
3.2.3.1 ESTUDIO DE LA FRACCIÓN ASFALTENICA DEL ASFALTO ORIGINAL POR ESPECTROSCOPIA INFRARROJA

Los asfaltenos son materiales amorfos, de alto peso molecular, es la fase sólida y dispersa del asfalto, precipita como un todo en solventes como hidrocarburos de bajo punto de ebullición como n-pentano, hexano, heptano, entre otros.

Diversos estudios analíticos muestran que los asfaltenos están formados por sistemas de anillos aromáticos poli nucleares formados principalmente por átomos de carbono, hidrógeno, en pequeñas proporciones se encuentra oxígeno azufre y nitrógeno. También contiene trazas de metales como hierro, vanadio y níquel formando complejos organometálicos.

En la figura 21 y en la tabla 8 aparece el espectro con las bandas de absorción, donde se pueden apreciar las principales absorciones de grupos funcionales como saturados, aromáticos, entre otros.

Figura 21. Espectro infrarrojo de los asfaltenos del asfalto original



El espectro de la fracción asfáltica presenta las siguientes bandas representativas:

Tabla 8. Bandas características del espectro Infrarrojo para asfaltenos del asfalto original.

ABSORCIÓN (cm ⁻¹)	ENLACE	GRUPO FUNCIONAL
3447	Tensión asimétrica grupos -N-H	Aminas
2920 y 2849	Tensión -C-H debida a -CH ₃ , -CH ₂ , CHO	Alcanos
2359	Banda fuerte debida a ArC≡N	Nitrilos, aromáticos
1635	Deformación en tijera fuerte, vibración N-H	Aminas
1539	Tensión C=C	Aromáticos
1456 y 1383	Deformación asimétrica del -C-H metilos.	Alcanos
608	Vibración de tensión C-S banda débil.	Mercaptanos, tioeteres
870 – 810	Metales (Vanadio)	

A 2920 cm^{-1} y 2849 cm^{-1} aparecen dos bandas bien definidas, debidas a la absorción de tensión del enlace C-H característica de los alcanos. Estas bandas se complementan con dos bandas que aparecen a 1456 cm^{-1} y 1383 cm^{-1} que corresponden a absorciones de deformación asimétrica del enlace C-H de grupos metilos.

A 1539 cm^{-1} se presenta la absorción de tensión C=C característica de anillos aromáticos.

La banda de tensión asimétrica N-H que aparece a 3447 cm^{-1} indica la presencia de nitrógeno posiblemente del medio ambiente. Del mismo modo aparecen dos bandas de absorción: de tensión a 2359 cm^{-1} debida al enlace $\text{ArC}\equiv\text{N}$, que es característica de grupos nitrilos, la otra banda aparece a 1635 cm^{-1} corresponde a una vibración de formación en tijera debida al enlace N-H.

La vibración de tensión C-S es una banda muy débil que aparece a 608 cm^{-1} , posiblemente corresponden a grupo funcionales de mercaptanos o tioéteres.

3.2.3.2 SEPARACIÓN DE LOS MALTENOS POR CROMATOGRAFÍA DE COLUMNA

Los maltenos son macromoléculas solubles en hidrocarburos saturados de bajo punto de ebullición. Están conformados principalmente por resinas, aromáticos y saturados, las cuales pueden ser fraccionados mediante la elusión de n-hexano a través de una columna de cromatografía, empacada con alúmina y sílica. La alúmina retiene los compuestos polares, en este caso resinas y la sílica retiene los compuestos no polares en este caso aromáticos y la fracción que no es retenida corresponde a los saturados de cadena larga.

En la tabla 9 se aprecian algunas diferencias de las fracciones separadas del asfalto original por cromatografía de columna Norma ASTM D-2007. Los **asfaltenos** son los componentes sólidos del asfalto, seguido de las **resinas**, esto son los responsables de la consistencia del asfalto y los **aromáticos** y las **saturados**, son la parte semisólida del asfalto en las cuales están inmersos asfaltenos y resinas. En relación con la composición porcentual, la fracción saturada se encuentra en mayor proporción con un 45% p/p, esto implica que el asfalto tiende a ser blando y lo hace más resistente al envejecimiento.

En la tabla 10 aparecen los resultados de las pruebas de caracterización de los componentes del asfalto original.

El resultado positivo de la reacción L' Rosen y la identificación de fenoles mediante la adición de hidróxido de sodio, indica la presencia de anillos

aromáticos debidos a grupos fenolicos, xilenoles, cresílicos, entre otros. La fusión de dichos compuesto es lo que conforman las resinas.

Tabla 9. Características de las fracciones separadas del asfalto por cromatografía de columna.

Compuesto	Apariencia	Color	% p/p
Asfaltenos	Sólido	Negro	17
Resinas	Sólido	Marrón	11
Aromáticos	Semisólido-viscoso	Marrón anaranjado	27
Saturados	Semisólido-viscoso	Amarillo oscuro	45

Tabla 10. Pruebas de caracterización de compuestos malténicos.

Compuesto	Prueba	Resultado
Resinas	Reacción de L'Rosen para identificación de aromáticos	+
	Identificación de fenoles mediante la adición de hidróxido de sodio	+
Aromáticos	Reacción de Hoffman	+
	Reacción de L'Rosen	+
Saturados	Baeyer	-
	Solubilidad con ácidos y con bases fuertes	-

Los compuestos aromáticos de los maltenos presentan un color característico entre marrón y anaranjado, además el resultado positivo de la reacción de Hoffman y la reacción de L' Rosen, indican la presencia de compuestos aromáticos.

Los compuestos saturados se identifican fácilmente, con la prueba de Baeyer ya que el resultado negativo indica la ausencia de insaturaciones, es decir que los compuestos saturados carecen de dobles enlaces que puedan reaccionar. Además los compuestos saturados son pocos reactivos, a temperatura ambiente no son afectados por ácidos y bases, agentes oxidantes o reductores fuertes; por lo tanto las pruebas resultaron negativas.

3.2.3.2.1 ANÁLISIS DE ESPECTROSCOPÍA INFRARROJA PARA LA FRACCIÓN DE LAS RESINAS

Las resinas o aromáticos polares tienen un peso molecular aproximado de 1.100 UMA, están compuestas por núcleos aromáticos altamente condensados y grupos funcionales que contienen heteroátomos como nitrógeno, azufre y oxígeno. Los

principales compuestos que hacen parte de las resinas son: los fenoles, cresoles, xilenoles, entre otros, que al fusionarse contribuyen a la formación de los ácidos cresílicos, los cuales le dan a la fracción el aspecto resinoso.

Las bandas de absorción que se esperan encontrar en las resinas según el espectro infrarrojo de la figura 22 se resumen en la tabla 11.

Figura 22. Espectro Infrarrojo de resinas del asfalto original.

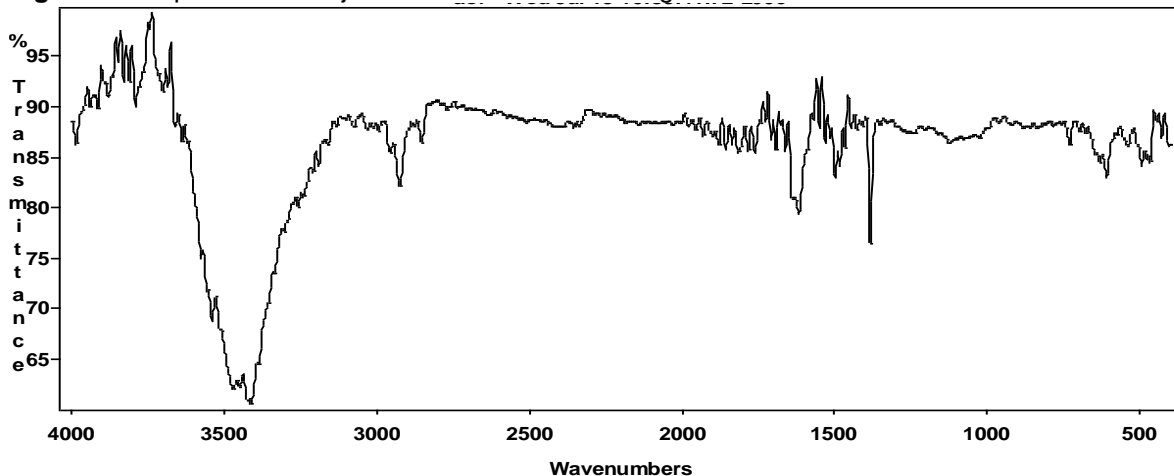


Tabla 11. Bandas características del espectro Infrarrojo para resinas del asfalto original

ABSORCIÓN (cm^{-1})	ENLACE	GRUPO FUNCIONAL
3412	Tensión O-H	Fenoles
2925, 2852	Tensión C-H (CH_3 , CH_2 , C-H, CHO)	alcanos
2924-2853	Vibración de tensión C-H	ciclohexanos
1616	Vibración de tensión C=C	aromáticos
1503, 1434	Armónicos o sobretonos, tensión C=C	aromáticos
608	Vibración de tensión C-S	Mercaptanos o tío éteres

La absorción a 3412 cm^{-1} corresponde a la tensión de alargamiento del OH, es una banda ancha comprendida entre 3550 cm^{-1} y 3450 cm^{-1} , posiblemente se puede atribuir a compuestos fenólicos, cresílicos, entre otros.

Se presentan tres bandas de absorción a 2925 cm^{-1} y 2852 cm^{-1} debidas a la tensión C-H, estas corresponden a sustituyentes alifáticos de cadena larga.

En cuanto a los aromáticos se aprecian tres bandas características: a 1616 cm^{-1} se pueden atribuir a vibraciones de tensión tipo C=C del anillo y las vibraciones a

1503 cm^{-1} , 1434 cm^{-1} , se atribuyen a sobretonos y armónicos de tensión C=C de compuestos aromáticos.

3.2.3.2.2. ANÁLISIS DE ESPECTROSCOPIA INFRARROJA PARA AROMÁTICOS

Generalmente la fracción aromática de los maltenos esta constituida principalmente por hidrocarburos aromáticos (naftenos), hidrocarburos cíclicos no bencenoides y también por bases nitrogenadas, como la piridina, pirrol, indol, quinoleina, entre otros, que al fusionarse entre si forman una especie de macromolécula tipo porfirina.

Las bandas de absorción que se esperan encontrar en el espectro infrarrojo aparecen en la figura 23 para la fracción aromática y se resumen en la tabla 12.

Figura 23. Espectro Infrarrojo de Aromáticos del asfalto original.

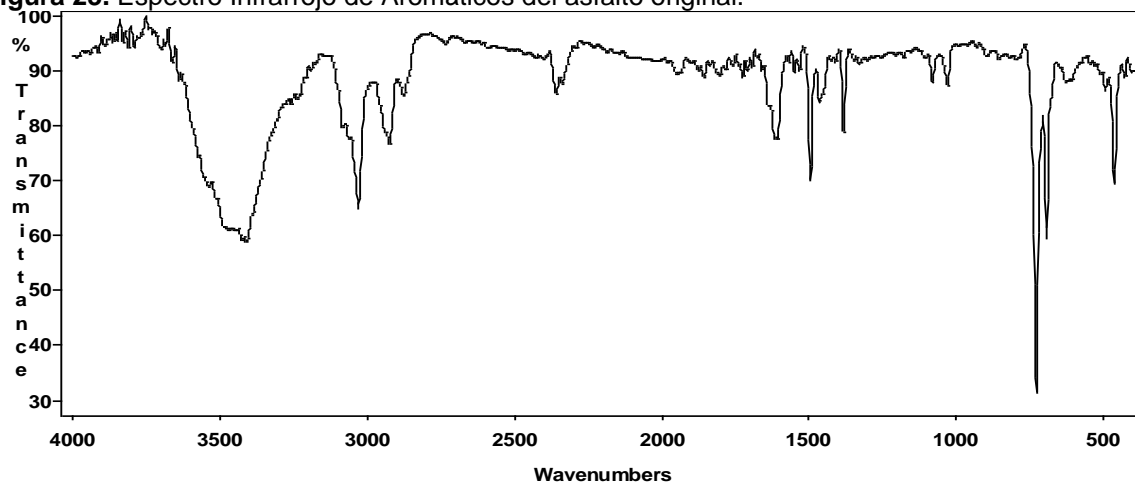


Tabla 12. Bandas características del espectro Infrarrojo para aromáticos del asfalto original

ABSORCIÓN (cm^{-1})	ENLACE	GRUPO FUNCIONAL
3410	Tensión N-H	Pirrol, porfirinas
3029	Tensión C-H	Aromáticos
2924	Tensión C-H (CH_3 , CH_2 , C-H)	Alcanos
2878	Tensión asimétrica CH_3	Alcanos
1463	Deformación asimétrica C-H	Antracenos
1900 - 1700	Tensión C=O	Aryl, ácidos α , β insaturados
1495,1463	Tensión C=C	Aromáticos pirroles
694, 728	Deformación C-H	Antracenos

En el espectro de la figura 23 correspondiente a la fracción aromática de los maltenos del asfalto original, se pueden distinguir las siguientes bandas:

En la región comprendida entre 3600 y 3400 cm^{-1} , se aprecia una tensión de alargamiento debido al enlace N-H, también aparecen dos bandas a 1495 y 1463 cm^{-1} , que corresponden a vibraciones de tensión en el plano de C=C de anillos aromáticos, posiblemente estas bandas se puede atribuir a pirroles di sustituidos, piridinas, o quinoleinas.

A 3029 cm^{-1} aparecen una banda bien definida, debidas a la absorción de tensión del enlace C-H característica de los aromáticos. Esta banda se complementan con una banda que aparecen a 1463 cm^{-1} que corresponden a absorciones de deformación asimétrica del enlace C-H, posiblemente del antraceno, la presencia de este compuesto se puede corroborar con dos bandas fuertes de deformación C-H que aparecen a 694 y 728 cm^{-1} .

Los alcanos presentan dos bandas de absorción a 2924 y 2878 cm^{-1} debidas a la tensión C-H y tensión asimétrica de CH_3 , estas corresponden a compuestos saturados de cadena larga.

En la región comprendida entre 1900 y 1700 cm^{-1} aparece una banda de tensión C=O cm^{-1} , posiblemente corresponde a ácidos α , β insaturados.

3.2.3.2.3. ANÁLISIS DE ESPECTROSCOPIA INFRARROJA PARA PARAFINAS O SATURADOS

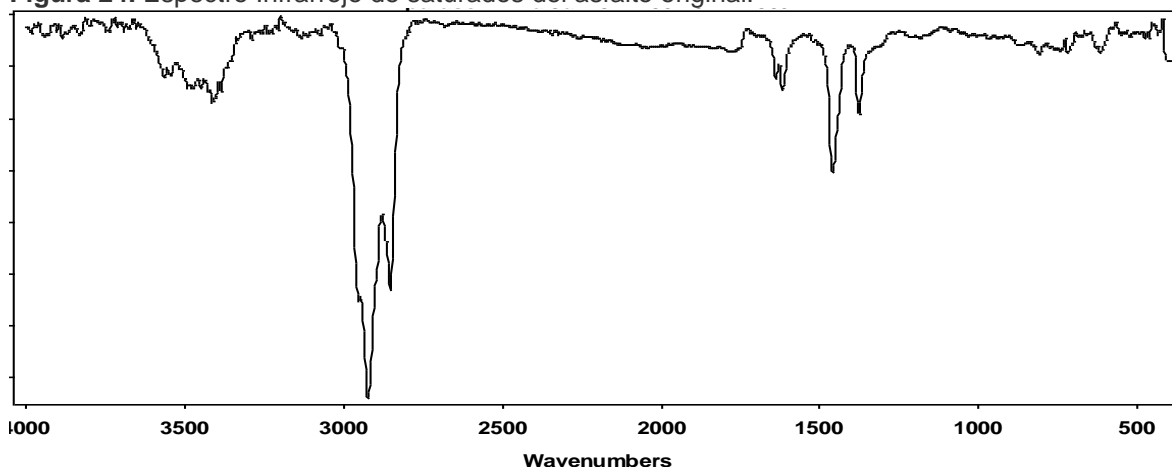
Las parafinas o saturados son hidrocarburos que solo contienen enlaces sencillos, formando cadenas lineales y ramificadas, además se encuentran saturados cíclicos en pequeña proporción, todos ellos constituyen la clase más simple y menos reactiva de los compuestos orgánicos, son compuestos de baja polaridad; por lo tanto no son absorbidos por la alúmina, ni por la sílica gel, de ahí que a la hora de hacer la separación de los maltenos por cromatografía de columna es la primera fracción eluida.

Los hidrocarburos saturados o parafinas presentan ciertas absorciones típicas en la región del infrarrojo cuyo espectro aparece en la figura 24. Las bandas mas representativas se resumen en la tabla 13.

Tabla 13. Bandas características del espectro Infrarrojo para Saturados del asfalto original

ABSORCIÓN (cm ⁻¹)	ENLACE	GRUPO FUNCIONAL
2922	Tensión asimétrica C-H	Alcanos
2852	Tensión simétrica C-H	Alcanos
1617	Tensión media C-C	Alcanos
1459, 1377	Deformación C-H	Alcanos
725	Deformación de balanceo C-H del -CH ₂ .	Metileno
650	Oscilaciones C-H intermedios (CH ₂)	Alcanos

Figura 24. Espectro Infrarrojo de saturados del asfalto original.



Las bandas a 2922 y 2852 cm⁻¹ debidas a las vibraciones tensión simétrica y asimétrica de C-H, son típicas de metilenos o metilos de hidrocarburos saturados, estas se complementan con bandas que aparecen cerca de 1459 y 1377 cm⁻¹, correspondientes a las vibraciones debidas a las deformaciones simétricas y asimétricas del enlace C-H.

A 1617 cm⁻¹ se localiza una banda de tensión media C-C que corresponde a saturados alifáticos. Las absorciones a 725 y 650 cm⁻¹ debidas a las deformaciones de balanceo del C-H se atribuyen a los metilenos.

3.2.3.3 ANÁLISIS DE ESPECTROSCOPIA UV-VIS PARA LA FRACCIÓN MALTÉNICA DEL ASFALTO ORIGINAL

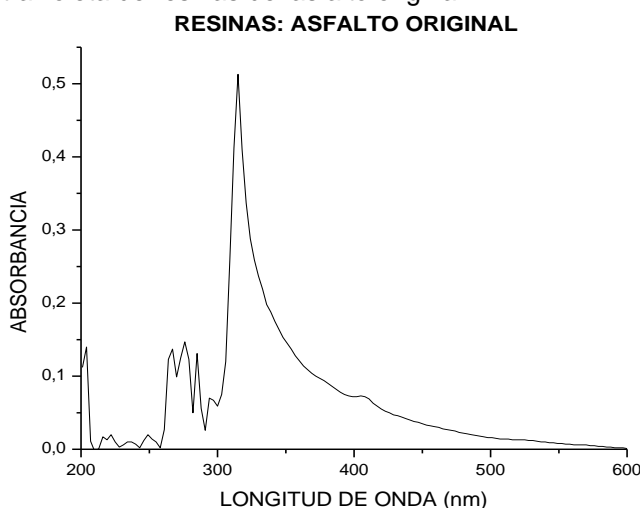
La mayoría de los componentes de la fracción malténica están conformados por compuestos coloridos que tienen sistemas conjugados tan extendidos que sus absorciones en el UV se extiende en la región visible.

3.2.3.3.1 ANÁLISIS DEL ESPECTRO ULTRAVIOLETA VISIBLE PARA RESINAS

Las resinas o polares aromáticos, son compuestos orgánicos constituidos por grupos funcionales como OH, CO, SH, Ar-OH. Estas moléculas también están constituidas, por ácidos cresílicos, los cuales son derivados de compuestos como el fenol, cresol y xilenol. Estos compuestos principalmente presentan transiciones de tipo $\pi \rightarrow \pi^*$, ocasionadas por los electrones π (π) conjugados.

En la figura 25 aparece el espectro ultravioleta de la fracción resinosa del asfalto original.

Figura 25. Espectro ultravioleta de resinas del asfalto original.



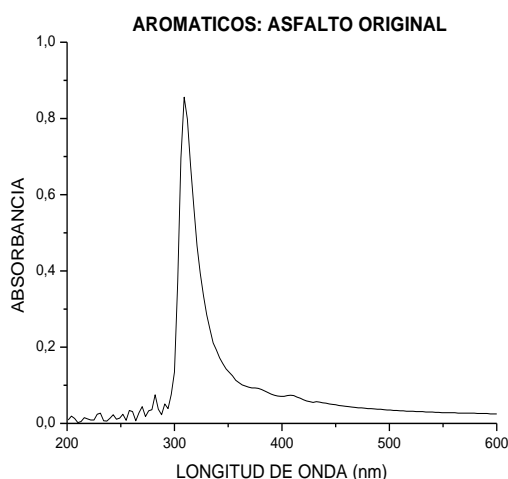
Según el espectro de la figura 25 las absorciones mas representativas, están dadas a entre 300-350 nm, que se deben a transiciones tipo $n \rightarrow n^*$, presentadas por los electrones $\pi(\pi^*)$ conjugados de las cadenas de anillos aromáticos policonjugados; la banda de absorción en forma de hombro que aparece a 400 nm, se debe a transiciones del tipo $n \rightarrow n^*$ ocasionadas por la presencia de los grupos auxocrómicos (OH, NH₂), unidos a los anillos aromáticos que poseen pares de electrones libres capaces de interactuar con los electrones $\pi(\pi^*)$ del anillo, desplazando las bandas representativas E (etilénica) y B (bencenoide) de los anillos aromáticos hacia longitudes de onda mayores, esto se debe a que las resinas están constituidas por grupos funcionales OH, CO, SH, Ar-OH y ácidos cresílicos, la banda presentada a 260 nm puede ser causada por la absorción del solvente (mezcla tolueno/acetona en relación 1:1).

3.2.3.3.2. ANÁLISIS DEL ESPECTRO ULTRAVIOLETA VISIBLE PARA AROMÁTICOS

La fracción aromática está conformada por sistemas de anillos no bencenoides con heteroátomos principalmente nitrógeno, unidos mediante dobles enlaces conjugados forman compuestos como el pirrol, la piridina, indol, quinolina, entre otras, que pueden encontrarse fusionados formando macromoléculas de tipo porfirina. Por lo tanto las transiciones electrónicas, que se esperan encontrar debidas a los dobles enlaces, es la transición $n \rightarrow \pi^*$.

En la figura 26 aparece el espectro ultravioleta de los aromáticos del asfalto original.

Figura 26. Espectro ultravioleta de aromáticos del asfalto original.



Las absorciones presentadas a longitudes de onda cercanas a 325 nm, se deben principalmente a transiciones del tipo $n \rightarrow n^*$ debidas a las bases nitrogenadas pertenecientes a esta fracción, ya que los grupos aromáticos y heteroátomos (nitrógeno oxígeno y azufre) unidos por dobles enlaces conjugados, forman un conglomerado de anillos heterocíclicos de tipo porfirina.

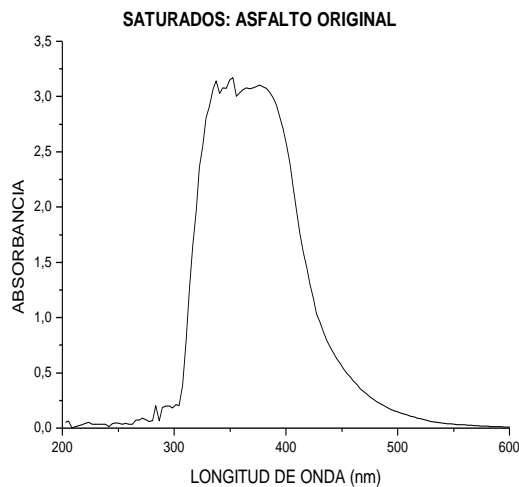
3.2.3.3.3. ANÁLISIS DEL ESPECTRO ULTRAVIOLETA VISIBLE PARA PARAFINAS O SATURADOS

En la figura 27 aparece el espectro ultravioleta visible, para la fracción saturada del asfalto original.

Los compuestos saturados por estar formados por enlaces simples tipo sigma (σ) son muy fuertes, por lo tanto, la energía requerida para una excitación $\sigma \rightarrow \sigma^*$ es relativamente grande.

Las bandas de absorción aparecen en la región del vacío (región de mayor energía) a longitudes de onda menores a 150nm, luego las absorciones que se dan a 260-300 nm y 350-400 nm presentadas en la figura 27 para componentes saturados, no son las esperadas, ya que se dan a longitudes de onda mayores. El desplazamiento a mayores longitudes de onda posiblemente se debe al incremento en el número de carbonos en los compuestos saturados.

Figura 27. Espectro ultravioleta de saturados del asfalto original.



3.3 ANÁLISIS DE LA MODIFICACIÓN DEL ASFALTO CON EL POLÍMERO POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD (PBD)

El rango de temperatura de mezclado para la modificación del asfalto es de 140°C a 150°C, se determinó con base a la curva reológica del asfalto original (anexo: 7). El asfalto se modificó a diferentes concentraciones de polímero con la finalidad de escoger la concentración de polímero en las cuales el asfalto mejora sus propiedades físicas y químicas.

3.3.1. ANÁLISIS PRELIMINAR DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL ASFALTO MODIFICADO A DIFERENTES CONCENTRACIONES DE POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD (PBD)

En la tabla 14 aparecen los resultados de los ensayos de las pruebas físicas, como: penetración, viscosidad, densidad, punto de ablandamiento y ductilidad. Estos ensayos permiten evaluar la consistencia del asfalto.

Según los resultados reportados en la tabla 14, se puede deducir que los asfaltos con concentraciones de polímero de 0 a 2.0%, de acuerdo a su consistencia, definida según el ensayo de penetración están dentro en el grado (AC 85-100 mm) más utilizado en la pavimentación de vías.

La viscosidad también ayuda a corroborar la consistencia del asfalto ya que a medida que aumenta la concentración del polímero aumenta la viscosidad. Por lo tanto para continuar el estudio del asfalto modificado se escogen dos concentraciones: 0.5% y 1.5% de polímero debido a que muestran mejores resultados y además por los bajos costos.

Tabla 14. Propiedades físicas de consistencia del asfalto modificado con Polietileno de baja densidad (PBD).

PBD (%)	PENETRACIÓN a25°C, 100g, 5s. (0.1 mm)	VISCOSIDAD A 60°C (cP)	DENSIDAD A 25 °C	PUNTO DE ABLANDAMIENTO	DUCTILIDAD (cm)
0	100	97391	1.0099	46.1	+100
0.5	85	122917	1.0079	44.8	+100
1.0	90	140588	1.0068	44.8	+100
1.5	96	145625	1.0065	44.7	+100
2.0	98	145620	1.0059	44.6	+100
3.0	107	145469	1.0047	43.8	+100
5.0	117	144063	1.0031	43.2	+100

3.3.2. ANÁLISIS DEL ASFALTO ORIGINAL Y MODIFICADO CON POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD (PBD), POR MICROSCOPIA DE FLUORESCENCIA

Por medio de la técnica de microscopia de fluorescencia se tomaron microfotografías a cada muestra de asfalto sin modificar y modificado, con el fin de observar la homogeneidad de la mezcla.

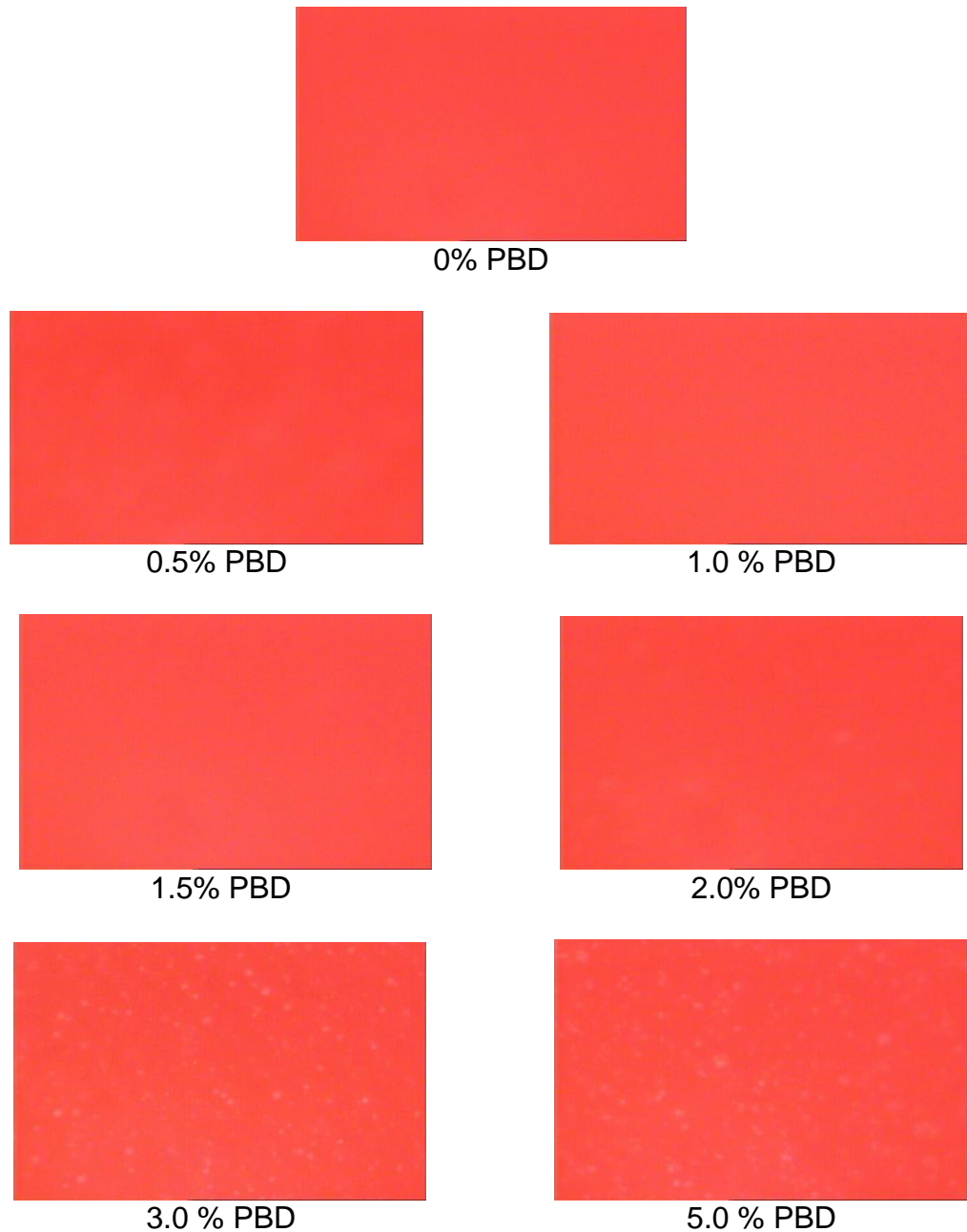
En la figura 28 se muestran los resultados de las microfotografías a diferentes concentraciones de polímero.

Las microfotográficas revelan una superficie homogénea desde el asfalto original hasta la concentración de la mezcla con el 2.0% de Polietileno de baja densidad (PBD), es decir, la mezcla asfalto-polímero no presenta mallas o redes que rodeen el asfalto.

A concentraciones de polímero superiores al 2.0% la superficie de la mezcla es heterogénea debido a las redes o mallas ocasionadas por las altas concentraciones del polímero, esto implica la separación del polímero y el asfalto;

por lo tanto incide en forma negativa en las propiedades físicas, químicas y reológicas del asfalto.

Figura 28. Microfotografías del asfalto original y modificado con Polietileno de baja densidad (PDB), tomadas a 10 aumentos (filtro azul).



Así que una buena modificación depende de la compatibilidad del asfalto con el polímero, de la concentración y del solvente empleado, que impida la separación

del asfalto-polímero. En consecuencia la homogeneidad de la mezcla indica que el polímero se a integrado eficazmente para las mezclas del 0.5 al 2.0% de Polietileno de baja densidad (PBD).

3.4 ANÁLISIS DEL ASFALTO ORIGINAL DURANTE EL PERIODO DE ALMACENAMIENTO(NORMA I.N.V. E-76)

El estudio del asfalto original y el asfalto modificado durante el proceso de almacenamiento (Norma I.N.V. E-726), permite evaluar la estabilidad de las propiedades físicas, químicas y reológicas del bitumen, proporcionando los elementos necesarios para determinar la durabilidad, calidad y la estabilidad del cemento asfáltico; ya que a causa del calentamiento a elevadas temperaturas en el proceso de almacenamiento el polímero puede reaccionar con el asfalto, de lo contrario el polímero puede precipitar por diferencia en las densidades.

En el procedimiento que se describe en la sección 2.1.2.3, una muestra del ligante modificado, contenido en un recipiente conveniente, se somete a la acción de temperatura controlada (165⁰C) durante cinco días, al final de este tiempo, se realizaron ensayos físicos tradicionales como: penetración (I.N.V.E-706), viscosidad (I.N.V.E-714), ductilidad (I.N.V.E-702) y peso específico (I.N.V.E-707); con respecto a las pruebas químicas se realizaron las siguientes: SARA (ASTM D-2007), técnicas de espectroscopia infrarroja y ultravioleta-visible y microscopia de fluorescencia. Se tomaron muestra en la zona superior e inferior del recipiente (figura 14).

3.4.1 ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL ASFALTO ORIGINAL AL DÍA CERO, CINCO Y CUARENTA DE ALMACENAMIENTO

La consistencia del asfalto se define, como el grado de fluidez que tiene a una determinada temperatura, para medirla se necesita conocer la viscosidad, penetración, punto de ablandamiento y ductilidad.

En la tabla 15 se resume los resultados de las propiedades físicas de consistencia durante el periodo de almacenamiento.

En los resultados reportados en la tabla 15, se puede apreciar que la viscosidad definida como la resistencia que presenta un liquido a fluir, se incrementa desde 97391 cP para el día cero, hasta un valor cercano 120000 cP para el día cuarenta, estos resultados implican que en el período de almacenamiento se presentaron cambios en los componentes del asfalto.

Tabla 15. Propiedades físicas de consistencia del asfalto original, al día cero, cinco y cuarenta.

PROPIEDAD FÍSICA	Asfalto original				
	Día cero	Día cinco		Día cuarenta	
		Arriba	Abajo	Arriba	Abajo
Viscosidad (cP)	97391	118816	119737	121944	120000
Penetración	100	88	85	84	82
Punto de ablandamiento	46.1 ° C	45.4 ° C	45.5 ° C	45.8° C	45.9° C
Ductilidad	+100 cm	+100 cm	+100 cm	+100 cm	+100 cm
Peso específico del asfalto sólido (g/mL)	1.00986	1.00802	1.00778	1.00706	1.00698

La penetración, es un ensayo empírico usado para medir la consistencia del cemento asfáltico, a mayor valor de la penetración, menor es la consistencia del asfalto. Los resultados de los ensayos de penetración son aproximadamente constantes por lo tanto; el proceso de almacenamiento no se presentaron cambios significativos en los componentes del asfalto.

No se puede hablar de punto de fusión, en los cementos asfálticos por ser materiales termoplásticos; por lo tanto, se habla de punto de ablandamiento y se define como la temperatura a la cual el asfalto soporta una carga de una bola de acero y este comienza a fluir. Según los resultados de la tabla anterior, estos tienden a mantenerse constantes.

La ductilidad es un ensayo con el cual se mide la resistencia que posee el asfalto a la ruptura, se mide por el alargamiento o estiramiento (cm) del bitumen. Los cementos asfálticos están sometidos frecuentemente a variaciones de temperatura que le provocan cambios dimensionales, para esto es necesario que el material asfáltico tenga suficiente ductilidad para alargarse sin que se produzcan grietas. De acuerdo con los resultados se puede observar que la ductilidad alcanza valores por encima de los 100cm, valor que está dentro de los parámetros de la norma I.N.V.E-702.

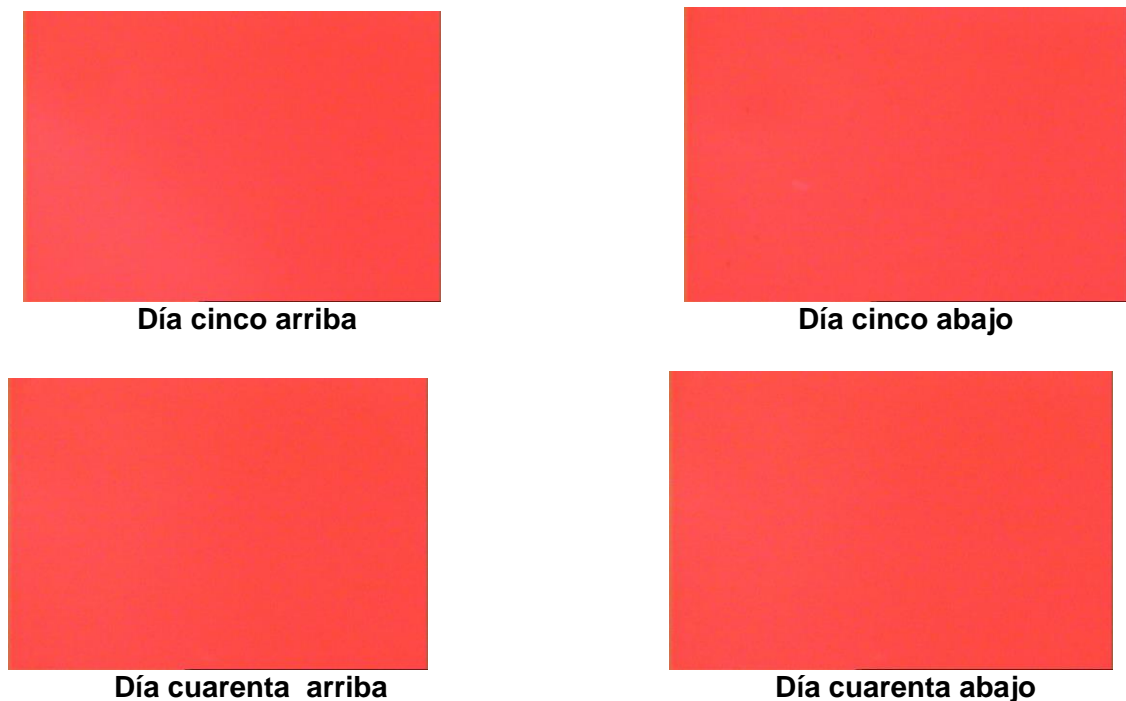
El peso específico, se expresa como densidad relativa del asfalto y se determina con un picnómetro. Los asfaltos tienen una densidad relativa a 25 °C del orden de 1.03, así que los resultados obtenidos según la tabla 14 están cerca de este valor y tienden a mantenerse constantes durante el período de almacenamiento.

Los resultados de las pruebas físicas del asfalto original cumple con todas las normas I.N.V, y ASTM e pero estas pruebas no son suficientes, para resistir la acción del transito y clima a largo plazo; por lo tanto, se hace necesario modificarlo para mejorar sus propiedades reológicas.

3.4.2. ANALISIS DEL ASFALTO ORIGINAL POR MICROSCOPIA DE FLUORESCENCIA, AL DÍA CINCO Y CUARENTA DE ALMACENAMIENTO

Las microfotografías de la figura 29 demuestran la homogeneidad del asfalto original es decir, que los componentes del asfalto no precipitan, dichas microfotografías presentan una sola fase. El asfalto no es alterado por calentamiento ni por el almacenamiento prolongado, lo que implica una buena estabilidad química y física

Figura 29. Microfotografías del asfalto original, al día cinco y cuarenta



3.4.3. ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES QUÍMICAS DEL ASFALTO ORIGINAL (SARA), AL DÍA CERO, CINCO Y CUARENTA DE ALMACENAMIENTO

La composición química del asfalto original se realizó por un ensayo de cromatografía de columna Norma ASTM D-2007 denominado SARA (saturados, aromáticos, resinas y asfaltenos) y los resultados de la composición química de las fracciones del asfalto original se resumen en la tabla 16.

Durante el proceso de almacenamiento del asfalto original, según los resultados que aparecen en la tabla 16, se pueden apreciar una serie de cambios en la composición química del asfalto. Por ejemplo los asfaltenos, para el día representan el 17%, pero a medida que transcurre el periodo de almacenamiento

el % de asfaltenos disminuye hasta el 10%, esto implica la conversión de una parte de asfaltenos en maltenos.

Tabla 16. Composición química de las fracciones separadas del asfalto original por cromatografía de columna, al día cero, cinco y cuarenta.

Compuesto	Día cero	Día cinco		Día cuarenta	
		Arriba	Abajo	Arriba	Abajo
Asfaltenos	17 %	10 %	10 %	10 %	13 %
Resinas	11 %	21 %	20 %	19 %	25 %
Aromáticos	27 %	25 %	25 %	15 %	6 %
Saturados	45 %	44 %	45 %	56 %	56 %

Las resinas en el día cero representa el 11% de los componentes del asfalto, durante el periodo de almacenamiento alcanzan un 25%, este aumento posiblemente se debe a la transformación de asfaltenos en resinas.

Las fracciones aromáticas y saturadas se mantienen constantes hasta el día cinco, transcurridos los treinta y cinco días restantes la fracción aromática disminuye y la fracción saturada aumenta, se podría decir que parte de la fracción aromática se transforma en saturados.

3.4.4. ANÁLISIS DE ESPECTROSCOPIA IR PARA LAS FRACCIONES DEL ASFALTO ORIGINAL AL DÍA CERO, CINCO Y CUARENTA DE ALMACENAMIENTO

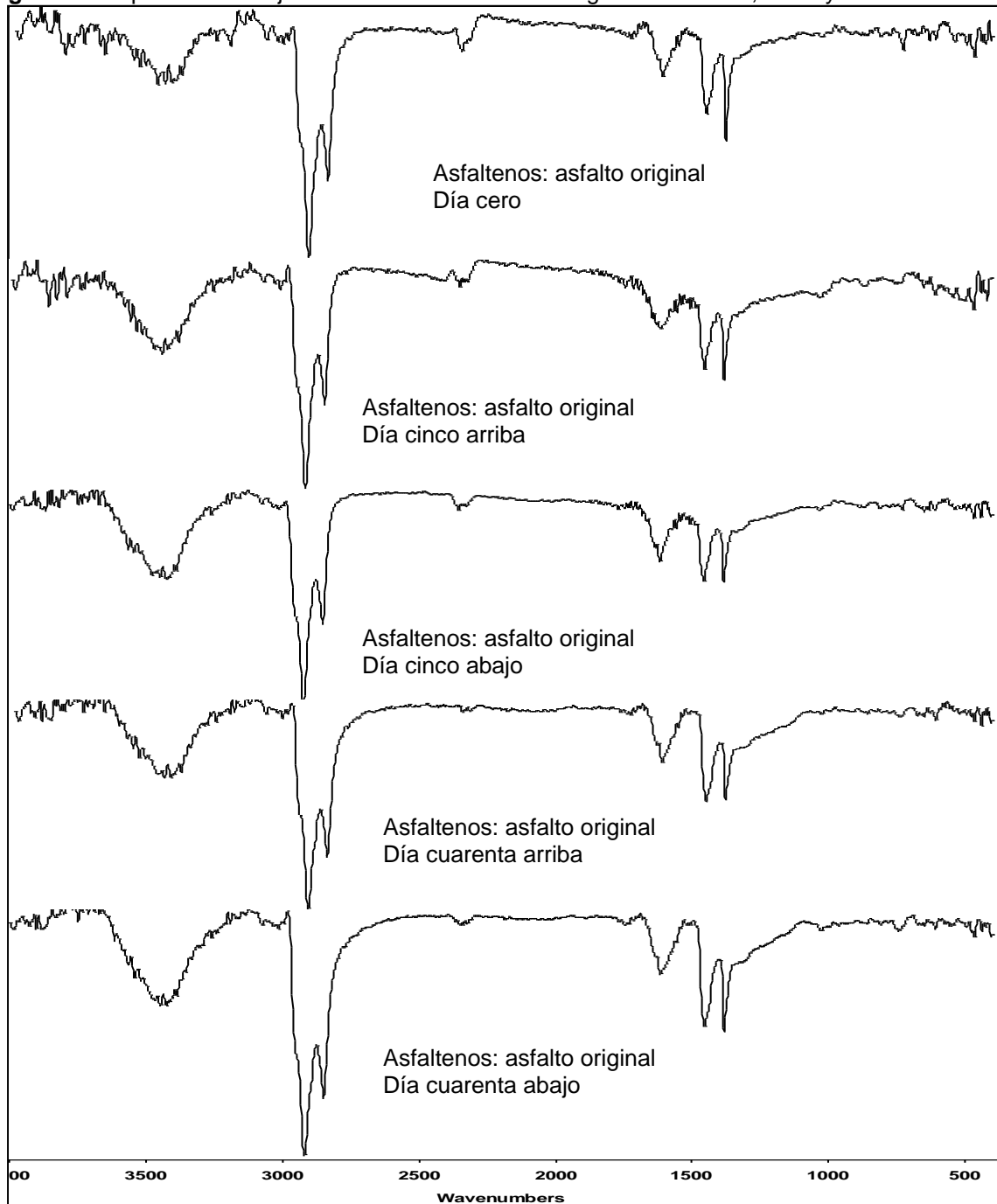
3.4.4.1. ANÁLISIS DE ESPECTROSCOPIA INFRARROJA PARA LA FRACCION DE ASFALTENOS, DURANTE EL PROCESO DE ALMACENAMIENTO

Los asfaltenos son la fase micelar del asfalto dispersa en una fase intermicelar (maltenos), constituidos por hidrocarburos aromáticos polinucleares, que contienen los heteroátomos de hierro, cobre, vanadio y níquel; cuya función es proporcionar dureza al asfalto.

En la figura 30 y en la tabla 17 se muestran, las bandas típicas y las absorciones características en el infrarrojo, de los grupos funcionales que conforman los asfaltenos.

Según los espectros infrarrojos de la figura 30, los asfaltenos durante el proceso de almacenamiento no presentan cambios apreciables en sus bandas de absorción: aparecen las mismas bandas de los grupos funcionales característicos de los asfaltenos.

Figura 30. Espectro Infrarrojo de asfaltenos del asfalto original al día cero, cinco y cuarenta



Los resultados de las absorciones de los grupos funcionales de los asfaltenos se resumen en la tabla 16, en la cual se evidencia que las absorciones debidas a las vibraciones de tensión C-H de aromáticos, N-H de aminas, C=C de aromáticos, tienden a ser constantes durante el periodo de almacenamiento; lo mismo sucede

con las absorciones debidas a la deformación C-H de metilenos y aromáticos, Flexión C-H de anillos aromáticos poli nucleares y a la s vibraciones de M-O (M= V, Fe, Cu, Ni), entre otras.

Todo el conjunto de anillos polinucleares unidos a heteroátomos como nitrógeno, oxígeno y azufre, rodeados por cadenas alquílicas de alto peso molecular, se van agrupando en capas para formar un cristal o partícula que varia de 40.000 a 40.000.000 UMA, estas contiene en su interior metales como hierro, vanadio, cobre y níquel, van a conformar lo que se conoce como la macro estructura de los asfaltenos.

Tabla 17. Bandas características del espectro Infrarrojo para asfaltenos del asfalto original, al día cero, cinco y cuarenta.

Banda obtenida (cm ⁻¹)	Día cero	Día cinco		Día cuarenta	
		Arriba	Abajo	Arriba	Abajo
Tensión asimétrica –N-H	3447	3426	3413	3414	3425
Tensión C-H aromático.	3020	3021	3020	3020	3020
Tensión –C-H producida por – CH ₃ , -CH ₂ , -CH, CHO	2920, 2849	2921 2850	2920 2851	2919 2849	2919 2849
Tensión C=C aromáticos	1615	1632	1615	1615	1615
Tensión del C=C aromático	1539	1539	1540	1540	1539
Deformación N-H en tijera, débil, de amina secundaria	1490	1454	1455	1453	1454
Deformación –C-H metilenos	1454 1383	1454 1383	1455 1383	1453 1382	1454 1382
Flexión C-H fuera del plano de un naftaleno β-sustituido	862	863	871	862	862
Deformación C–H aromático, fuera del plano.	728	723	732	728	728
Tensión C-S banda débil.	608	607	607	608	608
Tensión –C-S, cuando esta conjugando, banda débil.	474-421	474-421	474-421	474-421	474-421
Vibración de flexión C–H aromáticos sustituidos	465	465	465	465	465
Porfirinas –M (V, Fe, Cu, Ni)	465-606	465-606	465-606	465-606	465-606

3.4.4.2 ANÁLISIS DE ESPECTROSCOPIA INFRARROJA PARA RESINAS, DURANTE EL PROCESO DE ALMACENAMIENTO.

Las resinas generalmente, están constituidas por ácidos cresílicos derivados del hidroxitolueno, fenol, cresol, xilenol, entre otros, fusionados de tal forma producen un aspecto resinoso y pesado.

En la figura 30 se muestran los espectros de las resinas durante el proceso de almacenamiento y en la tabla 18 se resumen las bandas de absorción de la cada uno de los grupos funcionales que conforman las resinas.

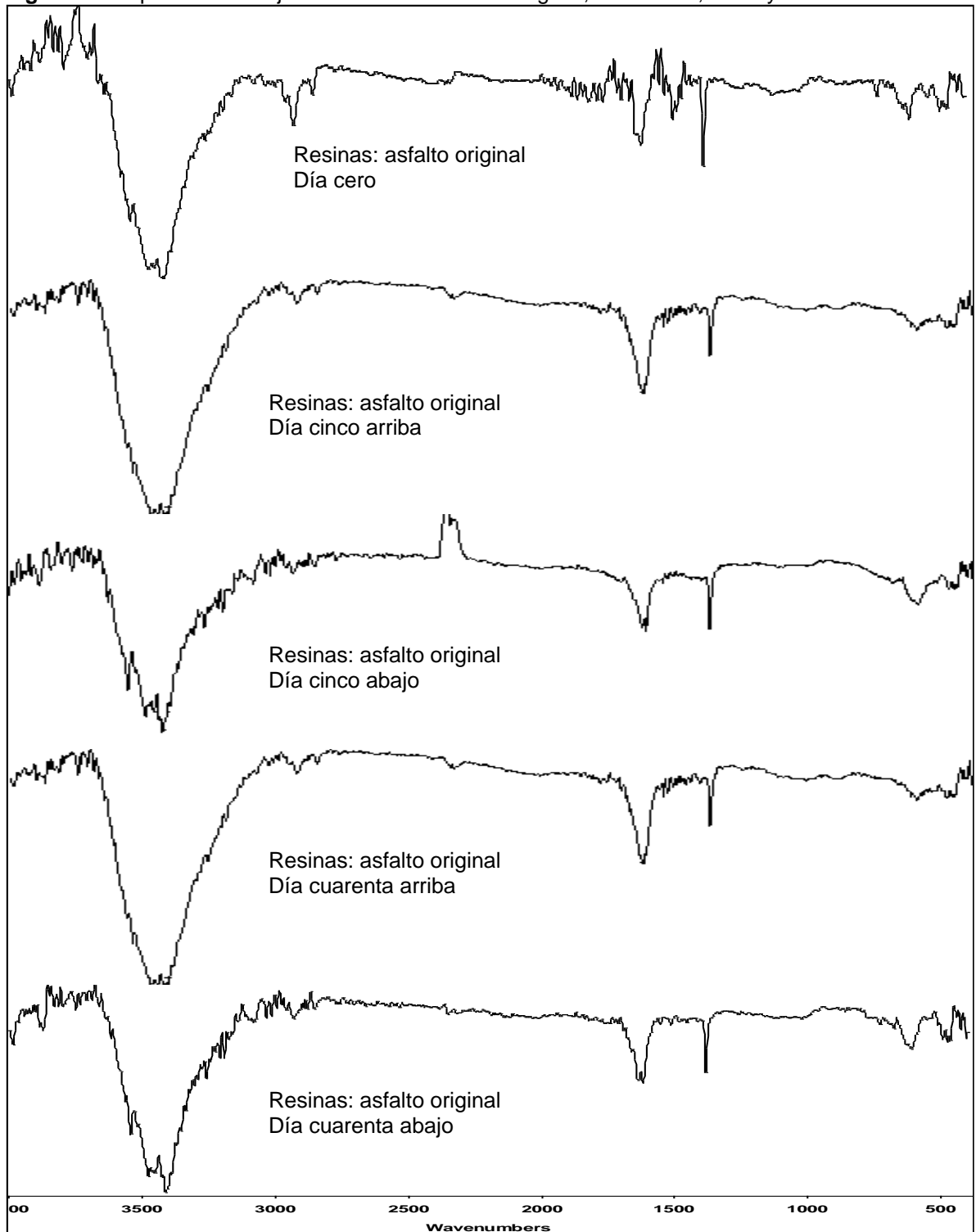
Tabla 18. Bandas características del espectro Infrarrojo para resinas del asfalto original, al día cero, cinco y cuarenta de almacenamiento.

Banda obtenida (cm ⁻¹)	Día cero	Día cinco		Día cuarenta	
		Arriba	Abajo	Arriba	Abajo
Tensión O-H, N-H	3412	3425	3412	3425	3411
Tensión C-H aromático.	3020	3020	3020	3020	3020
Tensión C-H (CH ₃ , CH ₂ , C-H, CHO)	2925, 2852	2926 2850	2926 2850	2926 2850	2926 2850
Armónicos, sobretonos de vibración de tensión C=C	1686- 1877	1686- 1877	1686- 1877	1686- 1877	1686- 1877
Bandas con intensidades variables, tensión del C=C aromáticos.	1616 1503 1482	1620 1539 1482	1618 1539 1483	1620 1539 1482	1618 1505 1483
Deformación asimétrica metilenos	1450	1450	1450	1450	1450
Deformación C-H simétrica	1383	1383	1383	1383	1383
Deformación de torsión C-H	1275	1250	1250	1250	1250
Tensión C-N, C-C y deformación C-H en el plano	1080 1030	1080 1030	1080 1030	1080 1030	1080 1030
Deformación de abanico fuera del plano N-H	677-729	677-729	677-729	677-729	677-729
Deformación C-H aromático, fuera del plano	729 690	728	729	728	729
Vibración de tensión C-S	608	608	610	608	610
Flexión C-H aromático sustituido	540,490	540,477	541,477	540,477	530,476

Las bandas de absorción de los grupos funcionales de las resinas que aparecen en la figura 30, no presentan cambios significativos durante el periodo de almacenamiento, siempre aparecen las mismas bandas características de sus grupos funcionales de fenoles, anillos aromáticos polinucleares, aminas cíclicas, tioéteres, etc.

Según los resultados reportados en la tabla 18 las vibraciones debidas a los enlaces O-H de fenoles, N-H de aminas, C-H de aromáticos y alcanos, C=C de anillos aromáticos, C-N de aminas, C-S de tioéteres, entre otras, tienden a mantenerse constante durante el periodo de almacenamiento. Dentro de las resinas es típico encontrar absorciones por encima de los 3411 cm⁻¹ que corresponde a la banda de tensión del OH, es una banda ancha comprendida entre 3550 y 3450 cm⁻¹, posiblemente se puede atribuir a compuestos fenólicos, cresílicos, entre otros, dentro de este mismo rango se encuentra solapada la banda de tensión N-H.

Figura 31. Espectro Infrarrojo de resinas del asfalto original, al día cero, cinco y cuarenta



En la fracción resinosa, presentan dos bandas de absorción poco intensas, a 2925 y 2850 cm^{-1} debidas a la tensión C-H, de sustituyentes metílicos unidos al sistema de anillos policondensados de las resinas.

La presencia de compuestos aromáticos condensados se aprecian con las bandas a 1616 cm^{-1} la cual se puede atribuir a vibraciones de tensión tipo C=C del anillo y las vibraciones a 1503 y 1482 cm^{-1} , se atribuyen a sobretonos y armónicos de tensión C=C de compuestos aromáticos.

3.4.4.3. ANÁLISIS DE ESPECTROSCOPIA INFRARROJA PARA AROMÁTICOS, DURANTE EL PROCESO DE ALMACENAMIENTO.

En la figura 32 aparece los espectro infrarrojo de los aromáticos durante el periodo de almacenamiento y en la tabla 19 se resumen las bandas típicas de cada uno de los grupos funcionales que hacen parte de la fracción aromática.

Los espectros de la fracción aromática que aparecen en la figura 32 se pueden apreciar pequeñas variaciones de intensidad de las bandas de absorción, desde el día cero hasta el día cuarenta. Los espectros del día cinco, de las muestras tomadas arriba y bajo del recipiente son idénticos, lo mismo sucede con los espectros del día cuarenta. La disminución de las intensidades de las bandas posiblemente se debe a la transformación de la fracción aromática en saturados, este resultado concuerda con los resultados obtenidos en la cromatografía de columna (SARA), en los cuales el porcentaje de aromáticos disminuye a partir del día cinco, de igual manera en el día cuarenta la disminución es considerable, posiblemente se debe a los efectos del calentamiento que es sometido el asfalto, cuando es almacenado a una temperatura de 165° C. Los anillos de los compuestos aromáticos a temperaturas elevadas tienden a romperse y la interacción con otros compuestos del asfalto, hace que se transformen en compuestos saturados.

Las bandas de absorción de los grupos funcionales de la fracción aromática, se resumen en la tabla 19; la absorción en el infrarrojo de cada uno de los grupos funcionales se muestran constantes durante el tiempo de almacenamiento.

En la regiones por encima de 3400 cm^{-1} , se aprecia una banda ancha e intensa de tensión de alargamiento debido al enlace N-H, también aparecen una banda de deformación N-H en tijera débil de amina secundaria a 1495 cm^{-1} , estas se complementan con bandas de tensión C-N que aparecen cerca de 1080 cm^{-1} y una banda de deformación en abanico fuera del plano N-H entre los 694 a 821 cm^{-1} , posiblemente estas bandas se puede atribuir a pirroles di sustituidos, piridinas, o quinoleinas.

Figura 32. Espectro Infrarrojo de aromáticos del asfalto original, al día cero, cinco y cuarenta

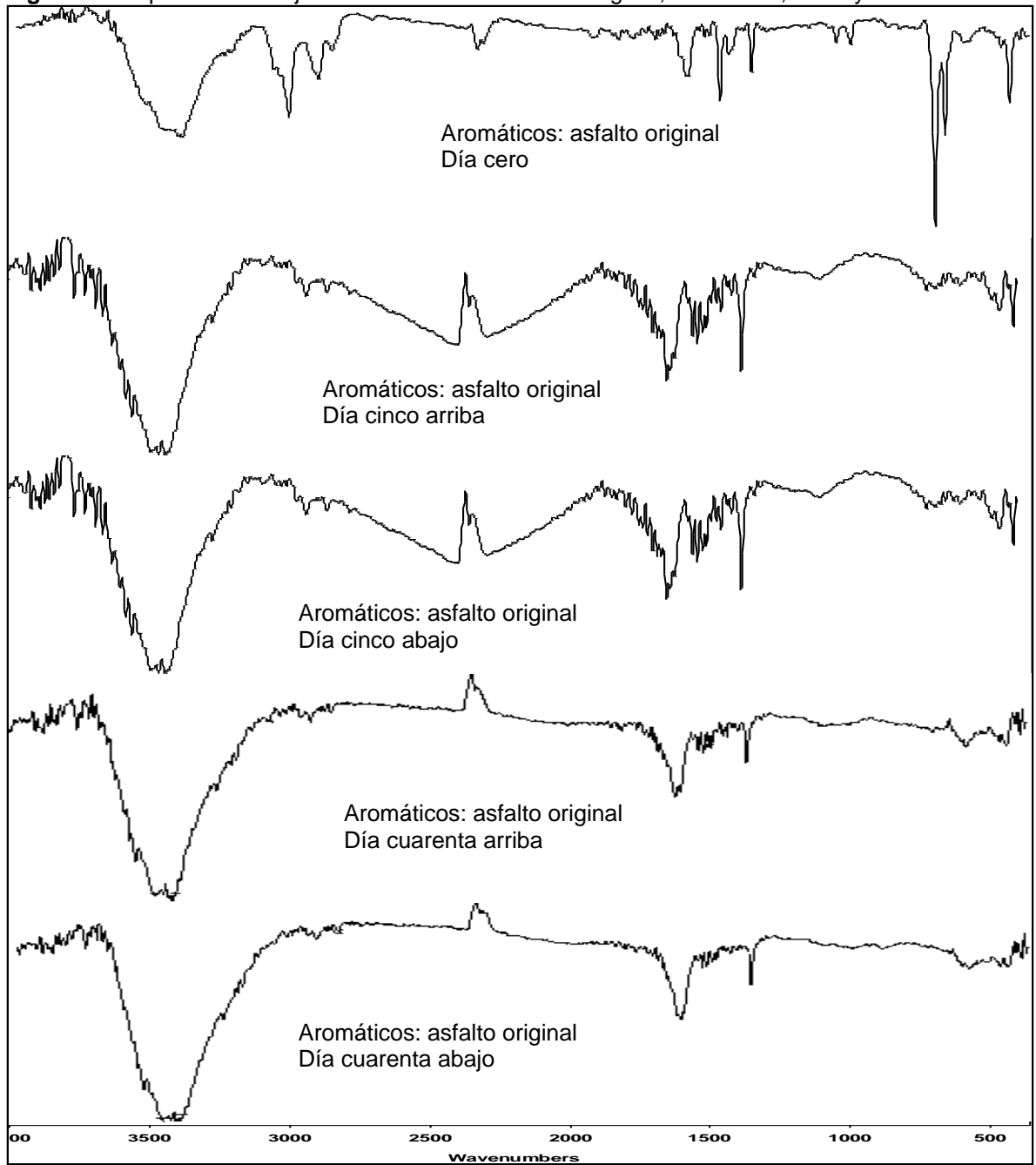


Tabla 19. Bandas características del espectro Infrarrojo para aromáticos del asfalto original, al día cero, cinco y cuarenta.

Banda obtenida (cm ⁻¹)	Día cero	Día cinco		Día cuarenta	
		Arriba	Abajo	Arriba	Abajo
Tensión –N–H	3410	3413	3425	3425	3425
Tensión C-H aromático.	3029	3033	3030	3030	3030
Tensión asimétrica C–H (CH ₃ , CH ₂ , C–H, CHO)	2924	2927	2927	2926	2957
Tensión simétrica metilos	2878	2823	2823	2851	2851
Tensión C-H proporcionada por los ciclohexanos.	2853– 2924	2823- 2927	2823- 2927	2851- 2926	2851- 2957
Armónicos y sobretonos de vibración de tensión C=C	1686– 1948	1686– 1948	1686– 1948	1686– 1948	1686– 1948
Bandas con intensidades variables, vibración de tensión de C=C aromáticos.	1615	1647	1635	1648	1648
	1533	1539	1506	1507	1520
	1495	1489	1486	1472	1456
Deformación N–H en tijera, débil, de amina secundaria	1495	1489	1486	1472	1456
Deformación asimétrica metilenos	1463	1463	1463	1463	1456
Deformación C–H simétrica	1383	1383	1383	1383	1383
Tensión C–N, C–C y deformación C–H en el plano	1080	1080	1080	1080	1080
	1030	1030	1030	1030	1030
Flexión C–H fuera del plano de un naftaleno β-sustituido	821	821	821	821	821
Deformación en abanico fuera del plano N–H	694– 821	694–821	694–821	694–821	694-821
Deformación de C-H aromático, fuera del plano	728	728	728	728	728
	694	694	694	709	710
Flexión C–H aromáticos sustituido	463	467	476	438	419

Por encima de 3029 cm⁻¹ aparecen una banda bien definida, debidas a la absorción de tensión del enlace C-H característica de los aromáticos. Esta banda se complementan con una banda que aparecen entre 1648 a 1456 cm⁻¹ que corresponden a la tensión C=C de anillos aromáticos. Otra banda característica de los aromáticos sustituidos, es la que aparece por encima de los 419 cm⁻¹, que corresponde a la flexión C-H.

El conjunto de bases nitrogenadas, hidrocarburos aromáticos e hidrocarburos cíclicos no bencenoides con algunas cadenas alifáticas como ramificaciones, conducen a la formación de una macromolécula tipo porfirina producto de la fusión de los compuestos antes mencionados.

3.4.4.4. ANÁLISIS DE ESPECTROSCOPIA INFRARROJA PARA LA FRACCIÓN SATURADA, DURANTE EL PROCESO DE ALMACENAMIENTO.

Los compuestos saturados son los menos complejos del asfalto, formados en su mayoría por átomos de carbono e hidrógeno, es la parte líquida y apolar del asfalto, a temperatura ambiente son estables, es decir no reaccionan debido a que están formados por enlaces simples de C-C.

Las bandas que se esperan encontrar debidas a la tensión, deformación y flexión C-H de grupos como metilos ,etilos ,entre otros ,aparecen en el espectro infrarrojo de la figura 32 y el resultado de la bandas de absorción en el infrarrojo se encuentran resumidas en la tabla 20.

Los espectros de la figura 33 correspondientes a la fracción saturada o parafínica, son idénticos, es decir aparecen las mismas bandas y además no se observa cambios significativos en las intensidades de las mismas.

Tabla 20. Bandas características del espectro Infrarrojo para Saturados del asfalto original, al día cero, cinco y cuarenta.

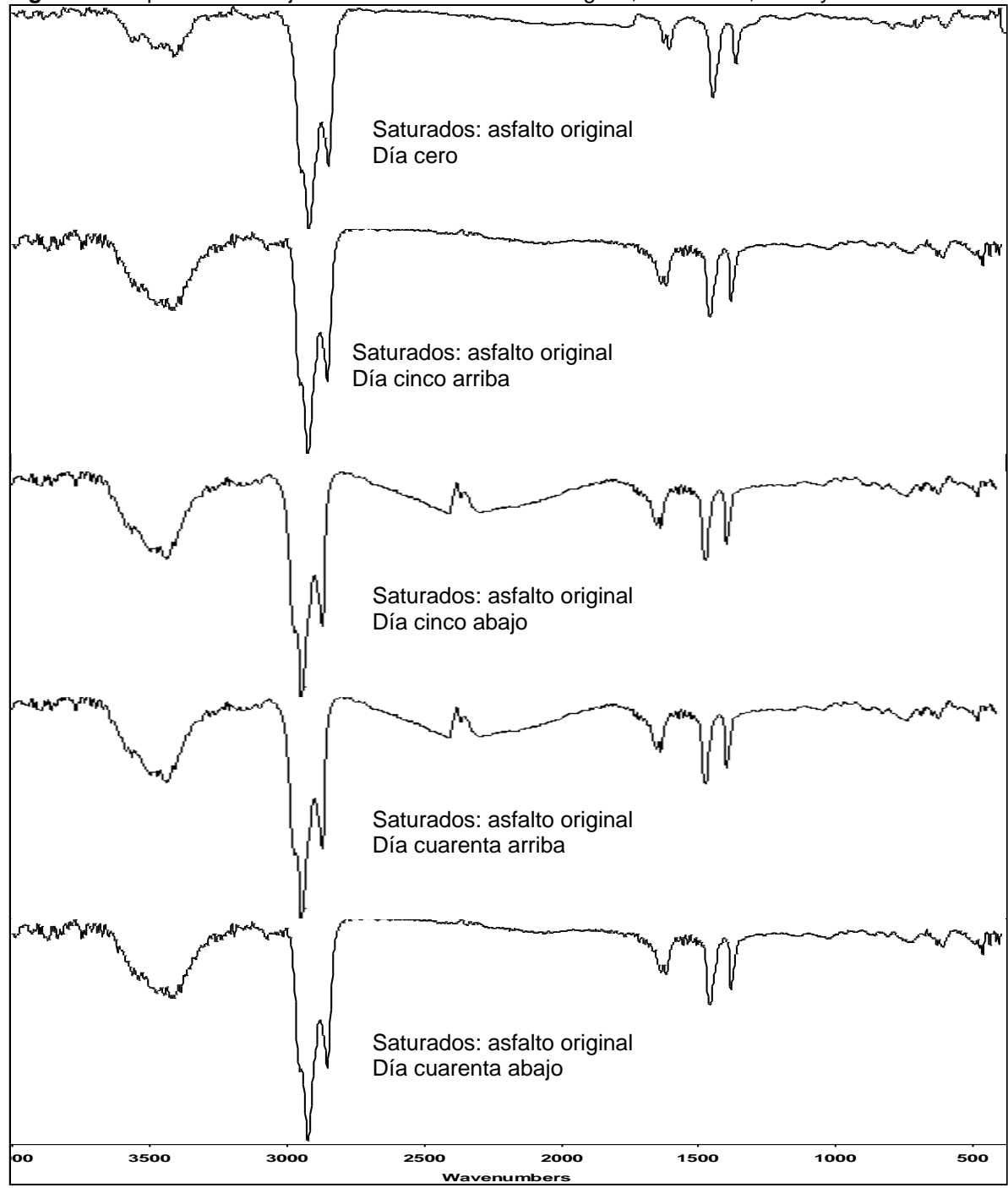
Banda obtenida (cm ⁻¹)	Día cero	Día cinco		Día cuarenta	
		Arriba	Abajo	Arriba	Abajo
Tensión C-H asimétrica.	2922	2922	2923	2923	2922
Tensión simétrica C-H	2852	2852	2852	2852	2852
Tensión media C-C alifáticos.	1617	1617	1617	1617	1617
Deformación asimétrica C-H de metilenos	1459	1458	1458	1458	1458
Deformación C-H simétrica	1377	1381	1381	1381	1381
Deformación de balanceo C-H del metileno -CH ₂ .	725	723	723	723	723
Oscilaciones C-H (CH ₂)	650	610	610	610	610

Los resultados de las absorciones de cada uno de los grupo funcionales se resumen en la tabla 20, en la cuales se evidencia que los valores de las absorciones a medida que transcurre el tiempo desde el día cero al día cuarenta, no se presentan cambios significativos en dichos valores, por lo tanto se puede inferir que los valores de las absorciones tienden ha ser constantes.

La fracción parafínica o saturada de acuerdo con el espectro de la figura 33 y los resultados de las bandas de absorción que se muestran en la tabla 19, presenta ciertas bandas características a 2922 y 2852 cm⁻¹debidas a las vibraciones tensión simétrica y asimétrica de C-H, son típicas de metilenos o metilos de hidrocarburos saturados, estas se complementan con bandas que aparecen cerca

de 1459 y por encima de 1377 cm^{-1} , correspondientes a las vibraciones debidas a las deformaciones simétricas y asimétricas del enlace C-H.

Figura 33. Espectro Infrarrojo de saturados del asfalto original, al día cero, cinco y cuarenta



En la región del espectro cercana a 1617 cm^{-1} se localiza una banda de tensión media C-C que corresponde a compuestos saturados alifáticos de cadena larga.

Las bandas de absorción que aparecen por encima de 723 y 610 cm^{-1} , son debidas a las deformaciones de balanceo y oscilaciones del C-H, estas se les atribuyen a los metilenos.

3.4.5. ANÁLISIS DE ESPECTROSCOPIA UV-VIS PARA LA FRACCIÓN MALTÉNICA DEL ASFALTO ORIGINAL, DURANTE EL PROCESO DE ALMACENAMIENTO.

Se realizó el estudio de espectroscopia UV-Vis, a los componentes malténicos del asfalto original, obtenidos de la cromatografía de columna para complementar los análisis espectroscópicos, observándose las absorciones reportadas en la tabla 21.

Tabla 21. Absorciones de los espectros UV-Vis para la fracción malténica del asfalto original al día cero y cinco.

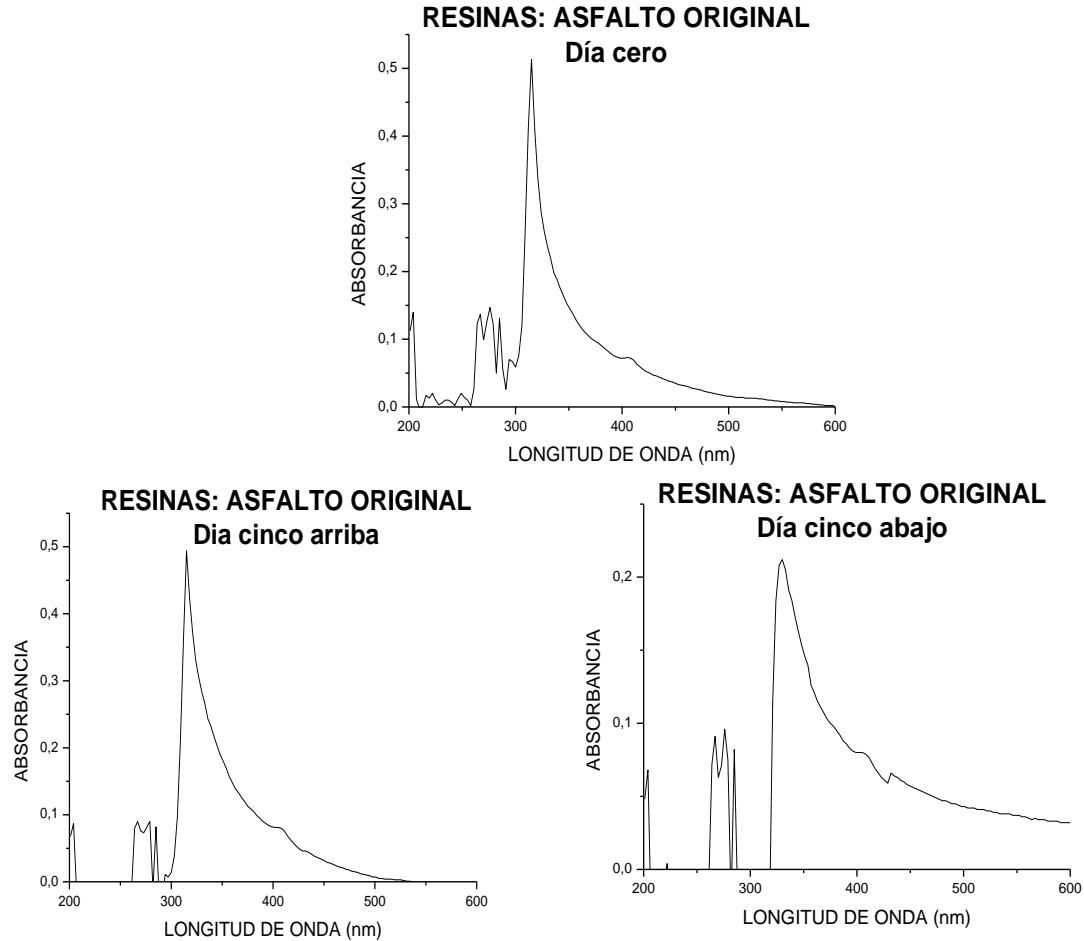
Fracción malténica	Absorciones del Asfalto original (nm)		
	Día cero	Día cinco	
		Arriba	Abajo
Resinas	260-300-350-400	260-300-350-400	260-300-350-400
Aromáticos	260-290-325	260-290-325	260-290-325
Saturados	320-340-400	340	340

3.4.5.1. ANÁLISIS DEL ESPECTRO ULTRAVIOLETA-VISIBLE PARA RESINAS DEL ASFALTO ORIGINAL, EN EL PROCESO DE ALMACENAMIENTO

Teniendo en cuenta los resultados de la tabla 21 y la figura 34, se pueden conocer las transiciones de las resinas en el asfalto original tanto para el día cero (antes del almacenamiento), como para el día cinco (después del almacenamiento).

De la tabla 21 se tiene que las absorciones más representativas, están dadas a entre $300-350\text{ nm}$, que se deben a transiciones tipo $n \rightarrow n^*$, presentadas por los electrones pi (π) conjugados de las cadenas de anillos aromáticos policonjugados.

Figura 34. Espectro UV-Vis de resinas del asfalto original, al día cero y cinco



La banda de absorción presentada a 400 nm, se debe a transiciones del tipo $n \rightarrow n^*$ ocasionadas por la presencia de los grupos auxocrómicos (OH, NH₂), unidos a los anillos aromáticos de que poseen pares de electrones libres capaces de interactuar con los electrones π del anillo, desplazando las bandas representativas E (etilénica) y B (bencenoide) de los anillos aromáticos hacia longitudes de onda mayores, esto se debe a que las resinas están constituidas por grupos funcionales OH, CO, SH, Ar-OH y ácidos cresílicos.

La banda presentada a 260 nm puede ser causada por la absorción del solvente (mezcla tolueno/acetona en relación 1:1).

Estas transiciones se mantienen en el asfalto original, tanto para el día cero, como para el día cinco después del almacenamiento; indicando que las transiciones de las resinas en este asfalto se mantienen a pesar de los cambios de temperatura a los que es sometido bajo condiciones de almacenamiento.

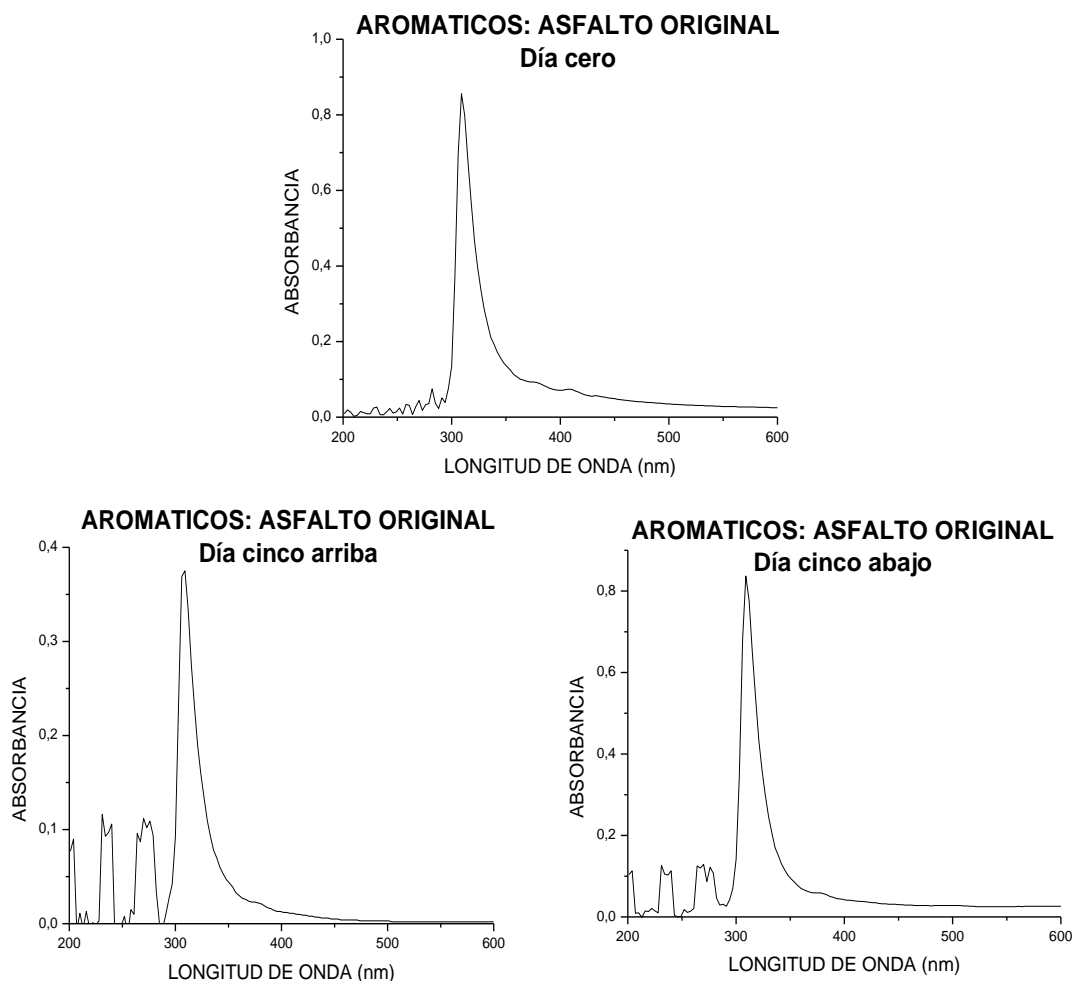
3.4.5.2. ANÁLISIS DEL ESPECTRO ULTRAVIOLETA-VISIBLE PARA AROMÁTICOS DEL ASFALTO ORIGINAL, EN EL PROCESO DE ALMACENAMIENTO

Las principales transiciones electrónicas de los componentes aromáticos para el asfalto original, se encuentran en la tabla 21 y figura 35.

Las absorciones presentadas a longitudes de onda cercanas a 325 nm, se deben principalmente a transiciones del tipo $n \rightarrow n^*$ de enlaces dobles conjugados de anillos condensados.

Las principales bandas de absorción en el espectro UV-Vis, del asfalto original se mantienen constantes durante el período de almacenamiento, es decir que las condiciones de almacenamiento no afectan las transiciones propias de dichos componentes.

Figura 35. Espectro UV-Vis de aromáticos del asfalto original

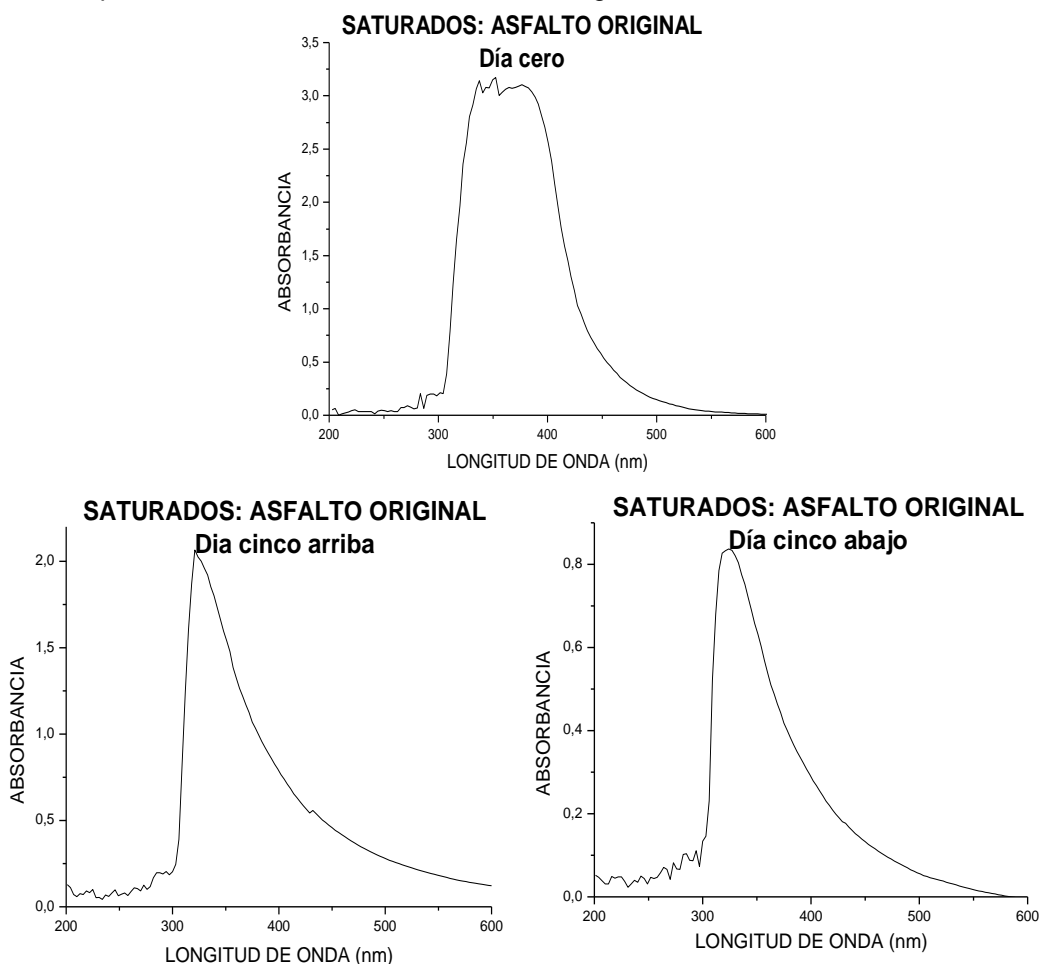


3.4.5.3. ANÁLISIS DEL ESPECTRO ULTRAVIOLETA-VISIBLE PARA SATURADOS DEL ASFALTO ORIGINAL, EN EL PROCESO DE ALMACENAMIENTO

Con los resultados de la tabla 21 y la figura 36 del espectro Ultravioleta-visible para las parafinas, se corroboran la presencia de sus principales grupos funcionales.

Los compuestos saturados contienen exclusivamente electrones σ , por lo tanto realizan transiciones tipo $\sigma \rightarrow \sigma^*$ y solamente se encuentran disponibles en la región del ultravioleta lejano (vacío), los hidrocarburos saturados son transparentes en la región del ultravioleta cercano, es decir, solo absorben a longitudes de onda $< 150\text{nm}$, por lo tanto las absorciones presentadas en la figura 36, para componentes saturados, no son las esperadas, ya que se dan a longitudes de onda mayores.

Figura 36. Espectro UV-Vis de saturados del asfalto original



Esto se debe a que las parafinas o saturados del asfalto presentan tanto cadenas lineales como cíclicas, que provocan absorciones en la región del ultravioleta cercano, además en medio de su estructura pueden contener heteroátomos como nitrógeno, azufre, oxígeno, entre otros, con electrones no enlazados del tipo n; estos pueden provocar transiciones $n \rightarrow \sigma^*$ ó $\sigma \rightarrow \sigma^*$, siendo las primeras mas probables debido a que requieren menor energía; de tal manera las absorciones presentadas para los componentes saturados del asfalto original se encuentran a longitudes de onda mayores a las esperadas. Se debe tener en cuenta que a mayor número de átomos de carbono en la cadena, menor solidez de la molécula, de esta forma la absorción se desplaza a las longitudes de onda observadas.

Este comportamiento se mantiene para todos los espectros presentados en la figura 36, lo que indica que las transiciones electrónicas debidas a los componentes saturados, no son afectadas por las condiciones del ensayo de almacenamiento.

3.5 ANÁLISIS DEL ASFALTO MODIFICADO DURANTE EL PERIODO DE ALMACENAMIENTO

3.5.1 ASFALTO MODIFICADO CON EL 0.5% DE PBD

El asfalto modificado debe mantener sus propiedades físicas, químicas y reológicas durante el almacenamiento, aplicación y servicio. Estas dependen de la composición del asfalto, de la naturaleza, estructura y concentración del polímero, de la compatibilidad de la mezcla asfalto-polímero, temperatura y tiempo de mezclado, entre otras.

3.5.1.1 ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL ASFALTO MODIFICADO DURANTE EL PROCESO DE ALMACENAMIENTO.

Los resultados de las de las propiedades físicas de consistencia del asfalto modificado con Polietileno de baja densidad al 0.5%, en los diferentes períodos de almacenamiento se reportan el la tabla 22.

Los resultados reportados en la tabla 22, se puede apreciar que la viscosidad antes del almacenamiento es de 122917 cP y después de cuarenta días de almacenamiento alcanza valores cercanos 130000 cP, presentando un ligero aumento.

Tabla 22. Propiedades físicas de consistencia del asfalto modificado con Polietileno de baja densidad al 0.5%, durante el periodo de almacenamiento.

PROPIEDAD FÍSICA	Asfalto modificado con 0.5 de PBD				
	Día cero	Día cinco		Día cuarenta	
		Arriba	Abajo	Arriba	Abajo
Viscosidad (cP)	122917	131667	129722	131029	130735
Penetración	85	88	87	87	86
Ductilidad	+100 cm	+100	+100	+100	+100
Peso específico del asfalto sólido (g/mL)	1.0079	1.0077	1.0074	1.0077	1.0075

Al comparar los valores de viscosidad al día cinco de las muestras tomadas arriba y bajo del recipiente, los resultados tienden a ser semejantes, lo mismo sucede con los valores de las viscosidades al día cuarenta, lo que significa que el polímero se encuentra repartido en forma homogénea en todo el asfalto ya que este influye directamente en el valor de la viscosidad.

Los resultados del ensayo de penetración, ductilidad y peso específico antes y después del almacenamiento tienden a ser constantes, durante el periodo de almacenamiento; por consiguiente se puede decir que el asfalto modificado con polietileno de baja densidad al 0.5%p/p, sometido a un proceso de almacenamiento con periodos prolongados de elevada temperatura (165°C), la mezcla asfalto-polímero es estable física y químicamente.

3.5.1.2. ANÁLISIS DEL ASFALTO MODIFICADO CON POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD (PBD) AL 0.5% POR MICROSCOPIA DE FLUORESCENCIA, DURANTE EL PERÍODO DE ALMACENAMIENTO

Durante el periodo de almacenamiento es muy importante que el asfalto modificado conserve su homogeneidad, ya que esta depende exclusivamente de la compatibilidad del polímero con el asfalto.

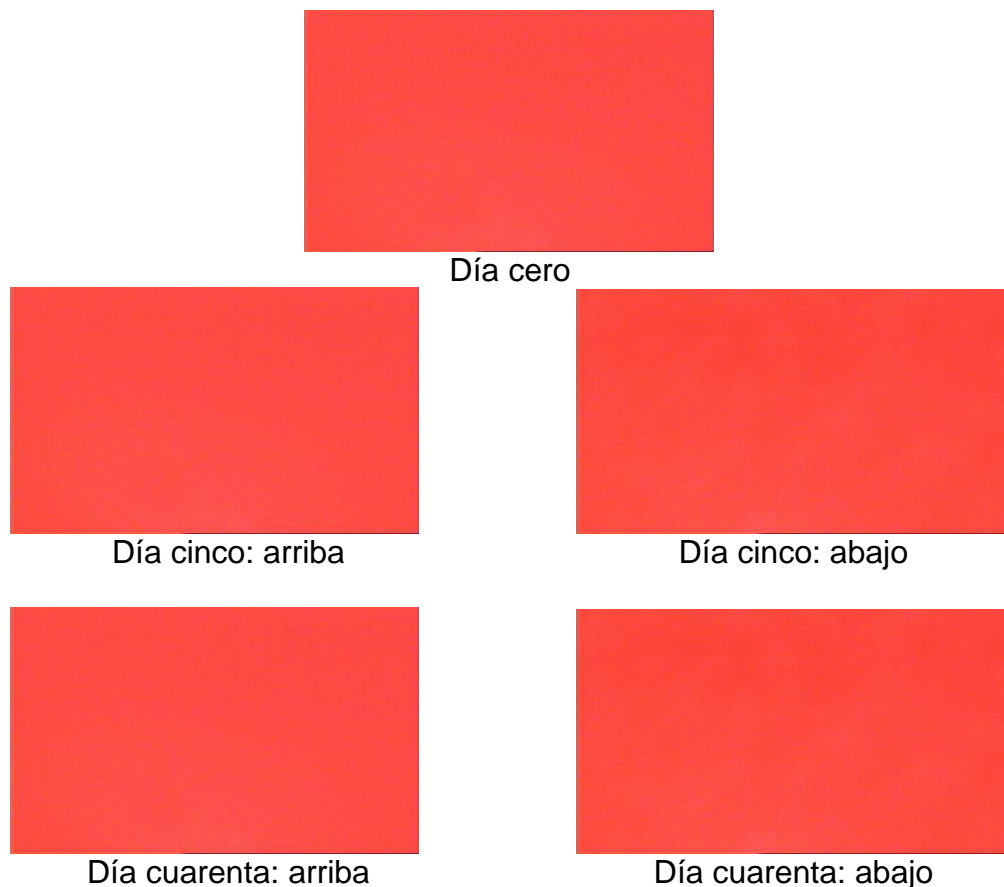
Mediante la técnica de microscopia de fluorescencia se puede conocer el grado de compatibilidad de la mezcla asfalto-polímero.

Los resultados de las microfotografías tomadas a los días cero, cinco y cuarenta, muestran homogeneidad como aparecen en la figura 36, esto se traduce en una buena compatibilidad del polímero con el asfalto.

El resultado de esta compatibilidad se debe, a la correcta disolución del polímero en la fracción saturada de los maltenos, por tener el mismo carácter apolar y

además debido a la estructura ramificada del polímero este tiene la capacidad de hincharse absorbiendo compuesto saturados presentes en el asfalto.

Figura 37. Microfotografías del modificado con Polietileno de baja densidad (PDB) al 0.5%, tomadas a 10 aumentos (filtro azul), durante el periodo de almacenamiento, días cero, cinco y cuarenta.



3.5.1.3. ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES QUÍMICAS DEL ASFALTO MODIFICADO CON POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD (PBD) AL 0.5%, EN EL PERÍODO DE ALMACENAMIENTO

En la tabla 23 aparecen las fracciones que componen el asfalto modificado con Polietileno de baja densidad al 0.5%, separadas por cromatografía de columna Norma ASTM D-2007 (SARA).

La fracción asfáltica del asfalto modificado inicialmente es de 14%, al día cinco hasta el día cuarenta permanecen aproximadamente igual. Esta igualdad se debe posiblemente al no cambio de densidad, pues de ocurrir lo contrario precipitaría.

Las resinas muestran un incremento pequeño, antes del almacenamiento solo eran el 14%, a partir del día cinco hasta el día cuarenta alcanzan un valor del 18% tanto arriba como abajo, se podría decir que el pequeño aumento se debe a una posible adición del polímero a las resinas por efectos del calentamiento al que se ve sometido el asfalto durante los cinco días de almacenamiento a 165°C.

Tabla 23. Fracciones separadas del asfalto modificado con Polietileno de baja densidad (PBD) al 0.5%, por cromatografía de columna, al día cero, cinco y cuarenta.

Compuesto	Día cero	Día cinco		Día cuarenta	
		Arriba	Abajo	Arriba	Abajo
Asfaltenos	14	12	12	13	13
Resinas	12	16	18	18	18
Aromáticos	22	18	18	16	15
Saturados	52	54	52	53	54

Los compuestos aromáticos antes del almacenamiento representan el 22%, en el transcurso de almacenamiento del día cinco hasta el día cuarenta, la fracción aromática disminuyen de un 4% y un 5%, se podría pensar que el calentamiento del asfalto durante cinco días a 165° C provoca rompimiento de anillos de la fracción aromática, las cuales con la interacción de otros compuesto del asfalto se transformen posiblemente en saturados.

La fracción saturada durante el tiempo de almacenamiento muestra pequeños incrementos, esto de debe a la transformación de aromáticos en saturados por efectos del calentamiento al que es sometido el asfalto.

A nivel general se observa que la fracción saturada representa aproximadamente el 50% de los componentes del asfalto modificado, según este porcentaje el asfalto modificado debería tornarse más blando, resultado que no es así, ya que las pruebas físicas como penetración y la viscosidad demuestra que el asfalto tiene mayor consistencia que el asfalto original; lo anterior se debe a los efectos de interacción del polímero con el asfalto, la estructura ramificada y la solidez del polímero hace que actúe como una esponja y se disuelva completamente en la fracción malténica, esto hace que sea muy estable evitando la precipitación y por lo tanto aumente su consistencia.

Los saturados tienen la propiedad de protegen al asfalto de la oxidación debido a su gran estabilidad química. Esto implica que un asfalto con un alto contenidos de saturados será más resistente al envejecimiento y más durable.

Los asfáltenos contienen las moléculas más pesadas del asfalto con un carácter aromático muy marcado, se podría decir que es la parte sólida del asfalto, por lo tanto, son los responsables de la dureza de los asfaltos.

Las resinas por su carácter polar le proporcionan al asfalto características adherentes, aglutinantes o cementantes.

3.5.1.4 ANÁLISIS DE ESPECTROSCOPIA IR PARA LAS FRACCIÓNES ASFALTENICA Y MALTÉNICA DEL ASFALTO MODIFICADO CON POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD (PBD) AL 0.5%, DURANTE EL ALMACENAMIENTO

3.5.1.4.1. ANÁLISIS DE ESPECTROSCOPIA IR PARA LAS FRACCIÓN ASFALTENICA DEL ASFALTO MODIFICADO CON POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD (PBD) AL 0.5%, DURANTE EL ALMACENAMIENTO.

Los espectros que aparecen en la figura 38, presentan bandas típicas de los asfáltenos en las diferentes muestras.

Los valores de las absorciones de las bandas de los grupos funcionales que hacen parte de la fracción asfáltica se resumen en la tabla 24, se puede evidenciar que los valores de las bandas de absorción, tienden a mantenerse constantes en el proceso de almacenamiento.

El espectro de la fracción asfáltica presenta las siguientes bandas representativas:

La absorción en el infrarrojo a 3447 cm^{-1} se aprecia una banda ancha e intensa debidas a las vibraciones de tensión O-H, en la misma región aparece solapada la banda de tensión asimétrica N-H, esta se complementa con la banda que aparece a 1635 cm^{-1} corresponde a una vibración de deformación en tijera debida al enlace N-H.

Cerca de la región del infrarrojo entre 3020 a 3079 cm^{-1} , se presenta una banda de tensión C-H de anillos aromáticos condensados, que se concatena con una banda a 1539 cm^{-1} correspondiente a la absorción de tensión C=C.

Aparecen dos bandas bien definidas, debidas a la absorción de tensión del enlace C-H característica de sustituyentes alquílicos a 2920 y 2849 cm^{-1} . Estas bandas se complementan con dos bandas que aparecen a 1456 y 1383 cm^{-1} que corresponden a absorciones de deformación asimétrica del enlace C-H de grupos metilos.

Figura 38. Espectro Infrarrojo de asfaltenos del asfalto modificado con el 0.5% de Polietileno de baja densidad al día cero, cinco y cuarenta

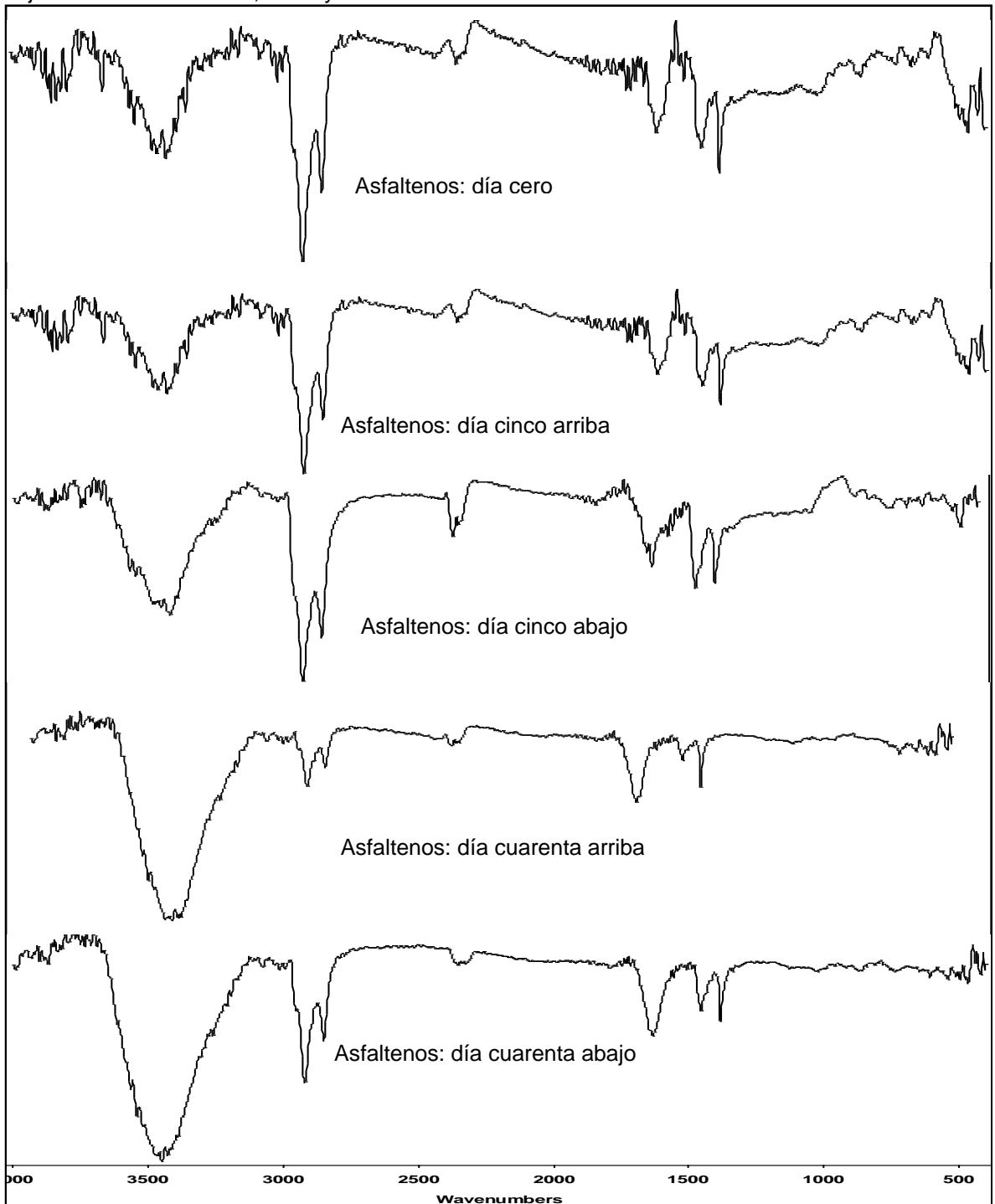


Tabla 24. Bandas características del espectro Infrarrojo para asfaltenos del asfalto modificado al 0.5% con Polietileno de baja densidad (PBD), almacenado al día cero, cinco y cuarenta.

Banda obtenida (cm ⁻¹)	Día cero	Día cinco		Día cuarenta	
		Arriba	Abajo	Arriba	Abajo
Tensión asimétrica –N-H, -OH	3413	3414	3413	3413	3447
Tensión C-H aromático.	3020	3021	3020	3079	3078
Tensión –C-H producida por – CH ₃ , -CH ₂ , -CH.	2920, 2849	2920 2849	2919 2849	2919 2849	2920 2850
Tensión C=C aromáticos	1615	1617	1615	1634	1634
Deformación N–H en tijera, débil, de amina secundaria	1450	1456	1449	1455	1455
Deformación –C-H metilenos	1382	1383	1382	1384	1383
Flexión C-H fuera del plano de un naftaleno β-sustituido	862	861	861	873	873
Deformación C–H aromático, fuera del plano.	733	723	733	708	708
Tensión C-S banda débil.	677	668	677	608	608
Tensión –C-S, cuando esta conjugando, banda débil.	542	541	543	542	541
Vibración de flexión C–H aromáticos sustituidos	465	466	465	466	466
Porfirinas –M (V, Fe, Cu, Ni)	465	466	465	466	466

Las bandas de flexión y deformación C-H, que aparecen entre 465 a 873 cm⁻¹ se pueden atribuir a compuestos de naftaleno sustituidos.

Los a grupo funcionales de mercaptanos o tioéteres se les atribuye las vibración de tensión C-S, son bandas muy débiles, que aparece entre 541cm⁻¹ a 677 cm⁻¹ posiblemente corresponden

La banda de absorción que aparece cerca 465cm⁻¹es característica de los metales pesados como, cobre, vanadio y níquel presentes en el asfalto producto de la refinación del petróleo.

3.5.1.4.2. ANÁLISIS DE ESPECTROSCOPIA INFRAROJA PARA LA FRACCIÓN DE LAS RESINAS DEL ASFALTO MODIFICADO AL 0.5% CON POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD (PDB), DURANTE EL PERIODO DE ALMACENAMIENTO.

Los espectros de las resinas del asfalto modificado con 0.5% de Polietileno de baja densidad que se muestran en la figura 39, son muy parecidos, es decir que en el transcurso del almacenamiento no se presentaron cambios significativos que altere la macro estructura resinosa. Los valores de las absorciones de los

principales grupos que componen las resinas se resumen en la tabla 25, en los cuales se evidencia que dichos valores tienden a mantenerse constante durante el periodo de almacenamiento.

Figura 39. Espectro infrarrojo de resinas del asfalto modificado con el 0.5% de Polietileno de baja densidad al día cero, cinco y cuarenta

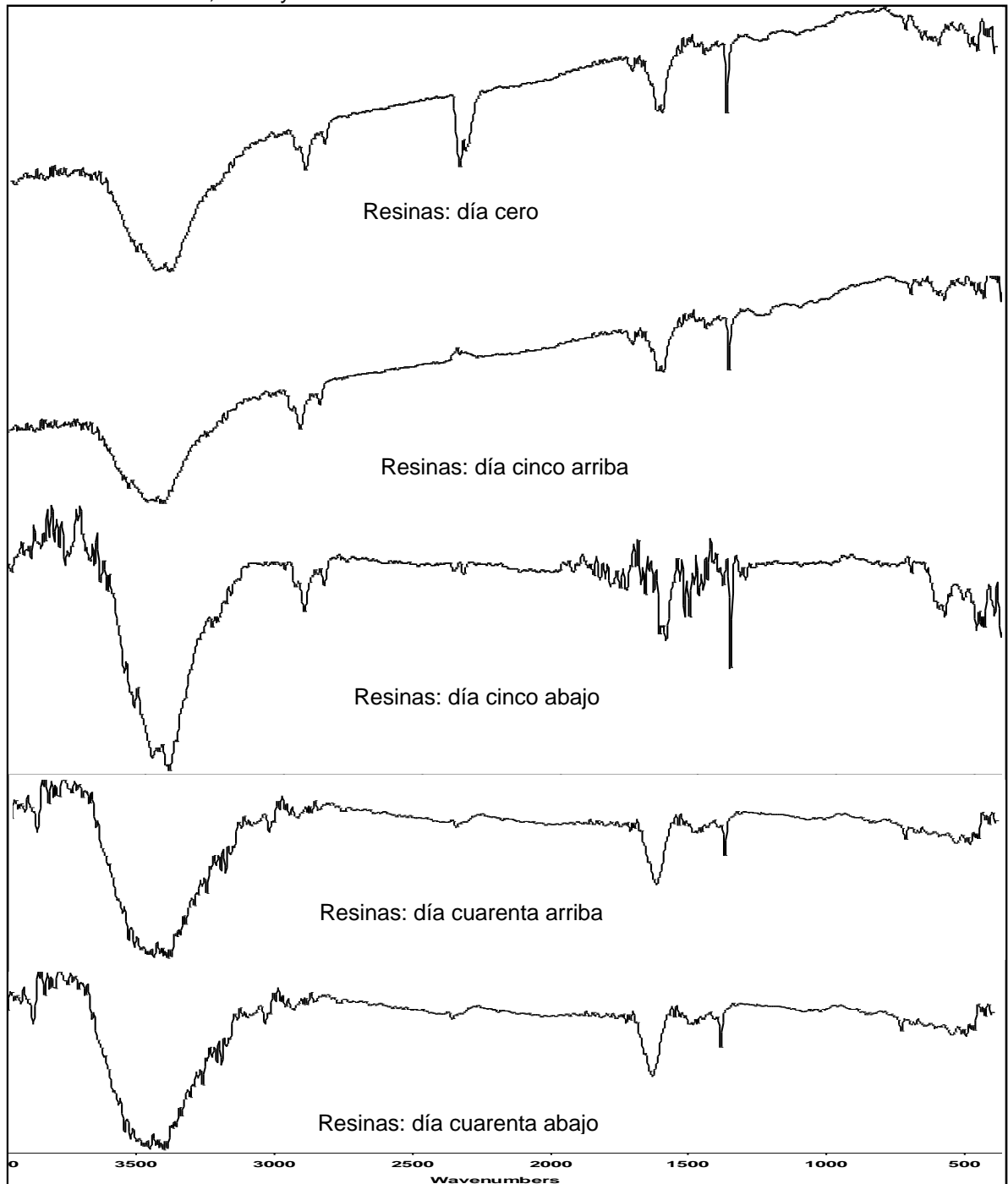


Tabla 25. Bandas características del espectro Infrarrojo para resinas del asfalto modificado con 0.5% de Polietileno de baja densidad (PBD), durante el almacenamiento.

Banda obtenida (cm ⁻¹)	Día cero	Día cinco		Día cuarenta	
		Arriba	Abajo	Arriba	Abajo
Tensión O-H, N-H	3413	3426	3412	3427	3411
Tensión C-H aromático.	3020	3020	3020	3030	3032
Tensión C-H (CH ₃ , CH ₂ , C-H, CHO)	2924, 2853	2924 2879	2925 2853	2925 2853	2930 2850
Armónicos, sobretonos de vibración de tensión C=C	1728, 1618	1726- 1620	1692- 1617	1686- 1621	1686- 1631
Intensidades variables, tensión del C=C aromáticos.	1616 1482	1618 1482	1618 1483	1618 1482	1618 1483
Deformación asimétrica metilenos	1466	1465	1450	1446	1450
Flexión O-H	1384	1383	1383	1384	1384
Deformación de torsión C-H y vibración de tensión C-O	1266 1128	1266 1129	1250	1250	1250
Deformación C-H aromático, fuera del plano	729 690	728	729	728	729
Vibración de tensión C-S	608	608	608	608	610
Flexión C-H aromático sustituido	540,477	540,440	541,466	540,441	549,476

En las bandas de absorción de los grupos funcionales que hacen parte de la composición de las resinas se pueden destacar las siguientes: una banda ancha que aparece por encima de los 3411 cm⁻¹ corresponde a la banda de tensión del O-H, dentro de este mismo rango se encuentra solapada la banda de tensión N-H.

La banda O-H se complementa con una banda de flexión O-H que aparece a 1348 cm⁻¹, que puede estar solapada con la banda de deformación asimétricas C-H de grupos metilo y metileno y una banda de tensión C-O que aparece alrededor de 1250 cm⁻¹.

Igualmente, se puede apreciar un hombro insipiente alrededor de 3020 cm⁻¹, ocasionado por el alargamiento de enlace C-H, propio de hidrocarburos aromáticos. Esta banda esta asociada con las bandas que aparecen alrededor de 1618 cm⁻¹ y 1728 cm⁻¹, que se pueden atribuir a armónicos y sobretonos de vibración de tensión tipo C=C del anillo, las vibraciones a 1616 y 1482 cm⁻¹, se atribuyen a vibraciones de tensión variable C=C, alrededor de 728 cm⁻¹ aparece una banda de deformación C-H y entre 540 a 549 cm⁻¹ se localiza una banda de deflexión C-H, característica de compuestos aromáticos sustituidos.

Cerca de 2924 y 2853 cm⁻¹ se observan dos absorciones características de la tensión asimétrica y simétrica respectivamente para el enlace C-H, de sustituyentes de hidrocarburos alifáticos unidos al sistema de anillos policondensados de las resinas.

La vibración de tensión C-S que aparece alrededor 608 cm^{-1} , puede atribuirse a grupos mercaptanos.

3.5.1.4.3. ANÁLISIS DE ESPECTROSCOPIA INFRAROJA PARA LA FRACCIÓN AROMÁTICA, DEL ASFALTO MODIFICADO AL 0.5% CON POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD (PBD) DURANTE EL PERÍODO DEL ALMACENAMIENTO.

En los espectros que se muestran en la figura 40 correspondientes a la fracción aromática, obtenidas del asfalto modificado en diferentes períodos de almacenamiento se puede observar que las bandas de los grupos funcionales son muy parecidas y además que los valores de las bandas de absorción resumidas en la tabla 26 se muestran constantes durante el tiempo de almacenamiento. La fracción aromática presenta las siguientes bandas características:

En la región comprendida entre 3500 y 3200 cm^{-1} se aprecia un alargamiento correspondiente al enlace N-H heteroaromático representativo de las quinolinas, en esta región también puede estar solapada la banda de tensión O-H (probablemente se deba a la humedad del medio) ya que en el espectro se observa una banda ligeramente ancha.

Alrededor de 3029 cm^{-1} aparecen una banda bien definida, debidas a la absorción de tensión del enlace C-H característica de los aromáticos.

Es común encontrar cuatro bandas de absorción en la región del infrarrojo comprendida, entre 1700 a 1400 cm^{-1} que corresponden a la tensión C=C y C=N de anillos aromáticos. Otras bandas características de los aromáticos sustituidos, es la que aparece en la región del infrarrojo comprendida entre 850 cm^{-1} a los 460 cm^{-1} , que corresponde a la flexión C-H.

Figura 40. Espectro infrarrojo de aromáticos del asfalto modificado con el 0.5% de Polietileno de baja densidad al día cero, cinco y cuarenta.

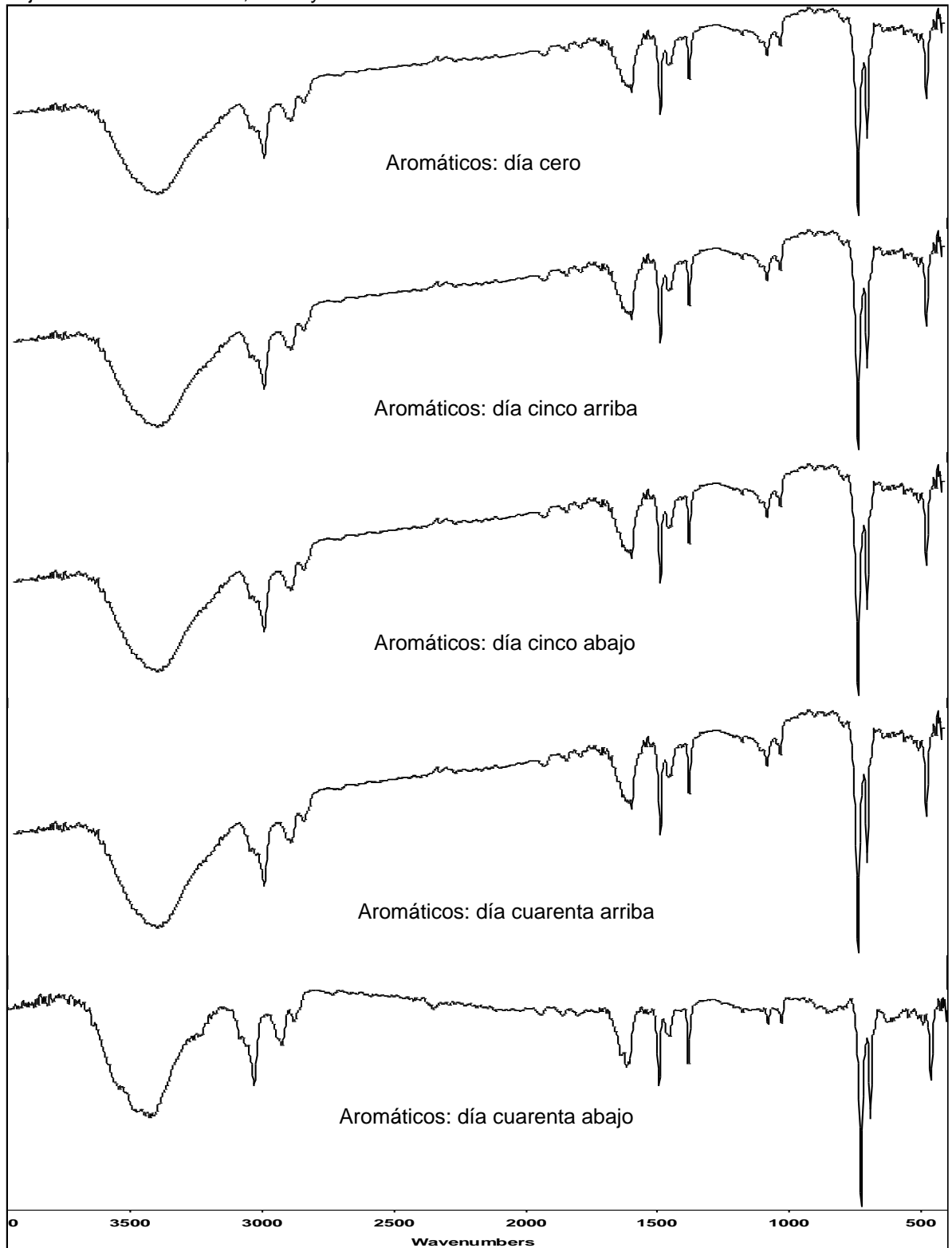


Tabla 26. Bandas características del espectro Infrarrojo para aromáticos del asfalto modificado con Polietileno de baja densidad (PBD) al 0.5%, en el proceso de almacenamiento.

Banda obtenida (cm ⁻¹)	Día cero	Día cinco		Día cuarenta	
		Arriba	Abajo	Arriba	Abajo
Tensión N-H	3412	3424	3425	3445	3412
Tensión C-H aromático.	3029	3033	3030	3030	3029
Tensión asimétrica C-H (CH ₃ , CH ₂ , C-H)	2925	2927	2927	2925	2925
	2879	2823	2823	2879	2880
Armónicos y sobretonos de vibración de tensión C=C, C=N	1942	1686-	1686-	1948	1943
	1801	1948	1948	1808	1806
Bandas con intensidades variables, vibración de tensión de C=C aromáticos.	1606	1647	1635	1621	1606
	1495	1539	1506	1495	1495
	1438	1489	1486	1463	1426
Deformación C-H simétrica	1384	1383	1383	1384	1384
Tensión C-N, C-C y deformación C-H en el plano	1080	1080	1080	1081	1081
	1030	1030	1030	1030	1030
Flexión C-H fuera del plano de un naftaleno β-sustituido	846	821	821	821	843
Deformación de C-H aromático, N- H fuera del plano	729	728	728	729	729
	675	694	694	694	694
Flexión C-H aromáticos sustituido	465	467	476	464	464

En todos los espectros se presentan vibraciones de tensión asimétrica y simétrica para el enlace C-H característico de grupos metílicos alrededor de 2927 a 2823cm⁻¹. Otras de las bandas características de las bases nitrogenadas de la fracción aromática son las bandas debidas a la tensión C-N que aparecen cerca de 1080 cm⁻¹ y una banda de deformación en abanico fuera del plano N-H entre lo 729 a 675 cm⁻¹.

3.5.1.4.4. ANÁLISIS DE ESPECTROSCOPIA INFRAROJA PARA LA FRACCIÓN SATURADA, DEL ASFALTO MODIFICADO AL 0.5% CON POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD (PBD) DURANTE EL PERÍODO DE ALMACENAMIENTO.

Los resultados de las absorciones de cada uno de los grupo funcionales se resumen en la tabla 27, en la cuales se evidencia que los valores de las absorciones a medida que transcurre el tiempo desde el día cero al día cuarenta no se presentan cambios significativos en dichos valores, por lo tanto se puede inferir que los valores de las absorciones tienden ha ser constantes.

Los espectros de las parafinas obtenidas del asfalto modificado, sometido a diferentes períodos de almacenamiento, mostrados en la figura 41 y las bandas aparecen en la tabla 27:

Figura 41. Espectro infrarrojo de saturados del asfalto modificado con el 0.5% de Polietileno de baja densidad al día cero, cinco y cuarenta.

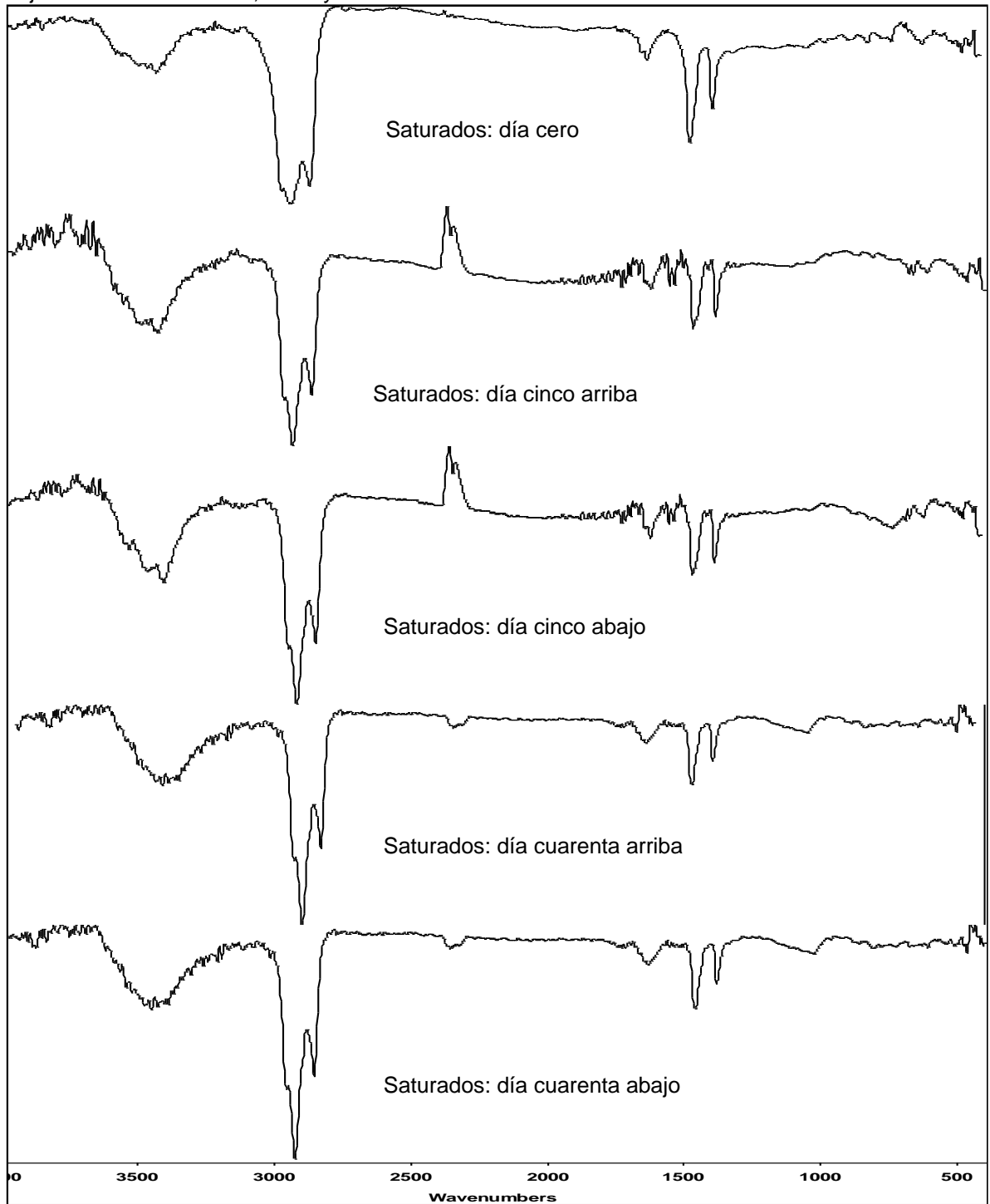


Tabla 27. Bandas características del espectro infrarrojo para saturados del asfalto modificado con Polietileno de baja densidad (PDB) al 0.5%, en el proceso de almacenamiento.

Banda obtenida (cm^{-1})	Día cero	Día cinco		Día cuarenta	
		Arriba	Abajo	Arriba	Abajo
Tensión C–H asimétrica.	2924	2923	2923	2923	2924
Tensión simétrica C–H	2853	2853	2853	2853	2853
Tensión media C–C alifáticos.	1617	1616	1617	1644	1632
Deformación asimétrica y simétrica C–H de metilenos	1552	1532	1532	1537	1537
	1461	1463	1463	1457	1459
	1378	1382	1382	1382	1381
Deformación de balanceo C–H del metileno –CH ₂ .	724	661	724	728	727
Oscilaciones C–H (CH ₂)	611	610	610	609	609

Se aprecian absorciones alrededor de 2923 y 2853 cm^{-1} , correspondiente a vibraciones de tensión asimétrica y simétrica del enlace C-H para los grupos metilenos respectivamente, complementadas con bandas que aparecen entre 1552 a 1378 cm^{-1} , características de deformaciones simétricas y asimétricas del enlace C-H de alcanos.

La banda de tensión media del enlace C-C que corresponde a compuestos saturados alifáticos de cadena larga aparece en la región del espectro cercana a 1617 cm^{-1} .

Se aprecian bandas de absorción débiles entre 728 a 609 cm^{-1} correspondiente a deformaciones de balanceo y oscilaciones C-H de metilenos. Estas frecuencias proporcionan información sobre el número aproximado de metilenos así:

Frecuencias por debajo de 720 cm^{-1} , indica que $(\text{CH}_2)_n$, donde $n > 5$.

Frecuencia por encima de 720 cm^{-1} , indica que $(\text{CH}_2)_n$, donde $n < 4$.

Frecuencia de 738 cm^{-1} , indica que $n = 3$.

Frecuencia de 760 cm^{-1} , indica que $n = 2$.

Frecuencia de 780 cm^{-1} , indica que $n = 1$.

3.5.1.5. ANÁLISIS DE UV-VIS PARA LA FRACCIÓN MALTÉNICA DEL ASFALTO MODIFICADO CON POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD (PBD) AL 0.5%, DURANTE EL PROCESO DE ALMACENAMIENTO

En la tabla 28 se encuentran las bandas más representativas de absorción de el UV-Vis para el asfalto modificado con Polietileno de baja densidad, antes y después del almacenamiento, para los días cero, cinco y cuarenta.

Tabla 28. Bandas de absorción de UV-Vis para el asfalto modificado con Polietileno de baja densidad al 0.5%, durante almacenamiento

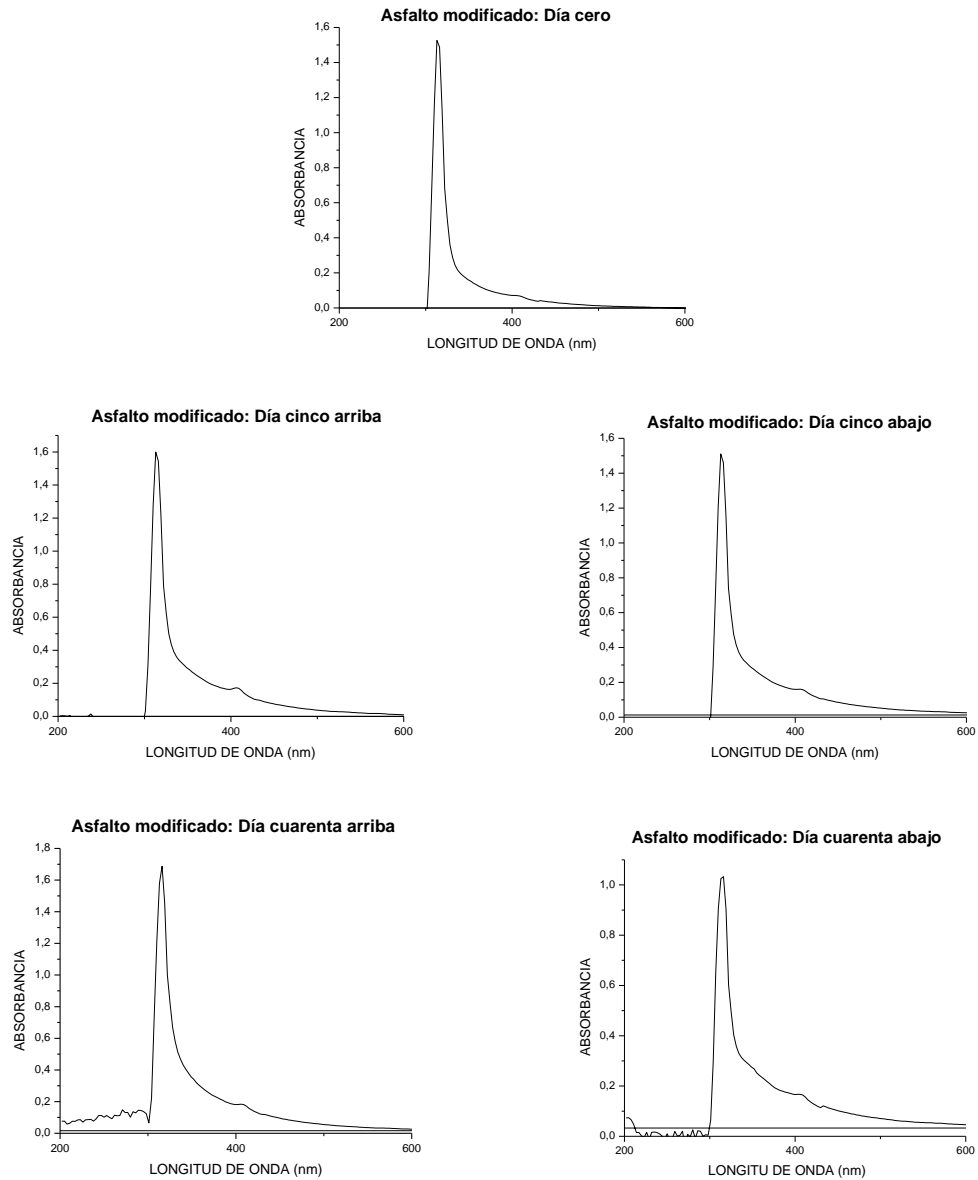
COMPONENTE	BANDAS DE ABASORCION (nm)					
	Día cero		Día cinco		Día cuarenta	
	Arriba	Abajo	Arriba	Abajo	Arriba	Abajo
Resinas	313	313	313	313	313	316
Aromáticos	286, 325	286,325	386, 325	386,325	325	325
Saturados	325	325	325	325	325	325

3.5.1.5.1. ANÁLISIS DE ESPECTROSCOPIA UV-VIS PARA RESINAS, DEL ASFALTO MODIFICADO CON POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD (PBD), DURANTE EL PROCESO DE ALMACENAMIENTO

Los espectros de UV-Vis correspondientes a la fracción de las resinas del asfalto modificado con polietileno de baja densidad (PDB), aparecen en la figura 42 y las absorciones a diferentes longitudes de onda se reportan en la tabla 28.

Dichos espectros muestran bandas representativas, las cuales se mantienen a una misma longitudes de onda 313 nm, indicando que las transiciones de tipo $n \rightarrow n^*$, ocasionadas por los electrones pi (π) conjugados, de anillos aromáticos policonjugados; esto indica que las transiciones de esta fracción malténica se mantienen con el aumento de la temperatura y bajo condiciones de almacenamiento.

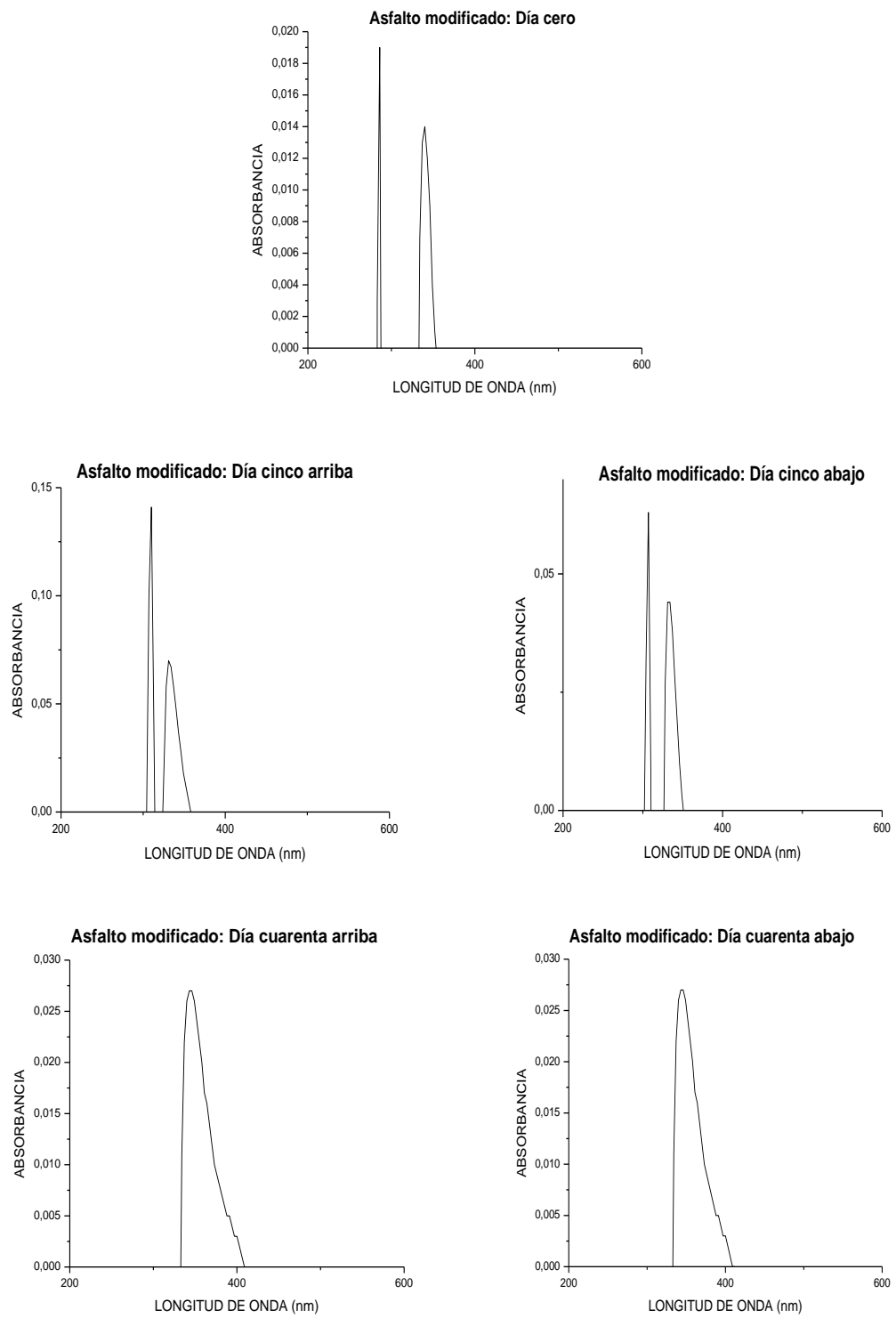
Figura 42. Espectros UV-Vis de resinas para el asfalto modificado con Polietileno de baja densidad (PBD) al 0.5%, en el almacenamiento



3.5.1.5.2. ANÁLISIS DE ESPECTROSCOPÍA UV-VIS PARA LOS AROMÁTICOS, DEL ASFALTO MODIFICADO CON POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD (PBD), DURANTE EL PROCESO DE ALMACENAMIENTO

En la tabla 28 y en la figura 43, aparecen las bandas de UV-Vis correspondiente a la fracción aromática del asfalto modificado al 0.5% con Polietileno de baja densidad.

Figura 43. Espectros UV-Vis de aromáticos para el asfalto modificado con Polietileno de baja densidad (PBD) al 0.5%, durante el almacenamiento



Se presenta un pequeño cambio en las bandas de absorción para los aromáticos con respecto a las del asfalto original a una longitud de onda de 286 nm, esta es debido a la presencia del solvente, pero la banda más representativa se mantiene a 325 nm, dicha banda se debe a las transiciones tipo $n \rightarrow n^*$ representativas de las bases nitrogenadas presentes en fracción del asfalto; por lo tanto las transiciones electrónicas se mantienen, indicando que el polímero es compatible con el asfalto. Este comportamiento se mantiene tanto para el almacenamiento después de los cinco y cuarenta días.

3.5.1.5.3 ANÁLISIS DE ESPECTROSCOPIA UV-VIS PARA LOS SATURADOS, DEL ASFALTO MODIFICADO CON POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD (PBD), DURANTE EL PROCESO DE ALMACENAMIENTO

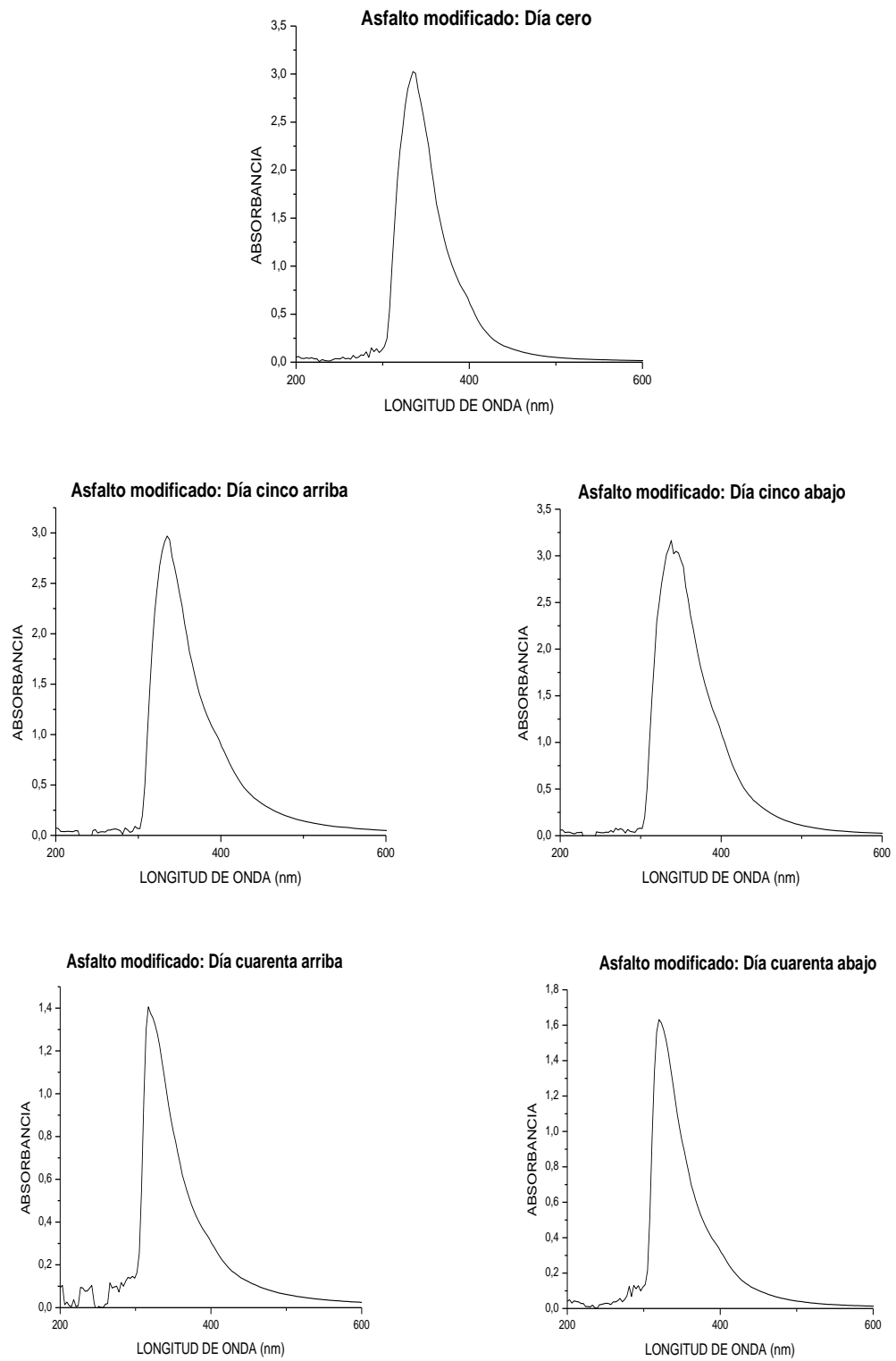
Los espectros UV-Vis para los componentes saturados del asfalto modificado con Polietileno de baja densidad al 0.5%, aparecen en la figura 44 y las absorciones a diferente longitud de onda se reportan en la tabla 28

Las absorciones presentadas se dan a longitudes de onda no esperadas ya que las parafinas son compuestos saturados que contienen exclusivamente electrones σ , por lo tanto realizan transiciones tipo $\sigma \rightarrow \sigma^*$ y solamente se encuentran disponibles en la región del ultravioleta lejano (vacío), los hidrocarburos saturados son transparentes en la región del ultravioleta cercano, es decir, solo absorben a longitudes de onda < 150 nm.

La razón por la cual aparecen bandas a longitudes de onda mayores es por que las parafinas o saturados del asfalto presentan tanto cadenas lineales como cíclicas, que provocan absorciones en la región del ultravioleta cercano, con electrones no enlazados del tipo n ; estos pueden provocar transiciones $n \rightarrow \sigma^*$ ó $\sigma \rightarrow \sigma^*$, siendo las primeras mas probables debido a que requieren menor energía; de tal manera las absorciones presentadas para los componentes saturados del asfalto original se encuentran a longitudes de onda mayores a las esperadas.

Se debe tener en cuenta que a mayor número de átomos de carbono en la cadena, menor solidez de la molécula, de esta forma la absorción se desplaza a las longitudes de onda observadas. Este comportamiento se mantiene en el asfalto modificado al igual que en el original.

Figura 44. Espectros UV-Vis de los saturados para el asfalto modificado con Polietileno de baja densidad (PBD) al 0.5%, durante el almacenamiento



3.5.2. ESTUDIO DEL ASFALTO MODIFICADO CON POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD (PBD) AL1.5%, DURANTE EL PROCESO DE ALMACENAMIENTO.

Como se ha mencionado en la sección 3.5.1, la concentración del polímero incide significativamente en las propiedades físicas, químicas y reológicas del cemento asfáltico. Estas se deben mantener aproximadamente constantes en los diferentes periodos de almacenamiento.

3.5.2.1 ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL ASFALTO MODIFICADO CON POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD (PBD) AL 1.5%, DURANTE EL PROCESO DE ALMACENAMIENTO

Los ensayos para evaluar las propiedades físicas de consistencia del asfalto modificado con Polietileno de baja densidad al 1.5%, durante el periodo de almacenamiento, se reportan en la tabla 29.

Tabla 29. Propiedades físicas de consistencia del asfalto modificado con polietileno de baja densidad al 1.5%, durante el periodo de almacenamiento.

PROPIEDAD FÍSICA	Asfalto modificado con 1.5% de PBD				
	Día cero	Día cinco		Día cuarenta	
		Arriba	Abajo	Arriba	Abajo
Viscosidad (cP)	145625	160667	161667	159000	161500
Penetración	96	87	87	85	85
Ductilidad	+100 cm	+100	+100	+100	+100
Peso específico del asfalto sólido (g/mL)	1.0065	1.0071	1.0072	1.0070	1.0062

Las propiedades físicas de consistencia del asfalto modificado con Polietileno de baja densidad reportados en la tabla 29, se pueden apreciar variaciones en los valores de la viscosidad, antes del almacenamiento(día cero) es de 145625 cP y después de cuarenta días de almacenamiento, alcanza valores cercanos 160000 cP, presentando un ligero aumento, quizá se debe a la transformación en fracciones mas pesadas de algunos componentes del asfalto, causado por los efectos del calentamiento a 165°C Norma I.N.V. E-726 al cual fué sometido el asfalto durante cinco día. Los valores de las viscosidades tomadas al día cinco y al día cuarenta, son semejantes en las muestras de la parte de arriba como en la parte de abajo del recipiente.

Los resultados del ensayo de penetración las variaciones son insignificantes mas bien los resultados tienden a ser constantes en los diferentes períodos de almacenamiento.

Los valores de los ensayo de ductilidad y peso específico tienden a ser constantes durante los diferentes períodos de almacenamiento. El hecho de que las propiedades físicas de consistencia se mantengan constantes durante los diferentes períodos de almacenamiento a excepción de los resultados de las viscosidades, implica que la mezcla asfalto-polímero no es afectada por los períodos de calentamiento prolongado, ni por el tiempo de almacenamiento.

3.5.2.2. ANÁLISIS DEL ASFALTO MODIFICADO CON POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD (PBD) AL 1.5% POR MICROSCOPIA DE FLUORESCENCIA, DURANTE EL PERÍODO DE ALMACENAMIENTO

Durante el período de almacenamiento es muy importante que el asfalto modificado conserve su homogeneidad, ya que de este depende exclusivamente de la compatibilidad del polímero con el asfalto.

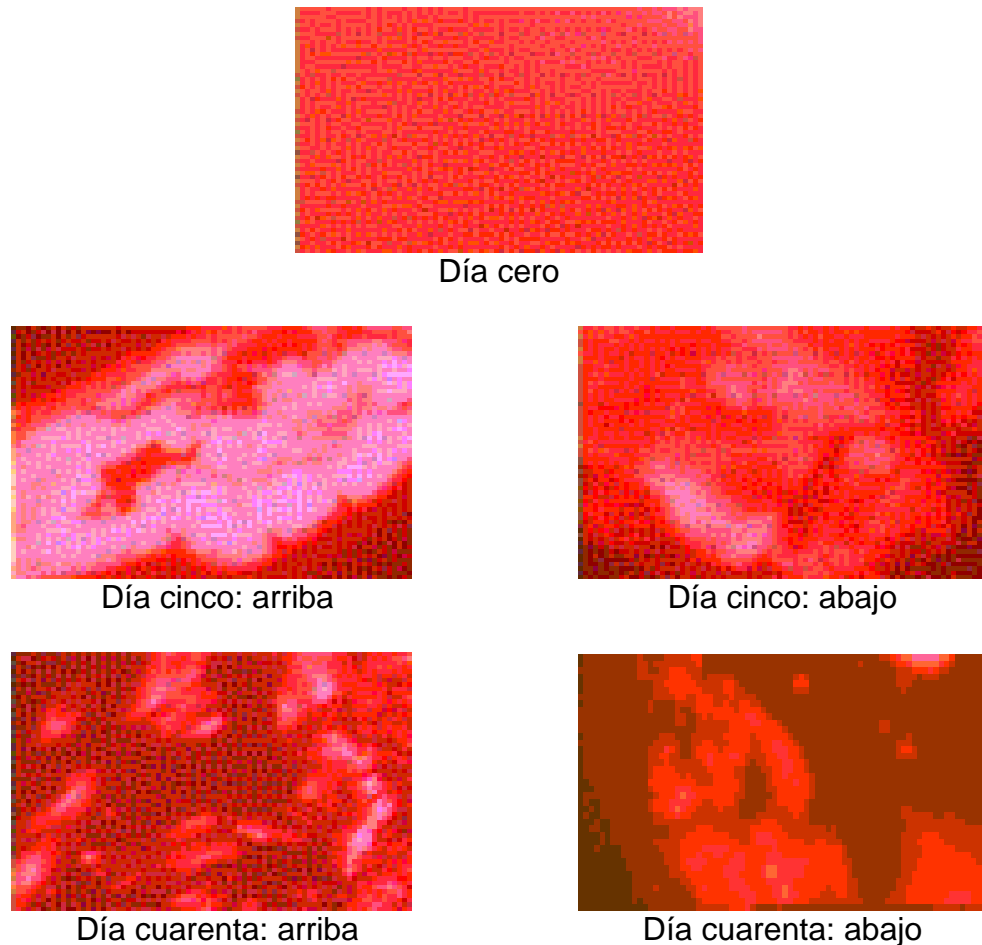
Mediante la técnica de microscopia de fluorescencia se puede conocer el grado de compatibilidad de la mezcla asfalto-polímero.

La microfotografía tomada el día cero, al asfalto modificado con polietileno de baja densidad al 1.5%, revela que la mezcla asfalto-polímero es completamente homogénea, ya que no se observan mallas o redes que son características de mezclas heterogéneas, esto significa que no ocurre separación entre asfalto-polímero.

Durante el almacenamiento, de cinco días a temperatura constante de 165°C Norma I.N.V. E-726, las microfotografías tomadas arriba y abajo del recipiente presenta mallas o redes característica de una mezcla heterogénea, lo que indica la separación del asfalto-polímero. Posiblemente se debe al cambio de densidad entre asfalto-polímero por efectos del calentamiento, al que es sometido el asfalto durante el almacenamiento, provocando en el polímero una mayor absorción de compuestos parafínicos hasta el punto saturación, conduciendo a la precipitación de los componentes del asfalto. Igualmente sucede al final del almacenamiento, donde las microfotografías tomadas al día cuarenta revelan la heterogeneidad de la mezcla asfalto-polímero.

Los resultados demuestran que después del almacenamiento ocurre una separación entre el asfalto y el polímero; por lo tanto, van a incidir en forma negativa en las propiedades físicas y química del asfalto modificado.

Figura 45. Microfotografías del modificado con PDB al 1.5%, tomadas a 10 aumentos (filtro azul), durante el periodo de almacenamiento, días cero, cinco y cuarenta.



3.5.2.3 ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES QUÍMICAS DEL ASFALTO MODIFICADO CON POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD (PBD) AL 1. 5%, EN EL PERÍODO DE ALMACENAMIENTO

En la tabla 30 aparecen las fracciones que componen el asfalto, separadas por cromatografía de columna Norma ASTM D-2007 (SARA) mediante la adición de n-hexano.

Los asfaltenos son la parte sólida de los asfaltos; por lo tanto son los responsables de la dureza, según los resultados reportados en la tabla 30 no se presentan cambios significativos en la composición porcentual de los asfaltenos, mas bien tienden a permanecer constantes en el transcurso del almacenamiento. Igualmente la fracción saturada, la composición porcentual se mantiene constante en los diferentes periodos de almacenamiento.

Tabla 30. Características de las fracciones separadas del asfalto modificado al 1.5% con Polietileno de baja densidad (PBD), por cromatografía de columna, al día cero, cinco y cuarenta.

Compuesto	Día cero	Día cinco		Día cuarenta	
		Arriba	Abajo	Arriba	Abajo
Asfaltenos	12 %	14 %	14 %	15 %	14 %
Resinas	14 %	16 %	17 %	17 %	18 %
Aromáticos	20 %	16 %	14 %	13 %	13 %
Saturados	54 %	55 %	55 %	55 %	55 %

La fracción resinosa permanece aproximadamente constante en la composición porcentual, caso contrario ocurre con la fracción aromática, en la que se presenta una pequeña disminución, debido a los efectos del calentamiento del asfalto durante el periodo de almacenamiento, posiblemente se debe a una fusión de los anillos de la fracción aromática transformándose en resinas.

La fracción saturada también permanece constante, esto implica que no presentó cambio durante el tiempo de almacenamiento.

3.5.2.4. ANÁLISIS DE ESPECTROSCOPIA IR PARA LAS FRACCIÓNES DEL ASFALTO MODIFICADO CON POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD (PBD) AL 1.5%, DURANTE EL ALMACENAMIENTO

3.5.2.4.1. ANÁLISIS DE ESPECTROSCOPIA IR PARA LAS FRACCIÓN ASFALTENICA DEL ASFALTO MODIFICADO CON POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD (PBD) AL 1.5%, DURANTE EL ALMACENAMIENTO.

La figura 46 muestra los espectros correspondientes al asfalto modificado con Polietileno de baja densidad (PBD) al 1.5 %, al día cero, cinco y cuarenta.

En la tabla 31 se resumen las bandas de absorción del asfalto modificado con Polietileno de baja densidad (PBD) al 1.5 %, antes y durante el proceso de almacenamiento, al día cero, cinco y cuarenta.

A los asfaltenos, se les considera como un sistema condensado de anillos aromáticos polinucleares, sustituidos por cadenas alquílicas y alicíclicas con heteroátomos, como: O, N, S, Ni, V y Fe, los espectros infrarrojo aparecen en la figura 46.

Figura 46. Espectros IR de asfaltenos del asfalto modificado con Polietileno de baja densidad (PBD) al 1.5 %, al día cero, cinco y cuarenta.

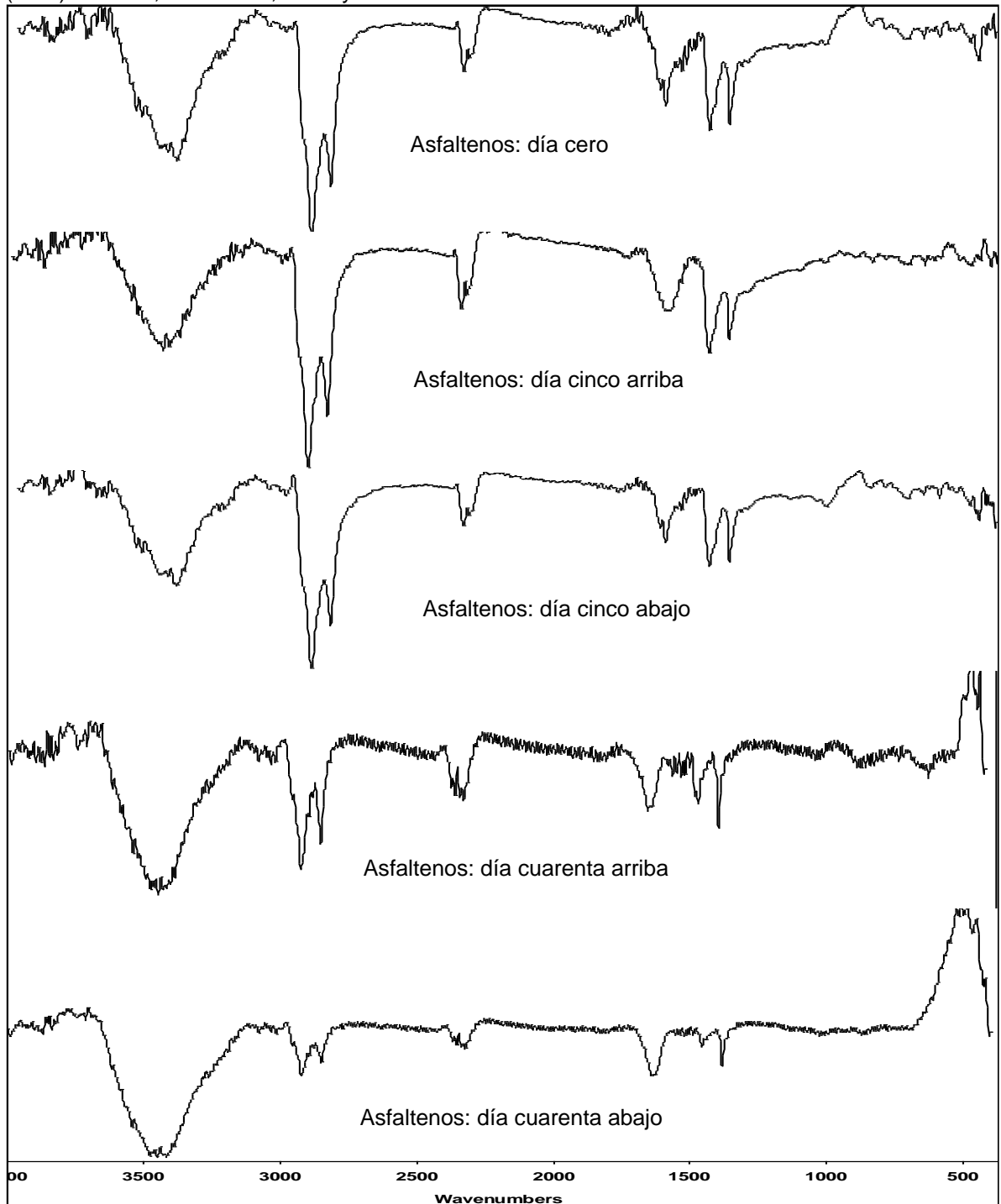


Tabla 31. Bandas características del espectro Infrarrojo para asfaltenos del asfalto modificado con Polietileno de baja densidad (PBD) al 1.5 %, al día cero, cinco y cuarenta.

Banda obtenida (cm ⁻¹)	Día cero	Día cinco		Día cuarenta	
		Arriba	Abajo	Arriba	Abajo
Tensión asimétrica –N-H	3384	3447	3424	3460	3428
Tensión C-H aromático.	3071	3021	3020	3020	3020
Tensión –C-H producida por – CH ₃ , -CH ₂ , -CH, CHO	2919	2918	2918	2921	2919
	2847	2848	2849	2848	2847
Tensión C=C aromáticos	1615	1614	1617	1643	1640
	1553	1539	1540	1536	1539
Deformación N–H en tijera, débil, de amina secundaria	1453	1454	1456	1457	1443
Deformación –C-H metilenos	1453	1454	1456	1457	1443
	1373	1382	1382	1383	1383
Flexión C-H fuera del plano de un naftaleno β-sustituido	859	863	860	862	862
Deformación C–H aromático, fuera del plano.	728	723	732	728	728
Tensión C-S banda débil.	608	607	610	607	608
Tensión –C-S, cuando esta conjugando, banda débil.	474-421	474-421	474-421	474-421	474-421
Vibración de flexión C–H aromáticos sustituidos	442	465	467	465	466
Porfirinas –M (V, Fe, Cu, Ni)	465-606	465-606	465-606	465-606	465-606

En el espectro de la figura 46 correspondiente asfalto modificado con Polietileno de baja densidad (PBD) al 1.5 % en el día cinco, se observa que no presenta cambios significativos, tanto en la fracción de arriba como en la de abajo, con respecto al día cero, lo que indica que el efecto de la temperatura no altera la estructura química principal de los asfaltenos, en el asfalto modificado. En el espectro del día cuarenta, tanto en la parte de arriba como en la parte de abajo permanece igual lo cual se puede corroborar con las bandas de la tabla 31.

3.5.2.4.2. ANÁLISIS DE ESPECTROSCOPIA IR PARA LA FRACCIÓN DE LAS RESINAS DEL ASFALTO MODIFICADO CON POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD (PBD) AL 1.5%, DURANTE EL ALMACENAMIENTO.

La figura 47 presenta los espectros IR de la fracción resínica del asfalto modificado con Polietileno de baja densidad (PBD) al 1.5 %, al día cero, cinco y cuarenta y en la tabla 32 se resumen las bandas características de las resinas.

Figura 47. Espectros IR de resinas del asfalto modificado con Polietileno de baja densidad (PBD) al 1.5 %, al día cero, cinco y cuarenta.

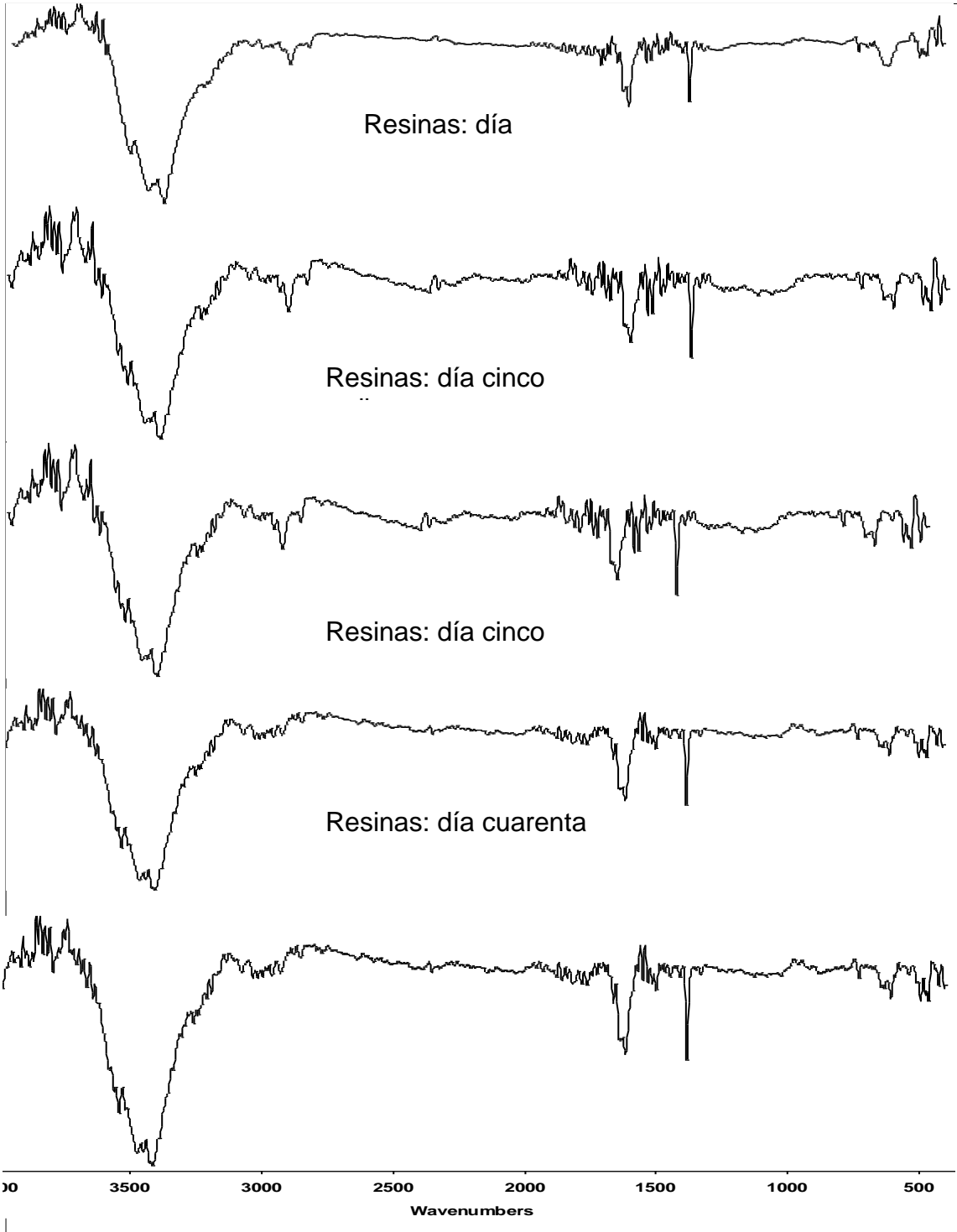


Tabla 32. Bandas características del espectro Infrarrojo para resinas del asfalto modificado con Polietileno de baja densidad (PBD) al 1.5 %, al día cero, cinco y cuarenta.

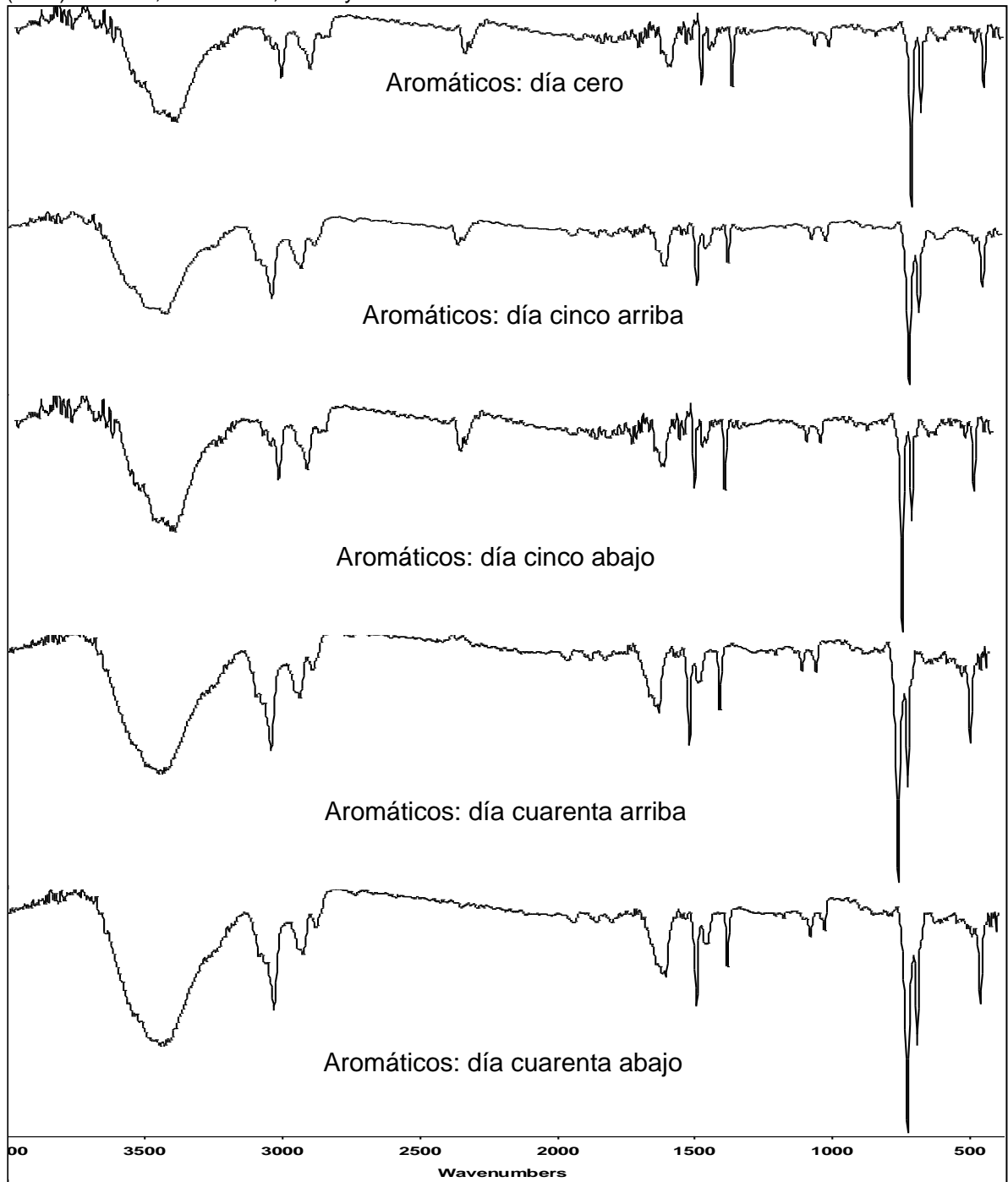
Banda obtenida (cm ⁻¹)	Día cero	Día cinco		Día cuarenta	
		Arriba	Abajo	Arriba	Abajo
Tensión O-H, N-H	3425	3412	3412	3425	3412
Tensión C-H aromático.	3020	3020	3020	3020	3020
Tensión C-H (CH ₃ , CH ₂ , C-H, CHO)	2924 2852	2925 2852	2924 2852	2926 2850	2926 2850
Armónicos, sobretonos de vibración de tensión C=C	1686- 1877	1686- 1877	1686- 1877	1686- 1877	1686- 1877
Bandas con intensidades variables, tensión del C=C aromáticos.	1617 1503 1466	1617 1532 1482	1615 1549 1482	1616 1514 1482	1616 1500 1483
Deformación asimétrica metilenos	1450	1450	1450	1450	1450
Deformación C-H simétrica	1383	1383	1383	1383	1383
Deformación de aleteo y torsión del metileno	1244	1250	1250	1250	1250
Tensión C-N, C-C y deformación C-H en el plano	1080 1030	1080 1030	1080 1030	1080 1030	1080 1030
Deformación de abanico fuera del plano N-H	677-729	677-729	677-729	677-729	677-729
Deformación C-H aromático, fuera del plano	729	729	730	729	728
Vibración de tensión C-S	609	608	610	608	610
Flexión C-H aromáticos sustituidos	540 493	540 477	541 465	540 477	530 476

Las absorciones de las bandas características de los espectros de las resinas del asfalto modificado con el polímero Polietileno de baja densidad (PBD) al 1.5% durante el almacenamiento (con cinco y cuarenta días) muestra semejanzas tanto con las resinas del asfalto original como con el asfalto modificado; esto se comprueba con los espectros de la figura 47.

3.5.2.4.3. ANÁLISIS DE ESPECTROSCOPIA IR PARA LA FRACCIÓN AROMÁTICA DEL ASFALTO MODIFICADO CON POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD (PBD) AL 1.5%, DURANTE EL ALMACENAMIENTO.

Los espectros de la fracción aromática del asfalto modificado con Polietileno de baja densidad (PBD) al 1.5%, en el proceso de almacenamiento, se muestra en la figura 48.

Figura .48 Espectros ir de aromáticos del asfalto modificado con Polietileno de baja densidad (PBD) al 1.5 %, al día cero, cinco y cuarenta.



Con la tabla 33, se establece una comparación de la fracción aromática del asfalto modificado con Polietileno de baja densidad (PBD) al 1.5%, antes y durante el almacenamiento.

Tabla 33. Bandas características del espectro Infrarrojo para aromáticos del asfalto modificado con Polietileno de baja densidad (PBD) al 1.5 %, al día cero, cinco y cuarenta.

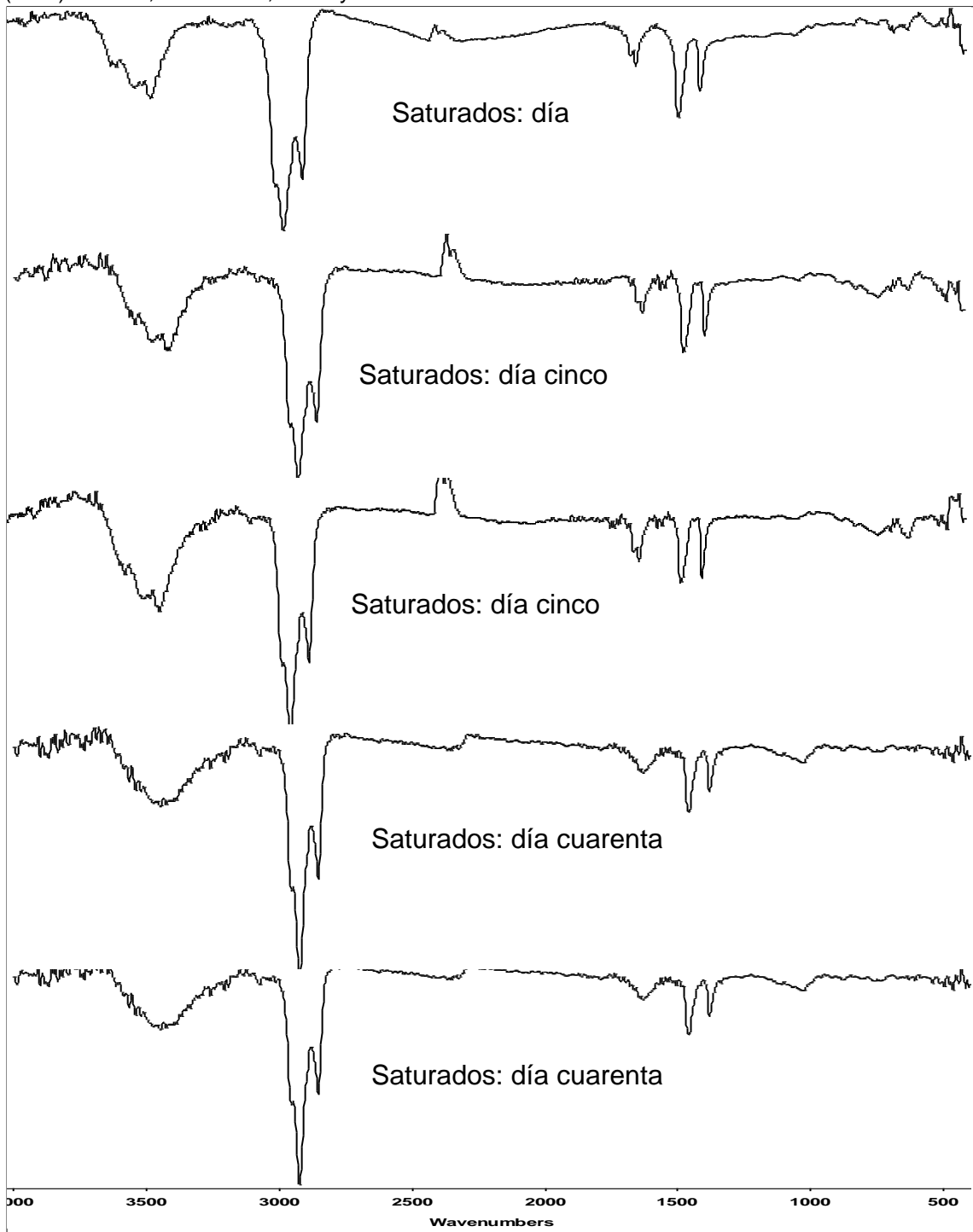
Banda obtenida (cm ⁻¹)	Día cero	Día cinco		Día cuarenta	
		Arriba	Abajo	Arriba	Abajo
Tensión N–H	3412	3413	3412	3413	3425
Tensión C-H aromático.	3027	3033	3027	3029	3041
Tensión asimétrica C–H (CH ₃ , CH ₂ , C–H, CHO)	2924	2927	2924	2924	2924
Tensión simétrica metilos	2878	2823	2878	2879	2879
Tensión C-H proporcionada por los ciclohexanos.	2853– 2924	2823– 2927	2853– 2924	2851– 2926	2851– 2957
Armónicos y sobretonos de vibración de tensión C=C	1686– 1948	1686– 1948	1686– 1948	1686– 1948	1686– 1948
Bandas con intensidades variables, vibración de tensión de C=C aromáticos.	1616 1520 1495	1647 1539 1489	1616 1520 1495	1618 1507 1495	1618 1520 1495
Deformación N–H en tijera, débil, de amina secundaria	1495	1489	1495	1495	1495
Deformación asimétrica metilenos	1464	1463	1464	1462	1462
Deformación C–H simétrica	1383	1383	1383	1383	1383
Tensión C–N, C–C y deformación C–H en el plano	1080 1030	1080 1030	1080 1030	1080 1029	1080 1030
Flexión C–H fuera del plano de un naftaleno β-sustituido	821	821	821	821	821
Deformación en abanico fuera del plano N–H	694–821	694–821	694–821	694–821	694–821
Deformación de C-H aromático, fuera del plano	728 694	728 694	728 694	728 694	728 694
Flexión C–H aromáticos sustituido	463	467	463	463	463

Al comparar el espectro del día cero con los días cinco y cuarenta, se mantienen las mismas bandas, lo que indica que el efecto de la temperatura no afecta significativamente las bandas de absorción correspondientes a los grupos funcionales, pertenecientes a los aromáticos, tales como: grupos aminos, enlaces C-N, C-C, C-H y C=C, de anillos aromáticos y ramificaciones alifáticas.

3.5.2.4.4. ANÁLISIS DE ESPECTROSCOPIA IR PARA LA FRACCIÓN SATURADA DEL ASFALTO MODIFICADO CON POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD (PBD) AL 1.5%, DURANTE EL ALMACENAMIENTO.

En la figura 49, se muestra la comparación de espectros infrarrojos de las parafinas durante el proceso de almacenamiento al día cero, cinco y cuarenta.

Figura 49. Espectro Infrarrojo de saturados del asfalto modificado con Polietileno de baja densidad (PBD) al 1.5%, al día cero, cinco y cuarenta



En la tabla 34, se muestran las principales vibraciones de los espectros infrarrojos características de esta fracción.

Tabla 34. Bandas características del espectro Infrarrojo para Saturados del asfalto Modificado, al día cero, cinco y cuarenta.

Banda obtenida (cm ⁻¹)	Día cero	Día cinco		Día cuarenta	
		Arriba	Abajo	Arriba	Abajo
Tensión C–H asimétrica.	2953	2922	2922	2923	2922
Tensión simétrica C–H	2852	2852	2852	2852	2852
Tensión media C–C alifáticos.	1617	1617	1617	1623	1617
		1532	1532	-	
Flexión C–H ciclopentano y. Deformación asimétrica C–H de metilenos	1460	1458	1462	1456	1458
Deformación C–H simétrica	1380	1381	1381	1381	1379
Vibración de alargamiento C-C				1024	1024
Vibración de flexión fuera del plano C-H				878-741	812
Deformación de balanceo C–H del metileno –CH ₂ .	720	723	725	723	723
Oscilaciones C–H (CH ₂)	631	610	610	610	610

Los resultados de las absorciones de la fracción saturada de la tabla 34 muestran semejanzas, no se presentan cambios significativos en dichos valores de longitud de onda, lo que significa que el polímero presenta una excelente compatibilidad con la fracción saturada.

3.5.2.5. ANÁLISIS DE UV-VIS PARA LA FRACCIÓN MALTENICA DEL ASFALTO MODIFICADO CON POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD (PBD) AL 1.5%, DURANTE EL ALMACENAMIENTO

En la tabla 35 se encuentran las bandas mas representativas de absorción en el UV-Vis para el asfalto modificado con Polietileno de baja densidad al 1.5% antes y después del almacenamiento para los días cinco y cuarenta.

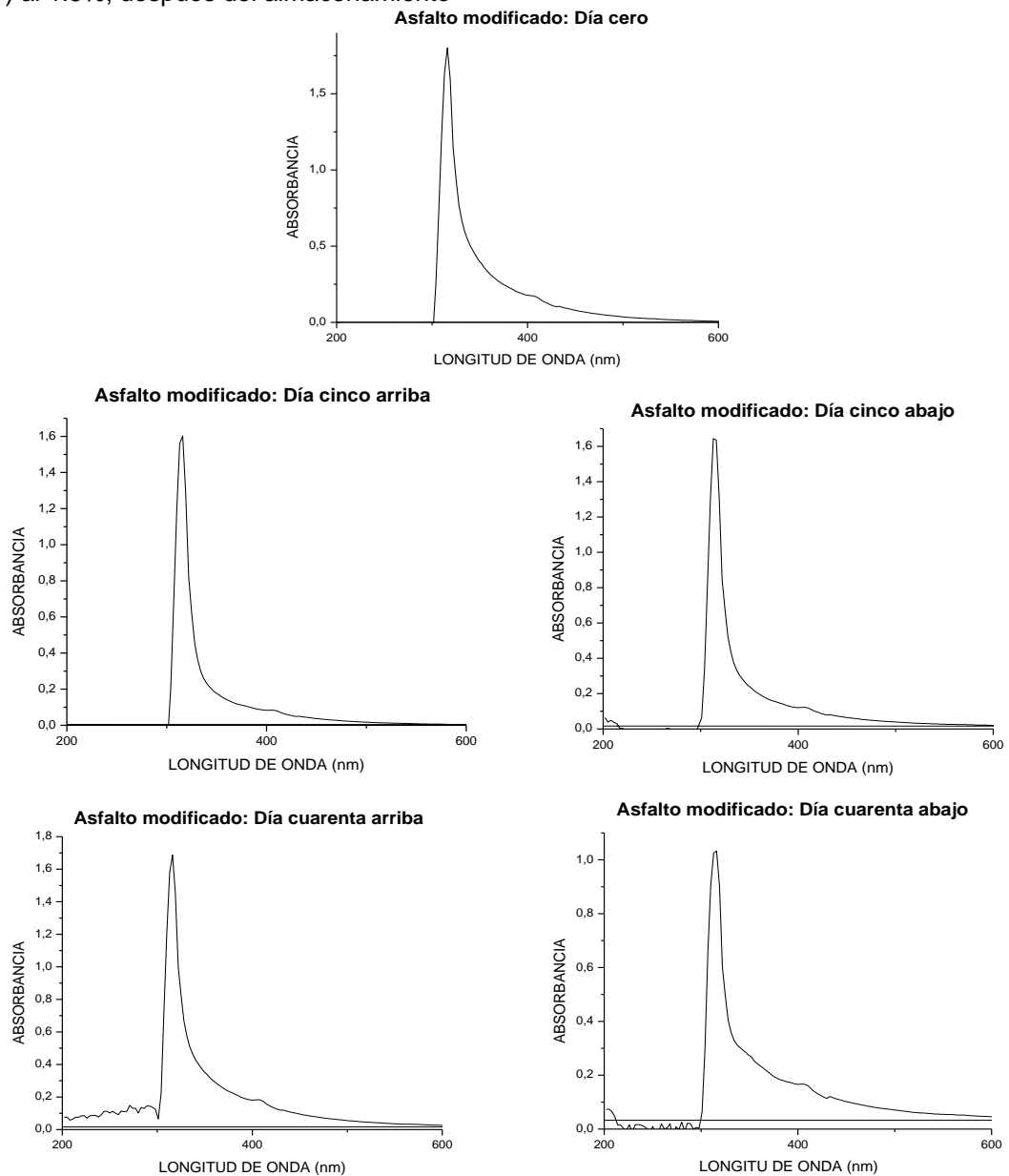
Tabla 35. Bandas de absorción para UV-Vis del asfalto modificado con Polietileno de baja densidad (PBD) al 1.5%, durante el almacenamiento

COMPONENTE	BANDAS DE ABSORCIÓN (nm)					
	Día cero		Día cinco		Día cuarenta	
	Arriba	Abajo	Arriba	Abajo	Arriba	Abajo
Resinas	313	313	313	313	316	316
Aromáticos	286,325	286,325	386,325	386,325	325	325
Saturados	325	325	325	325	325	325

3.5.2.5.1. ANÁLISIS DE ESPECTROSCOPIA UV-VIS PARA LAS RESINAS, DEL ASFALTO MODIFICADO CON POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD (PBD), DURANTE EL ALMACENAMIENTO

Las absorciones más representativas para las resinas del asfalto modificado con Polietileno de baja densidad, se encuentran en la tabla 35 y sus espectros UV-Vis se presentan en la figura 50

Figura 50. Espectros UV-Vis de resinas para el asfalto modificado con Polietileno de baja densidad (PBD) al 1.5%, después del almacenamiento

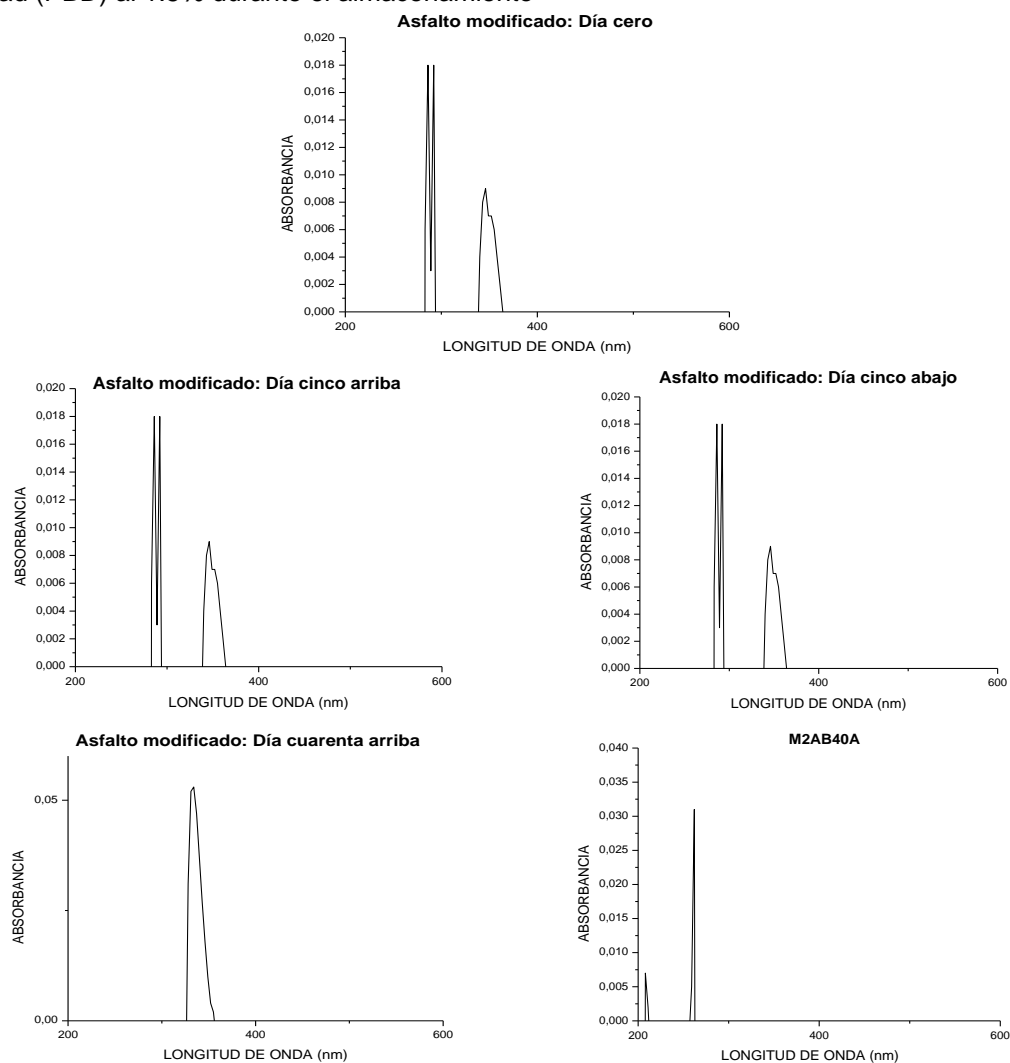


Se puede decir que las transiciones de la fracción resinosa para el asfalto modificado con Polietileno de baja densidad al 1.5% p/p, no varían lo que indica que las condiciones del almacenamiento no afectan las transiciones electrónicas de esta fracción malténica.

3.5.2.5.2. ANÁLISIS DE ESPECTROSCOPIA UV-VIS PARA LOS AROMÁTICOS, DEL ASFALTO MODIFICADO CON POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD (PBD), DURANTE EL ALMACENAMIENTO

Las absorciones representativas para los aromáticos del asfalto modificado con Polietileno de baja densidad al 1.5% p/p se encuentran en la tabla 35 y sus espectros UV-Vis se presentan en la figura 51.

Figura 51. Espectros UV-Vis de aromáticos para el asfalto modificado con Polietileno de baja densidad (PBD) al 1.5% durante el almacenamiento



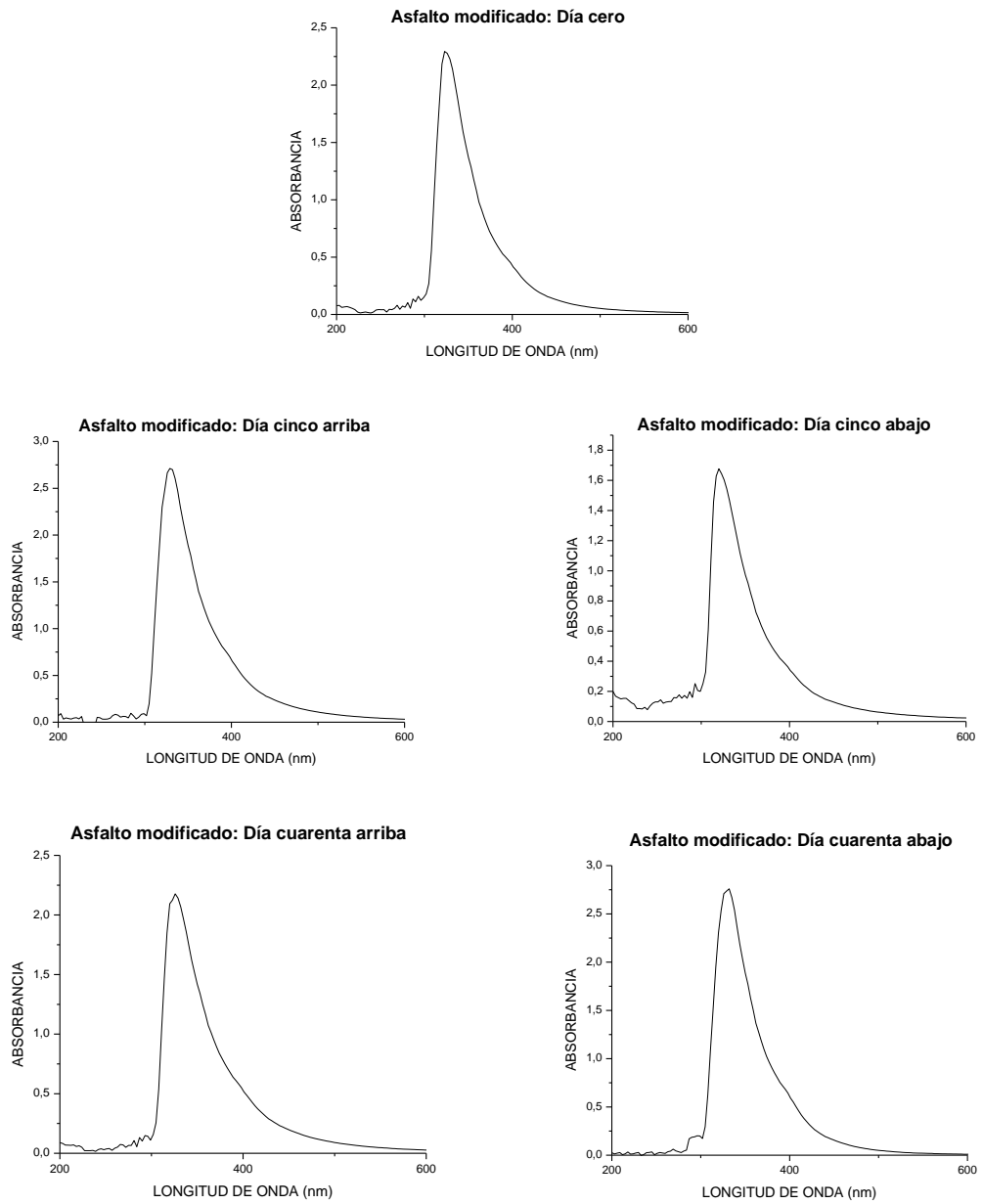
Las transiciones electrónicas de los componentes aromáticos, se mantiene, ya que sus espectros después del almacenamiento para los días cinco y cuarenta presentan las mismas bandas de absorción, esto indica que las condiciones del almacenamiento no afectan las propiedades químicas de la fracción aromática.

3.5.2.5.3. ANÁLISIS DE ESPECTROSCOPIA UV-VIS PARA LOS SATURADOS, DEL ASFALTO MODIFICADO CON POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD (PBD), DURANTE EL ALMACENAMIENTO

En cuanto al análisis de los espectros UV-Vis para los componentes saturados del asfalto modificado con Polietileno de baja densidad al 1.5% p/p, se tienen los resultados en la tabla 35 y figura 52.

Al igual que con el asfalto modificado con Polietileno de baja densidad al 0.5% y 1.5%, se mantienen las transiciones electrónicas para los saturados, tanto en las muestras tomadas en la parte de arriba como en la parte de abajo, lo cual indica que los grupos funcionales pertenecientes a esta fracción no se ven afectados por las condiciones de temperatura a las que se somete el asfalto durante el almacenamiento.

Figura 52. Espectros UV-Vis de saturados para el asfalto modificado con Polietileno de baja densidad (PBD) al 1.5% durante el almacenamiento



4. CONCLUSIONES

- ❖ La modificación de los cementos asfálticos con polímeros de Polietileno de baja densidad (PBD) es una técnica, que permite mejorar las propiedades físicas, químicas y reológicas, ya que los asfaltos convencionales no satisfacen ni garantizan un buen comportamiento, una vez se encuentren sometidos a la acción del tránsito y del clima.
- ❖ El estudio de las propiedades físicas, químicas y reológicas del asfalto original, indican el estado, la calidad, la durabilidad y la utilidad del asfalto, es el punto de partida a la hora de la modificación dado que según los resultados facilitarían la elección del polímero adecuado para mejorar las propiedades de los cementos asfálticos.
- ❖ Los resultados de los ensayos de las pruebas físicas y químicas, en cuanto a la compatibilidad y el comportamiento reológico del cemento asfáltico modificado indican las concentraciones óptimas del polímero que se le debe agregar al asfalto, en este caso fue de 0.5% a 2.0% de Polietileno de baja densidad (PBD).
- ❖ El betón modificado aumentará la vida útil del pavimento puesto que mejoró adherencia, estabilidad, ductilidad, resistencia, entre otras, dichas propiedades son mejores que las del asfalto sin modificar.
- ❖ La consistencia del bitumen modificado con el polietileno de baja densidad se incrementó, con ello puede mejorar la resistencia al ahuecamiento a altas temperaturas de servicio, y contrarrestar el fisuramiento.
- ❖ Mediante la técnica de Espectroscopia Infrarroja con Transformada rápida de Fourier (FTIR) y la Espectroscopía Ultravioleta-visible y pruebas de caracterización química, aplicada a los asfaltos y a sus fracciones obtenidas por Cromatografía líquida de columna, fue posible identificar y cualificar la presencia de grupos funcionales característicos de los saturados, aromáticos, bases nitrogenadas y ácidos cresílicos, dichos compuestos conforman las dos macromoléculas **asfaltenos** y **maltenos** de la mezcla compleja del asfalto.
- ❖ A pesar del mayor porcentaje de la fracción saturada del asfalto modificado con Polietileno de baja densidad (PBD), en comparación con el asfalto original muestra mejor consistencia y mayor durabilidad, ya que la presencia de saturados retarda la oxidación y el envejecimiento del asfalto.

- ❖ La ausencia de mallas o redes en las microfotografías tomadas al asfalto original y al asfalto modificado, indican la homogeneidad de la mezcla bituminosa, la cual se traduce en una buena compatibilidad de los componentes del asfalto con el polímero.
- ❖ Cuando el asfalto convencional y modificado fué sometido a períodos de almacenamiento Norma I.N.V. E-726 a 165°C y temperatura ambiente, la composición química del asfalto original varía con respecto a las fracciones resinosas y las aromáticas, mientras que para el asfalto modificado no se presentan cambios significativos en composición porcentual de los componentes del asfalto.
- ❖ Con la técnica analítica de espectroscopia infrarroja y el análisis cuantitativo de cada una de las fracciones químicas, que componen tanto el asfalto convencional como el asfalto modificado con el Polietileno de baja densidad (PBD), se deduce que el polímero por su afinidad se unió a los grupos funcionales que conforman la fracción saturada.
- ❖ Durante el proceso de almacenamiento los resultados de los ensayos, las propiedades físicas, químicas y reológicas tienden a mantenerse constantes, para el asfalto modificado con Polietileno de baja densidad (PBD) al 0.5% y 1.5% p/p. Esto significa que el polímero incide positivamente en la estabilidad del cemento asfáltico.
- ❖ Los análisis, cuantitativos mediante la técnica de cromatografía de columna Norma ASTM D-2007(SARA), espectroscópicos (Infrarrojo y ultravioleta visible) y la microscopia de fluorescencia no revelaron cambios significativos en los componentes del asfalto modificado, lo que implica una buena estabilidad del nuevo material durante los diferentes períodos de almacenamiento. A excepción del asfalto modificado con polietileno de baja densidad al 1.5%, no muestra una buena homogeneidad, ya que los resultados de las microfotografías de fluorescencia presentan mallas o redes producto de la separación del polímero y el asfalto, quizá debido a la diferencia de densidad.
- ❖ Desde el punto de vista físico, químico y económico, se recomienda llevar a cabo la modificación del bitumen con el plastómero Polietileno de baja densidad (PBD), ya que demostró ser estable al almacenamiento del material cuando es sometido a elevadas temperaturas y en ausencia de agitación, mejorando su comportamiento a temperaturas altas.

5. BIBLIOGRAFÍA

1. ALVARENGA, E. R, Incidencia de los ciclos de calentamiento - enfriamiento en las propiedades físicas del cemento asfáltico AC-30, utilizado en la producción de mezclas asfálticas en caliente. Tesis para optar el grado de ingeniero civil. Universidad Politécnica de El Salvador, p: 4. 2002.
2. ARENAS, H. Tecnología del cemento asfáltico. Segunda edición; Editorial FAID. Cali. 2000.
3. ARRIETA, M. A. Nueva opción de cromatografía de columna mediante la utilización de materiales no convencionales: arcilla y ripio de fique (*furcraea sp*) en la descomposición de asfaltos. Popayán. 2000. 111p. Trabajo de grado (Químico). Universidad del Cauca. FACENED. Departamento de Química.
4. BOTASSO, G., GONZALEZ, R., RODRIGUEZ, P. Selladores asfálticos de producción nacional. Universidad Tecnológica Nacional, área materiales viales. Argentina, p: 5. 2000.
5. Disponible:[/translate.google.com/translate?hl=es&sl=en&u=http://www.dynalabcorp.com/technical_info_ld_polyethylene.asp&prev=/search%3Fq%3Dlow%2Bdensity%2Bpolyethylene%26hl%3Des%26lr%3D%26sa%3DG](http://translate.google.com/translate?hl=es&sl=en&u=http://www.dynalabcorp.com/technical_info_ld_polyethylene.asp&prev=/search%3Fq%3Dlow%2Bdensity%2Bpolyethylene%26hl%3Des%26lr%3D%26sa%3DG)(Fecha de consulta:22-02-2006)
6. Disponible:usuarios.lycos.es/coropetrox/refineria.htm(14-11-2005)
7. Disponible:www.chemicals-technology.com/projects/odessa/(Fecha de consulta: 22-02-2006)
8. Disponible:www.e-asfalto.com/orig_asf/origenasf.htm(08-08-2005)
9. Disponible:www.frlp.utn.edu.ar/lemac/Publicaciones/Hasta%202002/Asf%20mod%20-%20IRF.pdf(Fecha de consulta: 01-09-2005)
10. Disponible:www.monografias.com/trabajos15/asfaltos-modificados/asfaltos-modificados.shtml(Fecha de consulta: 02-09-2005)
11. Disponible:www.solplast.com/sp/pro_pres.htm(Fecha de consulta:16-11-2005)

12. Disponible: www.telecable.es/personales/albatros1/quimica/industria/polietileno.htm (Fecha de consulta: 12-02-2006)
13. GUERRERO, N. Utilización de polímeros para modificación de mezclas asfálticas en caliente. (Primera parte). Universidad Nacional de ingeniería. Lima, p: 1. 2001.
14. LAREZ, C. Terminología básica utilizada en polímeros. Universidad de los Andes, facultad de ciencias. Departamento de química. Grupos de polímeros. Venezuela, p: 2, 15, 16, 23. 2001.
15. NORMAS NLT. Ensayo De Carreteras. Segunda Edición. Centro de estudios y experimentación de obras públicas, Madrid, 1992. (NLT 328/91).
16. POLACCO.G, BERLINCIONI.S, STASTNA.D, ZANZOTTO.B.L. ASPHAL MODIFICATION WITH DIFFERENT POLYETHYLENE-BASED POLYMERS. Dipartimento di Ingegneria Chimica, Università di Pisa, Via Diotisalvi 2, 56126 Pisa, Italy, Department of Civil Engineering, University of Calgary University, Calgary, Canada T2N 1N4 Received 6 May 2005; received in revised form 26 May 2005; accepted 28 May 2005 Available online 22 July 2005
17. REYES. L. F, REYES.O.O, VARGAS. J. Empleo de desperdicios plásticos para el diseño de una mezcla asfáltica drenante. Grupo CECATA. Pontificia Universidad Javeriana. Grupo de investigación de Geotecnia Vial. Universidad Militar Nueva Granada. Bogota. 20004.
18. RODRIGUEZ, R., CASTAÑO, V. M., MARTINEZ, M., HERNANDEZ, G. Desarrollo de aditivos para asfaltos modificados con bajos contenidos de hule. Instituto Mexicano del transporte. México, p: 6,7. 2002.
19. ROSERO. A. Y, SOLARTE. R. Y. Cambios en la estabilidad química durante el almacenamiento a corto plazo de un asfalto modificado con el plastómero eastman (EE-2), para uso vial. Popayán. 2005. Trabajo de grado (Químico). Universidad del Cauca. FACENED. Departamento de Química.
20. TORRES, C. M., ARENAS, H. Conferencias: Utilización de la espectroscopia de absorción infrarroja para detectar cambios en los crudos utilizados en la refinería en la producción de cementos asfálticos. Universidad del Cauca, Facultad de ingeniería civil- departamento de química. Popayán, p: 2. 1999.
21. TORRES. C. M. conferencias: Implementación de una carta de referencia para estudiar la composición química de los asfaltos colombianos mediante espectroscopia IR con transformada rápida de Fourier. Bucaramanga; segundas jornadas internacionales del asfalto, agosto de 2000.

22. TORRES. C. M. Naturaleza química de los constituyentes del asfalto y su importancia en la aplicación vial. Popayán. Producción intelectual. Universidad del Cauca. Facultad de ciencias naturales, exactas y de la educación. Departamento de química, p: 6, 13 –15. 1990.

23. PRETSCH. E; CLERC.T; SEIBE. J; SIMON. W. Tablas para la elucidación estructural de compuestos orgánicos por métodos espectroscópicos. Editorial Alhambra. España 1993, p I 5-I 250

24. BOYD N. Robert; MORRISON T. Robert. Química orgánica. Quinta edición. Editorial Addison Wesley Longman. Mexico 1998

ANEXOS

ANEXOS 1: VISCOSIDAD SAYBOLT DE ASFALTOS, NORMA I.N.V. E - 714

1. OBJETO

Este método se refiere a los procedimientos empíricos para determinar la viscosidad Saybolt universal o Saybolt Furol de productos del petróleo a temperaturas especificadas entre 21° y 99°C (70 y 210°F). Se incluye un procedimiento especial para productos parafinados.

Nota 1: Los métodos INV E - 715 y ASTM D445 se prefieren para determinar la viscosidad cinemática. Ellos requieren muestras más pequeñas, menor tiempo de ejecución y proporcionan mayor precisión. La viscosidad cinemática puede convertirse a Saybolt mediante las tablas de la Norma ASTM D 2161. Se recomienda que los índices de viscosidad se calculen a partir de la viscosidad cinemática y no de Saybolt.

2. USO Y SIGNIFICADO

2.1 Este método es útil para caracterizar ciertos productos del petróleo, como un medio para establecer la uniformidad de los embarques y de las fuentes de suministro.

2.2 La determinación de la viscosidad Saybolt de materiales a temperaturas mayores, es cubierta por la Norma ASTM E-102.

3. CORRESPONDENCIA CON OTRAS NORMAS

AASHTO T 72
ASTM D 88

ANEXO 2: PENETRACION DE LOS MATERIALES ASFALTICOS, NORMA I.N.V. E - 706

1. OBJETO

1.1 Esta norma describe el procedimiento que debe seguirse para determinar la consistencia de los materiales asfálticos sólidos o semisólidos en los cuales el único o el principal componente es un asfalto.

1.2 La penetración se define como la distancia, expresada en décimas de milímetro hasta la cual penetra verticalmente en el material una aguja normalizada en condiciones definidas de carga, tiempo y temperatura. Normalmente, el ensayo se realiza a 25°C (77°F) durante un tiempo de 5 s y con una carga móvil total, incluida la aguja, de 100 g, aunque pueden emplearse otras condiciones previamente definidas.

1.3 Los aparatos y el procedimiento descrito en esta norma son de aplicación general en productos asfálticos con una penetración máxima de 350; en el numeral 3.3.6 se indican el material y procedimiento para penetración hasta 500.

2. CORRESPONDENCIA CON OTRAS NORMAS

ASTM D 5 .
AASHTO T 49 .
NLT 124.

ANEXO 3: PESO ESPECIFICO Y PESO UNITARIO DE PRODUCTOS ASFALTICOS SÓLIDOS Y SEMISÓLIDOS, NORMA I.N.V. E - 707

1. OBJETO

1.1 Esta norma describe los procedimientos que deben seguirse para la determinación del peso específico y del peso unitario de materiales asfálticos sólidos y semisólidos y de alquitranes blandos, mediante el empleo de un picnómetro.

2. DEFINICIONES

2.1 **Peso específico.-** Es la relación entre el peso de un volumen dado del material a 25°C (77°F) o a 15.6°C (60°F) y el peso de un volumen igual de agua a la misma temperatura y se expresa en la siguiente forma:

Peso específico, 25/25°C (77/77°F) o 15.6/15.6°C (60/60°F)

2.2 Peso unitario.- Es el peso por unidad de volumen y se expresa así:

Peso unitario, 25°C (77°F) g/cm³, o 15.6°C (60°F) g/c

3. CORRESPONDENCIA CON OTRAS NORMAS

ASTM D 70

NLT 122

ANEXO 4: PUNTO DE ABLANDAMIENTO DE MATERIALES BITUMINOSOS (APARATO DE ANILLO Y BOLA), NORMA I.N.V. E - 712

1. OBJETO

Este método cubre la determinación del punto de ablandamiento de productos bituminosos en el intervalo de 30 a 157°C (86 a 315°F), utilizando el aparato de anillo y bola, sumergido en agua destilada (30 a 80°C), glicerina USP (encima de 80 a 157°C), o glicol etileno (30 a 110°C).

2. RESUMEN DEL METODO

Dos discos horizontales de material bituminoso, fundidos entre anillos de bronce, se calientan a una rata controlada en un baño líquido, mientras cada uno de ellos soporta una bola de acero. El punto de ablandamiento se considera como el valor promedio de las temperaturas, a la cuales los dos discos se ablandan lo suficiente, para permitir que cada bola envuelta en material bituminoso, caiga desde una distancia de 25 mm (1").

3. USO Y SIGNIFICADO

3.1 Los productos bituminosos son materiales viscoelásticos y no cambian del estado sólido, al estado líquido a una temperatura definida, sino que gradualmente se tornan más blandos y menos viscosos cuando la temperatura se eleva. Por esta razón, el punto de ablandamiento debe determinarse por medio de un método arbitrario fijo, pero definido que produzca resultados reproducibles y comparables.

3.2 El punto de ablandamiento es útil para clasificar productos bituminosos y es un valor índice de la tendencia del material a fluir cuando está sometido a temperaturas elevadas, durante su vida de servicio. También, puede servir para establecer la uniformidad de los embarques o fuentes de abastecimiento.

4. CORRESPONDENCIA CON OTRAS NORMAS

ASTM D 36
AASHTO T 53

ANEXO 5: DUCTILIDAD DE LOS MATERIALES ASFALTICOS, NORMA I.N.V. E - 702

1. OBJETO

1.1 Esta norma describe el procedimiento que debe seguirse para la determinación de la ductilidad de los materiales asfálticos, de consistencia sólida y semisólida.

1.2 El procedimiento consiste en someter una probeta del material asfáltico a un ensayo de tracción, en condiciones determinadas de velocidad y temperatura, en un baño de agua de igual densidad, definiéndose la ductilidad como la distancia máxima en cm que se estira la probeta hasta el instante de la rotura.

1.3 Normalmente, el ensayo se realiza con una velocidad de tracción de 50 ± 2.5 mm por minuto y la temperatura de $25 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ($77 \pm 1.0^{\circ}\text{F}$); aunque puede realizarse en otras condiciones de temperatura, debiendo concretarse en este caso la velocidad correspondiente.

2. CORRESPONDENCIA CON OTRAS NORMAS

ASTM D 113
AASHTO T 51
NLT 126

ANEXO 6: ESTABILIDAD AL ALMACENAMIENTO DE ASFALTOS, NORMA I.N.V. E - 726

1. OBJETO Y CAMPO DE APLICACION.

1.1 Esta norma describe el procedimiento que se debe seguir para determinar la estabilidad al almacenamiento que presentan los asfaltos modificados, en particular con polímeros, de aplicación en construcción de carreteras.

1.2 En circunstancias especiales climáticas, orográficas o de tráfico se pueden utilizar productos, generalmente polímeros, que adicionados al ligante asfáltico modifican alguna o varias de las características de éste, con el objeto de mejorarlo funcionalmente.

1.3 Durante el almacenamiento a temperaturas elevadas se pueden producir, en los ligantes modificados, fenómenos de cremado o de sedimentación, enriqueciéndose al ligante en polímeros en la parte inferior o superior del tanque en función de sus densidades respectivas. Este fenómeno puede ser propiciado por dispersión incorrecta del polímero en el ligante o por incompatibilidad entre ambos.

1.4 En el procedimiento que se describe, una muestra del ligante modificado, contenido en un recipiente conveniente, se somete a la acción de temperatura elevada durante 5 días determinándose, al final de este tiempo, el punto de ablandamiento (INV E-712), u otras características especificadas, en partes de muestra tomadas en la zona superior e inferior del recipiente.

2. APARATOS Y MATERIAL NECESARIOS

2.1 Recipiente metálico. De la forma y dimensiones que se especifican en la Figura No 1.

2.2 Balanza. Adecuada para masas de 200 g. con precisión de ± 0.1 g.

2.3 Estufa. Que pueda mantener una temperatura de $165 \pm 2^\circ\text{C}$.

2.4 Cápsulas. De porcelana, de 8 cm de diámetro, fondo plano.

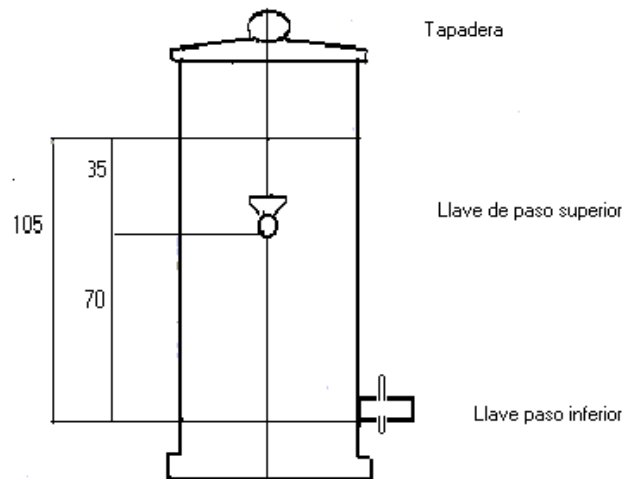
2.5 Material de uso general en laboratorios, varilla de vidrio, guantes, disolventes, cápsulas, etc.

3. PROCEDIMIENTO

3.1 Se adoptan todas las medidas y precauciones necesarias para que la porción de muestra para ensayo sea representativa de la muestra de laboratorio que presentará aspecto homogéneo y no estará contaminada.

3.2 Una cantidad suficiente de muestra de laboratorio se calienta con cuidado y con agitación continua hasta 165°C ; si es necesario, calentar más para conseguir una consistencia de la misma que permita su vertido.

Figura 1. Esquema del recipiente para el ensayo de estabilidad al almacenamiento



Nota: medidas en mm. Norma I.N.I.V. E-726

3.3 Se transfieren 180 ± 1 g de la muestra al recipiente de ensayo, al que previamente se le han cerrado herméticamente los dos tubos de salida insertos en la superficie lateral del mismo (Nota 1).

Nota1. Aunque en esta norma y en la Figura No 1 se especifica el sistema de cierre de los tubos laterales de salida, con llaves de paso del tipo de los empleados en el servicio de suministro de gas, esta característica no es privativa del ensayo, pudiéndose adoptar cualquier otro dispositivo (tapones, etc.) que garantice la hermeticidad y facilite la toma de parte de muestra superior e inferior después del período de calentamiento en estufa.

3.4 En seguida se tapa el recipiente con su tapadera bien ajustada y se lleva el conjunto a la estufa regulada a 165 ± 2 °C durante 120 horas (5 días).

3.5 Después de transcurrido el tiempo de calentamiento, se saca el recipiente con su contenido de la estufa, evitando movimientos de aquél que puedan ocasionar desplazamiento del ligante fluido dentro del recipiente, y se coloca en posición vertical sobre un soporte adecuado que permita el vaciado del contenido del recipiente como se indica a continuación.

3.6 Se quita la tapa del recipiente, se abre el dispositivo de cierre superior y se dejan fluir 60 ± 1 cm³ del contenido, que se recogen en una cápsula de porcelana previamente identificada como, por ejemplo, muestra superior. Inmediatamente después se abre el dispositivo de cierre inferior y

se dejan fluir otros $60 \pm 1 \text{ cm}^3$ del contenido, que se recogen en otra cápsula de porcelana previamente identificada como, por ejemplo, muestra inferior (Nota 2).

Nota 2. Puede ser necesario calentar ligeramente con un mechero el dispositivo de salida inferior si, por enfriamiento, el ligante modificado no fluyese por aumento de su viscosidad.

3.7 Los contenidos, por separado, de cada cápsula se trasvasan a su vez a los moldes de ensayo para la posterior determinación de los puntos de reblandecimiento, penetraciones, etc., respectivos. Estas manipulaciones se efectuarán respetando estrictamente lo indicado en las normas de ensayo correspondientes (Nota 3).

Nota 3. Aunque en esta norma se especifican los ensayos de penetración y del punto de ablandamiento anillo y bola para definir y cuantificar la estabilidad al almacenamiento de la muestra en cuestión, ello no impide la realización de otro u otros tipos de ensayo que permitan poner de relieve la posible alteración de la homogeneidad de la muestra por causa del ensayo de estabilidad al almacenamiento. Estos ensayos podrían ser, p.ej., desde el examen visual o microscópico, hasta la viscosidad absoluta.

3.8 Se efectúan sobre las dos submuestras tratadas superior e inferior, los ensayos de penetración y de punto de ablandamiento anillo y bola, de acuerdo con las normas INV E-706 y 712, respectivamente.

4. RESULTADOS

4.1 El resultado del ensayo de estabilidad al almacenamiento se expresará como diferencia entre las penetraciones y entre los puntos de reblandecimiento, determinados según el Apartado 3.8, obtenidos en las submuestras superior e inferior ensayadas.

Estabilidad al almacenamiento:

Variación de penetración: $\Delta P = P_{\text{sup}} - P_{\text{inf}} (0,1 \text{ mm})$

Variación del punto ablandamiento: $\Delta P = P_{\text{Asup}} - P_{\text{Ainf}} (^{\circ}\text{C})$

4.2 Aún no se han determinado los límites de precisión del ensayo.

5. CORRESPONDENCIA CON OTRAS NORMAS.

ANEXO 7: CURVA REOLÓGICA DEL ASFALTO ORIGINAL

