

MODIFICACION DE ASFALTO CON LATEX (CAUCHO NATURAL)

**VICTORIA EUGENIA ASTUDILLO GARCES
CLAUDELVI YOHANA REYES TALAGA**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACION
DEPARTAMENTO DE QUIMICA
POPAYAN
2006**

MODIFICACION DE ASFALTO CON LATEX (CAUCHO NATURAL)

**VICTORIA EUGENIA ASTUDILLO GARCES
CLAUDELVI YOHANA REYES TALAGA**

**Trabajo de Grado presentado como requisito parcial para optar el Título de
Químico**

**DIRECTORA GENERAL: 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
2006**

Nota de aceptación

Directora _____

M.Sc CRUZ MARINA TORRES CAICEDO

Jurado _____

Ing. RENE ZÚÑIGA

Jurado _____

Ing. HUGO LEON ARENAS

Fecha de sustentación: Popayán, 6 de Diciembre de 2006

AGRADECIMIENTOS

La fuente de inspiración para todos los esfuerzos puestos en este logro ha sido mi familia, quienes me han dado su apoyo en el transcurso de mi vida, expresando lo importante que soy para ellos, por tal razón, dedico este triunfo a toda mi familia, les agradezco de corazón por tantos momentos en los que he tropezado y han estado ahí junto a mi.

A mi Mamá, que desde la distancia ha buscado la forma de hacerme sentir que nada nos puede separar, dándome fuerzas para superarme cada día mas.

A mi Papá, quien ha hecho muchos esfuerzos para hacer menos difícil el camino hasta la meta de mi vida profesional, desde el colegio hasta el día de hoy, gracias por todo tu apoyo.

A mis Hermanos, Abuelos y Tías, quienes han estado siempre junto a mi, compartiendo cada instante de mi vida, con el fin de guiarme a ser cada día mejor persona.

A Sebastián, por apoyarme en los momentos en que más lo he necesitado, gracias por demostrarme lo que significo para ti.

A mis *Padres* quiero decirles... *¡gracias!* y dedicarles este triunfo, por haberme brindado la oportunidad de alcanzar una meta más en el largo camino que me falta por recorrer, además de agradecerles por creer en mi, por su apoyo incondicional, sus consejos y su infinito amor.

A la persona que representa mucho en mi vida... *Gustavo*, le agradezco por todo su amor y su comprensión, por haber contribuido a que mi paso por la Universidad sea una experiencia difícil de olvidar.

A *Diego* le doy gracias por haber estado conmigo en los momentos más difíciles cuando necesité de una mano amiga... y que independientemente de las vueltas que de la vida, seguiremos siendo amigos por siempre.

Finalmente a todos mis *compañeros* les doy mil y mil gracias, deseándoles el mayor de los éxitos en su desempeño profesional.

Recordemos finalmente que: *¡la confianza en si mismo, la actitud positiva y la perseverancia son los argumentos claves para triunfar!...*

VICTORIA ASTUDILLO

YOHANA REYES

A la profesora *Cruz Marina Torres*, que más que una directora ha sido una amiga, quien con sus consejos nos ha ayudado a superar nuestros errores, guiándonos por el camino mas indicado hacia una mejor vida profesional.

A nuestros jurados; Ing. René Zúñiga e Ing. Hugo León Arenas, por la colaboración y dedicación que nos han brindado.

Queremos agradecer a cada uno de nuestros profesores del Departamento de Química, por su tiempo, dedicación, gran calidad humana y por su capacidad académica, pero sobre todo por la exigencia que contribuye a nuestro desarrollo profesional.

A los Tecnólogos de los laboratorios del Departamento de Química, por su colaboración.

A los Geotecnólogos Victoria Muñoz y Oscar Orozco, del laboratorio de Materiales, Suelos y Pavimentos, del Departamento de Ingeniería Civil, por su contribución en la parte ingenieríl.

Al Geotecnólogo Jaime Obando, por el suministro del Látex.

Al profesor Nelson del Departamento de Biología, por facilitarnos el uso del espectrofotómetro Ultravioleta y Visible.

A Patricia de la unidad de Microscopia Electrónica, por su aporte en el uso del Microscopio Electrónico de Fluorescencia.

Finalmente, a nuestros amigos y compañeros, quienes nos han acompañado a lo largo de la carrera, compartiendo su amistad y momentos inolvidables.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION.....	26
1. MARCO REFERENCIAL	29
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	29
1.2 OBJETIVOS.....	31
1.2.1 Objetivo general.....	31
1.2.2 Objetivos específicos	31
1.3 JUSTIFICACION.....	32
1.4 MARCO TEORICO Y ESTADO DEL ARTE.....	34
1.4.1 El petróleo crudo.....	34
1.4.2 El asfalto	34
1.4.2.1 Asfaltos naturales	35
1.4.2.2 El asfalto derivado del petróleo.....	35
1.4.2.3 Propiedades físicas del asfalto	37
1.4.2.4 Composición química del asfalto	37
1.4.2.5 Problemas del asfalto.....	39
1.4.3 Asfaltos modificados	40
1.4.3.1 Modificación del asfalto.....	40
1.4.3.2 Características de los asfaltos modificados	41
1.4.4 Polímeros.....	42
1.4.4.1 Plastómeros	43
1.4.4.2 Elastómeros o cauchos.....	43
1.4.5 Látex o caucho natural.....	43
1.4.5.1 Origen del látex o caucho natural.	44
1.4.5.2 Recolección del látex	44
1.4.5.3 Composición química del látex	45

1.4.5.4 Características físicas y químicas de látex y del caucho natural	46
1.4.5.5 Aplicaciones del látex y caucho natural.	47
1.4.6 Investigaciones realizadas de asfaltos modificados.....	48
1.4.6.1 Modificación del asfalto por la adición de polímeros termoplásticos.....	48
1.4.6.2 Modificación del asfalto por la adición de cauchos termoplásticos	49
1.4.6.3 Fabricación de mezclas cauchos termoplásticos/asfalto.....	49
1.4.6.4 Modificación del asfalto por la adición de compuestos orgánicos de manganeso	50
1.4.6.5 Aditivación con Azufre	50
1.4.6.6 Modificación del asfalto por la adición de caucho	50
1.4.7 Técnicas de análisis.....	51
1.4.7.1 Métodos cromatográficos.....	51
1.4.7.1.1 Clasificación de los métodos cromatográficos	52
1.4.7.2 Norma ASTM D-2007.....	53
1.4.7.3 Índice de refracción.....	54
1.4.7.4 Microscopia de fluorescencia.....	54
1.4.7.5 Técnicas espectroscópicas	55
1.4.7.5.1 Espectroscopía infrarroja	56
1.4.7.5.2 Espectroscopía Ultravioleta y visible.....	57
1.4.7.6 Propiedades físicas de los asfaltos.....	59
1.4.7.6.1 Viscosidad a 60° C (Norma ASTM D – 4402)	59
1.4.7.6.2 Ensayo de penetración (Norma ASTM D – 5).....	59
1.4.7.6.3 Ensayo de punto de ablandamiento (Norma ASTM D – 36)	60
1.4.7.6.4 Ductilidad a 25° C (Norma ASTM D – 113).....	60
1.4.7.6.5 Recuperación elástica por torsión (Norma I.N.V. E – 727).....	60
1.4.7.6.6 Peso específico del asfalto sólido (Norma ASTM D – 70).....	61
1.4.7.6.7 Estabilidad al almacenamiento de asfaltos (Norma I.N.V. E – 726).....	61
2. SECCION EXPERIMENTAL.....	62
2.1 METODOLOGIA	62
2.1.1 ETAPA I: Estudio físico y químico del látex	62
2.1.1.1 Estudio físico.....	62
2.1.1.2 Estudio químico	63
2.1.2 ETAPA II: Estudio físico y químico del asfalto original.....	65
2.1.2.1 Estudio químico de los asfaltos (Norma ASTM – D 2007)	65
2.1.2.2 Propiedades físicas de los asfaltos.....	66
2.1.2.2.1 Viscosidad a 60° C (Norma ASTM D – 4402)	66
2.1.2.2.2 Ensayo de penetración (Norma ASTM D – 5).....	67

2.1.2.2.3 Ensayo de punto de ablandamiento (Norma ASTM D – 36)	68
2.1.2.2.4 Ductilidad a 25° C (Norma ASTM D – 113)	69
2.1.2.2.5 Recuperación elástica por torsión (Norma I.N.V. E – 727).....	70
2.1.2.2.6 Peso específico y peso unitario de productos asfálticos sólidos y semisólidos (Norma ASTM D – 70).....	71
2.1.3 ETAPA III: Adición del látex al asfalto.....	73
2.1.3.1 Estabilidad al almacenamiento de asfaltos (Norma I.N.V. E – 726).....	75
2.2 MATERIALES E INSTRUMENTAL	76
2.2.1 Reactivos	76
2.2.2 Equipos	77
2.3 PARTE EXPERIMENTAL	78
2.3.1 Modificación del látex con hidróxido de amonio.....	78
2.3.2 Modificación del asfalto.....	78
2.3.3 Almacenamiento del asfalto.....	79
2.3.4 Separación del asfalto	80
2.3.4.1 Separación de los componentes malténicos.....	80
2.3.5 Pruebas de caracterización a la fracción malténica obtenida del asfalto	81
2.3.5.1 Pruebas para identificar resinas.....	82
2.3.5.2 Pruebas para identificar compuestos aromáticos	82
2.3.5.3 Pruebas para identificar compuestos saturados	83
3. ANALISIS DE RESULTADOS.....	84
3.1 ANÁLISIS PRELIMINAR DEL LÁTEX NATURAL	84
3.1.1 Estudio físico y químico del látex natural	84
3.1.2 Caracterización del látex.....	86
3.1.2.1 Características del polímero del latex natural	87
3.1.3 Estudio del espectro infrarrojo del látex natural	88
3.1.4 Estudio del espectro UV-Vis del látex natural	91

3.2 Modificación del látex con hidróxido de amonio (NH ₄ OH).....	92
3.2.1 Análisis del látex modificado con hidróxido de amonio (NH ₄ OH).....	93
3.2.2 Estudio del látex modificado con hidróxido de amonio (NH ₄ OH) por microscopia electrónica de fluorescencia	94
3.2.3 Estudio por espectroscopia IR del látex modificado con hidróxido de amonio (NH ₄ OH).....	95
3.2.4 Estudio por espectroscopia UV-Vis del látex modificado con hidróxido de amonio (NH ₄ OH).....	96
3.3 ANÁLISIS PRELIMINAR DEL ASFALTO ORIGINAL.....	97
3.3.1 Análisis de las propiedades físicas del asfalto original	97
3.3.2 Análisis del espectro infrarrojo del asfalto original	100
3.3.3 Análisis de las propiedades químicas del asfalto original (SARA)	103
3.3.3.1 Pruebas de caracterización para las fracciones obtenidas de la separación cromatografica de maltenos en el asfalto original	105
3.3.4 Análisis de espectroscopia IR para las fracciones asfáltica y malténica del asfalto original	106
3.3.4.1 Análisis de espectroscopia Infrarroja para asfaltenos.....	107
3.3.4.2 Análisis de espectroscopia Infrarroja para Resinas	109
3.3.4.3 Análisis de espectroscopia Infrarroja para aromáticos.....	111
3.3.4.4 Análisis de espectroscopia Infrarroja para parafinas o saturados.....	112
3.3.5 Análisis por espectroscopia UV-Vis para la fracción malténica del asfalto original	114
3.3.5.1 Análisis del espectro Ultravioleta–Visible para Resinas.....	114
3.3.5.2 Análisis del espectro Ultravioleta–Visible para aromáticos	115
3.3.5.3 Análisis del espectro Ultravioleta–Visible para parafinas o saturados	115
3.4 ANALISIS DEL ASFALTO MODIFICADO CON LATEX AL 1%, 3% Y 5%	116
3.4.1 Análisis del asfalto modificado con látex al 1%, 3% y 5% por microscopía electrónica de fluorescencia	117
3.4.2 Análisis de las propiedades físicas del asfalto modificado con látex al 1%, 3% y 5%.....	118

3.4.3 Análisis por espectroscopia IR del asfalto modificado con látex al 1%, 3% y 5%.....	119
3.5 ANALISIS DEL ASFALTO MODIFICADO AL 1%, 3% Y 5% CON LATEX ADITIVADO CON NH₄OH AL 3%	121
3.5.1 Análisis del asfalto modificado al 1%, 3% y 5% con látex (NH ₄ OH 3%) por microscopía electrónica de fluorescencia	121
3.5.2 Análisis de las propiedades físicas del asfalto modificado al 1%, 3% y 5% con látex aditivado con NH ₄ OH al 3%.....	122
3.5.3 Análisis por espectroscopia IR del asfalto modificado al 1%, 3% y 5% con látex aditivado con NH ₄ OH al 3%.....	123
3.6 ANALISIS DEL ASFALTO MODIFICADO AL 1%, 3% Y 5% CON LÁTEX ADITIVADO CON NH₄OH AL 5%	125
3.6.1 Análisis del asfalto modificado al 1%, 3% y 5% con látex aditivado con NH ₄ OH al 5%, por microscopia electrónica de fluorescencia.....	125
3.6.2 Análisis de las propiedades físicas del asfalto modificado al 1%, 3% y 5% con látex aditivado con NH ₄ OH al 5%.....	126
3.6.3 Análisis por espectroscopía IR del asfalto modificado al 1%, 3% y 5% con látex aditivado con NH ₄ OH al 5%.....	127
3.7 ANALISIS DE LAS MUESTRAS DE ASFALTO MODIFICADO CON LATEX AL 3% Y CON LATEX ADITIVADO CON NH₄OH AL 3%, QUE SE EMPLEARON EN EL PROCESO DE ALMACENAMIENTO.....	128
3.7.1 Análisis del asfalto modificado con látex al 3%: día cero.....	129
3.7.1.1 Análisis de las propiedades químicas del asfalto modificado con látex al 3% (SARA).....	129
3.7.1.2 Análisis de espectroscopia IR para las fracciones asfáltica y malténica del asfalto modificado con látex al 3%.....	131
3.7.1.2.1 Análisis de espectroscopia Infrarroja para asfaltenos.....	131
3.7.1.2.2 Análisis de espectroscopia Infrarroja para Resinas	133
3.7.1.2.3 Análisis de espectroscopia Infrarroja para aromáticos.....	135
3.7.1.2.4 Análisis de espectroscopia Infrarroja para parafinas o saturados.....	137
3.7.1.3 Análisis de espectroscopia UV-Vis para la fracción malténica del asfalto modificado con látex al 3%.....	138
3.7.1.3.1 Análisis del espectro Ultravioleta–Visible para Resinas.....	138

3.7.1.3.2 Análisis del espectro Ultravioleta–Visible para aromáticos	139
3.7.1.3.3 Análisis del espectro Ultravioleta–Visible para saturados	140
3.7.2 Análisis del asfalto modificado al 3% con látex aditivado con NH ₄ OH al 3%: día cero.....	140
3.7.2.1 Análisis de las propiedades químicas del asfalto modificado al 3% con látex aditivado con NH ₄ OH al 3%: (SARA).....	141
3.7.2.2 Análisis de espectroscopia IR para las fracciones asfáltica y malténica del asfalto modificado al 3% con látex aditivado con NH ₄ OH al 3%	142
3.7.2.2.1 Análisis de espectroscopia Infrarroja para asfaltenos.....	142
3.7.2.2.2 Análisis de espectroscopia Infrarroja para Resinas	143
3.7.2.2.3 Análisis de espectroscopia Infrarroja para aromáticos.....	145
3.7.2.2.4 Análisis de espectroscopia Infrarroja para parafinas o saturados.....	147
3.7.2.3 Análisis de espectroscopia UV-Vis para la fracción malténica del asfalto modificado al 3% con látex aditivado con NH ₄ OH al 3%.....	148
3.7.2.3.1 Análisis del espectro Ultravioleta Visible para Resinas.....	149
3.7.2.3.2 Análisis del espectro Ultravioleta Visible para aromáticos	149
3.7.2.3.3 Análisis del espectro Ultravioleta Visible para parafinas o saturados ...	150
3.7.3 Posible reacción del asfalto con el polímero del látex (cis–1,4–poliisopreno).....	151
3.8 ANALISIS DEL ASFALTO ORIGINAL Y DEL ASFALTO MODIFICADO CON LATEX AL 3% Y AL 3% CON LATEX ADITIVADO CON NH₄OH AL 3%, ANTES Y EN EL PROCESO DE ALMACENAMIENTO.....	153
3.8.1 Análisis del asfalto original antes y en el proceso de almacenamiento: día cero, cinco y cuarenta.....	153
3.8.1.1 Análisis del asfalto original por microscopía electrónica de fluorescencia al día cero, cinco y cuarenta	154
3.8.1.2 Análisis de las propiedades físicas del asfalto original al día cero, cinco y cuarenta.....	155
3.8.1.3 Análisis de las propiedades químicas del asfalto original (SARA), al día cero, cinco y cuarenta	156
3.8.1.4 Análisis de espectroscopia IR para las fracciones asfáltica y malténica del asfalto original al día cero, cinco y cuarenta	156
3.8.1.4.1 Análisis de espectroscopia Infrarroja para asfaltenos.....	156
3.8.1.4.2 Análisis de espectroscopia Infrarroja para Resinas	158
3.8.1.4.3 Análisis de espectroscopia Infrarroja para aromáticos.....	161
3.8.1.4.4 Análisis de espectroscopia Infrarroja para parafinas o saturados.....	163

3.8.1.5 Análisis de espectroscopia UV-Vis para la fracción malténica del asfalto original al día cero y cinco.	164
3.8.1.5.1 Análisis del espectro Ultravioleta–Visible para Resinas.....	165
3.8.1.5.2 Análisis del espectro Ultravioleta–Visible para aromáticos	165
3.8.1.5.3 Análisis del espectro Ultravioleta–Visible para saturados	166
 3.8.2 Análisis del asfalto modificado con látex al 3%, antes y durante el proceso de almacenamiento: día cero, cinco y cuarenta	166
 3.8.2.1 Análisis del asfalto modificado con látex al 3% por microscopia electrónica de fluorescencia, al día cero, cinco y cuarenta	167
3.8.2.2 Análisis de las propiedades físicas del asfalto modificado con látex al 3%, al día cero, cinco y cuarenta.	168
3.8.2.3 Análisis de las propiedades químicas del asfalto modificado con látex al 3% (SARA), al día cero, cinco y cuarenta.....	170
 3.8.2.4 Análisis de espectroscopía IR para las fracciones asfáltica y malténica del asfalto modificado con látex al 3%, al día cero, cinco y cuarenta. .	171
3.8.2.4.1 Análisis de espectroscopia Infrarroja para asfaltenos	171
3.8.2.4.2 Análisis de espectroscopia Infrarroja para Resinas	173
3.8.2.4.3 Análisis de espectroscopia Infrarroja para aromáticos.....	175
3.8.2.4.4 Análisis de espectroscopia Infrarroja para parafinas o saturados.....	177
 3.8.2.5 Análisis de espectroscopia UV-Vis para la fracción malténica del asfalto modificado con látex al 3%, al día cero y cinco.	179
3.8.2.5.1 Análisis del espectro Ultravioleta–Visible para Resinas.....	179
3.8.2.5.2 Análisis del espectro Ultravioleta–Visible para aromáticos	180
3.8.2.5.3 Análisis del espectro Ultravioleta–Visible para saturados	181
 3.8.3 Análisis del asfalto modificado al 3% con látex aditivado con NH ₄ OH al 3%, antes y durante el proceso de almacenamiento: día cero, cinco y cuarenta	182
 3.8.3.1 Análisis del asfalto modificado al 3% con látex (NH ₄ OH 3%) al día cinco y cuarenta de almacenamiento por microscopia electrónica de fluorescencia	183
3.8.3.2 Análisis de las propiedades físicas del asfalto modificado al 3% con látex aditivado con NH ₄ OH al 3%, al día cero, cinco y cuarenta.....	184
3.8.3.3 Análisis de las propiedades químicas (SARA), del asfalto modificado al 3% con látex aditivado con NH ₄ OH al 3%, al día cero, cinco y cuarenta	186
 3.8.3.4 Análisis por espectroscopía IR de la fracción asfáltica y malténica del asfalto modificado al 3% con látex aditivado con NH ₄ OH al 3%, al día cero, cinco y cuarenta.....	187
3.8.3.4.1 Análisis de espectroscopia Infrarroja para asfaltenos	187
3.8.3.4.2 Análisis de espectroscopia Infrarroja para Resinas	189
3.8.3.4.3 Análisis de espectroscopia Infrarroja para aromáticos.....	191

3.8.3.4.4	Análisis de espectroscopia Infrarroja para parafinas o saturados.....	193
3.8.3.5	Análisis de espectroscopia UV-Vis para la fracción malténica del asfalto modificado al 3% con látex aditivado con NH ₄ OH al 3%, al día cero y cinco.....	194
3.8.3.5.1	Análisis del espectro Ultravioleta Visible para Resinas.....	195
3.8.3.5.2	Análisis del espectro Ultravioleta Visible para aromáticos	196
3.8.3.5.3	Análisis del espectro Ultravioleta Visible para parafinas o saturados ...	197
4.	CONCLUSIONES	198
	BIBLIOGRAFIA.....	198
	ANEXOS.....	201

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Concentraciones y modificadores empleados en la aditivación del asfalto	79
Tabla 2. Resultados de las pruebas físicas del látex.	84
Tabla 3. Prueba de solubilidad del látex.	85
Tabla 4. Resultados del contenido químico del látex.	85
Tabla 5. Resultados de las pruebas químicas de caracterización de grupos funcionales del látex.	86
Tabla 6. Compuestos contenidos en el látex.	89
Tabla 7. Bandas características del infrarrojo del látex natural.....	90
Tabla 8. Transiciones representativas para las bandas en el UV-Vis.	92
Tabla 9. Resultados de las pruebas físicas del látex modificado con hidróxido de amonio.	93
Tabla 10. Comparación de las bandas características en el infrarrojo del látex natural y modificado con hidróxido de amonio al 3% y 5%.	96
Tabla 11. Propiedades físicas de consistencia y peso específico del cemento asfáltico original.	99
Tabla 12. Bandas características en el infrarrojo del asfalto original.	102
Tabla 13. Características de las fracciones separadas del asfalto original por cromatografía de columna.	104
Tabla 14. Pruebas de caracterización de compuestos malténicos.	105
Tabla 15. Bandas características del espectro Infrarrojo para asfaltenos del asfalto original.....	107

Tabla 16. Bandas características del espectro Infrarrojo para Resinas del asfalto original.....	109
Tabla 17. Bandas características del espectro Infrarrojo para aromáticos del asfalto original.....	112
Tabla 18. Bandas características del espectro Infrarrojo para Saturados del asfalto original.....	113
Tabla 19. Absorciones de los espectros UV-Vis para fracción malténica del asfalto original.....	114
Tabla 20. Propiedades físicas de consistencia del asfalto modificado con látex al 1%, 3% y 5%.....	118
Tabla 21. Bandas características en el infrarrojo del asfalto original, del asfalto modificado con látex al 1%, 3% y 5%.	120
Tabla 22. Propiedades físicas de consistencia del asfalto modificado al 1%, 3% y 5% con látex aditivado con NH ₄ OH al 3%.....	122
Tabla 23. Bandas características en el infrarrojo del asfalto original y modificado al 1%, 3% y 5% con látex aditivado con NH ₄ OH al 3%.	123
Tabla 24. Propiedades físicas de consistencia del asfalto modificado al 1%, 3% y 5% con látex aditivado con NH ₄ OH al 5%.....	126
Tabla 25. Bandas características en el infrarrojo del asfalto original y modificado al 1%, 3% y 5% con látex aditivado con NH ₄ OH al 5%.	128
Tabla 26. Características de las fracciones separadas del asfalto original y modificado con látex al 3% por cromatografía de columna.....	129
Tabla 27. Bandas características del espectro Infrarrojo para asfaltenos del asfalto original y modificado con látex al 3%.	132
Tabla 28. Bandas características del espectro Infrarrojo para Resinas del asfalto original y modificado con látex al 3%.	134
Tabla 29. Bandas características del espectro Infrarrojo para aromáticos del asfalto original y modificado con látex al 3%.	136
Tabla 30. Bandas características del espectro Infrarrojo para Saturados del asfalto original y modificado con látex al 3%.	138

Tabla 31. Absorciones de los espectros UV-Vis para la fracción malténica del asfalto original y modificado con látex al 3%.	138
Tabla 32. Características de las fracciones separadas del asfalto original y modificado al 3% con látex aditivado con NH ₄ OH al 3% por cromatografía de columna.	141
Tabla 33. Bandas características del espectro Infrarrojo de asfaltenos del asfalto original y modificado al 3% con látex aditivado con NH ₄ OH al 3%.....	143
Tabla 34. Bandas características del espectro Infrarrojo para Resinas del asfalto original y modificado al 3% con látex aditivado con NH ₄ OH al 3%.....	144
Tabla 35. Bandas características del espectro Infrarrojo para aromáticos del asfalto original y modificado al 3% con látex aditivado con NH ₄ OH al 3%.....	146
Tabla 36. Bandas características del espectro Infrarrojo para Saturados del asfalto original y modificado al 3% con látex aditivado con NH ₄ OH al 3%.....	148
Tabla 37. Absorciones de los espectros UV-Vis para la fracción malténica del asfalto original y modificado al 3% con látex aditivado con NH ₄ OH al 3%.....	148
Tabla 38. Propiedades físicas de consistencia del asfalto original, al día cero, cinco y cuarenta.....	155
Tabla 39. Características de las fracciones separadas del asfalto original por cromatografía de columna, al día cero, cinco y cuarenta.....	156
Tabla 40. Bandas características del espectro Infrarrojo para asfaltenos del asfalto original, al día cero, cinco y cuarenta.	158
Tabla 41. Bandas características del espectro Infrarrojo para Resinas del asfalto original, al día cero, cinco y cuarenta.	160
Tabla 42. Bandas características del espectro Infrarrojo para aromáticos del asfalto original, al día cero, cinco y cuarenta.	162
Tabla 43. Bandas características del espectro Infrarrojo para Saturados del asfalto original, al día cero, cinco y cuarenta.	164
Tabla 44. Absorciones de los espectros UV-Vis para la fracción malténica del asfalto original al día cero y cinco.	164
Tabla 45. Propiedades físicas del asfalto-látex 3%, al día cero, cinco y cuarenta.....	168

Tabla 46. Características de las fracciones separadas del asfalto modificado con látex al 3%, por cromatografía de columna.....	170
Tabla 47. Bandas características del espectro Infrarrojo para asfaltenos del asfalto modificado con látex al 3%, al día cero, cinco y cuarenta.	173
Tabla 48. Bandas características del espectro Infrarrojo para Resinas del asfalto modificado con látex al 3%, al día cero, cinco y cuarenta.	175
Tabla 49. Bandas características del espectro Infrarrojo para aromáticos del asfalto modificado con látex al 3%, al día cero, cinco y cuarenta.	177
Tabla 50. Bandas características del espectro Infrarrojo para Saturados del asfalto original y del asfalto modificado con látex al 3%, al día cero, cinco y cuarenta. ...	179
Tabla 51. Absorciones de los espectros UV-Vis para la fracción malténica del asfalto original y modificado con látex al 3%, al día cero y cinco.....	179
Tabla 52. Propiedades físicas de consistencia del asfalto modificado al 3% con látex aditivado con NH ₄ OH al 3% al día cero, cinco y cuarenta.....	184
Tabla 53. Porcentajes de las fracciones separadas del asfalto modificado al 3% con látex aditivado con NH ₄ OH al 3%, al día cero, cinco y cuarenta	186
Tabla 54. Bandas características del espectro Infrarrojo de la fracción asfáltica del asfalto modificado al 3% con látex aditivado con NH ₄ OH al 3%, al día cero, cinco y cuarenta	187
Tabla 55. Bandas características del espectro infrarrojo de las Resinas del asfalto modificado al 3% con látex aditivado con NH ₄ OH al 3%, al día cero, cinco y cuarenta.....	190
Tabla 56. Bandas características del espectro Infrarrojo para aromáticos del asfalto modificado al 3% con látex aditivado con NH ₄ OH al 3%, a los días cero, cinco y cuarenta.....	192
Tabla 57. Bandas características del espectro Infrarrojo para Saturados del asfalto modificado al 3% con látex aditivado con NH ₄ OH al 3%, a los días cero, cinco y cuarenta.....	194
Tabla 58. Absorciones de los espectros UV-Vis para la fracción malténica del asfalto original y modificado al 3% con látex aditivado con NH ₄ OH al 3%, al día cero y cinco.....	195

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Proceso general de la refinación del petróleo	37
Figura 2. Estructura miscelar del asfalto	38
Figura 3. Estructura química de los compuestos del asfalto	39
Figura 4. Polímeros: lineal sin ramificaciones (I), con ramificaciones cortas (II) y con ramificaciones largas (III)	42
Figura 5. Recolección del látex	44
Figura 6. Estructura del monómero del poliisopreno	45
Figura 7. Separación del asfalto según el método de ensayo S.A.R.A.	54
Figura 8. Espectro electromagnético.....	57
Figura 9. Tratamiento químico efectuado a los asfaltos	65
Figura 10. Viscosímetro Brookfield modelo 1 DV-III.....	67
Figura 11. Penetrómetro Humbolt	68
Figura 12. Ensayo de punto de ablandamiento.....	69
Figura 13. Ensayo de ductilidad: A. Ductilímetro. B. Briqueta	70
Figura 14. Ensayo de torsión	71
Figura 15. Picnómetro para ensayo de peso específico.....	72
Figura 16. Aditivación del asfalto con látex	73
Figura 17. Modificación del látex con hidróxido de amonio (NH ₄ OH) y estos en el asfalto.....	74
Figura 18. Proceso de modificación del asfalto.....	78

Figura 19. Recipiente hermético empleado para el almacenamiento.....	79
Figura 20. Separación del asfalto en: A. Asfaltenos y B. maltenos	80
Figura 21. Separación de: A. resinas y aromáticos y B. saturados	81
Figura 22. Látex natural	84
Figura 23.. Estructura del hidrocarburo del caucho natural (cis-1,4-poliisopreno)	88
Figura 24. Espectro infrarrojo del látex natural.....	90
Figura 25. Espectro UV-Vis del látex natural.....	92
Figura 26. Microfotografías del látex natural y modificado al 3 % y 5% con hidróxido de amonio.....	94
Figura 27. Espectro infrarrojo del látex natural y aditivado con hidróxido de amonio al 3% y 5%.	95
Figura 28. Espectro UV-Vis del látex natural y modificado con hidróxido de amonio al 3% y 5%	97
Figura 29. Curva reológica del asfalto original	98
Figura 30. Espectro infrarrojo del asfalto original	101
Figura 31. Espectro Infrarrojo de Asfaltenos del asfalto original	107
Figura 32. Espectro Infrarrojo de Resinas del asfalto original.	109
Figura 33. Espectro Infrarrojo de Aromáticos del asfalto original	111
Figura 34. Espectro Infrarrojo de Saturados del asfalto original.....	113
Figura 35. Espectro UV-Vis de resinas del asfalto original.....	114
Figura 36. Espectro UV-Vis de aromáticos del asfalto original.....	115
Figura 37. Espectro UV-Vis de saturados del asfalto original.....	116
Figura 38. Microfotografías del asfalto modificado con látex al 1%, 3%, 5% y 10 %	117

Figura 39. Espectro Infrarrojo del asfalto original y modificado con látex al 1%, 3% y 5%.....	120
Figura 40. Microfotografías del asfalto modificado al 1%, 3% y 5% con látex aditivado con NH ₄ OH al 3%.....	122
Figura 41. Espectro Infrarrojo del asfalto original y modificado al 1%, 3% y 5% con látex aditivado con NH ₄ OH al 3%.....	124
Figura 42. Microfotografías del asfalto modificado al 1%, 3% y 5% con látex aditivado con NH ₄ OH al 5%.....	125
Figura 43. Espectro Infrarrojo del asfalto original y modificado al 1%, 3% y 5% con látex aditivado con NH ₄ OH al 5%.....	127
Figura 44. Variación del contenido de asfaltenos y maltenos en el asfalto original y modificado con látex al 3%, antes del almacenamiento: día cero	130
Figura 45. Espectro Infrarrojo de Asfaltenos del asfalto original y modificado con látex al 3%.....	131
Figura 46. Espectro Infrarrojo de Resinas del asfalto original y modificado con látex 3%	133
Figura 47. Espectro Infrarrojo de Aromáticos del asfalto original y modificado con látex al 3%.	135
Figura 48. Espectro Infrarrojo de Saturados del asfalto original y modificado con látex al 3%.....	137
Figura 49. Espectro UV-Vis de resinas del asfalto original y modificado con látex al 3%	139
Figura 50. Espectro UV-Vis de Aromáticos del asfalto original y modificado con látex al 3%.....	139
Figura 51. Espectro UV-Vis de saturados del asfalto original y modificado con látex al 3%.....	140
Figura 52. Variación del contenido de asfaltenos y maltenos en el asfalto original y modificado al 3% con látex aditivado con NH ₄ OH al 3%, al día cero....	141
Figura 53. Espectro Infrarrojo de Asfaltenos del asfalto original y modificado al 3% con látex aditivado con NH ₄ OH al 3%.	142

Figura 54. Espectro Infrarrojo de resinas del asfalto original y modificado al 3% con látex aditivado con NH ₄ OH al 3%.....	143
Figura 55. Espectro Infrarrojo de Aromáticos del asfalto original y modificado al 3% con látex aditivado con NH ₄ OH al 3%.....	145
Figura 56. Espectro Infrarrojo de saturados del asfalto original y modificado al 3% con látex aditivado con NH ₄ OH al 3%.....	147
Figura 57. Espectro UV-Vis de resinas del asfalto original y modificado al 3% con látex (NH ₄ OH 3%).....	149
Figura 58. Espectro UV-Vis de Aromáticos del asfalto original y modificado al 3% con látex aditivado con NH ₄ OH al 3%.....	150
Figura 59. Espectro ultravioleta de saturados del asfalto original y modificado al 3% con látex aditivado con NH ₄ OH al 3%.	150
Figura 60. Posibles reacciones del polímero cis-1,4-poliisopreno y la fracción resínica del asfalto.	151
Figura 61. Microfotografías del asfalto original, al día cinco y cuarenta.....	154
Figura 62. Espectro Infrarrojo de Asfaltenos del Asfalto original al día cero, cinco y cuarenta.....	157
Figura 63. Espectro Infrarrojo de Resinas del Asfalto original, al día cero, cinco y cuarenta.....	159
Figura 64. Espectro Infrarrojo de Aromáticos del Asfalto original, al día cero, cinco y cuarenta.....	161
Figura 65. Espectro Infrarrojo de Saturados del Asfalto original, al día cero, cinco y cuarenta.....	163
Figura 66. Espectro UV-Vis de resinas del asfalto original, al día cero y cinco..	165
Figura 67. Espectro UV-Vis de Aromáticos del asfalto original	165
Figura 68. Espectro UV-Vis de saturados del Asfalto original	166
Figura 69. Microfotografías del asfalto-látex 3%, al día cinco y cuarenta.....	167
Figura 70. Variación de la viscosidad y recuperación elástica del asfalto original y del asfalto modificado con látex al 3%, al día cero, cinco y cuarenta ...	169

Figura 71. Variación de los ensayos de penetración y punto de ablandamiento en el asfalto original y modificado con látex al 3%, al día cero, cinco y cuarenta	170
Figura 72. Espectro Infrarrojo de Asfaltenos del asfalto modificado con látex al 3% al día cero, cinco y cuarenta.	172
Figura 73. Espectro Infrarrojo de Resinas del asfalto modificado con látex al 3%, al día cero, cinco y cuarenta.....	174
Figura 74. Espectro Infrarrojo de Aromáticos del asfalto modificado con látex al 3%, al día cero, cinco y cuarenta.....	176
Figura 75. Espectro Infrarrojo de Saturados del asfalto modificado con látex al 3%, al día cero, cinco y cuarenta.	178
Figura 76. Espectro UV-Vis de resinas del asfalto original y modificado con látex al 3%, al día cero y cinco.....	180
Figura 77. Espectro UV-Vis de Aromáticos del asfalto original y modificado con látex al 3%, al día cero y cinco.....	181
Figura 78. Espectro UV-Vis de saturados del asfalto original y modificado con látex al 3%, al día cero y cinco.....	182
Figura 79. Microfotografías del asfalto modificado al 3% con látex aditivado con NH ₄ OH al 3%, al día cinco y cuarenta.....	183
Figura 80. Variación de la viscosidad y recuperación elástica del asfalto original y modificado al 3% con látex aditivado con NH ₄ OH al 3%, a los días cero, cinco y cuarenta	185
Figura 81. Variación de la penetración y punto de ablandamiento del asfalto original y modificado al 3% con látex aditivado con NH ₄ OH al 3% a los días cero, cinco y cuarenta.	185
Figura 82. Espectro Infrarrojo de asfaltenos del asfalto modificado al 3% con látex aditivado con NH ₄ OH al 3%, al día cero, cinco y cuarenta. .	188
Figura 83. Espectro Infrarrojo de resinas del asfalto modificado al 3% con látex aditivado con NH ₄ OH al 3%, al día cero, cinco y cuarenta.....	189
Figura 84. Espectro Infrarrojo de Aromáticos del asfalto modificado al 3% con látex aditivado con NH ₄ OH al 3%, al día cero, cinco y cuarenta. .	191

Figura 85. Espectro Infrarrojo de saturados del asfalto modificado al 3% con látex aditivado con NH_4OH al 3%, al día cero, cinco y cuarenta.....	193
Figura 86. Espectro UV-Vis de resinas del asfalto original y modificado al 3% con látex aditivado con NH_4OH al 3%, al día cero y cinco.....	195
Figura 87. Espectro UV-Vis de Aromáticos del asfalto modificado al 3% con látex aditivado con NH_4OH al 3%, al día cero, cinco y cuarenta.....	196
Figura 88. Espectro ultravioleta de saturados del asfalto modificado al 3% con látex aditivado con NH_4OH al 3%, al día cero y cinco.....	197

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Norma ASTM D-2007.....	203
ANEXO B. Viscosidad rotacional brookfield de cementos asfálticos (ASTM D-4402).....	203
ANEXO C. Penetración de los materiales asfálticos (Norma ASTM D – 5 o I.N.V. E - 706)	206
ANEXO D. Punto de ablandamiento de materiales bituminosos (aparato de anillo y bola) (Norma ASTM D – 36 o I.N.V. E – 712)	212
ANEXO E. Ductilidad de los materiales asfálticos (ASTM D – 113 o I.N.V. E – 702)	217
ANEXO F. Recuperación elástica por torsión de asfaltos modificados (I.N.V. E – 727)	220
ANEXO G. Peso específico y peso unitario de productos asfálticos sólidos y semisólidos (ASTM D – 70 o I.N.V. E – 707)	222
ANEXO H. Estabilidad al almacenamiento de asfaltos (I.N.V. E – 726)	226
ANEXO I. Especificaciones para cementos asfálticos ASTM D – 946.....	229
ANEXO J. Especificaciones para cementos asfálticos ASTM D – 3381.....	229

RESUMEN

La técnica de mezclar el asfalto con materiales convencionales y no convencionales con el fin de mejorar sus propiedades físicas, químicas y reológicas, ha fortalecido en los últimos años grupos de investigación teórica y aplicada, con el fin de entregar a los usuarios de dicho material (ingenieros civiles) beneficios y técnicas para el aprovechamiento de recursos naturales, material de desecho, entre otros en la pavimentación de vías.

Dicha técnica consiste en mezclar el asfalto con materiales convencionales como polímeros tipo SBS (estireno-butadieno-estireno), EVA (acetato de vinilo), Eastman EE-2, cauchos de butadieno-estireno (SBR), polipropileno (PP), poliestireno (PS), polietileno (PE), o material no convencional como caucho natural (NR), mejorando sus características de resistencia a la deformación por factores, climáticos, peso vehicular, aumento de adhesividad, elasticidad, viscosidad a temperaturas de compactación y mezclado. Sin embargo, cuando se aditiva el asfalto es necesario que el material usado sea compatible con el asfalto, de lo contrario el aditivo utilizado precipita, causando daños e inconvenientes en la pavimentación vial.

Por estas razones en esta investigación se busca que el aditivo a utilizar, látex (caucho natural), sea compatible con el asfalto hasta obtener un polímero emulsificado que al reaccionar con el asfalto, no precipite y mejore sus propiedades físicas, químicas y reológicas del mismo, aumentando durabilidad, adhesividad, viscosidad a temperaturas de compactación y mezclado, que reduzca la deformación de fácil manejo, entre otras.

Para comprobar dichas características del nuevo material aditivado se utilizan técnicas espectroscópicas, como espectroscopia infrarroja, ultravioleta y visible, microfotografía de fluorescencia y cromatografía en columna (Norma ASTM D 2007), pruebas físicas como, viscosidad, ductilidad, penetración, punto de ablandamiento, densidad relativa y recuperación elástica, antes y durante el almacenamiento a 5 y 40 días; tanto al asfalto original como al asfalto aditivado. Con lo anterior se busca comprobar una reacción entre el asfalto y el látex (caucho natural) y con ello garantizar un nuevo material que cumpla con los requisitos para ser empleados en los procesos de pavimentación vial.

INTRODUCCION

La pavimentación de redes viales se ha llevado a cabo gracias a la implementación del asfalto convencional, ya que presenta propiedades químicas, físicas y reológicas satisfactorias; dichas propiedades se encuentran dentro de los rangos establecidos por INVIAS, pero con el paso del tiempo dichas propiedades tienden a cambiar, disminuyendo la calidad del material asfáltico, presentando problemas de ahuellamiento por deformación plástica del ligante bituminoso, rotura por fatiga y deformación térmica, desprendimiento del agregado, entre otros. Por esta razón, es necesario modificar el material asfáltico, con el fin de incrementar su tiempo de vida útil y con ello mejorar sus propiedades iniciales.

Actualmente se realiza la modificación del asfalto, con materiales poliméricos convencionales como SBS (estireno-butadieno-estireno), EVA (acetato de vinilo), Eastman EE-2, cauchos de butadieno-estireno (SBR), polipropileno (PP), poliestireno (PS), polietileno (PE), entre otros, produciendo un asfalto completamente diferente al inicial, estas modificaciones implican aumento económico, debido al alto costo de los polímeros anteriormente mencionados. Por ello, en esta investigación se pretende mejorar las condiciones del asfalto con un material polimérico no convencional el látex, que es un líquido blanco, lechoso, de consistencia coloidal, extraído del árbol del Caucho o Hule Natural, de la especie *Hevea brasiliensis* Muell, en forma natural. Dicho látex contiene resinas, ácidos grasos, proteínas, esteroides y principalmente el hidrocarburo cis1,4 – poliisopreno, comportándose como un elastómero. Dadas estas propiedades similares a las asfalto, se realizó su modificación, aprovechando de esta forma un recurso natural, como lo es el látex, que además de tener bajo costo y fácil consecución, mejora de forma ostensible las propiedades físicas y reológicas al ser mezclado en pequeñas proporciones con el bitumen.

1. MARCO REFERENCIAL

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Bajo las condiciones actuales a las que están sometidas las carpetas de rodadura de la red vial nacional, que corresponden a un parque automotor que cada día sigue creciendo con el correspondiente incremento de las cargas transmitidas a las estructuras de pavimento, se hace necesario contar con materiales de altas especificaciones, que permitan obtener unos mayores índices de serviciabilidad referidos en el tiempo. Colombia, al ser un país en vía de desarrollo requiere ganar mayor competitividad en los mercados internacionales, es por eso, que la tecnología de pavimentos ha incrementado esfuerzos para el desarrollo de nuevas y mejores técnicas constructivas, así como el desarrollo tecnológico de materiales alternativos, que se adapten a las condiciones climáticas y de servicio de los corredores viales colombianos. Colombia en la actualidad posee 2 refinerías: APIAY y BARRANCABERMEJA, para la obtención de ligantes asfálticos que se utilizan en la producción de mezclas asfálticas con aglutinantes convencionales, las exigencias de comodidad, durabilidad y seguridad exigen que la estructura general de pavimento y en especial la carpeta de rodadura sea el producto de la mezcla de agregados pétreos y ligantes bituminosos de altas especificaciones, que tengan la capacidad de aglutinar y resistir los efectos combinados del clima y tráfico, nuestro país al poseer una gama extensa de pisos térmicos y su consecuente variedad de climas y condiciones pluviométricas hace que el comportamiento del ligante convencional no sea el mismo, debido a su comportamiento y características visco-elásticas, unido a la variabilidad detectada en la producción del asfalto en refinería.

En el país ha sido muy poco lo que se ha avanzado en cuanto a la utilización de los asfaltos modificados con polímeros, sin que hasta el momento se hayan definido unas políticas claras en cuanto al uso, manejo y aplicación de los ligantes modificados. En la actualidad se exige que los pavimentos viales tengan mayor durabilidad, resistencia, adhesividad y susceptibilidad térmica, ya que son sometidos a exigencias cada vez mayores, debido al incremento de los volúmenes del tráfico, cargas pesadas, mayor presión de los neumáticos, tipos de materiales usados, causando problemas de ahuellamiento por deformación plástica del ligante bituminoso, rotura por fatiga y deformación térmica, desprendimiento del agregado, entre otros.

Los modificadores poliméricos dentro de los cuales se encuentra el látex natural de caucho, presentan una serie de características físicas y químicas muy

importantes e influyentes en las propiedades mecánicas, físicas y dinámicas de la mezcla asfáltica. Reconociendo la utilización de modificadores a nivel mundial en procesos similares al que se plantea en este proyecto, es importante para el desarrollo de nuevos materiales, el potencial aprovechamiento del caucho natural producido por los HEVICULTORES en beneficio del medio ambiente, como solución a las necesidades de contar con materiales de mayor durabilidad al ser puestos en servicio como capa de rodadura de un pavimento Asfáltico; al sustituir ligantes bituminosos convencionales con asfaltos modificados se contará con un material que frente a los tradicionalmente empleados reporta características muy superiores que permitirán disminuir espesores de capas asfálticas y por consiguiente construcción de mayor número de Kilómetros con los recursos destinados por la nación y finalmente una revaloración de los precios de los productos que comercializan los hevilcultores en beneficio de la industria de la construcción que contaría con mayor número de metros cuadrados construidos con el capital invertido versus la inversión que se realizara en un año anterior. La situación actual a la que se enfrenta el país en cuestión de desarrollo vial, requiere atención urgente, pues la dinámica de desarrollo mundial y comercio regional exige de infraestructura perdurable que responda a las exigencias vehiculares y ambientales, entre otras; enmarcadas en fundamentos metodológicos de aprovechamiento de recursos (metodología de uso) y desarrollo normativo para su uso e implementación (norma de uso). Finalmente el desarrollo de una patente impulsará el desarrollo tecnológico para que sea aprovechado en diferentes naciones.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar el comportamiento del sistema asfalto-aditivo (látex) con diferentes concentraciones (1, 3, 5%), y optimizar la reacción con el asfalto original, conservando la morfología del nuevo material, evitando precipitación de partes, además evaluar sus propiedades físicas, químicas y reológicas en el nuevo material asfalto-látex.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Evaluar concentraciones de látex adicionado al asfalto en 1, 3 y 5%, mediante las propiedades físicas y químicas para seleccionar la óptima, donde el aditivo no precipite, teniendo en cuenta la temperatura de mezclado.
- Evaluar las propiedades físicas de viscosidad, ductilidad, penetración, punto de ablandamiento, densidad relativa y recuperación elástica, en la mezcla óptima asfalto-látex (caucho natural).
- Analizar la mezcla óptima asfalto-aditivo (látex) por espectroscopia Infrarroja por transformada rápida de Fourier, Ultravioleta-Visible y Microscopia Electrónica de Fluorescencia.
- Analizar la compatibilidad de la mezcla óptima asfalto-aditivo (látex), aplicando la técnica de SARA, (saturados, aromáticos, resinas y asfaltenos), para conocer los cambios producidos en estos componentes del asfalto sin aditivar y aditivado.
- Evaluar comportamiento de la compatibilidad del sistema asfalto-aditivo (látex) en almacenamiento prolongado de 5 y 40 días sin agitación.
- Comparar características físicas como viscosidad, ductilidad, penetración, punto de ablandamiento, densidad relativa y recuperación elástica, entre la mezcla óptima y la mezcla no óptima, para deducir un futuro comportamiento vial.

1.3 JUSTIFICACION

El problema planteado responde a la necesidad de crear materiales alternativos e innovadores de características superiores a los convencionalmente usados en la pavimentación de la infraestructura vial del país, en beneficio directo de la reducción de costos en las tareas de mantenimiento y pavimentación y de manera indirecta a los usuarios de los corredores viales.

El objetivo de esta investigación es aditivar el asfalto original, procedente de la refinería de Barrancabermeja, con látex (caucho natural), ya que posee virtudes particulares, entre ellas, gran resistencia aun sin vulcanizar, excelente adhesividad, plasticidad, flexibilidad, entre otros. Esperando obtener un nuevo y buen material que cumpla con los términos de exigencia vial y pavimentación en función de temperatura, carga, viscosidad, adhesividad, entre otros y lo mas importante, evitar que el aditivo (látex o caucho natural) se separe del asfalto por falta de estabilización cuando el sistema esta fluido, tal es el caso cuando hay almacenamiento prolongado sin agitación a ciertas condiciones de temperatura, dicha separación surge debido a la diferencia de densidades entre el asfalto-aditivo (látex o caucho natural). Controlar la compatibilidad asfalto-aditivo es fundamental para conseguir conservar las propiedades del sistema a través de la morfología que forma la fase elástica-viscosa entre polímero-aditivo, es importante decir, que esta morfología no siempre se obtiene de manera uniforme en todo el sistema, debido precisamente a la incompatibilidad de las especies por lo que se hace necesario normalizar u optimizar la concentración del aditivo, evitando problemas de compatibilidad, adherencia, viscosidad, ahuellamiento, entre otros.

De las aplicaciones industriales que se le viene dando al LATEX natural de caucho es importante generar desarrollo tecnológico para la producción de ligantes asfálticos modificados con productos naturales como el LÁTEX, ya que de acuerdo a resultados preliminares, se muestra que las propiedades físicas, químicas y organolépticas del nuevo material son comparables con la de un cemento asfáltico modificado con polímeros artificiales, con características estructurales superiores a las obtenidas a partir de un cemento asfáltico convencional, lo que permitirá elaborar mezclas asfálticas de mejor desempeño bajo condiciones de servicio, mas durables y de menor grado de intervención a mediano plazo, lo que permitirá llevar esos recursos a la construcción de un mayor número de kilómetros con los recursos destinados por la nación y finalmente una revaloración de los precios de los productos que comercializan los hevilcultores en beneficio de la industria de la construcción, que contaría con mayor número de metros cuadrados construidos con el capital invertido versus la inversión que se realizara en un año anterior.

Como efecto secundario a la modificación, se podrá lograr, en muchos casos, disminución de espesores en la capa de rodadura asfáltica, disminuyendo los costos iniciales de construcción.

En la actualidad, no se conoce del desempeño de estos ligantes asfálticos modificados con látex natural de caucho, al ser sometidos a las condiciones de servicio (cargas, clima, entre otros) y no existe un procedimiento validado para su utilización y mucho menos normativas que regulen su uso e impulsen el desarrollo de un material perdurable que responda a las exigencias actuales del tráfico, tales como corredores viales de vías primaria, o el caso de las superficies de rodadura.

Desarrollar este tipo de proyectos impulsaría el desarrollo de la red vial primaria para responder a las exigencias mundiales de comercialización. En el país aun se continúan evaluando mezclas asfálticas con tecnologías que no facilitan conocer el desempeño de las mismas, limitándose a algunos parámetros físico mecánicos (como el diseño Marshall), que además no dan respuesta al comportamiento de la mezcla asfáltica una vez es colocada en obra y mucho menos su desempeño en el periodo de servicio.

El conocimiento de las propiedades físico-químicas, organolépticas y reológicas del cemento asfáltico es de vital importancia para las entidades públicas y privadas encargadas del mantenimiento vial del país, pues a partir de estos rigurosos estudios de laboratorio se pueden tomar importantes decisiones en cuanto a la destinación de presupuestos para garantizar la movilidad y el desarrollo del país. Dadas las características aglutinantes, reológicas, visco elásticas y termoplásticas del cemento asfáltico convencional modificado con látex natural de caucho permitirá crear carpetas de rodadura con una elevada capacidad frente al efecto de los agentes climáticos y de carga a las que se ven sometidas las estructuras de pavimento.

1.4 MARCO TEORICO Y ESTADO DEL ARTE

1.4.1 EL PETROLEO CRUDO

El petróleo, al igual que el carbón mineral, y el gas natural son compuestos fósiles de la naturaleza, no renovables e impuros, y fuente de energía cuando las moléculas que los componen se combinan con el aire dentro de un motor, caldera o turbina, generando calor. El petróleo está compuesto fundamentalmente por una mezcla de hidrocarburos (HCs) de distintos números de átomos de carbono cuyas moléculas pueden ser acíclicos, lineales de simple o dobles ligaduras (saturados y no saturados), y *cíclicos* formando anillos (alícíclicos y aromáticos). La proporción de éstos distintos compuestos varía según la región en la que se encuentre el crudo, haciendo que el mismo pueda variar de coloración desde el negro al verde amarillento y/o rojizo. Del mismo modo varían sus propiedades físicas: densidad, viscosidad, índice de refracción, punto de ebullición, etc. De acuerdo al número de átomos de carbono, los hidrocarburos pueden ser gases (de 1 a 4 átomos de carbono: metano, etano, propano, butano), entre 5 y 19 átomos son líquidos, y más de 20 son semi-sólidos. Además presentan contaminación con trazas de metales (Fe, Va, Ni) y otros compuestos menores. (1)

La palabra petróleo proviene del latín *petra*=piedra, y *oleum*=aceite, líquido aceitoso bituminoso, inflamable que se encuentra en los estratos superiores de la tierra y consiste en una compleja mezcla de hidrocarburos con otras sustancias, a partir del cual y en distintas proporciones pueden obtenerse varios subproductos mediante distintos procesos de separación y refinación. Se denomina petróleo crudo o solo crudo, ya que se encuentra en su estado natural que contiene gas asociado o en solución, sin refinar.

La función principal de una refinería consiste en obtener de los crudos disponibles las cantidades adecuadas de naftas, gas licuado, kerosene, gas oil, lubricantes, fuel oil, parafinas, **asfaltos** y demás especialidades, en la forma más económica posible. (1)

1.4.2 EL ASFALTO

Se denomina asfalto a determinadas sustancias de color oscuro que pueden ser líquidas, semisólidas o sólidas, compuestas esencialmente de hidrocarburos solubles en sulfuro de carbono en su mayor parte y procedentes de yacimientos naturales u obtenidos como residuo del tratamiento de determinados crudos de petróleos por destilación o extracción. Estos últimos representan más del 90% de la producción total de asfaltos. (2)

1.4.2.1 ASFALTOS NATURALES

En la naturaleza se han formado depósitos naturales de asfalto, algunos prácticamente libres de materias primas extrañas y otros en que el asfalto se encuentra mezclado con cantidades variables de ciertos minerales, agua y otras sustancias. Los depósitos naturales en que el asfalto se presenta dentro de la estructura de una roca porosa se conocen comúnmente con el nombre de asfaltos de roca o rocas asfálticas. (2)

1.4.2.2 EL ASFALTO DERIVADO DEL PETROLEO

La obtención de productos químicos a partir del petróleo está asociada con el proceso de refinación, donde se pretende obtener la mayor cantidad de subproductos de este.

El petróleo llega a las refinerías en su estado natural para su procesamiento. Aquí prácticamente lo que se hace es cocinarlo. Por tal razón es que al petróleo también se le denomina "crudo". Una refinería es un enorme complejo donde ese petróleo crudo se somete en primer lugar a un proceso de destilación o separación física y luego a procesos químicos que permiten extraerle buena parte de la gran variedad de componentes que contiene. El petróleo se puede igualmente clasificar en tres categorías: parafínico, nafténico y asfáltico o mixto. Los productos que se sacan del proceso de refinación se llaman derivados y los hay de dos tipos: los combustibles, como la gasolina, ACPM, etc.; y los petroquímicos, tales como polietileno, benceno, etc. (12)

La refinación se cumple en varias etapas. Es por esto que una refinería tiene numerosas torres, unidades, equipos y tuberías. Es algo así como una ciudad de plantas de proceso. En términos sencillos, el funcionamiento de una refinería se cumple de la siguiente manera:

El primer paso de la refinación del petróleo crudo se cumple en las torres de "destilación primaria" o "destilación atmosférica". En su interior, estas torres operan a una presión cercana a la atmosférica y están divididas en numerosos compartimientos a los que se denominan "bandejas" o "platos". Cada bandeja tiene una temperatura diferente y cumple la función de fraccionar los componentes del petróleo. El crudo llega a estas torres después de pasar por un horno, donde se "cocina" a temperaturas hasta de 400 grados centígrados que lo convierten en vapor. Esos vapores entran por la parte inferior de la torre de destilación y ascienden por entre las bandejas. A medida que suben pierden calor y se enfrían. Cuando cada componente vaporizado encuentra su propia temperatura, se condensa y se deposita en su respectiva bandeja, a la cual están conectados ductos por los que se recogen las distintas corrientes que se separaron en esta etapa. Al fondo de la torre cae el "crudo reducido", es decir, aquel que no alcanzó

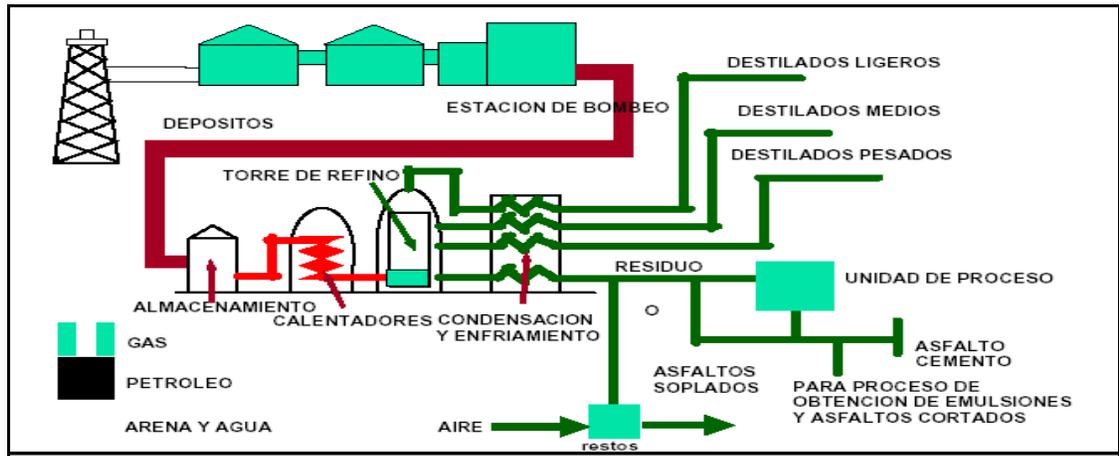
a evaporarse en esta primera etapa. Se cumple así el primer paso de la refinación. De abajo hacia arriba se han obtenido, en su orden: gasóleos, ACPM, queroseno, turbosina, nafta y gases ricos en butano y propano. Algunos de estos, como la turbosina, queroseno y ACPM, son productos ya finales. Las demás corrientes se envían a otras torres y unidades para someterlas a nuevos procesos, al final de los cuales se obtendrán los demás derivados del petróleo. Así, por ejemplo, la torre de "destilación al vacío" recibe el crudo reducido de la primera etapa y saca gasóleos pesados, bases parafínicas y residuos.

La unidad de Craqueo Catalítico o Cracking recibe gasóleos y crudos reducidos para producir fundamentalmente gasolina y gas propano. Las unidades de Recuperación de Vapores reciben los gases ricos de las demás plantas y sacan gas combustible, gas propano, propileno y butanos. La planta de mezclas es en últimas la que recibe las distintas corrientes de naftas para obtener la gasolina motor, extra y corriente. La unidad de aromáticos produce a partir de la nafta: tolueno, xilenos, benceno, ciclohexano y otros petroquímicos. La de Parafinas recibe destilados parafínicos y nafténicos para sacar parafinas y bases lubricantes. De todo este proceso también se obtienen azufre y combustóleo. El combustóleo es lo último que sale del petróleo. Es algo así como el fondo del barril.

Cada vez la mayor disponibilidad relativa de crudo pesado, con altos contenidos de azufre y metales y bajos rendimientos de destilados, hace necesario el contar con unidades de proceso que permitan modificar estos rendimientos en conformidad con las demandas, produciendo combustibles con calidad ecológica. Esto apunta hacia la introducción de procesos de conversión que aumenten la producción de destilados y disminuyan los residuales pesados. A este tipo de procesos se les ha llamado en su conjunto procesos de fondo de barril, y constituyen ya una sección específica de la mayor parte de las refinerías. En consecuencia, el asfalto es obtenido como producto residual del proceso anterior. El proceso general de la refinación del petróleo se muestra en la figura 1. (12)

El asfalto es una especialidad de algunas refinerías que los extraen de petróleos brutos particulares. Son productos de gran consumo exigidos en tonelaje creciente para la construcción de carreteras, autopistas, reparación de calles y caminos, para uniones de inmuebles, construcción de muros, para techo e impermeabilización, para la industria eléctrica, etc. Son objeto de ensayo de viscosidad, de penetración, de reblandecimiento y de ductilidad (alargamiento).

Figura 1. Proceso general de la refinación del petróleo



1.4.2.3 PROPIEDADES FISICAS DEL ASFALTO

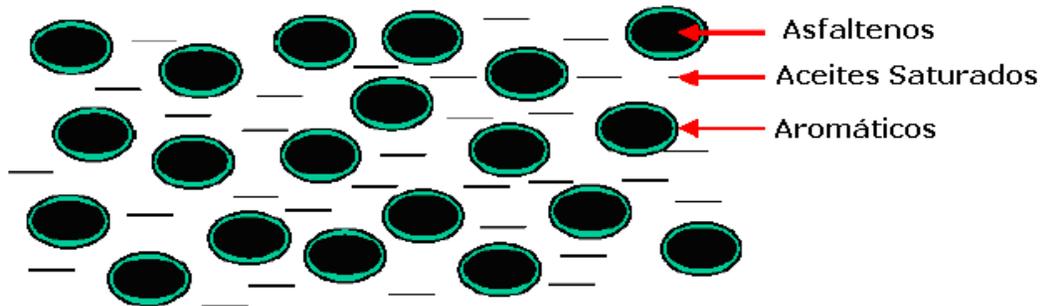
El asfalto es un material aglomerante, resistente, muy adhesivo, altamente impermeable y duradero; capaz de resistir altos esfuerzos instantáneos y fluir bajo acción de calor o cargas permanentes. Componente natural de la mayor parte de los petróleos, en los que existe en disolución y que se obtiene como residuo de la destilación al vacío del crudo pesado. Es una sustancia plástica que da flexibilidad controlable a las mezclas de áridos con las que se le combina usualmente. Su color varía entre el café oscuro y el negro; de consistencia sólida, semisólida o líquida, dependiendo de la temperatura a la que se exponga o por la acción de disolventes de volatilidad variable o por emulsificación. (2)

1.4.2.4 COMPOSICION QUIMICA DEL ASFALTO

Es de mucha utilidad un amplio conocimiento de la constitución y composición química de los asfaltos, para el control de sus propiedades físicas y así obtener un mejor funcionamiento en la pavimentación. Al igual que el petróleo crudo, el asfalto, es una mezcla de numerosos hidrocarburos parafínicos, aromáticos y compuestos heterocíclicos que contienen azufre, nitrógeno y oxígeno; casi en su totalidad solubles en sulfuro de carbono. La mayoría de los hidrocarburos livianos se eliminan durante el proceso de refinación, quedando los más pesados y de moléculas complejas. Al eliminar los hidrocarburos más ligeros de un crudo, los más pesados no pueden mantenerse en disolución y se van uniendo por absorción a las partículas coloidales ya existentes, aumentando su volumen dependiendo de la destilación que se les dé. Las moléculas más livianas constituyen el medio dispersante o fase continua. Los hidrocarburos constituyentes del asfalto forman una solución coloidal en la que un grupo de moléculas de los hidrocarburos más pesados (asfaltenos) están rodeados por moléculas de hidrocarburos más ligeros

(resinas), sin que exista una separación entre ellas, sino una transición, finalmente, ocupando el espacio restante los aceites, como se muestra en la figura 2. (10)

Figura 2. Estructura miscelar del asfalto



Un concepto más amplio sobre la constitución, es que el asfalto consta de tres componentes mayoritarios que son los asfaltenos, maltenos (resinas y aromáticos) y aceites saturados. Estos tres constituyen un sistema coloidal como el explicado anteriormente.

- **Asfaltenos:** son moléculas complejas de alto peso molecular, insoluble en hidrocarburos parafínicos y soluble en compuestos aromáticos como el benceno. Son inclusiones sólidas grandes, bituminosas negras, posee alta viscosidad y provee elasticidad, fuerza y adhesión.
- **Maltenos:** Son la fracción soluble en hidrocarburos saturados de bajo punto de ebullición. Los maltenos están constituidos por anillos aromáticos, anillos nafténicos y muy poca cadena parafínica; generalmente existe mayor proporción de maltenos que asfaltenos. El mayor contenido del primero es lo que le da la calidad a un asfalto, esto quiere decir que la naturaleza química de los maltenos regula en gran parte las propiedades químicas de los asfaltos.

Los maltenos son sustancias semisólidas o sólidas a temperatura ambiente, son fluidas cuando están calientes y brillantes cuando están frías y mantienen su ductilidad (viscosidad).

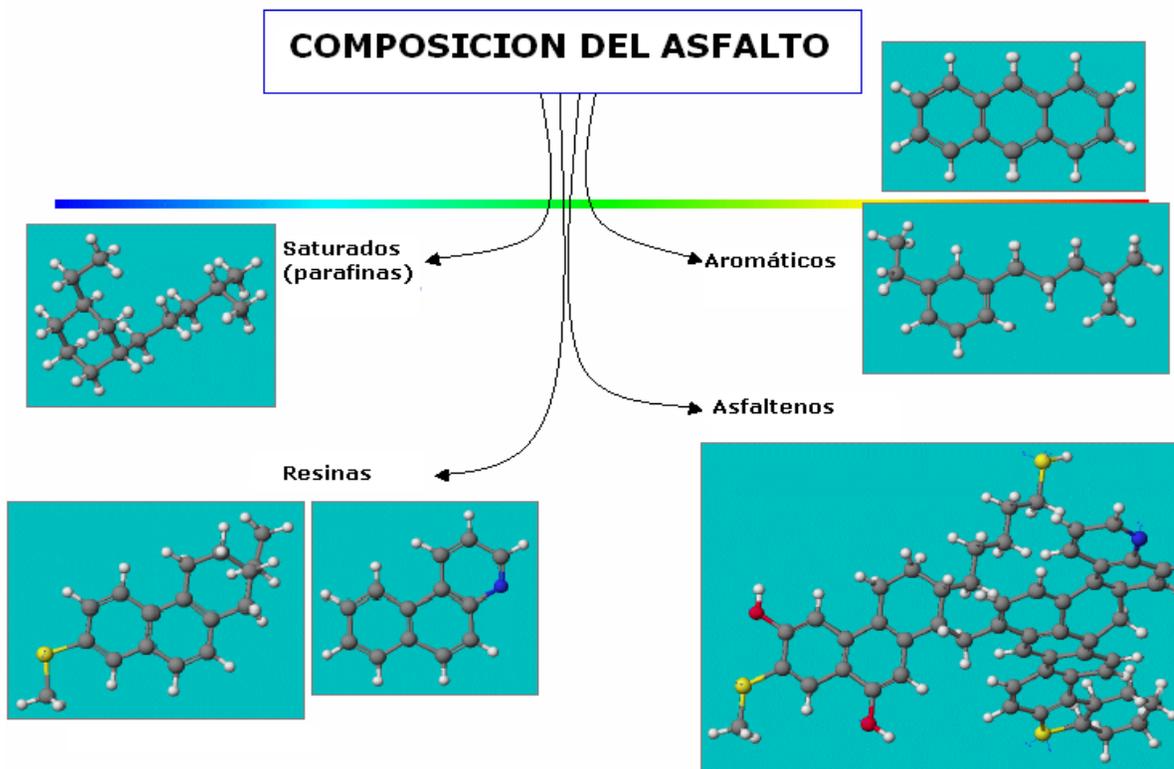
- **Aceites Saturados:** Son sustancias incoloras cuando están líquidas, son solubles en varios solventes, incrementa la fluidez (plasticidad) y puede contener una fase de cera que se transforma con el oxígeno.

Los asfaltenos cargan con la responsabilidad de las características estructurales y de dureza de los asfaltos, las resinas le proporcionan sus propiedades aglutinantes y los aceites la consistencia adecuada para hacerlos trabajables. Los asfaltos contienen fracciones bituminosas insolubles en parafinas. Como ya se

mencionó, cerca del 90 al 95% del peso del asfalto esta compuesto por carbono e hidrógeno, o lo que se había denominado como hidrocarburos. Las estructuras químicas de estos compuestos químicos del asfalto se muestran en la figura 3. Los elementos principales del asfalto:

- 80-85% C
- 10% H
- 2-5% O
- 1-7% S
- Trazas de N y metales

Figura 3. Estructura química de los compuestos del asfalto



1.4.2.5 PROBLEMAS DEL ASFALTO

Todos los materiales bituminosos utilizados en la construcción de capas de rodadura asfáltica cambian con el tiempo de una u otra forma bajo la acción de factores externos e internos. Entre ellos se puede tener:

- La consistencia del asfalto cambia con la temperatura haciéndose mas blando en tiempo cálido y mas duro en tiempo frío.

- El asfalto expuesto a la intemperie se endurece constantemente en mayor o menor grado como resultado de la acción del clima y el tránsito o por un mal manejo durante los procesos de mezclado en planta y colocación de obra.
- Deformación permanente (ahuellamiento).
- Endurecimiento a edad prematura, tornándose quebradizo.
- Pérdida de agregado.
- Fisuramiento por temperatura y fatiga. (2)

1.4.3 ASFALTOS MODIFICADOS

La modificación de asfaltos es una de las tendencias actuales del mundo de la ingeniería de los pavimentos y el aprovechamiento óptimo de recursos, creando la necesidad de innovar constantemente productos que apunten a la solución de necesidades prioritarias para el mantenimiento de la red vial, mejorando el nivel de desempeño y el tiempo de vida útil de las obras construidas en especial de los pavimentos.

Este conjunto de factores ha impulsado el interés hacia el empleo de nuevos materiales, mediante los cuales resulta posible aumentar la durabilidad de los pavimentos con la consiguiente mejora de las inversiones realizadas. Estos materiales, si bien tienen un precio más alto, suelen presentar una mayor efectividad de costo, sobre la base de un análisis de los costos actualizados durante el ciclo de vida, considerando tanto los costos en que incurre la autoridad vial (construcción y mantenimiento), como los asociados al usuario final (costos de operación vehicular). (2)

1.4.3.1 MODIFICACION DEL ASFALTO

El asfalto se presta particularmente bien para la construcción por varias razones: proporciona una buena unión y cohesión entre agregados, incrementando por ello la resistencia con la adición de espesores relativamente pequeños. Capaz de resistir la acción mecánica de disgregación producida por las cargas de los vehículos.

La modificación de asfaltos para pavimentación busca ante todo producir mezclas que tengan las siguientes características: óptima cantidad de asfalto para garantizar un pavimento durable; suficiente estabilidad para soportar las demandas de tránsito sin producir deformación o desplazamiento; que tenga suficientes vacíos que permitan la compactación de los materiales que forman el pavimento, pero que a la vez sean lo suficientemente bajos que impidan la entrada de efectos climáticos como el agua. (3)

Cualquier aditivo mezclado con el asfalto debe cumplir o tener ciertas características tales como:

- Fácilmente aplicable.
- Resistente a la degradación a altas temperaturas.
- Mezclable con el asfalto.
- 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
- Costo efectivo.
- Mantener sus propiedades durante el almacenamiento, aplicación y servicio.
- Ser capaz de ser procesado con equipamiento convencional.
- Ser física y químicamente estable durante el almacenamiento, aplicación y servicio.
- Asegurar un recubrimiento o viscosidad de aplicación a condiciones normales de temperatura

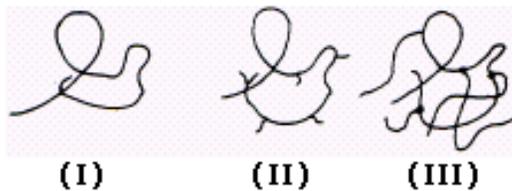
1.4.3.2 CARACTERISTICAS DE LOS ASFALTOS MODIFICADOS

Los asfaltos modificados con polímeros elevan la vida útil de un pavimento de dos a tres veces (según el caso a aplicar) con un costo adicional de hasta un 25% sobre la mezcla asfáltica. Esta 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 transito. Sin embargo, el creciente incremento de volumen del transito y la magnitud de las cargas, y la necesidad de optimizar las inversiones, provoca que, en algunos casos, las propiedades de los asfaltos convencionales resulten insuficientes. Por ejemplo, con los asfaltos convencionales, aun con los grados mas duros, no es posible eliminar el problema de las deformaciones producidas por el transito 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. Con 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 su durabilidad. Del mismo modo, las nuevas capas superficiales delgadas serian menos durables cuando se vean sometidas a altas intensidades de transito.

1.4.4 POLIMEROS

Los polímeros son sustancias macromoleculares naturales o sintéticas, obtenidas a partir de moléculas más sencillas por reacciones poliméricas, de allí su denominación de polímeros. Estos se producen por la unión de cientos de miles de moléculas pequeñas denominadas monómeros que forman enormes cadenas de las formas más diversas. Algunas parecen fideos, otras tienen ramificaciones, algunas más se asemejan a las escaleras de mano y otras son como redes tridimensionales, como se muestra en la figura 4. Por lo tanto, un polímero es un compuesto con un elevado peso molecular, cuya estructura se representa por la repetición de pequeñas unidades.

Figura 4. Polímeros: lineal sin ramificaciones (I), con ramificaciones cortas (II) y con ramificaciones largas (III)



Los polímeros naturales como proteínas, ácidos nucleicos, polisacáridos y el caucho natural, son productos de la actividad vital de los organismos. Por otra parte, los polímeros sintéticos, son obtenidos de manera más simple, por la unión de moléculas sencillas denominadas monómeros. Sin embargo, la mayor parte de los polímeros que usamos en nuestra vida diaria son materiales sintéticos con propiedades y aplicaciones variadas.

Lo que distingue a los polímeros de los materiales constituidos por moléculas de tamaño normal son sus propiedades mecánicas. En general, estos tienen una excelente resistencia mecánica debido a que las grandes cadenas poliméricas se atraen. Las fuerzas de atracción intermoleculares dependen de la composición química del polímero y pueden ser de varias clases.

Como es conocido la utilización de Polímeros en la preparación de mezclas asfálticas data desde hace más de medio siglo en los países con mayor avance tecnológico que les permite efectuar ensayos de laboratorio en cuanto al comportamiento de las mezclas asfálticas modificadas con polímeros y elaborando proyectos, los mismos que son ejecutados logrando de ésta manera mejorar la performance de los pavimentos con el consecuente beneficio al obtener periodos de diseño y de vida útil mucho mayores que el de los pavimentos convencionales. Se debe lograr resistencias mayores del pavimento en cuanto al ahuellamiento, susceptibilidad térmica, fatiga, deformación a altas temperaturas, fracturamiento a bajas temperaturas, etc., reduciendo además los costos de mantenimiento.

La gran diversidad de materiales poliméricos hace que su clasificación y sistematización sea difícil; pero atendiendo a su estructura y propiedades se clasifican en dos grandes grupos; polímeros plastómeros y elastómeros o cauchos. (4)

1.4.4.1 Plastómeros

La deformación plástica de los polímeros ocurre cuando las cadenas en el polímero se deslizan una sobre otra rompiendo los débiles enlaces de Van der Waals. Los polímeros con alta viscosidad requieren mayores esfuerzos para causar deformación plástica. Dentro de estos tenemos:

1. EVA: etileno-acetato de vinilo.
2. EMA: Etileno-acrilato de metilo
3. PE: (polietileno) tiene buena resistencia a la tracción y buena resistencia térmica, como también buen comportamiento a bajas temperaturas.
4. PP: (Polipropileno).
5. Poliestireno: son poco usados. (5)

1.4.4.2 Elastómeros o cauchos

Los elastómeros son sustancias parecidas al caucho, poseen propiedades elásticas que permiten duplicar o triplicar su longitud cuando se estiran, recuperando su tamaño cuando se interrumpe la tensión. (13)

Son polímeros lineales amorfos, generalmente insaturados. Sometidos a un proceso de vulcanización adquieren una estructura parcialmente reticulada, la cual le da las propiedades elásticas. Entre los polímeros que son elastómeros se encuentran el poliisopreno o caucho natural, el polibutadieno, el poliisobutileno, y los poliuretanos, los cuales han sido utilizados con el asfalto y sus efectos son principalmente el incremento de la viscosidad. En algunas instancias los cauchos han sido utilizados en un estado vulcanizado, por ejemplo neumáticos reciclados pero dificultosos de poder ser dispersados en el asfalto requiriendo altas temperaturas y largos tiempos de mezclado, pudiendo resultar en mezclas heterogéneas actuando el caucho como un filler flexible.(14)

1.4.5 LATEX O CAUCHO NATURAL

El caucho natural se obtiene de un líquido lechoso de color blanco llamado látex, que se encuentra en numerosas plantas. El caucho es un polímero de hidrocarburos elástico que surge como una emulsión lechosa (conocida como el látex) en la savia de varias plantas, pero que también puede ser producido

sintéticamente. La principal fuente comercial del látex son las euforbiáceas, *Hevea brasiliensis* (*Euphorbiaceae*). Otras plantas que contienen el látex: higueras, euphorbias y el diente de león común. (14)

1.4.5.1 ORIGEN DEL LATEX O CAUCHO NATURAL.

En estado natural, el caucho aparece en forma de suspensión coloidal en el látex de plantas productoras de caucho. Una de estas plantas es el árbol de la especie *Hevea Brasiliensis*, de la familia de las Euforbiáceas, originario del Amazonas. Otra planta productora de caucho es el árbol del hule, *Castilloa elastica*, originario de México (de ahí el nombre de hule). El caucho en bruto obtenido de otras plantas suele estar contaminado por una mezcla de resinas que deben extraerse para que el caucho sea apto para el consumo. Entre estos cauchos se encuentran el guayule, la gutapercha y la balata, que se extraen de ciertos árboles tropicales.

1.4.5.2 RECOLECCION DEL LATEX

El caucho se obtiene del árbol por medio de un tratamiento sistemático de "sangrado", que consiste en hacer un corte en forma de ángulo a través de la corteza profundizando hasta el cambium, como se observa en la figura 5. Una pequeña vasija que cuelga en el tronco del árbol para recoger el látex, jugo lechoso que fluye lentamente de la herida del árbol.

Figura 5. Recolección del látex



El látex fresco es transformado en caucho seco tan pronto como sea posible después de la recolección. Primeramente, se cuela por un tamiz de lámina perforada para eliminar partículas de hojas y corteza. En seguida se diluye de su concentración de 30-35% de caucho a un título aproximado de 12%. Algunas plantaciones usan un hidrómetro especial llamado Metralac, que determina el

contenido sólido del látex sin realizar el ensayo por evaporación. Después de la dilución, se deja el látex en reposo un corto tiempo para que las materias no separadas por el tamiz (arena y cieno) se sedimenten. Entonces está dispuesto para la coagulación.

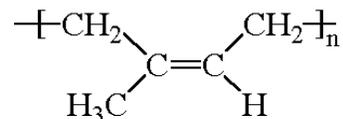
1.4.5.3 COMPOSICION QUIMICA DEL LATEX

El látex contiene de 30 a 36% del hidrocarburo del caucho, 0.30-0.7% de cenizas, 1-2% de proteínas, 2% de resina y 0.5 de quebrachitol. La composición del látex varía en las distintas partes del árbol; generalmente el porcentaje de caucho (hidrocarburo) decrece del tronco a las ramas y hojas. La época del año afecta a la composición del látex, así como el tipo de suelo y la línea o casta del árbol. El caucho es una secreción irreversible o producto de desecho del árbol, y cuanto más se extrae, tanto más la planta regenera. El caucho es producido en el protoplasma por reacciones bioquímicas de polimerización catalizadas por enzimas.

El contenido de sólidos del caucho fresco de árboles de media edad oscila entre 32 y 38%. En los árboles jóvenes desciende hasta 20%, y en árboles viejos y en los que no han sido sangrados mucho tiempo, la cifra se eleva hasta 45%. Aunque, aproximadamente, 90% de los sólidos son de hidrocarburo del caucho, se hallan también enzimas, proteínas, azúcares, tanino, alcaloides, sales minerales y algunos componentes de la corteza. Algunas de estas sustancias distintas del hidrocarburo del caucho son las que motivan a la estabilización de las partículas coloidales del mismo en el agua. Otras afectan el color y otras cooperan a los caracteres físicos del caucho contenido en el látex. (16)

Uno de los polímeros naturales más conocidos es el poliisopreno, o caucho natural, cuya molécula aparece en la figura 6. Es lo que llamamos un elastómero, es decir, después de ser estirado o deformado, recupera su forma original. Normalmente, el caucho natural es tratado para producir entrecruzamientos, lo que lo convierte en un elastómero aún mejor.

Figura 6. Estructura del monómero del poliisopreno



El poliisopreno es un polímero dieno, o sea un polímero formado a partir de un monómero que contiene dos enlaces dobles carbono-carbono. Como la mayoría de los polímeros dienos, tiene un enlace doble carbono-carbono en la cadena polimérica. El poliisopreno puede extraerse de la savia del árbol de la Hevea, pero

también puede sintetizarse por medio de la polimerización Ziegler-Natta. Este es un raro ejemplo de un polímero natural que puede hacerse *casí* tan bien como lo hace la naturaleza.

1.4.5.4 CARACTERISTICAS FISICAS Y QUIMICAS DE LATEX Y DEL CAUCHO NATURAL

El caucho bruto en estado natural es un hidrocarburo blanco o incoloro. A la temperatura del aire líquido, alrededor de -195°C , el caucho puro es un sólido duro y transparente. De 0 a 10°C es frágil y opaco, y por encima de 20°C se vuelve blando, flexible y translúcido. Al amasarlo mecánicamente, o al calentarlo por encima de 50°C , el caucho adquiere una textura de plástico pegajoso. A temperaturas de 200°C o superiores se descompone.

Cuando fluye del árbol, el látex es casi neutro, pero la acción de enzimas y bacterias lo vuelve ácido y entonces el látex tiende a coagularse. Para evitar la coagulación y conservar el látex en su estado coloidal estable, se le añaden preservativos tipo bactericidas lo antes posible después que ha sido obtenido del árbol. El preservativo más común es el amoníaco, pero se usan también el formaldehído, hidróxido de sodio, jabón y ciertos productos químicos bactericidas, como las sales de pentaclorofenol. En las plantaciones se suele colocar una pequeña cantidad de amoníaco acuoso en la vasija en la que se recoge el látex fresco. El látex obtenido se lleva a la estación, donde se le añade amoníaco en estado gaseoso.

El caucho puro es insoluble en agua, álcalis o ácidos débiles, y soluble en benceno, petróleo, hidrocarburos clorados y disulfuro de carbono. Con agentes oxidantes químicos se oxida rápidamente, pero con el oxígeno de la atmósfera lo hace lentamente.

La densidad del caucho a 0°C es de 0.950 a 20°C es de 0.934 . El caucho bruto deshelado después de la masticación por cilindros fríos no varía de densidad. Cuando el caucho bruto ha sido estirado y deformado durante algún tiempo, no vuelve completamente a su estado original. Si entonces se calienta, la recuperación es mayor que a la temperatura ordinaria. Este fenómeno se denomina deformación residual o estiramiento permanente y es propio del caucho.

El ácido fórmico está considerado como el mejor de los coagulantes para el caucho natural, pero el ácido acético se usa también mucho. Otros ácidos, el alumbre ordinario y el alumbre de amonio han sido usados como coagulantes. La cantidad de ácido requerida, depende del estado de los árboles y de las condiciones climáticas. Los árboles jóvenes dan un látex inestable y durante la sangría ha de añadirse al mismo algo de amoníaco para asegurar su estabilidad hasta su manufactura. Este amoníaco ha de tomarse en cuenta al determinar la

cantidad de ácido necesario. El látex de árboles grandes, que no ha recibido amoníaco, necesita 40 mL de ácido fórmico (90%) por cada 100 litros de látex (con 12% de sólidos). El ácido de 90% se diluye en agua hasta una concentración de 4% y se mezcla muy bien con el látex. El volumen de ácido debe controlarse cuidadosamente, pues el exceso impide la coagulación. En intervalo de pH de 5.05 a 4.77 está el punto isoeléctrico en que se efectúa la coagulación del caucho. Dicho intervalo se denomina también primera zona de sólido. (16)

En la mayoría de los casos, el caucho bruto se mezcla con numerosas sustancias que modifican sus características. Existen aditivos que estiran el caucho pero no lo endurecen materialmente, como el carbonato de calcio y la baritina o sulfato de bario. También se añaden otras sustancias reforzantes para dar dureza al producto final, como el negro de humo, el óxido de cinc, el carbonato de magnesio y ciertas arcillas. Otros aditivos que se emplean son pigmentos, como el óxido de cinc, el litopón y muchos tintes orgánicos, y ablandadores, como ciertos derivados del petróleo (aceites y ceras), la brea de pino o los ácidos grasos, que se usan cuando el caucho es demasiado rígido para mezclarse con otras sustancias.

El principal agente vulcanizante sigue siendo el azufre. El selenio y el telurio también se emplean, pero generalmente con una elevada proporción de azufre. En la fase de calentamiento del proceso de vulcanización, se mezcla el azufre con el caucho a la vez que con el resto de los aditivos. La proporción azufre-caucho varía entre un 1:40 para el caucho blando hasta un 1:1 en el caucho duro. La vulcanización en frío, que se utiliza para fabricar artículos de caucho blando como guantes y artículos de lencería, se lleva a cabo por exposición al vapor de cloruro de azufre (S_2Cl_2). Los agentes aceleradores de la vulcanización que se empleaban en un principio eran solamente óxidos metálicos como el blanco de plomo y la cal.

1.4.5.5 APLICACIONES DEL LATEX Y CAUCHO NATURAL.

Comparado con el caucho vulcanizado, el caucho natural tiene muy pocas aplicaciones. Se usa en cementos, cintas aislantes, cintas adhesivas y como aislante en mantas y zapatos. El caucho vulcanizado tiene otras muchas aplicaciones. Por su resistencia a la abrasión, el caucho blando se utiliza en los dibujos de los neumáticos de los automóviles y en las cintas transportadoras; el caucho duro se emplea para fabricar carcasas de equipos de bombeo y tuberías utilizadas para perforaciones con lodos abrasivos.

Por su flexibilidad, se utiliza frecuentemente para fabricar mangueras, neumáticos y rodillos para una amplia variedad de máquinas, desde los rodillos para escurrir la ropa hasta los instalados en las rotativas e imprentas. Por su elasticidad se usa en varios tipos de amortiguadores y mecanismos de las carcasas de máquinas para reducir las vibraciones. Al ser relativamente impermeable a los gases se emplea para fabricar mangueras de aire, globos y colchones. Su resistencia al agua y a la

mayoría de los productos químicos líquidos se aprovecha para fabricar ropa impermeable, trajes de buceo, tubos de laboratorio y sondas para la administración de medicamentos, revestimientos de tanques de almacenamiento, máquinas procesadoras y vagones aljibes para trenes. Por su resistencia a la electricidad, el caucho blando se utiliza en materiales aislantes, guantes protectores, zapatos y mantas, y el caucho duro se usa para las carcasas de teléfonos, piezas de aparatos de radio, medidores y otros instrumentos eléctricos. El coeficiente de rozamiento del caucho, alto en superficies secas y bajo en superficies húmedas, se aprovecha para correas de transmisión y cojinetes lubricados con agua en bombas para pozos profundos. (15)

1.4.6 INVESTIGACIONES REALIZADAS DE ASFALTOS MODIFICADOS

En los últimos 20 años muchos investigadores han observado un gran espectro de materiales que modifican a los asfaltos utilizados en la construcción de caminos, experimentando principalmente en asfaltos para usos industriales, agregando asbestos, fibras vegetales, minerales y cauchos.

La utilización de fibras celulósicas no modifica químicamente al bitúmen pero interviene en las propiedades físicas permitiendo incrementar el contenido del mismo. Tiende a espesar o conferir una reología al bitúmen evitando que el mismo drene de la mezcla previa a la compactación.

Para que un aditivo y/o modificador sea efectivo para ser utilizado debe ser práctico y económico, entonces debe ser: fácilmente aplicable, resistente a la degradación a altas temperaturas, mezclable con el asfalto, mejorar la resistencia a la fluencia a 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 y costo efectivo.

Los aditivos cuando son mezclados con el asfalto deberían tener las siguientes características: Mantener sus propiedades durante el almacenamiento, aplicación y servicio. Ser capaz de ser procesado con equipamiento convencional. Ser física y químicamente estable durante el almacenamiento, aplicación y servicio. Asegurar un recubrimiento o viscosidad de aplicación a condiciones normales de temperatura

1.4.6.1 Modificación del asfalto por la adición de polímeros termoplásticos

Polímeros como, polietileno, polipropileno, policloruro de vinilo, poliestireno y etileno vinil acetato (EVA) son los principales polímeros termoplásticos que han sido examinados para la utilización como modificadores de ligantes asfálticos. Como termoplásticos, estos son caracterizados por su ablandamiento en el

calentamiento y el endurecimiento en el enfriamiento. Cuando se mezclan con el asfalto los polímeros termoplásticos, asociados a la temperatura ambiente, incrementan la viscosidad del asfalto. Desafortunadamente los polímeros no incrementan significativamente la elasticidad del asfalto y cuando son calentados pueden ser separados, entregando una capa de dispersión en el enfriamiento. El polímero EVA a una concentración del 5% en asfalto de penetración 70/100 es muy común.

El polímero EVA es un material termoplástico con una estructura "randon" producida por la copolimerización del etileno y el acetato de vinilo. Los copolímeros con bajo contenido de acetato de vinilo poseen propiedades similares al polietileno de baja densidad. Si el nivel de acetato de vinilo se incrementa, cambian las propiedades del copolímero.

1.4.6.2 Modificación del asfalto por la adición de cauchos termoplásticos

De los cuatro grupos principales de elastómeros termoplásticos se encuentran, el poliuretano, copolímeros poliéter - poliéster, copolímeros olefínicos, y copolímeros estirénicos en bloque, este último es el que ha presentado el potencial más importante cuando se mezcla con el asfalto. Los copolímeros estirénicos en bloque, comúnmente denominados " Cauchos Termoplásticos", pueden ser producidos por una sucesiva operación secuencial de la polimerización del estireno-butadieno-estireno (SBS) ó estireno-isopreno-estireno (SIS). A temperaturas por encima de punto de transición del poliestireno (100° C), el poliestireno se ablanda y los dominios se debilitan y se disociarán bajo esfuerzos permitiendo de esta forma una fácil disolución. Con el enfriamiento los dominios se reasociaran, la resistencia y la elasticidad se restauran nuevamente. Por este motivo es un material termoplástico utilizado en la modificación del asfalto.

1.4.6.3 Fabricación de mezclas cauchos termoplásticos/asfalto

Para asegurar la calidad de la dispersión del polímero en el asfalto es importante tener en cuenta diferentes factores, como la velocidad aplicada por el mezclador. Cuando el polímero es agregado al asfalto caliente, el asfalto inmediatamente comienza a penetrar en las partículas del polímero, causando que los dominios del polímero se empiecen a disolver y derretir. Cuando esto ocurre, el nivel de velocidad de las partículas derretidas es crítico, y una dispersión satisfactoria se asegura con un adecuado tiempo de mezclado. Por esto, se requieren mezcladores de alta velocidad para dispersiones de cauchos termoplásticos en el asfalto.

1.4.6.4 Modificación del asfalto por la adición de compuestos orgánicos de manganeso

El uso de compuestos orgánicos de manganeso en el asfalto modifica y mejora los esfuerzos de los concretos asfálticos, ya sea solo o en combinación con compuestos cobálticos y de cobre. El uso del manganeso modifica los asfaltos y los concretos mejorando la susceptibilidad térmica de las mezclas como por ejemplo la estabilidad Marshall, la resistencia a la deformación permanente y el Stiffness dinámico. Para manejar los compuestos de Manganeso se deben dispersar rápidamente en el asfalto con un aceite como mezclador.

1.4.6.5 Aditivación con Azufre

El azufre es utilizado en dos tipos de pavimentos asfálticos procesados y en otros productos importantes. El azufre mezclado en el asfalto se utiliza en pequeñas cantidades como un diluyente del mismo. En otro proceso, se utiliza una gran cantidad de azufre donde el excedente se comporta como un filler moldeable, produciendo una mezcla muy trabajable, que puede ser extendida por maquinaria de compactación sin rodillo, que al enfriarse es muy resistente a la deformación.

La cantidad de azufre que reaccionaria con el asfalto depende de la composición y de la temperatura del asfalto. Se ha demostrado que el azufre reacciona predominantemente con la fracción nafténica-aromática del asfalto, ya sea adicionándose a la molécula, u oxidando el asfalto, con la extracción de hidrogeno como sulfuro de hidrogeno. Entre 119° C y 150° C, la reacción es principalmente de adición, produciendo un incremento de la fracción polar aromática y un cambio relativamente pequeño en las propiedades reológicas del asfalto. Por encima de los 150° C, el proceso de oxidación aumenta rápidamente, produciendo un incremento en los asfaltenos y un efecto en las propiedades, similar al asfalto soplado.

1.4.6.6 Modificación del asfalto por la adición de caucho

Polímeros tales como, Polibutadieno, Poliisopreno, Cloropreno, Caucho Estireno Butadieno, han sido utilizados con el asfalto, causando principalmente incremento en la viscosidad. En algunas instancias los cauchos han sido utilizados en un estado vulcanizado, por ejemplo, neumáticos reciclados que son difíciles de dispersarse en el asfalto, requiriendo altas temperaturas y largos tiempos de mezclado, pudiendo resultar mezclas heterogéneas actuando el caucho como un filler flexible.

En la actualidad no se conoce del desempeño de asfaltos modificados con látex natural de caucho, y no existe un procedimiento valido para ser sometidos a las

condiciones de servicio (cargas, clima, entre otros), ni mucho menos normativas que regulen su uso e impulsen el desarrollo de un material perdurable que responda a las exigencias actuales del tráfico, tales como corredores viales de vías primarias, o el caso de las superficies de rodadura. Por ello, con esta investigación se busca analizar, que este aditivo a emplear (látex) en el asfalto cumpla con las condiciones físicas y químicas requeridas para la pavimentación de vías.

1.4.7 TECNICAS DE ANÁLISIS

Diversas técnicas de análisis han sido aplicadas por centros de investigación para el estudio de los materiales asfálticos, con el fin de investigar su composición y las alteraciones provocadas por la incidencia de diversos agentes climáticos, como, el aire, luz, humedad, rayos ultravioletas, etc sobre la película bituminosa.

Entre los métodos de análisis aplicados a los estudios de composición de los cementos asfálticos podemos citar: métodos cromatográficos como la cromatografía plana y de columna, índice de refracción, Microscopia de fluorescencia, técnicas espectroscópicas como la Espectroscopia Infrarroja y la Espectroscopia de Ultravioleta y Visible

1.4.7.1 MÉTODOS CROMATOGRÁFICOS

La cromatografía agrupa un conjunto importante y diverso de métodos, que permite a los científicos separar componentes estrechamente relacionados en mezclas complejas, lo que en muchas ocasiones resulta imposible por otros medios. En todas las separaciones cromatográficas, la muestra se desplaza con una fase móvil, que puede ser un gas, un líquido o un fluido supercrítico. Esta fase móvil se hace pasar a través de una fase estacionaria con la que es inmisible, y que se fija a una columna o a una superficie sólida. Las dos fases se eligen de tal forma, que los componentes de la muestra se distribuyen de modo distinto entre la fase móvil y la fase estacionaria. Aquellos componentes que son fuertemente retenidos por la fase estacionaria se mueven lentamente con el flujo de la fase móvil; por el contrario, los componentes que se unen débilmente a la fase estacionaria, se mueven con rapidez. Como consecuencia de la distinta movilidad, los componentes de la muestra se separan en bandas o zonas discretas que pueden analizarse cualitativa y/o cuantitativamente. (18)

1.4.7.1.1 CLASIFICACIÓN DE LOS MÉTODOS CROMATOGRAFICOS

Los métodos cromatográficos se pueden clasificar de dos modos distintos que se mencionaran a continuación.

- **CROMATOGRAFIA PLANA**

En la cromatografía plana, la fase estacionaria se fija sobre una placa plana o a los intersticios de un papel; en este caso la fase móvil se desplaza a través de la fase estacionaria por capilaridad o por gravedad.

Los métodos de cromatografía en plano incluyen la cromatografía en capa fina (TLC), la cromatografía en papel (PC), y la electrocromatografía (EC). En todos los casos se emplea una capa plana y relativamente delgada de un material que a la vez es el soporte, o bien que recubre una superficie de vidrio, plástico o metálica. La fase móvil se mueve a través de la fase estacionaria por capilaridad, a veces ayudada por gravedad o por aplicación de un potencial eléctrico. La cromatografía en plano en algunas ocasiones se denomina cromatografía bidimensional, aunque esta descripción no es estrictamente correcta puesto que la fase estacionaria tiene un grosor definido.

En la actualidad, la cromatografía en plano se centra en la técnica de la capa fina, que es más rápida, tiene mejor resolución, y es más sensible que su alternativa en papel.

El desarrollo de la placa es un proceso análogo a la elución en la cromatografía de líquidos, en el que la muestra es transportada por la fase móvil a través de la fase estacionaria. La forma más común de desarrollar una placa consiste en depositar una gota de la muestra cerca de uno de los extremos de la placa, y marcar su posición con un lápiz. Una vez se ha evaporado el disolvente en el que estaba disuelta la muestra, se coloca la placa en un recipiente cerrado y saturado con los vapores del disolvente con el que se efectuara el desarrollo. Uno de los extremos de la placa se introduce en el eluyente procurando evitar el contacto directo de éste con la muestra. El eluyente asciende por la placa gracias al efecto de capilaridad ejercido entre las finas partículas. A medida que el eluyente se desplaza pasa por el punto de aplicación de la muestra, la disuelve y la arrastra por la placa distribuyéndose entre el disolvente que se desplaza y la fase estacionaria. Después que el disolvente ha pasado a través de la mitad o las dos terceras partes de la longitud de la placa, se retira ésta del recipiente y se seca. Las posiciones de los componentes de la muestra se determinan por cualquiera de los procedimientos habituales. (18)

- **CROMATOGRAFIA EN COLUMNA**

En la cromatografía en columna, un tubo estrecho se contiene la fase estacionaria a través de la cual se hace pasar la fase móvil por presión.

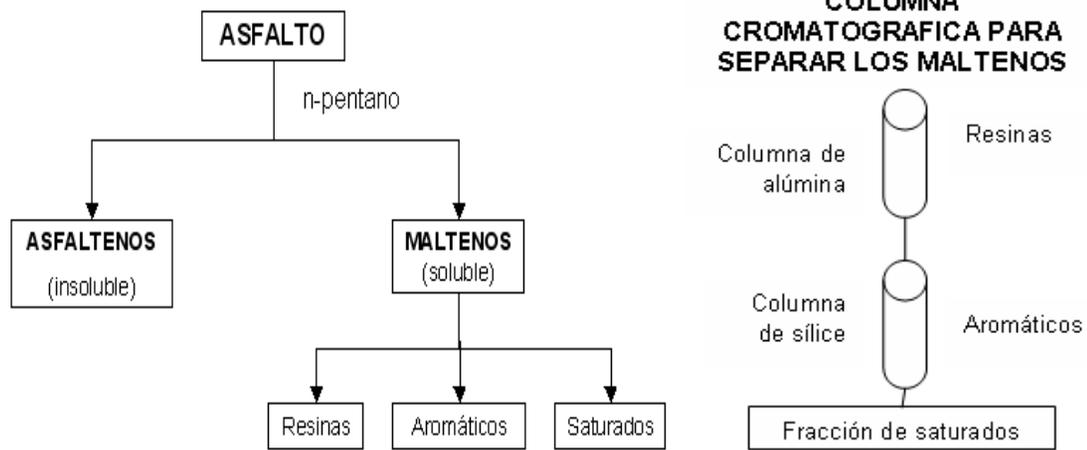
La elución implica el transporte de una especie a través de una columna por la adición continuada de nueva fase móvil. Una única porción de la muestra se introduce en la parte superior de la columna (tiempo t_0) después de lo cual los componentes de la muestra se distribuyen entre las dos fases. La introducción de fase móvil adicional (el eluyente) hace que la fase móvil que contiene una parte de la muestra avance por la columna, donde tiene lugar un posterior reparto entre la fase móvil y las porciones frescas de fase estacionaria a las que accede (tiempo t_1). Al mismo tiempo, tiene lugar una distribución entre el disolvente nuevo y la fase estacionaria en el lugar en el que inicialmente se ubicaba la muestra.

Las sucesivas adiciones de la fase móvil hacen avanzar las moléculas de soluto por la columna en una serie de continuas transferencias entre las fases estacionaria y móvil. Sin embargo, debido a que el movimiento de los solutos solo puede ocurrir en la fase móvil, la velocidad media a la que una zona de soluto migra en la columna depende de la fracción de tiempo que reside en esta fase. Esta fracción de tiempo es pequeña para las sustancias que son retenidas fuertemente por la fase estacionaria y es grande cuando es más probable la retención en la fase móvil. Las diferencias de velocidad que resultan hacen que se separen los componentes de la mezcla en zonas que se localizan a lo largo de la columna. El aislamiento de las especies separadas se lleva a cabo haciendo pasar suficiente cantidad de fase móvil a través de la columna hasta que las bandas individuales salen de ella, pudiendo así recogerse. (18)

1.4.7.2 NORMA ASTM D-2007

La norma ASTM D-2007, empleada para evaluar asfaltos, utiliza como adsorbentes alúmina y silica gel, los cuales se distribuyen en una columna superior y una inferior respectivamente tal y como se muestra en la figura 7. En el diagrama de la figura 7 se aprecia que la fracción malténica del asfalto obtenida de la separación por precipitación con n- Pentano 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 o resinas (columna de alúmina) y los aromáticos (columna de silica gel), los cuales son desorbidos mediante adición de solventes adecuados (mezcla -acetona 1:1 tolueno y tolueno respectivamente).

Figura 7. Separación del asfalto según el método de ensayo S.A.R.A.



1.4.7.3 INDICE DE REFRACCIÓN

Experimentalmente se observa que la velocidad a la que se propaga la radiación a través de una sustancia transparente es menor que su velocidad en el vacío y depende de los tipos y concentraciones de átomos, iones o moléculas del medio. De estas observaciones se deduce que la radiación debe interactuar de alguna manera con la materia. Sin embargo, dado que no se observa ningún cambio en la frecuencia, la interacción no puede implicar una transferencia permanente de energía.

El índice de refracción de un medio es una medida de su interacción con la radiación y se define como $n_i = c / v_i$, en la que n_i es el índice de refracción para una frecuencia determinada i , v_i es la velocidad de la radiación en el medio, y c es su velocidad en el vacío. El índice de refracción de la mayoría de los líquidos está entre 1.3 y 1.8; para los sólidos va desde 1.3 a 2.5 o incluso hasta valores superiores.

La interacción implicada en la transmisión puede atribuirse a la polarización periódica de las especies atómicas y moleculares que constituyen el medio. La polarización significa una deformación transitoria de las nubes de electrones asociadas a los átomos o a las moléculas, causada por el campo electromagnético alternante de la radiación. (18)

1.4.7.4 MICROSCOPIA DE FLUORESCENCIA

Las moléculas fluorescentes absorben la luz de una determinada longitud de onda y emiten luz de otra longitud de onda más larga. Si un componente de este tipo es

iluminado a su longitud de onda absorbente y visualizado a través de un filtro que sólo permita pasar la luz de longitud de onda igual a la de 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.

El microscopio de fluorescencia es similar al microscopio convencional, a excepción de que la luz incidente que procede de una potente fuente atraviesa un primer filtro que selecciona la longitud de onda capaz de excitar al fluorocromo, antes de incidir sobre la muestra. La luz emitida por la muestra (reflejada y fluorescente) atraviesa un segundo filtro que selecciona la longitud de onda de emisión del fluorocromo.

En el funcionamiento de un microscopio de epifluorescencia, en el que la luz incide sobre la preparación a través de las lentes del objetivo. Este microscopio, de gran poder de resolución tiene que tener objetivos de cuarzo para permitir el paso de la luz ultravioleta. En el esquema se sitúan los tres elementos característicos del microscopio de fluorescencia:

- a. Primer filtro de corte o filtro de excitación. Es el filtro que selecciona la luz de la longitud de onda incidente. En el esquema está seleccionando luz de longitud de onda entre 450 y 490 nm (azul)
- b. Espejo de ranuras ordenadas o espejo dicróico. Se trata de un espejo que tiene la propiedad de reflejar la luz de ciertas longitudes de onda y de dejar pasar otras. En este caso refleja luz de longitud de onda menos de 510 nm (por ello refleja la luz incidente azul) y deja pasar la luz de longitud de onda superior a 510 nm, dejando pasar la luz verde emitida por el fluorocromo presente en la muestra.
- c. Segundo filtro de corte o filtro de emisión. Es el filtro que selecciona la luz de longitud de onda fluorescente. En este caso deja pasar la luz de longitud de onda 520 a 560 nm.

Existen un gran número de juegos de filtros de excitación y de emisión para los diferentes fluorocromos, inclusive conjuntos que permiten la observación simultánea de dos fluorocromos. Es de gran importancia seleccionar el adecuado conjunto de filtros para la observación.

1.4.7.5 TECNICAS ESPECTROSCOPICAS

Entre los métodos instrumentales de análisis aplicados a los estudios de composición de los cementos asfálticos podemos citar: la Espectroscopía infrarroja y la Espectroscopía de Ultravioleta y Visible

1.4.7.5.1 ESPECTROSCOPIA INFRARROJA

Los espectros de absorción, emisión y reflexión en el infrarrojo, de especies moleculares, se pueden explicar asumiendo que todos son el resultado de los distintos cambios energéticos producidos en las transiciones de las moléculas de uno estados de energía vibracionales y rotacionales a otros.

La radiación en el infrarrojo no es lo suficientemente energética para producir la clase de transiciones electrónicas que se dan cuando la radiación es ultravioleta, visible y de rayos X. La absorción de radiación en el infrarrojo se limita así, en gran parte, a especies moleculares para las cuales existen pequeñas diferencias de energía entre los distintos estados vibracionales y rotacionales.

Para absorber radiación en el infrarrojo, una molécula debe sufrir un cambio neto en el momento bipolar como consecuencia de su movimiento de vibración o de rotación. Solo en estas circunstancias, el campo eléctrico alterno de la radiación puede interactuar con la molécula, y provocar cambios en la amplitud de alguno de sus movimientos.

Las posiciones relativas de los átomos en una molécula no son exactamente fijas, sino que fluctúan continuamente como consecuencia de una multitud de tipos de vibraciones y rotaciones diferentes alrededor de los enlaces en la molécula.

Pueden distinguirse dos categorías básicas de vibraciones: de tensión y de flexión. Una vibración de tensión supone un cambio continuo en la distancia interatómica a lo largo del eje del enlace entre dos átomos. Las vibraciones de flexión se caracterizan por un cambio en el ángulo entre dos enlaces y son de cuatro tipos: de tijereteo, de balanceo, de aleteo y de torsión. En una molécula que contiene más de dos átomos, son posibles todos los tipos de vibraciones mencionados anteriormente. Además, puede producirse una interacción o acoplamiento de las vibraciones si éstas involucran enlaces con un mismo átomo central. El resultado del acoplamiento es un cambio en las características de las vibraciones implicadas. (18).

- **La región del infrarrojo**

La región del infrarrojo del espectro abarca la radiación con números de onda comprendidos entre 12800 y 10 cm^{-1} , que corresponden a longitudes de onda de 0.78 a $1000\text{ }\mu\text{m}$. Tanto desde el punto de vista de las aplicaciones como de la instrumentación, es conveniente dividir el espectro infrarrojo en tres regiones denominadas infrarrojo **cercano**, **medio** y **lejano**.

Región	Intervalo de longitud de onda (λ), μm	Intervalo de número de onda (ν), cm^{-1}	Intervalo de frecuencias (f), Hz
Cercano	0.78 a 2.5	12800 a 4000	3.8×10^{14} a 1.2×10^{14}
Medio	2.5 a 50	4000 a 200	1.2×10^{14} a 6.0×10^{12}
Lejano	50 a 1000	200 a 10	6.0×10^{12} a 3.0×10^{11}
La mas utilizada	2.5 a 15	4000 a 670	1.2×10^{14} a 2.0×10^{13}

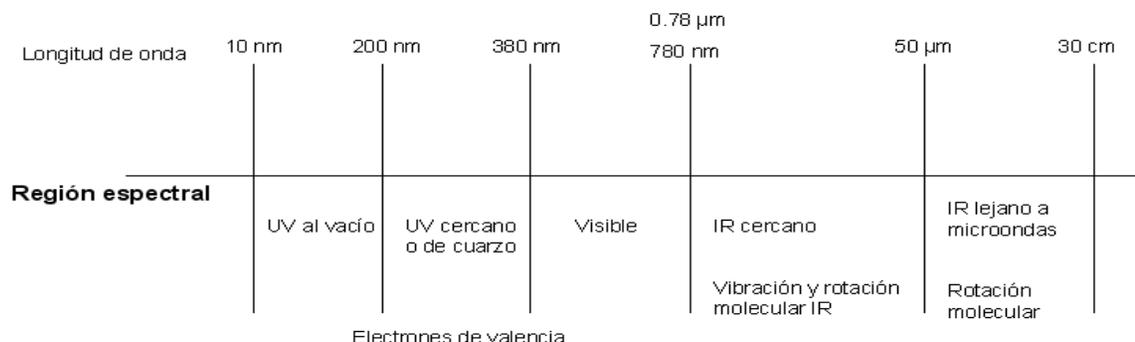
Las técnicas y las aplicaciones de los métodos basados en cada una de las tres regiones del espectro infrarrojo difieren considerablemente

1.4.7.5.2 ESPECTROSCOPIA ULTRAVIOLETA Y VISIBLE

Las medidas de absorción de radiación ultravioleta y visible tienen una gran aplicación en la identificación y determinación de una enorme cantidad de especies inorgánicas y orgánicas.

La porción ultravioleta del espectro electromagnético se indica en la figura 8. Las longitudes de onda en la región ultravioleta generalmente se indican en nanómetros ($1\text{nm} = 10^{-7}\text{cm}$) o angstroms, \AA ($1\text{\AA} = 10^{-8}\text{cm}$). Ocasionalmente la absorción se indica en números de onda, ($\vec{\nu} = \text{cm}^{-1} = 10^7/\text{nm} = 10^8/\text{\AA}$).

Figura 8. Espectro electromagnético



Nos interesa principalmente la región de ultravioleta cercano (cuarzo) que de acuerdo a la figura 8 se extiende desde 200 hasta 380 nm. La atmósfera es transparente en esta región que resulta ser fácilmente accesible con la óptica de cuarzo. La absorción atmosférica se inicia cerca de 200 nm y se prolonga hacia la región de menor longitud de onda que es accesible a través de la espectrometría ultravioleta al vacío.

La absorción molecular en la región ultravioleta y visible el espectro depende de la estructura electrónica de la molécula. La absorción de energía se cuantifica y da

por resultado la elevación de los electrones desde orbitales en el estado básico a orbitales de mayor energía en un estado excitado; como consecuencia, los picos de absorción pueden correlacionarse con los tipos de enlace de las especies objeto de estudio.

La energía total de una molécula es la suma de su energía electrónica, su energía vibracional y su energía rotacional. La energía absorbida en la región ultravioleta produce cambios en la energía electrónica de la molécula que resulta de las transiciones de los electrones de valencia en la molécula. Estas transiciones consisten en la excitación de un electrón desde un orbital molecular lleno (normalmente un orbital π de unión o p de no unión) al siguiente orbital de energía mayor (un orbital antienlace π^* o δ^*).

- **Características de una banda de absorción**

Las principales características de una banda de absorción son su posición e intensidad. La posición de la absorción corresponde a la longitud de onda de la radiación cuya energía es igual a la requerida para la transición electrónica.

La intensidad de la absorción depende principalmente de dos factores: la probabilidad de interacción entre la energía de radiación y el sistema electrónico para elevar el estado básico a un estado excitado, así como la polaridad del estado excitado.

Es necesario, definir los siguientes términos que frecuentemente se utilizan en la descripción de los espectros electrónicos:

CROMOFORO: un grupo instaurado covalentemente que es responsable de la absorción electrónica (por ejemplo, C=C, C=O y NO₂).

AUXOCROMO: un grupo saturado que, se encuentra unido a un cromóforo altera tanto la longitud de onda como la intensidad del máximo de absorción (por ejemplo, OH, NH₂ y Cl).

DESPLAZAMIENTO BATOCROMICO: el desplazamiento de la absorción a una mayor longitud de onda debido a un efecto de solvente o sustitución.

DESPLAZAMIENTO HIPROCROMICO: el desplazamiento de la absorción a una menor longitud de onda debido a un efecto de solvente o sustitución.

EFFECTO HIPERCROMICO: aumento de la intensidad de absorción.

EFFECTO HIPOCROMICO: disminución de la intensidad de absorción.

Las características de absorción de las moléculas orgánicas en la región ultravioleta dependen de las transiciones electrónicas que pueden ocurrir y del efecto del medio atómico en las transiciones.

1.4.7.6 PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS ASFALTOS

Existen unas propiedades físicas particulares que son necesarias para evaluar los asfaltos modificados y sin modificar. Entre esas propiedades se encuentran: viscosidad, penetración, punto de ablandamiento, ductilidad, recuperación elástica, peso específico y estabilidad al almacenamiento.

1.4.7.6.1 Viscosidad a 60° C (Norma ASTM D – 4402)

Una de las propiedades que más interesan desde el punto de vista ingenieril es la viscosidad de los asfaltos. La viscosidad se define como la resistencia que ofrece un fluido a la deformación, debida básicamente al rozamiento interno de las moléculas. Cuanto mas elevada sea su viscosidad, mucho mas lento será su movimiento.

Es muy importante conocer la viscosidad a temperaturas elevadas para determinar adecuadamente las condiciones de manejo en la planta asfáltica y las temperaturas óptimas de mezclado, colocación y compactación de las mezclas asfálticas.

Si bien a temperaturas que superan los 130 – 140° C, los asfaltos modificados con polímeros aun pueden presentar un comportamiento reológico complejo, se considera que el viscosímetro rotacional Brookfield es un elemento sumamente adecuado para medir la consistencia de estos ligantes a temperaturas elevadas.

1.4.7.6.2 Ensayo de penetración (Norma ASTM D – 5)

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.

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.

1.4.7.6.3 Ensayo de punto de ablandamiento (Norma ASTM D – 36)

Los asfaltos de diferentes tipos reblandecen a temperaturas diferentes. El punto de reblandecimiento se determina usualmente por el método de ensayo arbitrario de anillo y bola. Aunque este ensayo no se incluye en las especificaciones para los asfaltos de pavimentación, se emplea frecuentemente para caracterizar los materiales mas duros empleados en otras aplicaciones e indica la temperatura en la cual los asfaltos se hacen fluidos.

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.

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.

1.4.7.6.4 Ductilidad a 25° C (Norma ASTM D – 113)

Mide el alargamiento que presenta el asfalto sin romperse, la longitud del hilo del material se mide cuando se corta en cm, este ensayo además de indicarnos el tipo de asfalto nos da la edad del mismo; ya que si se rompe a valores menores a los establecidos nos indica que es un asfalto envejecido y que ha perdido sus características, como consecuencia puede provocar grietas en la carpeta cemento asfáltico crackeado.

1.4.7.6.5 Recuperación elástica por torsión (Norma I.N.V. E – 727)

Esta norma describe el procedimiento que se debe seguir para determinar el grado de elasticidad que presentan los asfaltos modificados en particular con polímeros, de aplicación en construcción de carreteras. En el procedimiento que se describe, un cilindro de dimensiones especificadas se sumerge en la muestra del ligante bituminoso modificado. Mediante un dispositivo de torsión se gira el cilindro 180° y se determina, después de 30 minutos, el ángulo recuperado por él.

1.4.7.6.6 Peso específico del asfalto sólido (Norma ASTM D – 70)

El peso específico es la relación del peso de un volumen dado de material a 25° C con respecto al peso de un volumen igual de agua a la misma temperatura. Este deberá determinarse, cuando sea posible, sobre fragmentos naturales, homogéneos, libres de grietas. 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.

1.4.7.6.7 Estabilidad al almacenamiento de asfaltos (Norma I.N.V. E – 726)

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.

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.

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. SECCION EXPERIMENTAL

2.1 METODOLOGIA

Esta metodología se realizó en tres etapas, que incluyen el estudio físico y químico del látex, estudio químico y físico del asfalto, y la aditivación del asfalto con concentraciones de 1, 3 y 5 %, donde finalmente se eligió la concentración óptima y se le realizaron pruebas físicas, químicas y almacenamiento.

2.1.1 ETAPA I: ESTUDIO FISICO Y QUIMICO DEL LATEX

El látex analizado proveniente del Caucho o Hule Natural, de la especie *Hevea brasiliensis* Muell, del género *Hevea*, familia *Euphorbiaceae* (Euforbiácea), del orden Euforbiales, fue suministrado por ASOHETOL (Asociación de Hevicultores del Tolima).

2.1.1.1 ESTUDIO FISICO

❖ Densidad

La densidad de una sustancia es el peso de 1 mL de la misma. Se obtiene dividiendo el peso de cierto volumen de sustancia entre el peso del volumen similar de agua. El resultado depende de la temperatura. Normalmente, la densidad se determina a 20° C

❖ Solubilidad

Esta prueba se realizó utilizando diferentes solventes, entre ellos:

<ul style="list-style-type: none">▪ Agua▪ Acido clorhídrico▪ Acido sulfúrico▪ Hidróxido de sodio▪ Hidróxido de potasio▪ Éter etílico	<ul style="list-style-type: none">▪ Formol▪ Benceno▪ Acetona▪ Petróleo▪ Gasolina▪ Hidróxido de amonio
---	--

❖ pH

❖ Índice de refracción

❖ Punto de descomposición

Para realizar las cuatro últimas pruebas se utilizaron, un pH-metro, refractómetro, plancha de calentamiento y termómetro, respectivamente, previamente calibrados.

2.1.1.2 ESTUDIO QUÍMICO

El estudio químico del látex incluye un análisis de tipo preliminar en el cual no se pretende determinar detalladamente su composición. En este estudio se determina la humedad, cenizas, proteínas del látex, se realizan algunas pruebas de caracterización y el estudio de Espectroscopía Infrarroja por transformada rápida de Fourier.

❖ Humedad

Se pesan en una balanza analítica con una precisión de cuatro cifras decimales dos recipientes secos, termoresistentes y de fondo amplio (cápsula de porcelana, de aluminio o caja de Petri).

Se pesan por duplicado con exactitud de 5 a 10 g de la muestra preparada y se colocan dispersas de modo uniforme en cada recipiente. Las muestras se llevan a desecación en una estufa a presión atmosférica entre 98 y 100° C, o en una estufa al vacío a 70° C durante dos a tres horas.

Se retiran los recipientes bien tapados de la estufa y se colocan inmediatamente en un desecador hasta que alcancen la temperatura ambiente. Las muestras desecadas se pesan y se vuelven a colocar en la estufa a la temperatura de desecación durante media o una hora más. Se debe tener cuidado en su manipulación para no perder porción alguna con respecto a la muestra pesada original. Si es posible, se deben repetir las operaciones de secado, enfriada y pesada hasta obtener un peso constante esto se alcanza cuando toda el agua de la muestra haya sido eliminada; luego se guarda en el desecador la muestra deshidratada. A partir de los pesos obtenidos se calcula el porcentaje de agua o humedad y de materia seca en el producto sometido a experimentación.

La muestra debe guardarse para los correspondientes análisis de cenizas y proteína.

❖ Cenizas

Se seca en la estufa a 100° C por 30 minutos un crisol de porcelana limpio con tapa y posteriormente se enfría dentro de un desecador y se pesa exactamente.

Se pesa con la mayor precisión posible una muestra de 1.0 g seco o deshidratado del material a analizar en el crisol de porcelana con tapa.

Se coloca el crisol con la muestra y su tapa floja en una mufla y se lleva progresivamente a una temperatura que no exceda los 425° C con el fin de lograr la incineración y liberación de los compuestos gaseosos sin formación de llamas.

Se aumenta la temperatura gradualmente hasta llegar a un máximo de 550° C y se mantiene a este nivel durante el tiempo necesario (~ 2h) para obtener unas cenizas blancas o grisáceas. Se deja enfriar el crisol tapado en la mufla o en el aire hasta cerca de 60° C y luego se lleva a temperatura ambiente dentro del desecador. Finalmente se pesa el crisol con las cenizas y la tapa.

❖ **Proteínas**

Se pesan de 0.2 a 0.8 g de la muestra en un papel filtro o vidrio reloj se transfiere a un balón de digestión Kjeldahl de 250 mL (limpio y perfectamente seco) y se agregan 2.0 g del catalizador y 9 mL de H₂SO₄ concentrado.

Se coloca el balón en posición inclinada y se calienta suavemente hasta que deje de formar espuma. Se digesta hasta que la muestra este completamente clara libre de materia orgánica; de vez en cuando se debe hacer girar el balón para recoger cualquier material carbonizado adherido a la pared.

Se enfría a temperatura ambiente y se diluye con precaución con agua destilada (aproximadamente 200 mL). Luego se adiciona 100 mL de solución de H₃BO₃ al 4% con unas gotas del indicador Tashiro a un erlenmeyer de 250 mL para recoger el destilado.

Se conecta el balón en el aparato de destilación con el extremo del condensador penetrando en la disolución de ácido bórico contenido en el erlenmeyer. Se adiciona cuidadosamente 50 mL de la solución de hidróxido de sodio al 50% (o de solución de hidróxido de sodio y tiosulfato si el catalizador es de mercurio).

Se calienta y se recoge el destilado hasta cambio a verde y se deja 6 minutos más. La destilación no debe ser muy rápida porque el amoniaco no alcanza a solubilizarse en el ácido bórico produciéndose su escape.

Se retira el balón y se titula el borato de amonio con la solución de HCl 0.1 N.

❖ **Pruebas de caracterización**

Este estudio incluye pruebas como: Nitrato cérico, 2,4 Dinitrofenilhidrazina, ácidos carboxílicos, complejo de transferencia de carga generado por lodo entre otras, con el fin de caracterizar diferentes grupos funcionales en el látex, tales como: alcoholes, cetonas, aldehídos, ácidos, saturados e insaturados; todos ellos se llevaran a cabo, con sus respectivos reactivos.

❖ Espectroscopía Infrarroja por transformada rápida de Fourier

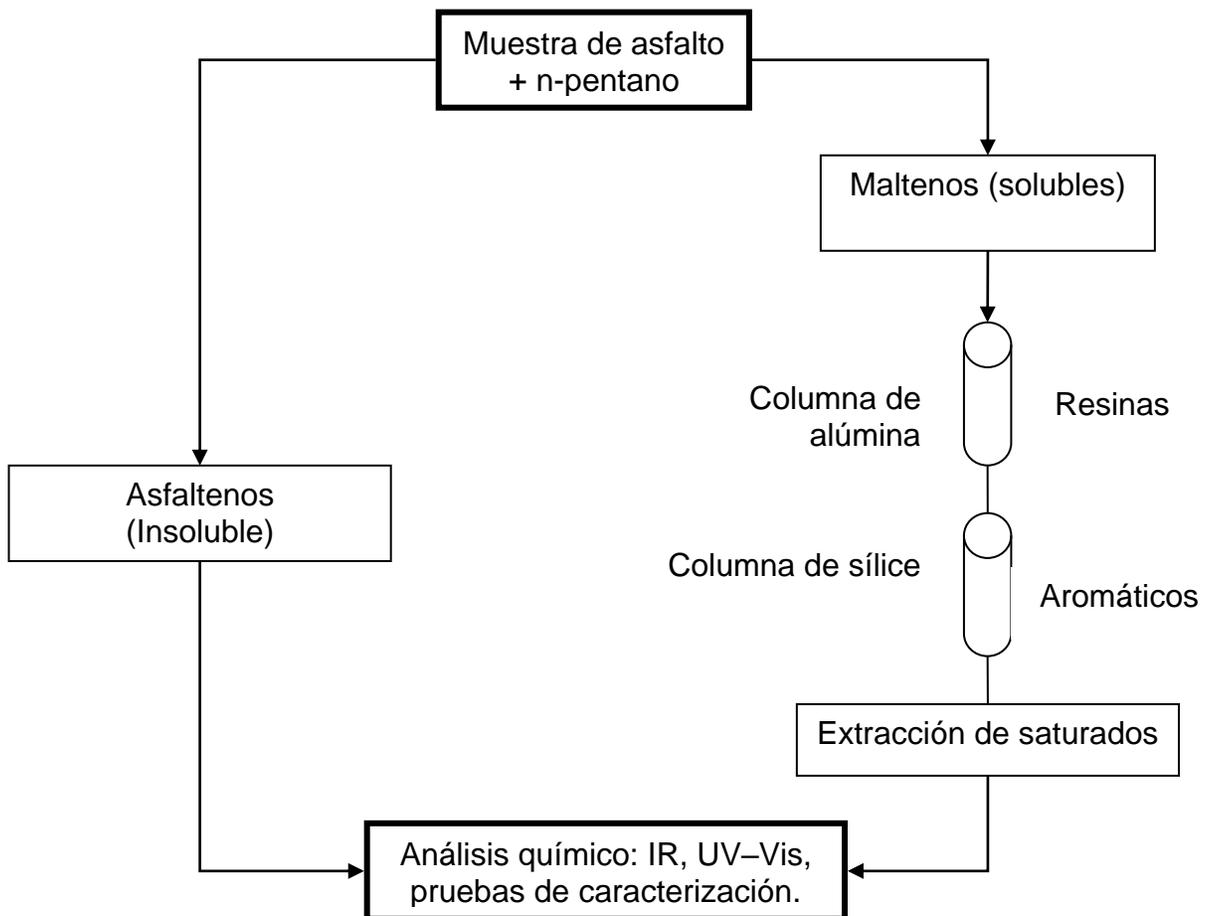
Para este análisis se empleó un Espectrofotómetro GEMINI FTIR MATTSON (ATI). Resolución ($4000-400\text{cm}^{-1}$) por Transformada Rápida de Fourier. Se tomó una mínima cantidad (2-4 micras) de muestra, se morterea con KBr quien actúa como plastificante, luego se prensa para formar una película traslúcida.

2.1.2 ETAPA II: ESTUDIO FISICO Y QUIMICO DEL ASFALTO ORIGINAL

2.1.2.1 ESTUDIO QUIMICO DE LOS ASFALTOS (NORMA ASTM – D 2007)

Se realizó la separación de los componentes, mediante tratamiento químico (extracción con n-pentano) obteniendo dos partes (soluble e insoluble), como se ilustra en la figura 9.

Figura 9. Tratamiento químico efectuado a los asfaltos



A cada extracto obtenido, se le realizó un estudio por espectroscopía Infrarroja por transformada rápida de Fourier y Ultravioleta-Visible, con el fin de confirmar los grupos funcionales de los componentes del asfalto, además de las pruebas químicas de caracterización.

2.1.2.2 PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS ASFALTOS

A una muestra de asfalto, se le realizó el análisis de las propiedades físicas como: penetración, viscosidad, ductilidad, densidad, punto de ablandamiento anillo y bola y recuperación elástica.

Estas pruebas se realizaron en el Laboratorio de Materiales, Suelos y Pavimentos de la Facultad de Ingeniería Civil, de la Universidad del Cauca.

2.1.2.2.1 Viscosidad a 60° C (Norma ASTM D – 4402)

Para este ensayo el equipo debe estar previamente calibrado, considerando las instrucciones del fabricante, con el respectivo rotor (aguja 27), a la temperatura de prueba y el tiempo de prueba, así:

Temperatura (°C)	60	100	135	150
Tiempo (min)	45	20	10	10

- Se calentó 20 g de asfalto, durante 30 minutos, a 135° C, evitando el sobrecalentamiento de la muestra o su inflamación y se agita suficientemente la muestra para homogeneizarla.
- Pasado este tiempo se adicionan 10.5 g en la cámara de prueba, e inmediatamente se introduce al viscosímetro Brookfield modelo 1 DV-III, que se muestra en la figura 10.
- Se ajusta el rotor, introduciéndolo despacio y con cuidado hasta que esté sumergido a la profundidad indicada; entonces se mueve la cámara de prueba en un plano horizontal hasta que el rotor esté localizado aproximadamente en el centro de la misma.
- Se aumentan las rpm del rotor hasta obtener un torque superior a 80%, finalmente se leen los datos obtenidos en el equipo digital. (Ver anexos).

Figura 10. Viscosímetro Brookfield modelo 1 DV-III



2.1.2.2.2 Ensayo de penetración (Norma ASTM D – 5)

Este ensayo se utiliza para la clasificación de los asfaltos. Este es un método antiguo y empírico que consiste en:

- Se calentó 100 g. de la muestra de asfalto con agitación constante para evitar sobrecalentamientos locales y para homogeneizar el material. Las temperaturas de calentamiento no exceden a las del Punto de Ablandamiento (Norma INV E - 712, método de anillo y bola). El tiempo total de calentamiento es de 30 minutos.
- Se llena el molde y se cubre con un vaso de vidrio invertido, para protegerlos del polvo y permitir la eliminación de posibles burbujas de aire, y se dejan enfriar al aire a una temperatura entre 20° y 30° C, (68° y 86° F), por un período entre 1 y 1.5 horas.
- Finalmente, se sumergen los recipientes en el baño de agua a temperatura de 25 ° C, manteniéndolos así durante los mismos períodos de enfriamiento.
- Apoyar una aguja normalizada, de 100 g. sobre la superficie del cemento asfáltico durante 5 segundos, esto se lleva acabo con el Penetrómetro, como el ilustrado en la figura 11.
- La medida de penetración es la longitud que la aguja penetró en el cemento asfáltico (unidades de medida 0.1 mm). (Ver anexos).

Figura 11. Penetrómetro Humbolt



2.1.2.2.3 Ensayo de punto de ablandamiento (Norma ASTM D – 36)

El ensayo consiste en:

- Se calienta 40 g. de la muestra del material bituminoso en forma cuidadosa. El calentamiento de la muestra no es por más de 2 horas; y, la temperatura no será mayor que 110°C (200°F) por encima del punto de ablandamiento esperado.
- Se vierte con un ligero exceso, el producto bituminoso dentro de los anillos de dimensiones normalizadas y se deja enfriar a temperatura ambiente durante 30 minutos.
- La muestra se suspende en un baño de agua. Sobre el centro de la muestra se sitúa una bola de acero de dimensiones y pesos especificados.
- Se calentó el baño en forma pausada, para asegurar que la rata de elevación de la temperatura sea constante a 5° C (9° F)/minuto, esto se lleva acabo en un montaje como el indicado en la figura 12.
- Apuntar la temperatura en la cual la bola de acero toca el fondo del vaso de cristal. Esta temperatura se denomina punto de ablandamiento del asfalto. (Ver anexos).

Figura 12. Ensayo de punto de ablandamiento



2.1.2.2.4 Ductilidad a 25° C (Norma ASTM D – 113)

Se calientan 70 g. del material asfáltico cuidadosamente, y se procede al llenado de los moldes, previamente cubiertos con una ligera película de una mezcla de partes iguales de glicerina y dextrina, para evitar la adherencia del material a la placa y partes interiores del molde.

La muestra se deja enfriar a temperatura ambiente durante 30 a 40 minutos, sumergiéndola a continuación en el baño de agua a la temperatura de ensayo durante otros 30 minutos. Seguidamente se quita el exceso de material del molde con una espátula recta caliente, hasta dejar la probeta perfectamente enrasada, como la que se muestra en la figura 13. B.

El conjunto de la placa, molde y probeta se introduce de nuevo en el baño de agua, manteniéndolo a la temperatura de ensayo con una variación máxima de 0.1° C, (0.2° F), durante un tiempo comprendido entre 85 y 95 minutos. A continuación, se retira la placa del molde, se quitan las piezas laterales y se da comienzo al ensayo en un equipo denominado ductilómetro.

Normalmente, el ensayo se realiza con una velocidad de tracción de 50 ± 2.5 mm por minuto y la temperatura de $25 \pm 0.5^\circ$ C ($77 \pm 1.0^\circ$ F); hasta que se produzca la rotura, midiéndose la distancia en cm que se haya separado ambas pinzas hasta este instante. Este proceso se muestra en la figura 13. A. (Ver anexos).

Figura 13. Ensayo de ductilidad: **A.** Ductilómetro. **B.** Briqueta



2.1.2.2.5 Recuperación elástica por torsión (Norma I.N.V. E – 727)

Se calienta una cantidad de 100 g. de la muestra de asfalto con cuidado y con agitación continua hasta conseguir una consistencia de la misma que permita su vertido.

Se ajusta el cilindro del aparato de torsión de forma que su base inferior quede a una distancia de 20 mm del fondo del recipiente para ensayo situado en posición centrada, ajustado en el resalte que para tal fin se dispone en el fondo del baño.

Se vierte la muestra al recipiente de ensayo en cantidad suficiente para enrasarla con la marca grabada de que dispone el cilindro a 10 mm de su base inferior, el aparato empleado para este ensayo se muestra en la figura 14.

Se deja enfriar el conjunto recipiente – muestra a temperatura ambiente, durante 1 hora como mínimo. A continuación, se hace circular agua por el baño termostático a temperatura de $25 \pm 0,1$ °C, durante al menos 90 minutos, para equilibrar la temperatura del agua del baño y de la muestra. El nivel del agua en el baño estará suficientemente por encima del recipiente con la muestra.

Transcurridos los 90 minutos antes referidos, se introduce el pasador en el alojamiento que al efecto tiene el cilindro y con su ayuda se hace girar éste 180° en sentido de las agujas del reloj desde 180 a 0° , en un tiempo comprendido entre 3 y 5 segundos. Inmediatamente se retira de su alojamiento el pasador y después de 30 minutos ± 15 segundos, se procede a la lectura indicada por la varilla sobre la semicorona graduada. La lectura al final del ensayo es el valor del ángulo recuperado. (Ver anexos).

Figura 14. Ensayo de torsión



2.1.2.2.6 Peso específico y peso unitario de productos asfálticos sólidos y semisólidos (Norma ASTM D – 70)

Inicialmente se calibra el picnómetro de la siguiente manera:

Se lava perfectamente el picnómetro y su tapón, luego se enjuaga con agua destilada, después con acetona y finalmente se seca. Después de secado, se deja que el picnómetro alcance la temperatura ambiente y se pesa con aproximación de 1 mg. El peso del picnómetro vacío, se designa por **A**.

Se llena el picnómetro con agua destilada o desionizada, colocando suavemente el tapón, sin apretarlo. Se sumerge completamente el picnómetro en el baño de agua a temperatura de 25° C y se aprieta el tapón, no debiendo quedar burbujas de aire ocluidas en el picnómetro en esta operación. Se deja el picnómetro en el interior del baño por un mínimo de 30 minutos, se saca del agua e inmediatamente se seca la superficie superior del tapón pasando suavemente y una sola vez un paño seco por la misma; a continuación, se seca rápidamente el resto del picnómetro y se pesa. El peso del picnómetro lleno de agua, se designa por **B**.

Se calienta con cuidado la muestra de asfalto, agitándola para evitar sobrecalentamientos locales hasta que llegue a ser suficientemente fluida para que pueda ser vertida. En ningún caso se debe elevar la temperatura

a más de 111°C (200°F) por encima del punto de ablandamiento esperado, para el asfalto. No debe calentarse por más de 30 minutos.

Se vierte una cantidad de muestra suficiente dentro del picnómetro limpio y seco previamente calentado, llenándolo hasta tres cuartos de su capacidad, como se muestra en la figura 15. Se deja enfriar el picnómetro con su contenido hasta temperatura ambiente durante un período no menor de 40 minutos y se pesa con el tapón. El peso del picnómetro con la muestra, se designa como **C**.

Se llena el picnómetro que contiene el asfalto con agua destilada o desionizada a la misma temperatura del baño, colocar el tapón en el picnómetro. No deben permitirse burbujas de aire. Se coloca el picnómetro en el baño y se aprieta el tapón.

Mantener el picnómetro dentro del baño de agua durante un período no menor de 30 minutos. Se saca el picnómetro del baño. Se seca y se pesa, empleando el mismo procedimiento y tiempo empleados anteriormente. Este peso del picnómetro con la muestra y con agua, se designa como **D**. (ver anexos).

El peso específico se calcula con aproximación a 0.001 así:

$$\text{Peso Específico} = (C - A) / [(B - A) - (D - C)]$$

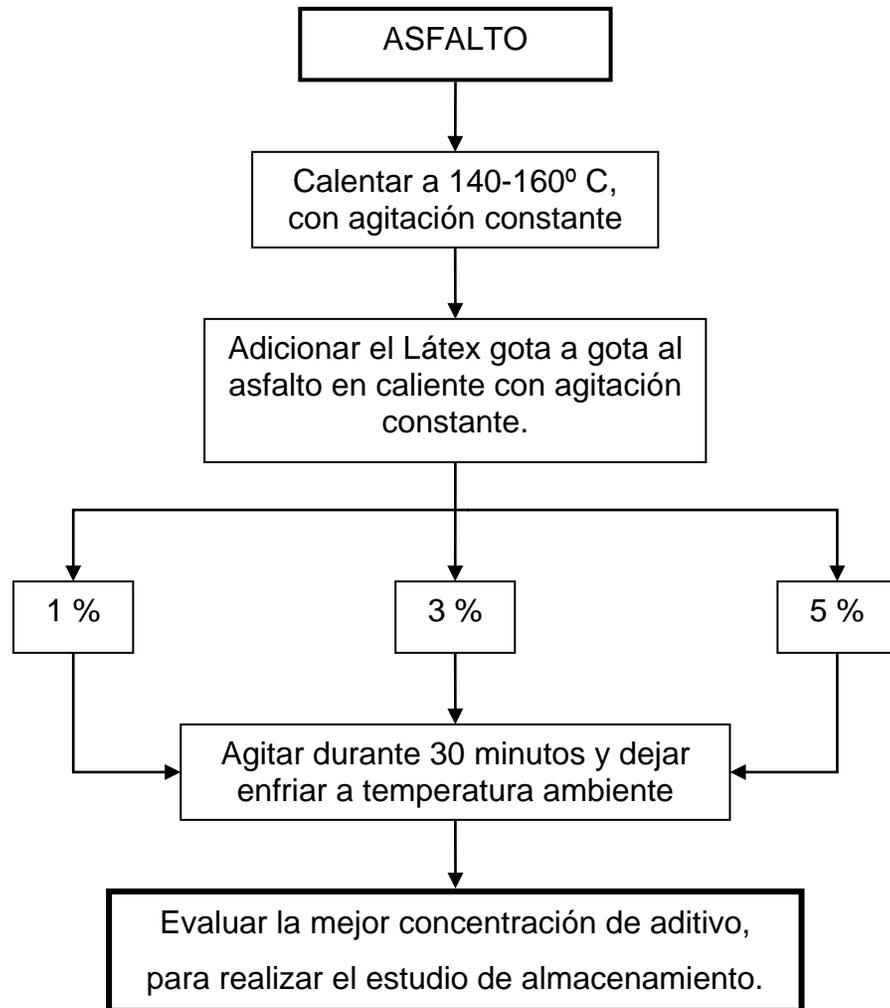
Figura 15. Picnómetro para ensayo de peso específico



2.1.3 ETAPA III: ADICION DEL LÁTEX AL ASFALTO.

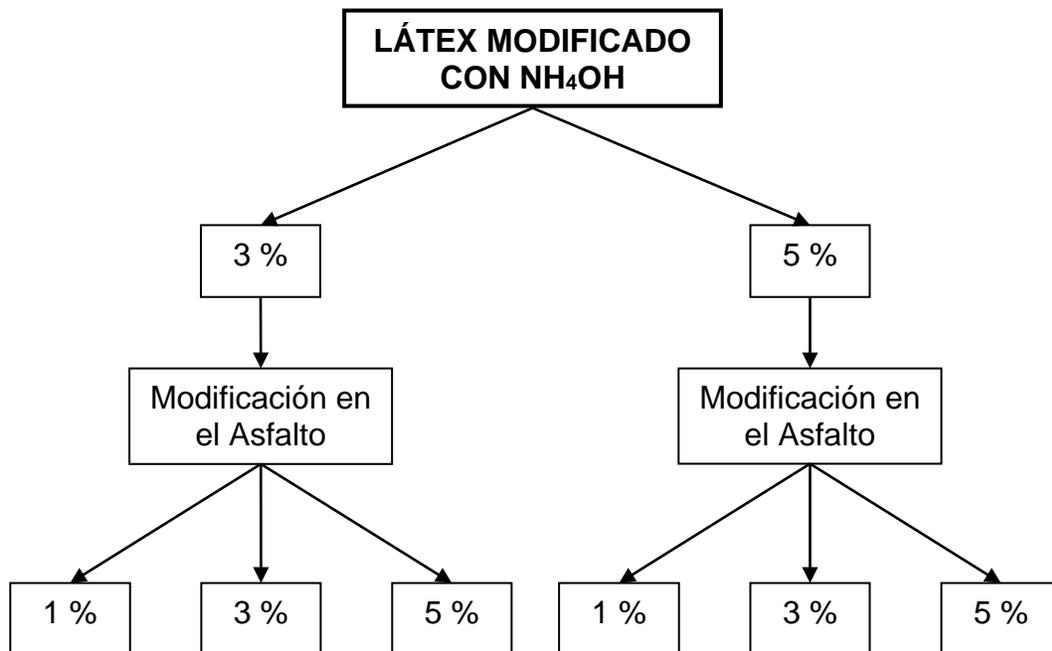
El procedimiento sugerido en la modificación de asfalto con el látex se observa en la figura 16, que se muestra a continuación.

Figura 16. Aditivación del asfalto con látex



El látex se modificó, empleando el hidróxido de amonio (NH_4OH), como solvente, con el fin de buscar mejorar el aditivo del asfalto. Para esto se empleó el mismo procedimiento de la figura 16. Las modificaciones del látex con hidróxido de amonio (NH_4OH), y este a su vez en el asfalto, se muestra en la figura 17.

Figura 17. Modificación del látex con hidróxido de amonio (NH_4OH) y estos en el asfalto



Con la adición del látex y del látex modificado, anteriormente mencionados, se determinará la cantidad (concentración adicionada) que permanezca estable en el sistema asfalto-aditivo (no precipite), teniendo en cuenta la temperatura de mezclado, permaneciendo la morfología y propiedades físicas y químicas de un buen asfalto adecuado para vías, mejorando características de adhesividad, cohesividad y elasticidad.

Con la mejor concentración se realizará el análisis de las propiedades químicas, tales como, la técnica de SARA (saturados, aromáticos, resinas y asfaltenos) que consiste en la separación del asfalto en dos fracciones principales, mediante la adición de n-Pentano: una insoluble que corresponde a los asfaltenos y la otra soluble a los maltenos, esta última fracción se eluye a través de dos columnas cromatográficas de características especiales con el fin de separar mediante solventes de polaridad creciente las diferentes fracciones que componen a la fase malténica, como se muestra en el procedimiento de la etapa II, en la figura 9.

También se le realizará el estudio de Espectroscopía de Infrarrojo, Ultravioleta-Visible y espectroscopia de Fluorescencia, además del análisis de propiedades físicas como viscosidad, ductilidad, penetración, punto de ablandamiento, densidad relativa y recuperación elástica, como se indica en la etapa II: propiedades físicas del asfalto.

A la mezcla óptima se le evaluó el comportamiento de la compatibilidad del sistema asfalto-látex, realizando un estudio de almacenamiento prolongado a una temperatura constante de 165° C, sin agitación, durante 5 días como lo indica la Norma I.N.V. E – 726 (estabilidad al almacenamiento de asfaltos) y a los 40 días a temperatura ambiente, con el fin de establecer puntos de comparación en cuanto a sus propiedades físicas y químicas.

2.1.3.1 Estabilidad al almacenamiento de asfaltos (Norma I.N.V. E – 726)

Se calienta una cantidad suficiente de muestra de asfalto con agitación constante hasta 165 °C.

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 insertados en la superficie lateral del mismo (para garantizar la hermeticidad y que facilite la toma de parte de muestra superior e inferior después del período de calentamiento en estufa). Se tapa el recipiente bien ajustado, se lleva el montaje a la estufa regulada a 165 ± 2 °C durante 120 horas (5 días).

Después de transcurrido el tiempo de calentamiento, se saca el recipiente con su contenido de la estufa, evitando movimientos 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.

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 rotulada. Inmediatamente después se abre el dispositivo de cierre inferior y se dejan fluir otros 60 ± 1 cm³ del contenido, que se recogen en otra cápsula de porcelana previamente rotulada (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).

Los contenidos, por separado, de cada cápsula se trasvasan a su vez a los moldes de ensayo para la posterior determinación de las propiedades físicas de los asfaltos, respetando estrictamente lo indicado en las normas de ensayo correspondientes. (Ver anexos).

2.2 MATERIALES E INSTRUMENTAL

2.2.1 REACTIVOS

- Agua
- Acido clorhídrico
- Acido sulfúrico
- Hidróxido de sodio
- Hidróxido de potasio
- Éter etílico
- Alcohol Etílico
- Formol
- Benceno
- Acetona
- Petróleo
- Gasolina
- Hidróxido de amonio
- Acido acético
- N-pentano
- Tolueno
- Xilol
- Reactivo de la prueba, Nitrato Cérico: se prepara disolviendo 4.0 g de nitrato de amonio cérico en 10 mL de acido nítrico 2 N.
- Reactivo de la prueba, Ácido peryódico: se prepara disolviendo 250 mg de acido periódico en 50 mL de agua desionizada.
- Reactivo de la prueba, 2,4 Dinitrofenilhidrazina: se prepara disolviendo 1.0 g. de 2,4 dinitrofenilhidrazina en 5.0 mL de acido sulfúrico concentrado. Se agrega esta solución, lentamente y con agitación a una mezcla de 10 mL de agua y 35 mL de etanol al 95 %. Se filtra la solución.
- Reactivo de prueba, Bromo en cloruro de metileno al 2%.
- Reactivo de la prueba, Complejo de transferencia de carga generado por Yodo: cristal de yodo
- Reactivo de prueba, Permanganato de potasio al 1%.
- Reactivo de la prueba, del espejo de plata (Reactivo de tollens): se conforma de, solución acuosa de nitrato de plata al 5 %, solución acuosa de hidróxido de sodio al 10 % y solución acuosa de amonio concentrado al 10%.
- Reactivo de la prueba, del ión cobre: sulfato de cobre al 10%.
- Reactivo de prueba para ácidos carboxílicos: solución de bicarbonato de sodio.
- Reactivo de prueba, Complejos de adición de bisulfito: se prepara mezclando 1.5 mL de etanol y 6 mL de una solución acuosa de bisulfito de sodio al 40 %. Filtrar.

- Asfalto, proporcionado por el Complejo Industrial de Barrancabermeja (CIB), al grupo de investigación, Geotecnia Vial y Pavimentos, de la Facultad de Ingeniería Civil, de la Universidad del Cauca.
- Látex, proporcionado por ASOHETOL (Asociación de Hevicultores del Tolima), al grupo de investigación, Geotecnia Vial y Pavimentos, de la Facultad de Ingeniería Civil, de la Universidad del Cauca.

2.2.2 EQUIPOS

- Espectrofotómetro GEMINI FTIR MATTSON (ATI). Resolución (4000-400cm⁻¹). Laboratorio de Organometálica. Universidad del Cauca.
- Spectronic Genesis 5 UV-Vis (200-1100nm). Laboratorio de Biología Celular y Molecular. Universidad del Cauca.
- Refractómetro ABBE MARK II. Reichert-Jung. Laboratorio de Organometálica. Universidad del Cauca.
- Controlador de temperatura Barnant Company, modelo 689-0000. laboratorio del Departamento de Química. Universidad del Cauca.
- Microscopio de Fluorescencia Nikon. Unidad de Microscopía Electrónica. Universidad del Cauca.
- Plancha de calentamiento Corning, modelo PC-320. Laboratorio de Organometálica. Universidad del Cauca.
- Estufa Haceb, modelo EM-2. Laboratorio de Organometálica. Universidad del Cauca.
- Balanza Metter PJ-360, Delta Range. Laboratorio de Organometálica. Universidad del Cauca.
- Viscosímetro Brookfield, modelo 1 DV-III. Laboratorio de suelos y materiales. Universidad del Cauca.
- Penetrómetro Humbolt MFG. CO, modelo IL 60656. Laboratorio de suelos y materiales. Universidad del Cauca.
- Ductilómetro Soiltest, modelo AP-101. Laboratorio de suelos y materiales. Universidad del Cauca.
- Baño maría Soiltest, modelo AP-152. Laboratorio de suelos y materiales. Universidad del Cauca.
- Termómetro Hanna, modelo HI98501. Laboratorio de suelos y materiales. Universidad del Cauca.
- Horno BLUEM, modelo OV-490A-3. Rango de temperatura 78-260° C. Laboratorio de suelos y materiales. Universidad del Cauca.

2.3 PARTE EXPERIMENTAL

2.3.1 MODIFICACIÓN DEL LÁTEX CON HIDRÓXIDO DE AMONIO

Se utilizó Hidróxido de amonio como solvente para el látex a diferentes concentraciones.

- NH_4OH 3% en el látex

Se tomaron 48.5 mL de látex y se le adicionaron 1.5 mL de Hidróxido de amonio para preparar una cantidad de 50 mL de modificador.

- NH_4OH 5% en el látex

Se tomaron 47.5 mL de látex y se le adicionaron 2.5 mL de Hidróxido de amonio para preparar una cantidad de 50 mL de modificador.

2.3.2 MODIFICACIÓN DEL ASFALTO

Se tomaron 500 g. de asfalto original y se le adicionaron 15.24 mL (15 g) de modificador, a la temperatura indicada en la etapa III, sección 2.1.3. El proceso se muestra en la figura 18.

Figura 18. Proceso de modificación del asfalto



El mismo procedimiento se realizó con el látex modificado, que se muestra en la figura 17, que son: látex con NH_4OH al 3% y látex con NH_4OH al 5%. Para modificar el asfalto se le adicionó el modificador a diferentes concentraciones que son: 1, 3 y 5%, como se resume en la siguiente tabla.

Tabla 1. Concentraciones y modificadores empleados en la aditivación del asfalto.

Concentración en el asfalto	Látex natural	Látex con 3% NH ₄ OH	Látex con 5% NH ₄ OH
Asfalto – modificador	1% 3% 5%	1% 3% 5%	1% 3% 5%

A cada una de estas nueve muestras se les realizaron las respectivas pruebas físicas, descritas en la metodología, etapa II: propiedades físicas del asfalto, teniendo en cuenta las respectivas normas establecidas para los asfaltos empleados en vías.

De estas muestras se escogieron dos, para realizar el respectivo proceso de almacenamiento, en donde se realizó su análisis químico y físico, además de tener en cuenta el almacenamiento del asfalto original.

2.3.3 ALMACENAMIENTO DEL ASFALTO

Para llevar a cabo el procedimiento de almacenamiento se tuvo en cuenta la norma I.N.V. E – 726 (Estabilidad al almacenamiento de asfaltos), mencionada en la sección 2.1.3.1, que indica que es en un recipiente herméticamente cerrado y almacenado por 5 días a 165 °C, como el que se muestra en la figura 19. Adicionalmente, se mantuvo las muestra de asfalto (dos modificadas y el original), en el recipiente hasta el día 40 a temperatura ambiente, con el fin de observar sus cambios, tanto químicos como físicos.

Figura 19. Recipiente hermético empleado para el almacenamiento



2.3.4 SEPARACION DEL ASFALTO

Para la separación del asfalto original y modificado se tomó un gramo de muestra de cada uno de ellos, y se le adicionó 25 mL de n-pentano dejando en reposo la mezcla en la oscuridad por un periodo de 4 horas, transcurrido este tiempo se filtró por gravedad la mezcla, con el fin de separar la fracción asfáltica figura A (insoluble) y malténica figura B (soluble) del asfalto. Mostrado en la figura 20.

Figura 20. Separación del asfalto en: **A.** Asfaltenos y **B.** maltenos



A.



B.

2.3.4.1 SEPARACION DE LOS COMPONENTES MALTENICOS

La separación de la fracción malténica para cuantificar sus tres compuestos que son: Parafinas o Saturados, Resinas o Aromáticos Polares y Aceites Aromáticos, se realizó utilizando la técnica de cromatografía líquida de columna como se especifica a continuación:

- Columna 1: Se empacó utilizando aproximadamente 20 g de alúmina previamente tratada.
- Columna 2: Se empacó utilizando aproximadamente 10 g de silica gel

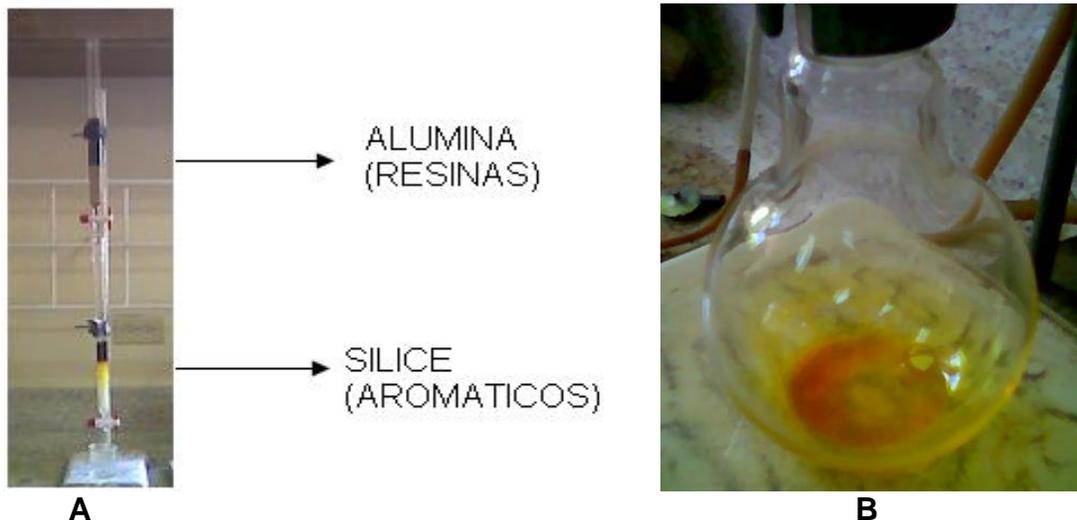
La columna 1 se colocó sobre la columna 2 (figura 21A), utilizando n-pentano como eluyente, con el fin de humedecer dichas columnas.

La fracción malténica obtenida anteriormente se adicionó en la columna 1 que posteriormente pasa a la columna 2, se agregó poco a poco n-pentano a la doble columna para una mejor elusión. El proceso finalizó cuando la solución después de pasar por la doble columna fue incolora, se cerró la llave con al fin de cortar el flujo de la fase móvil, de esta manera se obtuvo el primer fraccionamiento que

corresponde a la fracción parafínica (figura 21 B). Este procedimiento se indica en la figura 9.

Se desconectaron las dos columnas, la columna que tiene alúmina retuvo los compuestos polares o resinas y la columna empacada con silica gel retuvo los compuestos aromáticos. Se procedió a desorber estos compuestos de la columna mediante la adición de una mezcla volumétrica de 50/50 de tolueno/acetona (para la columna 1), obteniéndose así las resinas, la cromatografía para la separación de las resinas finalizó cuando el solvente salió incoloro. Las fracciones recogidas se guardaron en nevera a una temperatura de 5° C, y posteriormente se analizaron por Espectroscopia Infrarroja y UV-Vis, además de practicárseles pruebas físicas y químicas.

Figura 21. Separación de: A. resinas y aromáticos y B. saturados



La separación de los maltenos finalizó con la desorción de los compuestos aromáticos, los cuales fueron removidos de la columna empacada con silica gel mediante la adición de tolueno como efluente. Estos compuestos también se analizaron mediante Espectroscopia Infrarroja y UV-Vis, y se les practicaron pruebas de caracterización para verificar su composición química.

2.3.5 PRUEBAS DE CARACTERIZACION A LA FRACCION MALTENICA OBTENIDA DEL ASFALTO

A los diferentes compuestos de la fracción malténica obtenida de la separación del asfalto, se les realizan pruebas de caracterización con el fin de identificar grupos funcionales que correspondan a resinas, aromáticos y saturados.

2.3.5.1 PRUEBAS PARA IDENTIFICAR RESINAS

Las resinas que se encuentran retenidas por la columna que contiene la alúmina, son extraídas con una mezcla de tolueno/acetona en relación 1:1, como se expuso en la separación de los componentes malténicos. A estos compuestos se les efectuaron las siguientes pruebas de identificación de núcleos, para determinar la presencia de ácidos cresílicos.

- **Prueba de identificación de fenoles mediante la adición de hidróxido de sodio**

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

Los blancos utilizados para la realización de estas pruebas fueron o-cresol y fenol.

- **Prueba para identificación de aromáticos**

Se tomó 1 mL de la muestra a analizar, y se le adicionaron unos pocos cristales de cloruro férrico anhidro y 2.5 mL 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

2.3.5.2 PRUEBAS PARA IDENTIFICAR COMPUESTOS AROMÁTICOS

Los compuestos aromáticos son la tercera y última fracción obtenida de la separación cromatográfica de los asfaltos y su desorción de la columna empaquetada con silica gel se consigue mediante la adición de tolueno. La caracterización e identificación de núcleos se hizo mediante la aplicación de las siguientes pruebas:

- **Reacción de I´Rosen para la identificación de aromáticos**

Se tomó 1 mL de la muestra y se acidifico con ácido sulfúrico, luego se agregaron 0.5 mL de Formaldehído, se agitó. La presencia de aromáticos se detecta por un cambio en la coloración de la solución.

- **Determinación de nitrógeno mediante la adición de bencidina y sulfato de cobre**

Se tomaron 3 mL de la muestra y se acidificaron con ácido acético: luego se añaden 2 gotas de una solución preparada recientemente de bencidina al 1% en

ácido acético al 50% y se agitó. Posteriormente se adicionó 1 gota de una solución de sulfato de cobre al 1%, la formación de un precipitado de color azul, indica la presencia de nitrógeno en la muestra.

- **Reacción de Hoffmann**

Se tomaron 2 mL de la muestra y se calentaron suavemente, luego se adicionaron 2 mL de yoduro de metilo y se añadió poco a poco hidróxido de potasio diluido, hasta formar una pasta espesa. La coloración roja de la masa y el desprendimiento de un olor picante indican que en la muestra se encuentran presentes anillos piridínicos.

2.3.5.3 PRUEBAS PARA IDENTIFICAR COMPUESTOS SATURADOS

A la primera fracción obtenida de la Cromatografía de Columna correspondiente a las parafinas, se les practicaron las siguientes pruebas con el fin de caracterizarlas y verificar la presencia de dichos compuestos.

- **Prueba de Baeyer**

A 2 mL de agua, etanol o acetona, se le añaden 5 mL de la fracción. 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 2 mL de ácido sulfúrico concentrado, con el fin de probar su reactividad, debido a que los alcanos son inertes frente a la mayoría de 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 blancos, parafina analítica y parafina comercial.

3. ANALISIS DE RESULTADOS

3.1 ANALISIS PRELIMINAR DEL LATEX NATURAL

3.1.1 ESTUDIO FISICO Y QUIMICO DEL LATEX NATURAL

El caucho natural es obtenido a partir del látex producido por un gran número de plantas, sin embargo, a nivel comercial se explota del árbol de caucho (*Hevea Brasiliensis*), especie originaria de la región amazónica. El caucho es obtenido por un tratamiento sistemático de “sangrado”, que consiste en hacer un corte en forma de “V” a través de la corteza del árbol. El jugo lechoso que fluye lentamente del corte del árbol, es recogido en una vasija que cuelga del tronco, como se muestra en la figura 5. Las propiedades físicas del látex natural se encuentran reportadas en la tabla 2.

Tabla 2. Resultados de las pruebas físicas del látex.

PRUEBA FISICA	RESULTADO
Estado	Líquido
Color	Blanco
Olor	Penetrante
Densidad	0.9842 g/mL
pH	9.60
Indice de refracción	1.3770
Punto de descomposición	71 – 75 ° C

Figura 22. Látex natural



En el intervalo de pH de 5.05 – 4.77 esta el punto isoeléctrico en el que se efectúa la coagulación del caucho. A dicho intervalo se le denomina primera zona de sólido. Cuando fluye del árbol, el látex es casi neutro, pero la acción de enzimas y bacterias lo vuelve ácido por lo que el látex tiende a coagularse. Para evitar la coagulación y conservar el látex en su estado más estable, se le adicionan bactericidas y conservadores lo antes posible después de que ha sido obtenido del árbol. El preservativo empleado en este caso es el hidróxido de amonio, por esta razón el pH determinado es de 9.60. En la figura 22 se observa el látex en su estado natural.

Las propiedades físicas del látex varían con la temperatura. A bajas temperaturas se vuelve rígido, a un rango de temperatura de 71 – 75° C empieza a convertirse en caucho, con una textura blanda y pegajosa. Por encima de los 100° C es un caucho blando, flexible y traslucido.

El caucho bruto calentado hasta 200° C se ablanda y sus soluciones tienen menor viscosidad, pero el número de dobles enlaces que contiene el hidrocarburo del caucho se conserva sin alteración. Cuando la temperatura se eleva hasta 250° C,

los enlaces dobles se separan y tiene lugar la formación de anillos. El cambio a caucho cíclico eleva la densidad y la solubilidad, el producto obtenido es una dura y frágil resina.

Debido al comportamiento frente a la temperatura no se habla de punto de ebullición sino de punto de descomposición.

Las pruebas de solubilidad realizadas al látex natural se reportan en la tabla 3.

Tabla 3. Prueba de solubilidad del látex.

REACTIVO	OBSERVACIONES
▪ Agua	Soluble
▪ Acido clorhídrico	Formación de caucho
▪ Acido sulfúrico	Formación de caucho
▪ Hidróxido de sodio	Soluble
▪ Hidróxido de potasio	Parcialmente soluble
▪ Éter etílico	Insoluble
▪ Alcohol Etílico	Soluble
▪ Formol	Formación de caucho
▪ Benceno	Formación de caucho
▪ Acetona	Formación de caucho
▪ Petróleo	Insoluble
▪ Gasolina	Insoluble
▪ Hidróxido de amonio	Soluble
▪ Acido acético	Formación de caucho

La solubilidad del caucho en ácidos, bases y solventes orgánicos no es muy elevada. El caucho puro es insoluble en agua, álcalis o ácidos débiles, y soluble en benceno, petróleo, hidrocarburos clorados y disulfuro de carbono. Sin embargo, debido a que el látex se encuentra mezclado con un preservativo como es el hidróxido de amonio, su solubilidad esta dada por dicho solvente.

El contenido químico del látex se reporta en la tabla 4

Tabla 4. Resultados del contenido químico del látex.

PRUEBA QUÍMICA	DATO EXPERIMENTAL	DATO TEORICO
Humedad	68.11 %	70 – 75 %
Cenizas	0.52 %	0.30 – 0.7 %
Proteínas	1.8%	1.0 – 2.0 %
Sólidos totales	57.13 %	45 %

En la tabla 4 se comparan los datos experimentales y teóricos, y se encuentra que los valores experimentales están en el rango de los teóricos. El valor de sólidos

totales comparado con el teórico, esta por encima, debido a que estos sólidos dependen del tipo de árbol, edad del mismo, cantidad de sangrado, e impurezas que aun puede contener (lodos).

El contenido de sólidos del látex fresco de árboles de media edad, oscila entre 32 y 38 %; en los árboles jóvenes desciende hasta el 20%, en árboles viejos y en los que no han sido sangrados mucho tiempo, la cifra se eleva hasta el 45 %. Aunque, aproximadamente 90 % de los sólidos son de hidrocarburos del caucho, se hallan también enzimas, proteínas, azúcares, taninos, alcaloides, sales minerales y algunos componentes de la corteza. Algunas de estas sustancias distintas de los hidrocarburos del caucho son las que motivan a la estabilización de las partículas coloidales del mismo en el agua. Otras afectan el color y otras cooperan a los caracteres físicos del caucho contenido en el látex.

3.1.2 CARACTERIZACION DEL LÁTEX

En el estudio de un compuesto orgánico como este caso, la aplicación de las pruebas de caracterización es de vital importancia para encontrar los tipos de componentes del látex que están presentes en la molécula.

Se realizó una búsqueda de información específica concerniente a los tipos de componentes del látex natural. Para ello se seleccionaron algunas pruebas de caracterización, las cuales aparecen en la tabla 5.

Tabla 5. Resultados de las pruebas químicas de caracterización de grupos funcionales del látex.

PRUEBA	GRUPO FUNCIONAL	DATO OBTENIDO
Nitrato Cérico	Alcohol	Formación de caucho
Ácido peryódico	Dioles vecinos	Formación de caucho
2,4 Dinitrofenilhidrazina	Aldehídos y Cetonas	Formación de caucho
Bromo en cloruro de metileno	Alquenos y Alquinos	Formación de caucho
Complejo de transferencia de carga generado por lodo	Insaturaciones	(+)
Permanganato	Insaturaciones	(+)
Prueba del espejo de plata (Reactivo de tollens)	Aldehídos	(+)
Prueba del ión cobre	Aminas	(+)
Ácidos carboxílicos	Ácidos	(+)
Complejos de adición de bisulfito	Cetonas	(-)

En las cuatro primeras pruebas mencionadas en la tabla, se dio la formación de un caucho con el látex. Esta reacción se presento debido a que los reactivos

empleados en estas pruebas están preparados en medio ácido, por lo tanto, el látex en este tipo de solventes tiende a coagularse. Este comportamiento en el látex parece ser debido a la agregación de partículas de goma, por una proteína llamada heveína, que está conformada por el polímero de *cis*-1,4-poliisopreno, que es el constituyente del caucho.

En la prueba de complejo de transferencia de carga generado por Iodo para la determinación de insaturaciones, se observó al final de la prueba una coloración café, lo cual indica un resultado positivo. Este color se debe a la producción del complejo de transferencia de carga que se forma entre el Iodo y los electrones disponibles de las especies presentes en el látex, que contienen electrones π o pares de electrones no enlazados. La presencia de insaturaciones en el látex, se corrobora con la prueba del permanganato que da como resultado una decoloración de la solución y la formación de un precipitado que corresponde a óxidos de manganeso, de color café. Mediante la decoloración de la solución de permanganato, se pudo detectar las insaturaciones presentes en el látex, esta prueba involucra una reacción de hidroxilación *cis* del alqueno presente, para producir un 1,2 diol (glicol).

Otra de las pruebas realizadas al látex fue la del espejo de plata (Reactivo de Tollens) que se utilizó para la determinación de grupos aldehídos. El desarrollo de esta prueba arrojó un resultado positivo evidenciándose en la formación de un precipitado negro de plata. La reacción implica la oxidación de los aldehídos a sus correspondientes ácidos carboxílicos, utilizando una solución alcohólica de hidróxido amónico de plata.

La prueba del ión cobre se utilizó para la determinación de aminas, su resultado positivo se evidenció por la formación de una coloración azul-verdosa en el momento de ser adicionado el látex a la solución de sulfato de cobre.

Para la determinación de grupos ácidos en el látex se utilizó la prueba de ácidos carboxílicos, el desprendimiento de burbujas de gas (CO_2) constituyó un resultado positivo.

Con la prueba de complejos de adición de bisulfito para la caracterización de cetonas, se dio la formación de una pasta de caucho en el momento de mezclar el látex con el reactivo de prueba. Esta reacción es debida, a que el reactivo es una base ácida y como se comprobó en las respectivas pruebas de solubilidad, el látex se coagula al entrar en contacto con este tipo de solventes ácidos.

3.1.2.1 CARACTERÍSTICAS DEL POLÍMERO DEL LÁTEX NATURAL

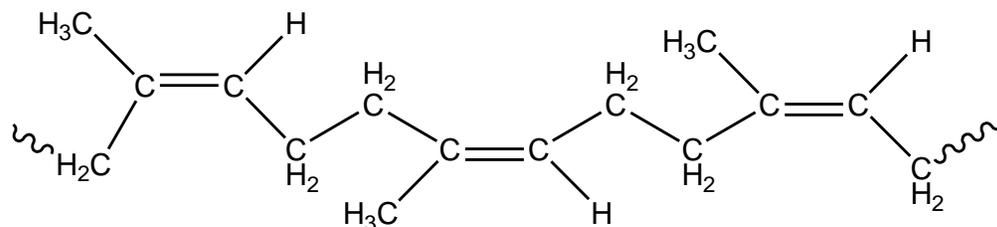
El látex está compuesto principalmente por el hidrocarburo *cis*-1,4-poliisopreno, que es un polímero de tipo elastomérico. Un elastómero posee el alto grado de

elasticidad que es característico del caucho; puede ser deformado considerablemente, (estirado hasta ocho veces su longitud original) y luego, volver a su forma original. Como en el caso de las fibras, sus moléculas son alargadas y se alinean cuando se estira el material. Cuando se elimina la fuerza de estiramiento, las moléculas de un elastómero no permanecen extendidas y alineadas; vuelven a sus conformaciones desordenadas originales, favorecidas por la entropía. No permanecen alineadas, porque las fuerzas moleculares necesarias para sujetarlas en este ordenamiento son mas débiles que en las fibras. En general, los elastómeros no tienen grupos muy polares o lugares aptos para puentes de hidrogeno: las cadenas extendidas no se ajustan bien entre si, por lo que pueden operar eficientemente las fuerzas de Van der Waals. En un elastómero, la entropía derrota la entalpía.

Un requisito adicional que debe cumplir un elastómero: las cadenas largas de un elastómero se conectan entre si por enlaces cruzados ocasionales: deben ser suficientes para evitar el deslizamiento de moléculas, pero no privar a las cadenas de la flexibilidad necesaria para extenderse con facilidad y volver nuevamente al desorden.

El caucho natural ilustra estos requisitos estructurales de un elastómero: cadenas largas y flexibles; fuerzas intermoleculares débiles y enlaces cruzados ocasionales. El caucho es cis-1,4-poliisopreno, como se ilustra en la figura 23. Al no tener sustituyentes fuertemente polares, la atracción intermolecular queda limitada a las fuerzas de Van der Waals, débiles por la configuración cis en todos los dobles enlaces.

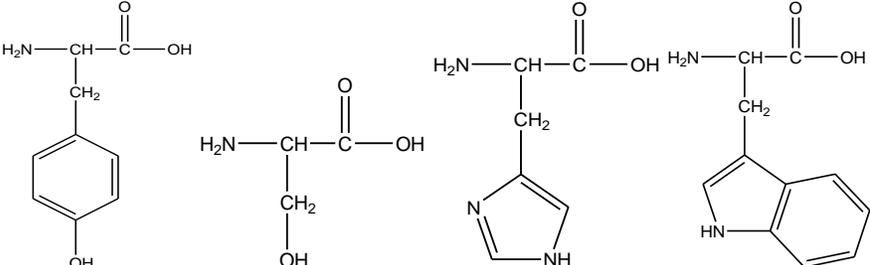
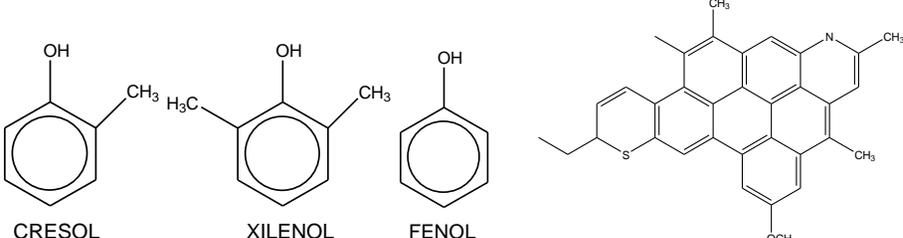
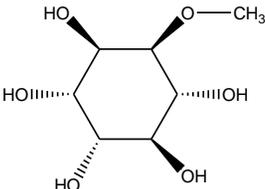
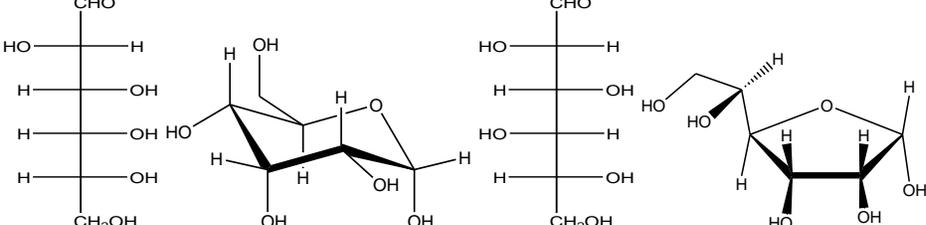
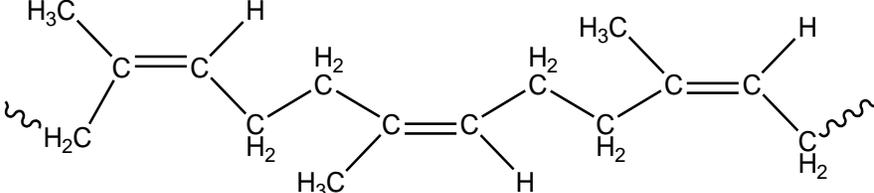
Figura 23. Estructura del hidrocarburo del caucho natural (cis-1,4-poliisopreno)



3.1.3 ESTUDIO DEL ESPECTRO INFRARROJO DEL LÁTEX NATURAL

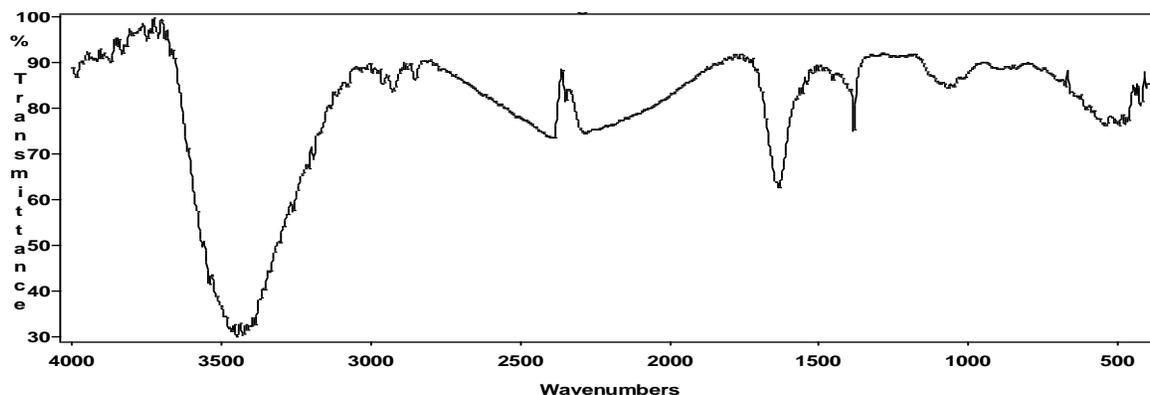
Como se mencionó anteriormente el látex contiene gran variedad de sustancias químicas entre ellas: cenizas, proteínas, resinas, quebrachitol, enzimas, azúcares, taninos, alcaloides, sales minerales, algunos componentes de la corteza y principalmente el hidrocarburo del caucho (cis-1,4-poliisopreno). En la tabla 6 se encuentran las principales estructuras y sus grupos funcionales.

Tabla 6. Compuestos contenidos en el látex.

Nombre de sustancias	Grupos funcionales y algunos ejemplos de las sustancias contenidas en el látex.
Proteínas	 <p>Diagram showing the general structure of an amino acid (H₂N-CH(R)-COOH) and four specific examples: Tyrosine (R = -CH₂-C₆H₄-OH), Serine (R = -CH₂-OH), Histidine (R = -CH₂-Imidazole), and Tryptophan (R = -CH₂-Indole).</p>
Resinas	 <p>Diagram showing four types of resins: Cresol (methylphenol), Xilenol (dimethylphenol), Fenol (phenol), and a complex polycyclic aromatic hydrocarbon (likely a xanthone derivative).</p>
Quebrachitol	 <p>Diagram showing the chemical structure of Quebrachitol, a polyhydroxylated cyclohexane derivative. Fórmula molecular: C₇H₁₄O₆</p>
Azúcares	 <p>Diagram showing the chemical structures of D-glucose (in Fischer projection and Haworth projection) and D-fructose (in Fischer projection and Haworth projection).</p>
Taninos	 <p>Diagram showing three types of tannins: ácido gálico (gallic acid), ácido elágico (ellagic acid), and Flavan-3,4-diol (tanino condensado).</p>
Hidrocarburo del caucho	 <p>Diagram showing the chemical structure of a rubber hydrocarbon, a polyisoprene chain with methyl groups and double bonds.</p>

Con el fin de ubicar los grupos funcionales contenidos en el látex natural, se utilizó la técnica de Espectroscopía Infrarroja por Transformada Rápida de Fourier. El espectro infrarrojo se observa en la figura 24.

Figura 24. Espectro infrarrojo del látex natural



El espectro infrarrojo permite ubicar los grupos funcionales de las moléculas. Un grupo de átomos determinados da origen a bandas de absorción características, es decir, un grupo específico absorbe luz de frecuencias determinadas. En la tabla 7 se encuentran las bandas características del látex natural, donde se pueden destacar sus grupos funcionales.

Tabla 7. Bandas características del infrarrojo del látex natural.

Banda obtenida (cm ⁻¹)	Banda teórica (cm ⁻¹)	Origen de la banda
3427	3200-3550	Vibración de tensión O-H (banda ancha)
3000 – 3100	3000-3100	Frecuencia de tensión CH olefínica (RR' C=CH-R)
3427	3000-3750	Tensión O-H, N-H
3000	3000	Frecuencia de tensión O-H de ácidos.
2926		
2850	2800-3000	Frecuencias de tensión C-H
1634	1560-1640	Vibración de deformación del N-H
650- 750	650-769	Vibración de deformación del O-H
1383	Alrededor de 1380	Hidrocarburo lineal
1480	1460	Vibración de flexión C-H intermedio (CH ₂)
1383	1385	Oscilaciones C-H terminales (CH ₃)
1070	1000 – 1100	Frecuencia de tensión C-O de alcoholes
600	695	Oscilaciones C-H intermedios (CH ₂)

En el espectro infrarrojo del látex natural, presentado en la figura 24, se encuentran múltiples bandas debido a la variedad de sustancias en su composición. La banda ancha entre 3200cm⁻¹ y 3550 cm⁻¹ es originada por las vibraciones de tensión de O-H, la banda entre 3000 cm⁻¹ y 3750 cm⁻¹ es de

tensión de grupos O-H y N-H aunque está última es una banda mediana y probablemente se encuentra solapada. Estas bandas probablemente provienen de la gran mayoría de las sustancias que lo componen, como lo son, proteínas, resinas, quebrachitol, azúcares, taninos.

La banda presente entre 3000 cm^{-1} y 3100 cm^{-1} es ocasionada por una vibración de tensión C–H olefínico, (con hibridación sp^2 $RR'C=CH-R$), que se encuentra en la estructura del hidrocarburo del caucho, entre otras de las sustancias. La banda a 3000 cm^{-1} es una vibración de tensión O–H, que proviene de grupos ácidos y se encuentra solapada con la banda anterior. A 2926 cm^{-1} y 2850 cm^{-1} se tiene un vibración de tensión C-H (con hibridación sp^3 $RR'C=CH_2$), presente en la mayoría de los compuestos contenidos en el látex. La banda ubicada aproximadamente a 1634 cm^{-1} es una vibración de deformación del N-H, presente en algunas de las proteínas presentes en el látex.

Las bandas ubicadas entre $650\text{-}750\text{ cm}^{-1}$ son características de vibraciones de deformación de moléculas que contienen grupos O-H.

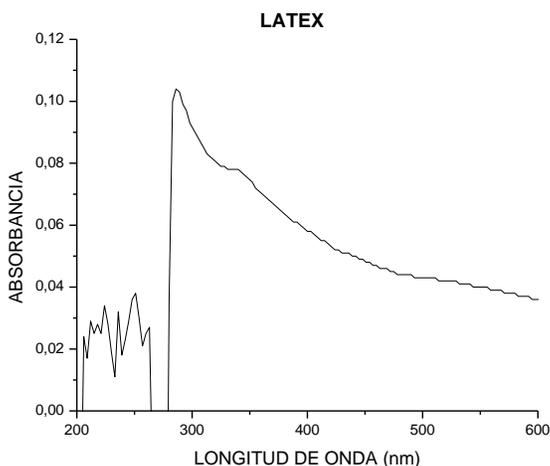
Aproximadamente a 1480 cm^{-1} se observa una vibración de flexión de C–H intermedio (CH_2), que presenta el hidrocarburo. A 1383 cm^{-1} y 600 cm^{-1} se tienen oscilaciones C–H características de grupos terminales (CH_3) e intermedios (CH_2), respectivamente, que se encuentran en el hidrocarburo del caucho entre otras sustancias contenidas en el látex. Entre 1000 cm^{-1} y 1100 cm^{-1} se tienen vibraciones de tensión C–O, características de los alcoholes.

El espectro infrarrojo del látex natural, aporta gran información acerca de los grupos funcionales que componen la macromolécula del látex. Con dichas bandas se puede confirmar la presencia de estos grupos representativos, ilustrados en la tabla 7. Sin embargo, debido a las numerosas bandas de absorción, muchas no pueden ser asignadas con exactitud.

3.1.4 ESTUDIO DEL ESPECTRO UV-Vis DEL LATEX NATURAL

La absorción molecular en la región ultravioleta y visible del espectro depende de la estructura electrónica de la molécula. La absorción de energía se cuantifica y da por resultado la elevación de los electrones desde orbitales en el estado básico a orbitales de mayor energía en un estado excitado. Para muchas estructuras electrónicas, la absorción no ocurre en una porción fácilmente accesible de la región ultravioleta. Las principales características de una banda de absorción son su posición e intensidad. La posición de la absorción corresponde a la longitud de onda (λ) de la radiación cuya energía requerida es igual a la empleada para la transición electrónica. El espectro ultravioleta del látex natural se observa a continuación en la figura 25.

Figura 25. Espectro UV-Vis del látex natural.



En el espectro UV-Vis de la figura 25 para el látex natural, se presentan dos bandas características: 215 – 250 y 286 nm.

Las bandas entre 215 nm y 250 nm, indican la presencia de cromóforos de etileno, cuyas absorciones teóricas son entre 215–230 nm, esto indica un efecto batocrómico, debido a la conjugación adicional de los polienos de cadena abierta del látex. El efecto batocrómico es progresivo conforme aumenta el número de grupos alquilo, dichas bandas se atribuyen a transiciones tipo $\pi \rightarrow \pi^*$ (banda K).

La banda a 286 nm indica la presencia de un cromóforo de benceno, que muestra una banda de absorción amplia, en la región del ultravioleta cercano entre 250 y 290 nm, debidas a la banda B (bencenoide), generadas por transiciones $\pi \rightarrow \pi^*$. Los cromóforos de benceno son ocasionados por la presencia de proteínas, resinas y taninos contenidos en el látex. En la tabla 8 se indican las transiciones para cada banda.

Tabla 8. Transiciones representativas para las bandas en el UV-Vis.

Banda	Transición	λ máxima (nm)
E	$\pi \rightarrow \pi^*$	180-220
K	$\pi \rightarrow \pi^*$	220-250
B	$\pi \rightarrow \pi^*$	250-290
R	$n \rightarrow \pi^*$	275-330

3.2 MODIFICACION DEL LATEX CON HIDROXIDO DE AMONIO (NH₄OH)

En el aparte 2.3.1, aparece la modificación del látex con hidróxido de amonio (NH₄OH), esto debido, a que el látex con aumento de temperatura precipita

formando moléculas de caucho, por ello se procedió a disminuir su susceptibilidad térmica, mediante la adición de hidróxido de amonio (NH_4OH) al 3% y 5%, que fueron los mejores resultados de solubilidades de este material.

Se decidió emplear el hidróxido de amonio debido a su alta solubilidad y su alcalinidad, lo que hace que el látex se conserve en su estado líquido, además de ser un reactivo de bajo costo y un solvente empleado por excelencia en la industria del látex por su acción bactericida

Las diluciones se llevaron a cabo, buscando retardar, o aun mejor, evitar la formación del caucho, además de mejorar la estabilidad del látex frente a altas temperaturas como las de mezclado en el asfalto, con el fin de obtener una buena dispersión de este material.

3.2.1 ANALISIS DEL LATEX MODIFICADO CON HIDROXIDO DE AMONIO (NH_4OH)

Teniendo en cuenta dos de las propiedades físicas del látex natural como son, su facilidad de coagulación frente a algunos solventes de tipo orgánico e inorgánico y el bajo punto de descomposición, se realizaron dos diluciones con hidróxido de amonio (NH_4OH) que son: al 3% y 5%, a los cuales se les realizaron algunas pruebas físicas, que se encuentran en la tabla 9.

Tabla 9. Resultados de las pruebas físicas del látex modificado con hidróxido de amonio.

PRUEBA FISICA	RESULTADO OBTENIDO		
	Látex natural	Látex- NH_4OH 3 %	Látex- NH_4OH 5 %
Estado	Líquido	Líquido	Líquido
Color	Blanco	Blanco	Blanco
Olor	Penetrante	Penetrante	Penetrante
Densidad	0.9842 g/mL	0.99354 g/mL	1.00186 g/mL
pH	9.60	10.2	10.8
Indice de refracción	1.3770	1.3780	1.3760

Comparando los resultados de las pruebas físicas del látex modificado al 3% y 5% respectivamente, con las del látex en su estado natural, no se observan modificaciones en cuanto a su estado, color y olor, con lo cual podemos descartar alguna incompatibilidad en el momento de ser mezclados. Sin embargo, no sucede lo mismo con la densidad ya que ésta aumenta a medida que se incrementa el contenido de hidróxido de amonio en el látex. Lo cual es razonable ya que se está aumentando su peso molecular.

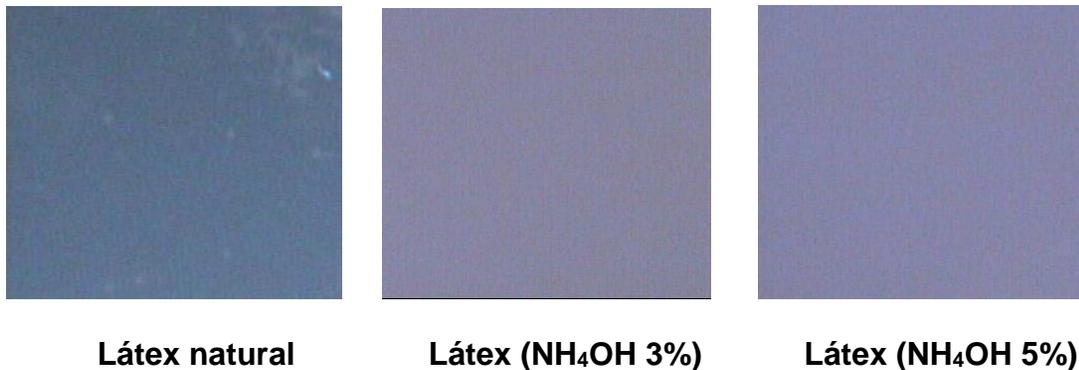
El aumento en la densidad del látex modificado, posiblemente permite que no

haya precipitación del polímero en el asfalto durante el proceso de mezcla y almacenamiento, debido a que el amoniaco reacciona con los ácidos grasos del látex y los jabones formados in situ, son absorbidos por las partículas de caucho aumentando la estabilidad del látex. El aumento del pH es debido a la adición de hidróxido de amonio.

3.2.2 ESTUDIO DEL LÁTEX MODIFICADO CON HIDROXIDO DE AMONIO (NH₄OH) POR MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE FLUORESCENCIA

Con el fin de estimar la compatibilidad del látex con el hidróxido de amonio, se utilizó la técnica de Microscopia Electrónica de Fluorescencia que permite observar su micromorfología. A continuación se muestran las microfotografías de fluorescencia en la figura 26 del látex natural y modificado al 3 % y 5% con hidróxido de amonio, tomadas en la Unidad de Microscopia Electrónica de la Universidad del Cauca, por personal capacitado de este laboratorio.

Figura 26. Microfotografías del látex natural y modificado al 3 % y 5% con hidróxido de amonio

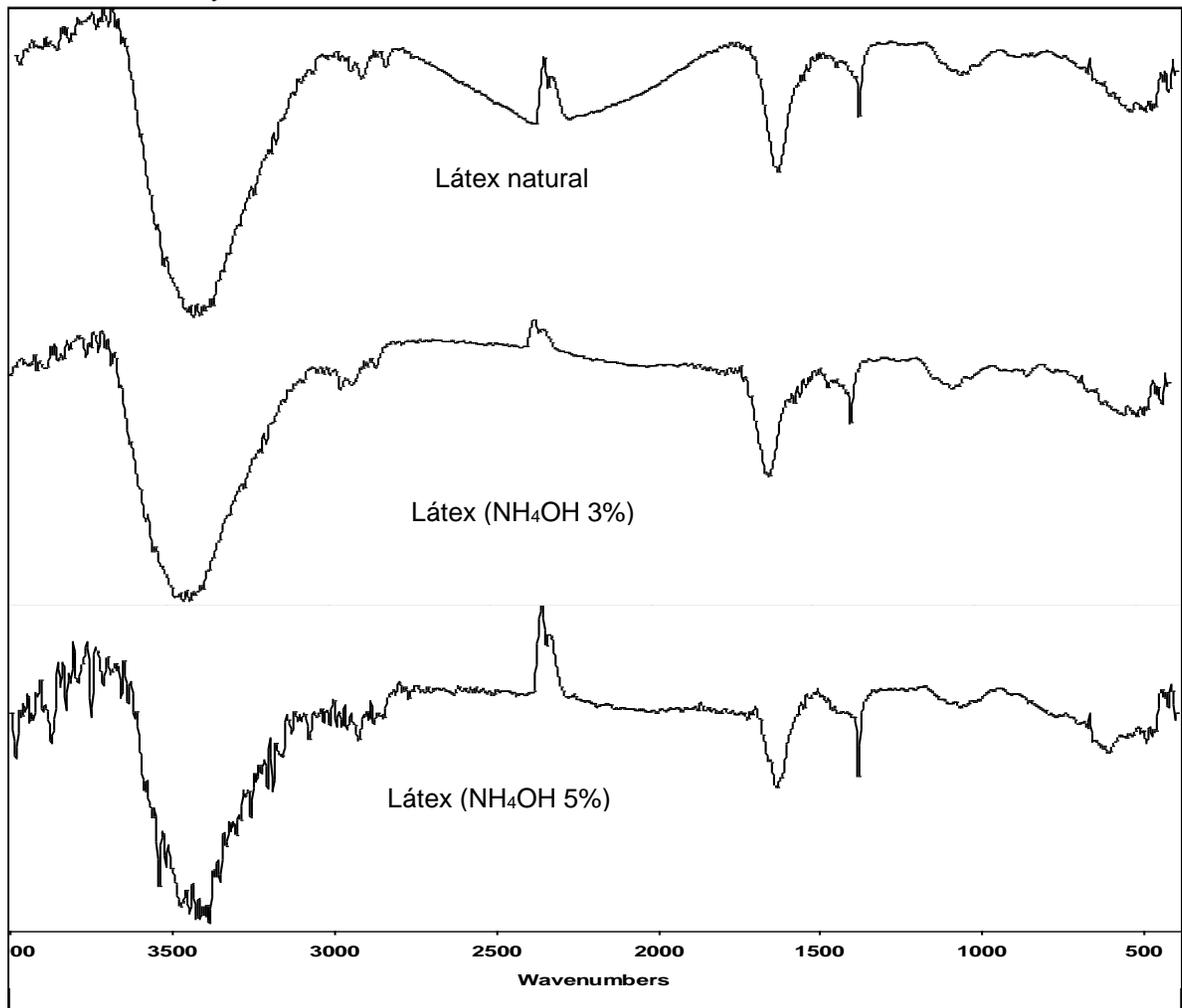


De acuerdo a las microfotografías anteriores, el látex natural presenta pequeños grumos, es decir, no es completamente homogéneo, debido posiblemente a su inestabilidad frente al medio ambiente, este tiende a coagularse y precipitarse con la luz solar, por ello se emplea un solvente que lo mantenga estable frente a estos cambios, como lo es el hidróxido de amonio, lo cual se corrobora con las microfotografías del látex modificado con dicho solvente, ya que presentan una superficie homogénea, indicando una buena solubilidad y dilución.

3.2.3 ESTUDIO POR ESPECTROSCOPIA IR DEL LÁTEX MODIFICADO CON HIDROXIDO DE AMONIO (NH₄OH)

Al látex modificado con hidróxido de amonio se le realizó un estudio por espectroscopia de absorción infrarroja, con el fin de comparar las bandas representativas, con el látex natural. Estos espectros del látex modificado con hidróxido de amonio al 3 y 5%, se tienen en la figura 27, junto con el látex natural.

Figura 27. Espectro infrarrojo del látex natural y aditivado con hidróxido de amonio al 3% y 5%.



En la tabla 10 se encuentra una comparación de estas principales bandas del látex natural y modificado con 3% y 5% de hidróxido de amonio.

Tabla 10. Comparación de las bandas características en el infrarrojo del látex natural y modificado con hidróxido de amonio al 3% y 5%.

Banda obtenida (cm ⁻¹)			Origen de la banda
Látex natural	Látex (NH ₄ OH 3%)	Látex (NH ₄ OH 5%)	
3427	3100-3600	3000-3700	Frecuencia de tensión O-H y N-H
3000 – 3100	3000 – 3100	3000 – 3100	Frecuencia de tensión CH olefínica (RR`C=CH-R)
3000	3000	3000	Frecuencia de tensión O-H de ácidos.
3427	3447	3400	Vibración de tensión O-H (banda ancha)
2926 2850	2961 2851	2928 2860	Frecuencias de tensión C-H
1634	1634	1635	Vibración de deformación del N-H
1383	1383	1383	Hidrocarburo lineal
1480	1480	1480	Vibración de flexión C-H intermedio (CH ₂)
1383	1383	1383	Oscilaciones C-H terminales (CH ₃)
1070	1070	1070	Frecuencia de tensión CO de alcoholes
650- 750	650-750	650-760	Vibración de deformación del O-H
600	600	600	Oscilaciones C-H intermedios (CH ₂)

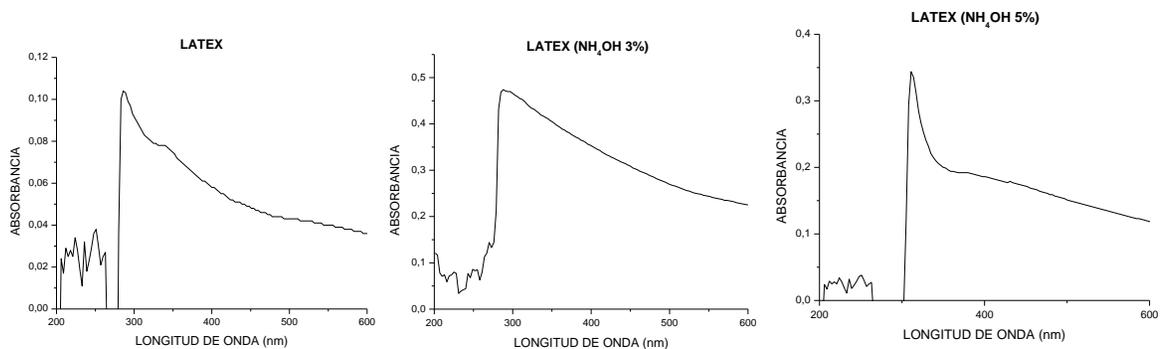
Con base en la tabla 10, se puede decir que las principales bandas correspondientes a los grupos funcionales contenidos en el material de partida, se encuentran presentes en los tres espectros, lo que indica que el solvente no altera la vibración de estos grupos funcionales, tales como los enlaces C-C, C-H y O-H. La presencia del hidrocarburo, como principal constituyente del látex, se confirma con las bandas de tensión CH olefínica a 300-3100 cm⁻¹, a 2900 y 2800 cm⁻¹, las vibraciones de flexión CH a 1480 cm⁻¹ y las oscilaciones CH a 600 cm⁻¹.

3.2.4 ESTUDIO POR ESPECTROSCOPIA UV-Vis DEL LATEX MODIFICADO CON HIDROXIDO DE AMONIO (NH₄OH)

Se realizó un análisis por espectroscopia ultravioleta al látex modificado con hidróxido de amonio al 3% y 5%, al igual que al látex natural, con el fin de comparar la presencia de las bandas representativas de sus grupos funcionales. En la figura 28 se encuentran dichos espectros del látex natural y modificado con hidróxido de amonio al 3% y 5%, respectivamente.

En los espectros UV-Vis, se observa que el látex modificado con hidróxido de amonio al 3 %, conserva las bandas del látex natural, indicando que el solvente en esta concentración, no afecta las transiciones electrónicas del material de partida, este efecto se corrobora con las microfotografías analizadas en el numeral 3.2.2, que indican la homogeneidad entre el solvente y el látex.

Figura 28. Espectro UV-Vis del látex natural y modificado con hidróxido de amonio al 3% y 5%



El látex modificado al 5%, presenta un efecto batocrómico de la banda bencenoide, con respecto al látex natural, ya que inicialmente se ubicaba a 286 nm y en este caso se encuentra a 311 nm; esto indica que el solvente a mayores concentraciones afecta las transiciones electrónicas del material inicial. Sin embargo, la homogeneidad presentada en el numeral 3.2.2 se mantiene.

3.3 ANALISIS PRELIMINAR DEL ASFALTO ORIGINAL

3.3.1 ANALISIS DE LAS PROPIEDADES FISICAS DEL ASFALTO ORIGINAL

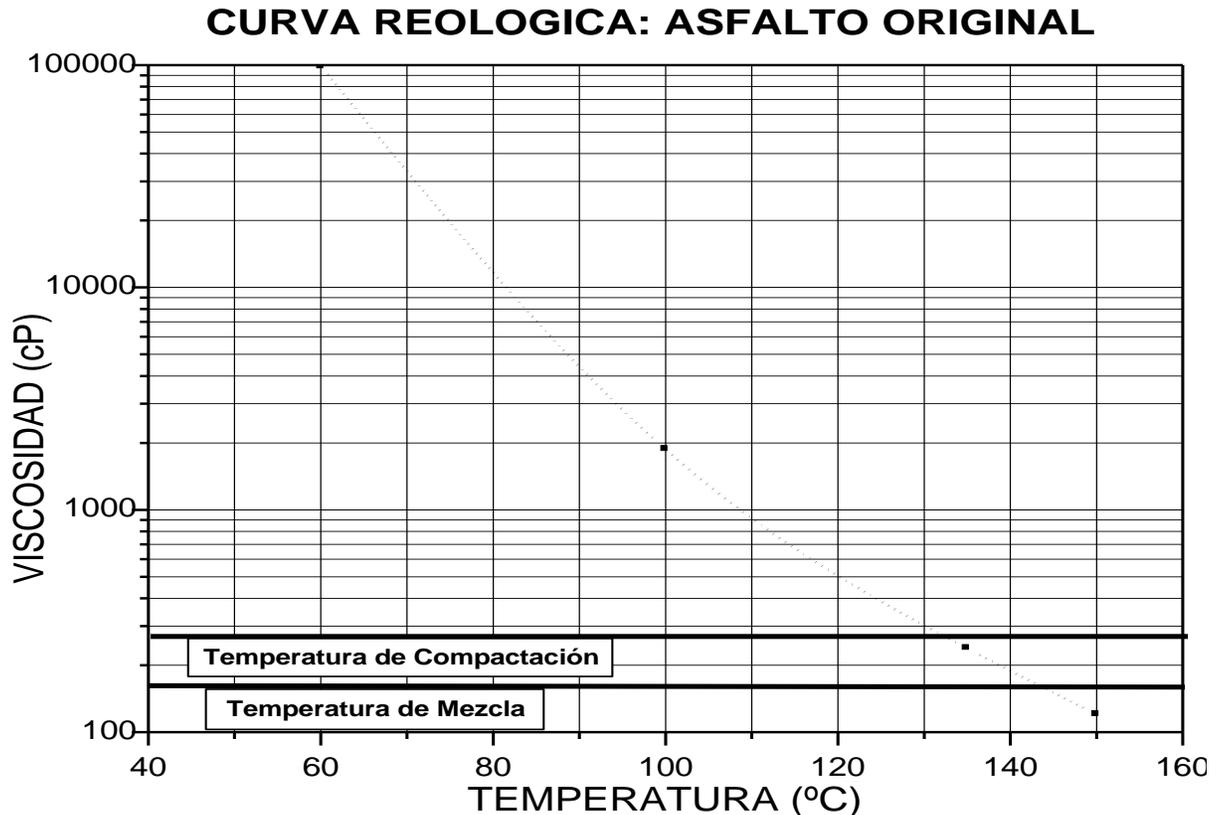
El asfalto empleado en esta investigación proviene de la refinería de Barrancabermeja. En la figura 29 se observa la variación de la viscosidad con respecto a la temperatura, con la curva reológica del cemento asfáltico. Con esta curva se puede analizar los rangos de temperatura en los que se puede realizar la mezcla con el polímero.

Los cementos asfálticos para pavimentación poseen a temperatura ambiente una consistencia de sólido o semisólido, con propiedades termoplásticas, ya que su consistencia varía con la temperatura. Así, a bajas temperaturas actúan como un sólido frágil y quebradizo y a temperaturas elevadas como un líquido viscoso. Esta variación puede ser más o menos pronunciada en función del tipo de asfalto y de su proceso de obtención (susceptibilidad térmica).

Conocer estas características reológicas o comportamiento viscoelástico de la carpeta es la parte fundamental para tener en cuenta el funcionamiento del pavimento, que predice sobre una amplia gama de las condiciones climáticas, ambientales, del tráfico y de carga. Con la curva reológica se tiene esta gama de temperaturas, entre ellas la temperatura de compactación y la temperatura de mezclado, de acuerdo a la norma I.N.V. E-748. La temperatura a la cual se debe calentar el cemento asfáltico para las mezclas, debe ser la requerida para producir una viscosidad de 170 ± 20 cP y la temperatura a la cual deberá calentarse el

cemento asfáltico para que tenga una viscosidad de 280 ± 30 cP, será la temperatura de compactación.

Figura 29. Curva reológica del asfalto original.



De acuerdo a la figura 29, donde se tiene la curva reológica del asfalto original el valor obtenido de la temperatura de compactación es de 132 °C y la temperatura de mezcla es de 144 °C teniendo en cuenta las características reológicas, son el método más exacto de comparar productos competitivos, variación de la formulación, y efectos uniformes de interacciones aditivas.

Los ensayos utilizados para determinar las propiedades físicas de los cementos asfálticos se pueden agrupar en cinco categorías: ensayo para medir la consistencia, de durabilidad, de pureza, de seguridad entre otros.

La consistencia se define como el grado de fluidez que tiene un asfalto a una determinada temperatura. El asfalto es un material termoplástico, por lo que su consistencia varía en mayor o menor grado con la temperatura. Si se quiere realizar comparaciones entre ellos, es necesario medir su consistencia a una misma temperatura e igual condición de carga. Los ensayos más utilizados para medir la consistencia de los cementos asfálticos son, viscosidad, penetración, punto de ablandamiento, ductilidad y recuperación elástica. En la tabla 11 se

presentan las propiedades físicas de consistencia y peso específico del cemento asfáltico original, suministrado por el Grupo de Geotecnia Vial y Pavimentos, de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad del Cauca.

Tabla 11. Propiedades físicas de consistencia y peso específico del cemento asfáltico original.

PROPIEDAD FISICA	VALOR	NORMA
Viscosidad Absoluta Brookfield 60° C, 45 min	97391 cP (973.91 P)	ASTM D – 4402
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
Recuperación elástica por torsión a 25° C	1.7 %	I.N.V. E – 727 NLT-329
Peso específico del asfalto sólido a 25° C	1.00986 g/mL	I.N.V. E - 707 ASTM D – 70

Una de las propiedades más importantes desde el punto de vista ingenieryl es la **viscosidad**, ya que es la expresión de la resistencia que ofrece un fluido al movimiento relativo de sus partículas, medida en unidades fundamentales de masa, longitud y tiempo. La viscosidad se define como el tiempo de flujo en segundos, en que una muestra del material en estudio fluye a través de un recipiente establecido, bajo condiciones específicas. Por lo tanto, cuanto mas elevada sea la viscosidad, mucho mas lento será su movimiento. La viscosidad del asfalto original es de 974 Poises (97391 cP), determinado, de acuerdo a la norma establecida. Este ensayo se realizo a 60° C, debido a que se considera la temperatura más alta que puede tener en la superficie, una mezcla asfáltica en servicio durante los meses de verano.

El resultado del ensayo de **penetración**, se expresa por la distancia, en décimas de milímetro, a que una aguja, de dimensiones dadas, penetra verticalmente en la muestra de material, a condiciones de peso, tiempo y temperatura establecidas. La penetración pretende fundamentalmente, ser una medida de la viscosidad, donde la tensión cortante viene dada por la carga, dividida por la superficie de la punta de la aguja en contacto con el asfalto, en un momento determinado. Por lo tanto la viscosidad, disminuye al aumentar la penetración de la aguja. El valor de la penetración en el asfalto original es de 100 (0.1 mm) a 25° C, que se considera como la temperatura media de servicio, con un peso de 100 g y una duración de la prueba de 5 s.

En el ensayo del **punto de ablandamiento**, el asfalto se coloca en un anillo de latón a una determinada altura sobre el fondo del recipiente con agua y se le coloca una esfera, a medida que la temperatura se eleva a una velocidad constante, el asfalto se ablanda y la esfera desciende gradualmente envuelta en una bolsa de asfalto hasta tocar el fondo del baño. Dicha temperatura es la denominada temperatura de ablandamiento, ya que los cementos asfálticos no son sólidos cristalinos, no se puede hablar de un punto de fusión. El punto de ablandamiento en agua destilada del asfalto original, es de 46.1° C, es decir, el punto en el que el asfalto no soporta la esfera de acero y comienza a fluir.

El ensayo de **ductilidad** mide el alargamiento, antes de la rotura, de una probeta de cemento asfáltico estirado por sus extremos a una velocidad constante, ya que, una propiedad que tienen los asfaltos, es su capacidad de mantenerse coherentes bajo grandes deformaciones cuando se someten a tracción en el tránsito. El valor de la ductilidad obtenido para el asfalto original es de +100 cm y se encuentra dentro de lo establecido como óptimo para un asfalto.

Respecto al ensayo de **recuperación elástica** por torsión, se determina el ángulo recuperado por una muestra de asfalto, mediante un dispositivo de torsión que ha sido girado 180° en sentido opuesto, después de 30 minutos. Para el asfalto original se obtuvo un valor de 1.7 %, lo que indica que la elasticidad de este asfalto es muy pequeña.

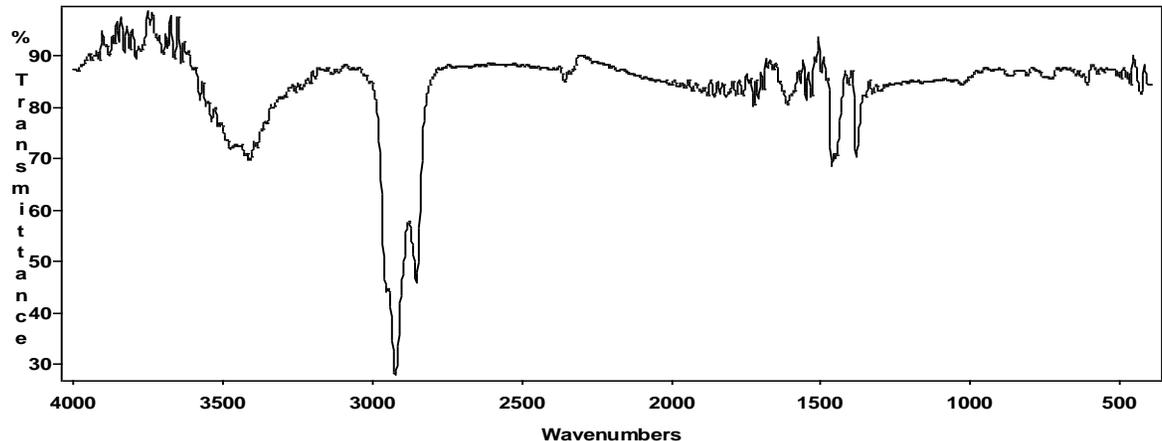
El ensayo de **peso específico**, se lleva a cabo mediante el empleo de un picnómetro, determinando así la relación del peso de un volumen dado de material a 25° C, con respecto al peso de un volumen igual de agua a la misma temperatura. El resultado obtenido en este ensayo es de 1.00986 g/mL

3.3.2 ANALISIS DEL ESPECTRO INFRARROJO DEL ASFALTO ORIGINAL

De todas las propiedades de un compuesto orgánico, la que da más información acerca de su estructura es su espectro infrarrojo. Una molécula vibra constantemente: sus enlaces se alargan (y contraen) y se combinan recíprocamente. La absorción de la luz infrarroja produce cambios en las vibraciones de una molécula: la luz que se encuentra más allá (frecuencia menor, longitud de onda mayor, energía menor) del rojo del espectro visible.

El asfalto al igual que el petróleo crudo, es una mezcla de numerosos hidrocarburos, en proporciones muy diferentes. Las moléculas del asfalto al agruparse según sus características físicas, dan lugar a una estructura coloidal característica. Estos componentes del asfalto se han clasificado en dos grupos: los **asfaltenos** y **maltenos**, estos últimos están constituidos por resinas, aromáticos y saturados. En la figura 30 se observa el espectro infrarrojo del asfalto original.

Figura 30. Espectro infrarrojo del asfalto original

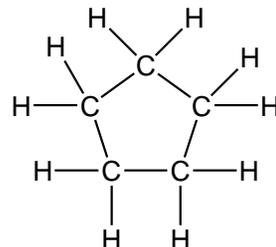
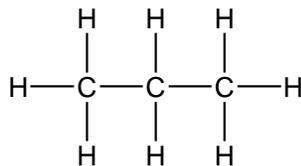


Como se mencionó anteriormente el asfalto es una mezcla de compuestos organometálicos de estructura muy compleja. Está constituido principalmente por hidrocarburos alifáticos saturados, hidrocarburos aromáticos, resinas y aceites, además de una serie de metales pesados como hierro vanadio y níquel, y heteroátomos de azufre, oxígeno y nitrógeno. Teniendo en cuenta esto, se puede decir, que el asfalto presenta diversos grupos funcionales, representados como:

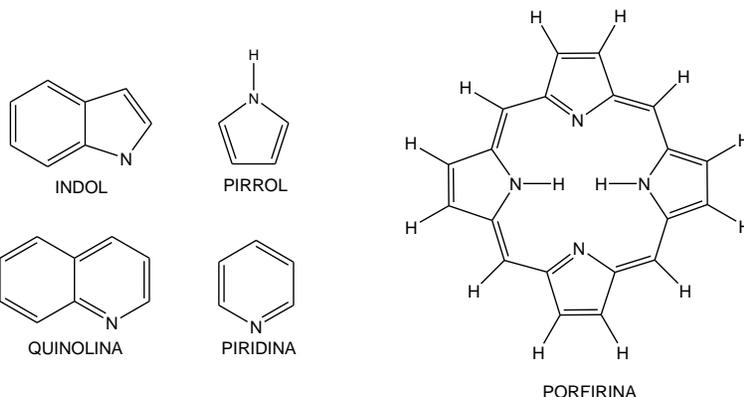
- Hidrocarburos saturados (parafinas), como grupos metilo y metileno.
- Anillos aromáticos polares (ácidos cresílicos derivados del fenol, cresol o xilenol): grupo hidroxilo, metilo y dobles enlaces conjugados.
- Hidrocarburos aromáticos no benzenoides (bases nitrogenadas: pirrol, piridina, etc.): grupos funcionales contengan nitrógeno en su estructura.
- Compuestos organometálicos: enlaces CO-M, donde CO representa un compuesto orgánico y M un metal como vanadio, níquel, hierro, etc.

Algunos de estos grupos funcionales se pueden observar a continuación en las siguientes estructuras químicas de los respectivos constituyentes del asfalto.

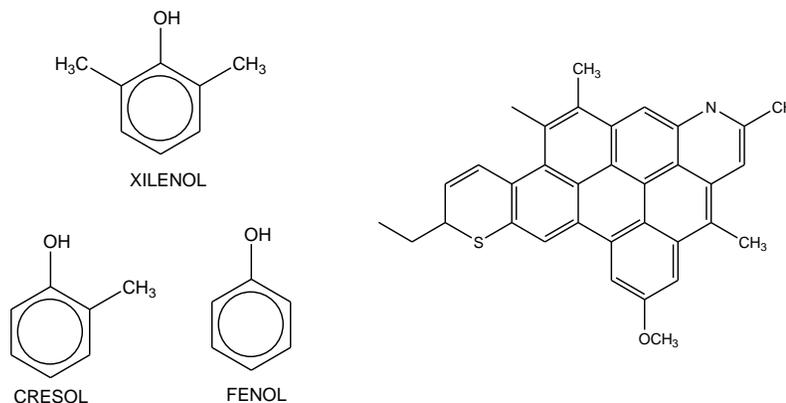
SATURADOS



AROMÁTICOS



RESINAS



En la tabla 12 se resumen las bandas características en el espectro infrarrojo del asfalto original.

Tabla 12. Bandas características en el infrarrojo del asfalto original.

Banda obtenida (cm ⁻¹)	Banda teórica (cm ⁻¹)	Origen de la banda
3385	3300	Frecuencia de tensión NH
2922 – 2928		Frecuencia de tensión CH olefínica (RR`C = CH-R)
2852	2800 – 3000	
1700	1710	Frecuencia de tensión C=O
1613	1500 – 1600	Frecuencia de tensión C=C aromático
1463	1460	Vibración de flexión C-H intermedio (CH ₂)
1381	1385	Oscilaciones CH terminales (CH ₃)
1014	1225 – 980	Frecuencia de tensión de iones con azufre
870 – 810	870 – 810	Metales (Vanadio)
750 – 700	750 – 700	Deformación de balanceo C-H (aromáticos y saturados)
650	695	Oscilaciones CH intermedios (CH ₂)
606 – 465	<604	Porfirinas –M (V, Fe, Cu, Ni)

Con base en la tabla 12, se tienen múltiples bandas, donde se pueden distinguir las siguientes zonas de absorción.

Las bandas representativas de los hidrocarburos alifáticos (saturados) se encuentran alrededor de:

- 2922 – 2928 cm^{-1} : tensión asimétrica C–H de metileno.
- 2852 cm^{-1} : tensión simétrica C–H de metileno.
- 1463 cm^{-1} : deformación asimétrica C–H de metileno.
- 1381 cm^{-1} : deformación simétrica C–H de metileno.
- 700 – 750 cm^{-1} : deformación de balanceo C–H de metileno.
- 650 cm^{-1} : Oscilaciones C–H

Las bandas características de los hidrocarburos aromáticos son las siguientes:

- 1613 cm^{-1} : bandas por alargamiento C=C de enlaces aromáticos.
- Sobretonos a 1660 y 2000 cm^{-1} : frecuencia de tensión C=C aromático.
- 700 – 750 cm^{-1} : Deformación C-H aromático fuera del plano.

La banda que se encuentra a aproximadamente a 3385 cm^{-1} , es generada por vibraciones de tensión N–H y O–H

Una banda de absorción de muy baja intensidad, ubicada a 1700 cm^{-1} , corresponde a una frecuencia de tensión del grupo carbonilo. En el espectro también se observa una banda muy débil cerca de 1014 cm^{-1} , ocasionada posiblemente a la presencia de iones con azufre (sulfatos, sulfóxidos, sulfitos, etc.), presentes en el asfalto.

Entre 810 y 870 cm^{-1} , se tiene una absorción de muy baja intensidad que puede ser atribuida a grupos funcionales que contengan metales como vanadio. Al igual que la banda entre 606 – 465 cm^{-1} .

3.3.3 ANALISIS DE LAS PROPIEDADES QUIMICAS DEL ASFALTO ORIGINAL (SARA)

Para separar el asfalto en sus fracciones constituyentes y determinar las proporciones relativas de cada una, se empleó el método de ensayo, S.A.R.A. En éste, primero se separan las fracciones de asfaltenos y maltenos basándose en las diferencias de solubilidad en n-hexano o n-pentano, y luego se separan los maltenos en saturados, aromáticos y resinas, gracias a las distintas afinidades que presentan. Esta separación se realizó por cromatografía de columna, mediante la adsorción selectiva de los componentes de la muestra sobre alúmina y silica-gel, como se menciona en la sección 2.3.4.1. En la primera fracción se retienen las

resinas y en la segunda los aromáticos. La fracción sobrante de dichas columnas se destiló, con el fin de recuperar el solvente y finalmente obtener los saturados.

En la tabla 13, se muestran los resultados de la composición S.A.R.A. del asfalto original, separados por cromatografía de columna.

Tabla 13. Características de las fracciones separadas del asfalto original por cromatografía de columna.

Compuesto	Apariencia	Color	η_i	%
Asfaltenos	Sólido	Negro	-	17
Resinas	Sólido	Marrón	1.4835	11
Aromáticos	Sólido	Marrón anaranjado	1.4100	27
Saturados	Semisólido-viscoso	Amarillo oscuro	1.3469	45

Los **asfaltenos** extraídos del asfalto son una materia sólida, amorfa y polvorosa, de color marrón o negro, insolubles en solventes alifáticos, pero solubles en benceno y disulfuro de carbón. En general, son de carácter predominantemente aromático, con un contenido de hidrógeno comparativamente bajo. Estructuralmente se les considera como un sistema condensado de anillos aromáticos polinucleares, formados por la condensación y deshidrogenación de hidrocarburos aromáticos-nafténicos de menor peso molecular, sustituidos con cadenas alquílicas y alicíclicas con heteroátomos (N, O, S, Ni, V y Fe)

Las **resinas** son similares a los asfaltenos, pero de menor peso molecular. Conforman la fracción con mayor carácter polar en los maltenos y tienen carácter aromático, con heteroátomos (N, O, S). Poseen, además, cadenas alifáticas largas y pocos anillos aromáticos, en comparación con la estructura de los asfaltenos.

Los **aromáticos** son estructuras sencillas no polares formadas por policírculos de seis átomos de carbono. No contiene heteroátomos.

La fracción de **saturados** es la de menor peso molecular y esta constituida por cadenas alquílicas y ciclo parafinas. No contiene heteroátomos.

Con base en la tabla 13, se puede decir, que el asfalto original es de carácter alifático, debido a su alto contenido de saturados. La influencia que tienen los compuestos químicos del asfalto, con respecto a sus propiedades, son muy variables, en el caso de los asfaltenos, son los encargados de la dureza y resistencia del asfalto, mientras que los maltenos dan la flexibilidad, adherencia y consistencia para hacer del asfalto un material manejable.

3.3.3.1 PRUEBAS DE CARACTERIZACION PARA LAS FRACCIONES OBTENIDAS DE LA SEPARACION CROMATOGRAFICA DE MALTENOS EN EL ASFALTO ORIGINAL

Se realizaron pruebas de caracterización (procedimiento descrito en la sección 2.3.5) a los diferentes compuestos separados de la fracción malténica del asfalto, con el fin de corroborar que dichos compuestos corresponden a saturados, aromáticos y resinas. En la tabla 14 se encuentran las pruebas de caracterización y su respectivo resultado.

Tabla 14. Pruebas de caracterización de compuestos malténicos.

Compuesto	Prueba	Resultado
Resinas	Reacción de L' Rosen para identificación de aromáticos	Positivo
	Identificación de fenoles mediante la adición de hidróxido de sodio	Positivo
Aromáticos	Determinación de nitrógeno mediante la adición de Bencidina y Sulfato de Cobre	Positivo
	Reacción de Hoffman	Positivo
Saturados	Baeyer	Negativo
	Solubilidad con ácidos y con bases fuertes	Negativo

- **Resinas**

A la fracción de resinas, obtenida del asfalto original, se les realizaron las pruebas reportadas en la tabla 14. Con el fin de verificar la presencia de núcleos aromáticos y fenoles.

La identificación de anillos aromáticos dio un resultado positivo en la reacción de L Rosen. Esta presencia de núcleos aromáticos altamente condensados son los principales constituyentes de las resinas que se detectaron por el cambio de la coloración en la solución.

La adición de hidróxido de sodio a la fracción de resinas del asfalto, dió como resultado la formación de un precipitado lo que indica una prueba positiva para fenoles. El resultado de estas pruebas fue comparado con blancos de fenol y o-cresol.

- **Aromáticos**

La adición del reactivo de Bencidina y sulfato de cobre a la fracción aromática del asfalto fue indispensable para determinar la presencia de nitrógeno que se evidencio por la formación de un precipitado de color azul. Esta reacción se debe

a la formación de un compuesto de coordinación entre el cobre y los compuestos aromáticos.

La reacción de Hoffmann que implica la adición de yoduro de metilo en medio alcalino (Hidróxido de potasio) a la fracción aromática para la determinación de anillos piridínicos, arrojó un resultado positivo al observarse la formación de una pasta rojiza y el desprendimiento de gas fuerte. Este resultado implica la reacción de metilación dejando como producto una sal de amonio.

Los anteriores resultados confirman la presencia de bases nitrogenadas (piridina, pirrol, Indol entre otras) como constituyentes del asfalto. El resultado de estas pruebas se comparó utilizando como blanco el benceno, anilina y piridina.

- **Saturados**

A la fracción de saturados obtenida de la separación malténica del asfalto, se le realizó en primera instancia la prueba de Baeyer que es comúnmente utilizada para determinar insaturaciones. Este ensayo arrojó un resultado negativo como era de esperarse y se evidenció por la no decoloración de la solución de permanganato de potasio. Esta solución se decolora con compuestos que tienen enlaces etilénicos, acetilénicos por lo que el resultado negativo arrojado en la prueba se debe a que no hay presencia de dobles enlaces que puedan reaccionar con el permanganato de potasio.

Otra de las pruebas realizadas consistió en medir la solubilidad de la fracción saturada en ácidos y bases fuertes. Este ensayo arrojó un resultado negativo debido a la poca reactividad que presentan los enlaces saturados a temperatura ambiente frente a sustancias ácidas y básicas como ácido clorhídrico, ácido sulfúrico, hidróxido de amonio e hidróxido de sodio.

Para efectuar estas pruebas se utilizó parafina analítica como blanco, confirmando de esta manera que la fracción eluida de la columna cromatográfica con n-pentano corresponden a parafinas y saturados.

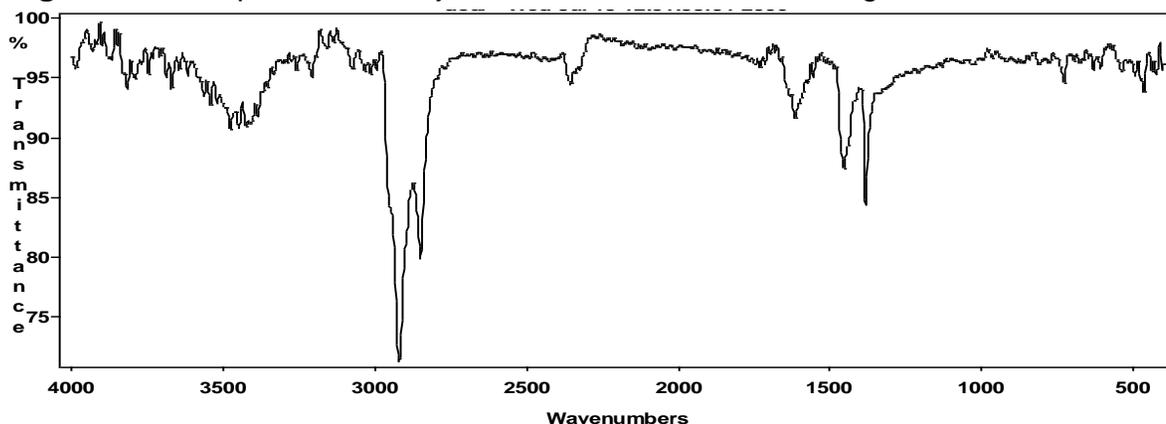
3.3.4 ANALISIS DE ESPECTROSCOPIA IR PARA LAS FRACCIONES ASFALTENICA Y MALTENICA DEL ASFALTO ORIGINAL

La espectroscopia infrarroja se emplea fundamentalmente como método para la asignación de grupos funcionales. El siguiente estudio está enfocado al análisis espectroscópico de la fracción asfáltica y malténica del asfalto original.

3.3.4.1 Análisis de espectroscopia Infrarroja para asfaltenos

Como se mencionó en la sección 1.4.2.5, los asfaltenos son moléculas complejas de alto peso molecular. Están compuestos principalmente por átomos de carbono e hidrogeno, además de poseer en su interior heteroátomos de oxigeno. Nitrógeno y azufre. En la figura 31 se aprecia el espectro infrarrojo de la fracción asfáltica del asfalto.

Figura 31. Espectro Infrarrojo de Asfaltenos del asfalto original



En la tabla 15 se muestran las bandas características de los grupos funcionales en los asfaltenos.

Tabla 15. Bandas características del espectro Infrarrojo para asfaltenos del asfalto original.

Banda (cm ⁻¹)	Posición teórica (cm ⁻¹)	Origen de la banda
3447	3000-3750	Hombro de tensión asimétrica por grupos -N-H
3020	3000 – 3100	Frecuencia de tensión C-H aromático.
2920, 2849	2700-3000	Banda de tensión -C-H producida por -CH ₃ , -CH ₂ , -CH, CHO
1615	1500,1600	Tensión C=C de anillos aromáticos
1539	1500-1600	Bandas con intensidad variables, vibración de tensión del C=C
1490	1490 – 1580	Vibración de deformación N-H en tijera, débil, de amina secundaria
1454 1383	1375 1460	Banda de deformación -C-H metilenos.
862	862-835	Vibración de flexión C-H fuera del plano de un naftaleno β-sustituido
728	675 – 900	Deformación C-H aromático, fuera del plano.
608	700-590	Vibración de tensión C-S banda débil.
474-421	Cerca de 500	Tensión del -C-S, cuando esta conjugando, banda débil.
465	400 – 500	Vibración de flexión C-H aromáticos sustituidos
465 – 606	< 604	Porfirinas -M (V, Fe, Cu, Ni)

En el espectro infrarrojo de la figura 31, las absorciones de los enlaces hidrógeno-X (X = N, C) dominan la región de número de ondas elevado en el espectro de infrarrojo, según el orden N-H, C-H (del más alto al más bajo). Las absorciones a 3447 cm^{-1} que corresponden al hombro de tensión asimétrica proporcionado por grupos N-H constituyen un buen diagnóstico de la presencia de aminas en los asfaltenos, esto se puede corroborar con la vibración de deformación N-H en tijera, de amina secundaria a 1490 cm^{-1} , esta banda es débil y se encuentra solapada.

Se destacan las bandas fuertes a 2920 cm^{-1} y 2849 cm^{-1} que corresponden a las bandas de tensión C-H producida por grupos $-\text{CH}_3$, $-\text{CH}_2$, $-\text{CH}$, CHO.

Las bandas con intensidades variables, ubicadas entre $1500\text{--}1600\text{ cm}^{-1}$ corresponden a vibraciones de tensión del enlace C=C de los alquenos. En la mayoría de los casos, el estiramiento de los enlaces C=C da lugar a bandas relativamente débiles en los espectros de IR, porque este grupo funcional carece por lo general de un momento dipolar significativo. De ahí que en el caso de alquenos simétricos no se observe ninguna absorción.

A 3020 cm^{-1} , se encuentra una vibración de tensión C-H aromático y a 1615 cm^{-1} la banda que corresponde a la tensión C=C de anillos aromáticos, estas dos bandas son débiles. Estos compuestos tienen absorciones características debido a la presencia del sistema π cíclico, tal es el caso de las absorciones debidas al alargamiento de los enlaces C-H aromático que aparecen inmediatamente por encima de 3000 cm^{-1} . La presencia de estos grupos aromáticos se confirma con las bandas de deformación C-H aromática, fuera del plano a 728 cm^{-1} y con la vibración de flexión C-H aromáticos sustituidos a 465 cm^{-1} . En esta última aparecen una serie de bandas que dependen del grado de sustitución del anillo aromático y de la posición relativa de los sustituyentes en dicho anillo. Sin embargo, estas bandas no se evidencian claramente en el espectro de la figura 31 cuya anchura e intensidad puede variar por la interacción entre grupos funcionales dentro de una molécula lo que ocasiona cambios en la frecuencia e intensidad de las bandas.

A 1383 cm^{-1} y 1456 cm^{-1} aparecen las bandas de deformación del C-H de grupos metileno y de metilos. En el rango de frecuencias de $862\text{--}835\text{ cm}^{-1}$ se encuentran las vibraciones de flexión C-H fuera del plano de un naftaleno β -sustituido.

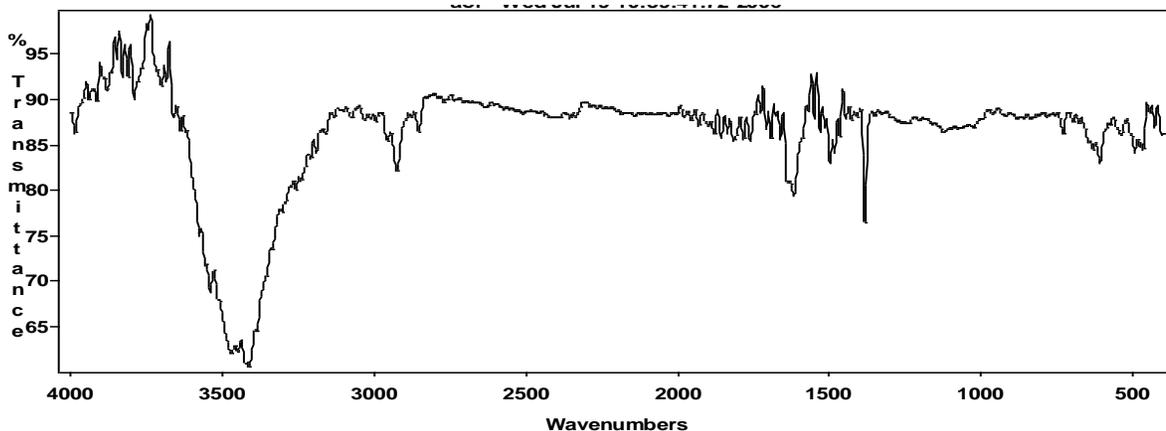
La banda débil a 608 cm^{-1} corresponde a la vibración de tensión C-S, que cuando esta conjugado aparece una banda cerca de 500 cm^{-1} que corresponde a la vibración de tensión del C-S tal y como se aprecia en el espectro de la figura 31.

La presencia de metales pesados como, V, Fe, Cu y Ni, se observan en el espectro a $465\text{--}606\text{ cm}^{-1}$.

3.3.4.2 Análisis de espectroscopia Infrarroja para Resinas

Las resinas constituyen una de las fracciones malténicas del asfalto, están compuestas por núcleos aromáticos altamente condensados y grupos funcionales que contienen heteroátomos como nitrógeno oxígeno y azufre. En la figura 32 se observa el espectro infrarrojo de las resinas del asfalto original.

Figura 32. Espectro Infrarrojo de Resinas del asfalto original.



La tabla 16 presenta una lista de las bandas de absorción características para los grupos funcionales más comunes de las resinas.

Tabla 16. Bandas características del espectro Infrarrojo para Resinas del asfalto original

Banda (cm ⁻¹)	Posición Teórica (cm ⁻¹)	Origen de la banda
3412	3000-3750	Frecuencia de tensión O-H, N-H
3020	3000 – 3100	Frecuencia de tensión C-H aromático.
2925, 2852	270 -3000	Tensión C-H (CH ₃ , CH ₂ , C-H, CHO)
1686-1729	1667-2000	Armónicos y sobretonos de vibración de tensión C=C aromáticos.
1616, 1503, 1434	1500-1600	Bandas con intensidad variable, vibración de tensión del C=C aromáticos.
1482	1490 – 1580	Vibración de deformación N-H en tijera, débil, de amina secundaria
1450	1468	Deformación asimétrica C-H metilenos
1383	1375	Deformación C-H simétrica metilenos
1275 1126	1306 1153	Vibración de deformación de aleteo y torsión del metileno
1080 1030	1000 – 1250 960 – 1275	Vibración de tensión C-N, C-C y Vibración de deformación C-H en el plano.
677-729	650 – 900	Deformación en abanico N-H
729, 690	675 – 900	Deformación de C-H aromático, fuera del plano.
728-677	900-650	Deformación de abanico fuera del plano N-H
608	590-700	Vibración de tensión C-S
540, 490	400 – 550	Vibración de flexión C-H aromáticos sustituidos

En el espectro de la figura 32, aparece una banda intensa y ancha en la región de $3000-3750\text{ cm}^{-1}$ que es característica de frecuencias de tensión de O–H probablemente de los grupos fenólicos constituyentes de los ácidos orgánicos que pueden estar presentes en las resinas. En esta misma zona aparecen bandas de tensión de los grupos N–H, aunque se encuentran solapadas, la presencia de los grupos aminos se confirman con las absorciones a 1482 cm^{-1} de vibración de deformación N–H en tijera, de amina secundaria, y la vibración de deformación en abanico N–H a $677-729\text{ cm}^{-1}$, estas dos son débiles y se pueden encontrar solapadas; además, se tiene la banda de tensión C–N a 1080 y 1030 cm^{-1} , que se encuentra solapada con las vibraciones de tensión C–C y las de deformación C–H en el plano, que son un poco más fuertes.

La anchura e intensidad de las absorciones de los enlaces O–H y N–H son muy sensibles a la estructura del compuesto y también a las condiciones de obtención del espectro. Aunque estos dos grupos funcionales participan en la formación de puentes de hidrógeno intermoleculares estas interacciones son más significativas en los alcoholes y aminas primarias y menos en los alcoholes y aminas secundarias y, en especial, en terciarias. La formación de puentes de hidrógeno disminuye a medida que se reduce la concentración del alcohol o la amina en el disolvente.

Las bandas que aparecen a 2925 cm^{-1} y 2852 cm^{-1} corresponden a vibraciones de tensión C–H provenientes de CH_3 , CH_2 , C–H, CHO., junto con las vibraciones de deformación C–H de metilenos, asimétrica y simétrica a 1450 y 1383 cm^{-1} , respectivamente. Las bandas de 1275 cm^{-1} y 1126 cm^{-1} corresponden a vibraciones de deformación de aleteo y torsión del metileno.

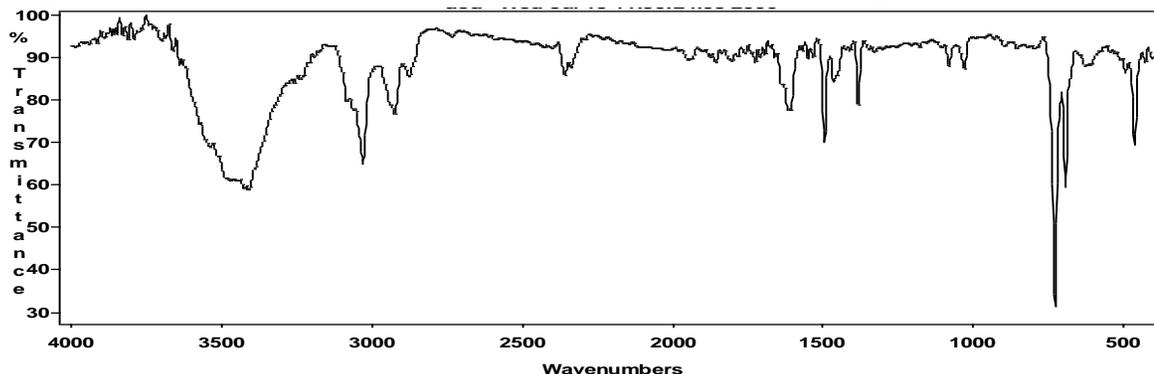
En el rango de $1500-1600\text{ cm}^{-1}$ se observan bandas con intensidades variables que corresponden a la vibración de tensión del enlace C=C característico de compuestos aromáticos. En la región de $1667-2000\text{ cm}^{-1}$ aparecen los armónicos o sobretonos que son un conjunto de bandas débiles que se utilizan para determinar o confirmar el tipo de sustitución del anillo, al igual que la vibración de flexión C–H aromáticos sustituidos a 540 y 490 cm^{-1} . Los aromáticos también presentan una banda a 3020 cm^{-1} , ocasionada por una vibración de tensión C–H aromático y las vibraciones de deformación C–H aromático en el plano fuera del plano, a 1080 , 1030 y a 729 , 690 cm^{-1} , respectivamente, aunque estas bandas son muy débiles, y puede ser debido a baja concentración en este tipo de moléculas.

La vibración de tensión C–S da lugar a absorciones débiles en la región del espectro de infrarrojo situada entre $590-700\text{ cm}^{-1}$ proveniente de la presencia de grupos funcionales que contienen azufre.

3.3.4.3 Análisis de espectroscopia Infrarroja para aromáticos

Los compuestos aromáticos hacen parte de la fracción malténica del asfalto. Contienen hidrocarburos aromáticos (naftenos), hidrocarburos cíclicos no bencenoides y cadenas alifáticas, algunas bases nitrogenadas como la piridina pirrol entre otras. En la figura 33 se muestra el espectro infrarrojo de la fracción aromática del asfalto original.

Figura 33. Espectro Infrarrojo de Aromáticos del asfalto original



La tabla 17 enseña las absorciones más representativas del espectro infrarrojo de los compuestos aromáticos del asfalto original.

Las absorciones características de los compuestos aromáticos se deben a la presencia del sistema π cíclico. El espectro de la figura 33 muestra una banda característica a 3029 cm^{-1} que se debe al alargamiento de los enlaces C–H en el anillo aromático. Estas bandas generalmente aparecen inmediatamente por encima de 3000 cm^{-1} . En la región de $1500\text{--}1600\text{ cm}^{-1}$, aparecen tres bandas con intensidad variable que corresponden a vibraciones de tensión del enlace C=C del anillo aromático. Un conjunto de bandas débiles conocidas como armónicos o sobretonos de vibración de tensión C=C en la región de $1686\text{--}1729\text{ cm}^{-1}$, permiten determinar el tipo de sustitución en el anillo, junto con la vibración de flexión C–H aromática, sustituidos a 463 cm^{-1} .

El espectro de la figura 33, sobresalen dos bandas fuertes a 694 cm^{-1} y a 728 cm^{-1} que corresponden a deformaciones del C-H fuera del plano señales que junto a las anteriormente mencionadas son características de un compuesto aromático.

Aparece una banda a 3410 cm^{-1} que corresponde a la tensión asimétrica proporcionada por grupos –N–H, que se corrobora con la banda que se observa en el rango de $650\text{--}900\text{ cm}^{-1}$, correspondiente a la deformación en abanico fuera del plano del enlace N–H y la vibración de deformación N–H en tijera, débil, de amina secundaria a 1495 cm^{-1} .

Tabla 17. Bandas características del espectro Infrarrojo para aromáticos del asfalto original

Banda (cm⁻¹)	Posición teórica (cm⁻¹)	Origen de la banda
3410	3000-3750	Vibración tensión –N-H
3029	3000-3100	Frecuencia de tensión C-H aromático.
2924	2923	Tensión asimétrica C–H (CH ₃ , CH ₂ , C–H, CHO)
2878	2876	Tensión simétrica metilos
2853-2924	2854-2927	Vibración de tensión C-H proporcionada por los ciclohexanos.
1686-1729	1667-2000	Armónicos y sobretonos de vibración de tensión C=C
1615,1533,1495	1500-1600	Bandas con intensidad variables, vibración de tensión del C=C aromáticos.
1495	1490 – 1580	Vibración de deformación N–H en tijera, débil, de amina secundaria
1463	1460	Deformación asimétrica metilenos
1383	1375	Vibración de deformación C–H simétrica
1080 1030	1000 – 1250 960 – 1275	Vibración de tensión C–N, C–C y vibración de deformación C–H en el plano.
821	862-835	Vibración de flexión C–H fuera del plano de un naftaleno β-sustituido
694-821	650-900	Deformación de abanico fuera del plano N-H
694, 728	675-900	Deformación C-H aromático, fuera del plano
608	650	Oscilaciones C–H intermedios (CH ₂)
463	400 – 550	Vibración de flexión C–H aromáticos sustituidos

La absorción a 2924 cm⁻¹ corresponde a la tensión C–H proveniente de grupos CH₃, CH₂, C–H, CHO. Las bandas en el rango de 2853–2924 cm⁻¹ pertenecen a vibraciones de tensión C-H proporcionada por los ciclohexanos.

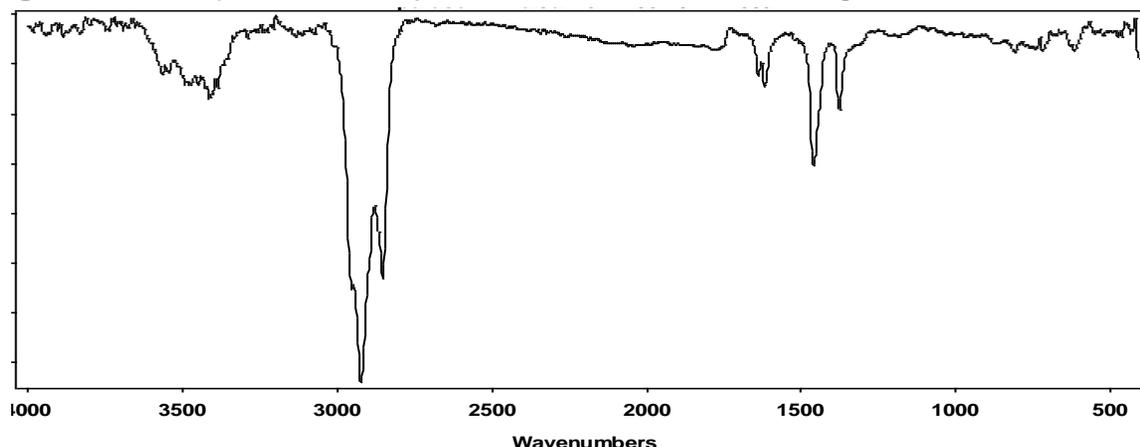
El espectro de la figura 33 muestra una serie de bandas que corresponden a las tensiones simétricas y asimétricas de los enlaces C–H de los metilos y metilenos. Aparece una banda a 2878 cm⁻¹ que corresponde a la tensión simétrica de metilos, 2924 cm⁻¹ a la tensión asimétrica de metilenos y a 1463 cm⁻¹ a la deformación asimétrica de metilos.

La banda a 1383 cm⁻¹ corresponde a la vibración de tensión del –CO en el plano.

3.3.4.4 Análisis de espectroscopia Infrarroja para parafinas o saturados

Como se mencionó en la sección 1.4.2.4, los saturados son las sustancias del asfalto que dan la consistencia adecuada para hacerlos trabajables, incrementando la fluidez. En su estructura básica se encuentran enlaces sencillos C–C y C–H, como se muestran en la figura 3. En la figura 34 se observa el espectro infrarrojo de la fracción saturada del asfalto original.

Figura 34. Espectro Infrarrojo de Saturados del asfalto original



Detallando la figura 34, se destacan las principales bandas, representadas en la tabla 18.

Tabla 18. Bandas características del espectro Infrarrojo para Saturados del asfalto original

Banda (cm ⁻¹)	Posición teórica (cm ⁻¹)	Origen de la banda
2922	2962	Vibración de tensión proporcionada por C-H asimétrica.
2852	2872	Tensión simétrica C-H
1617	1645-1500	Banda de tensión media proporcionada por C-C alifáticos
1459	1455	Banda de vibración de flexión C-H del ciclopentano y. Deformación asimétrica C-H de metilenos
1377	1375	Banda de vibración C-H simétrica
725	720	Banda de deformación de balanceo C-H del metileno -CH ₂ .
650	650	Oscilaciones CH intermedios (CH ₂)

La banda a 2922 cm⁻¹, es una vibración de tensión asimétrica C-H de metileno, mientras que la banda de 2852 cm⁻¹ es una vibración de tensión simétrica C-H de metileno.

Las bandas a 1459cm⁻¹ y 1377 cm⁻¹, son vibraciones de deformación del enlace C-H del metileno asimétrica y simétrica, respectivamente.

A 725 cm⁻¹, se tiene una banda ocasionada por la deformación de balanceo C-H del metileno. La banda ubicada a aproximadamente 650 cm⁻¹ es una oscilación C-H, característica de grupos intermedios (CH₂).

3.3.5 ANALISIS POR ESPECTROSCOPIA UV-VIS PARA LA FRACCION MALTENICA DEL ASFALTO ORIGINAL

Como se mencionó en la sección 3.3.3, los asfaltos están constituidos por una fracción malténica y por el método S.A.R.A. se separa en tres componentes: resinas, aromáticos y saturados. En la tabla 19 se enseñan las absorciones UV-Vis para la fracción malténica del asfalto original.

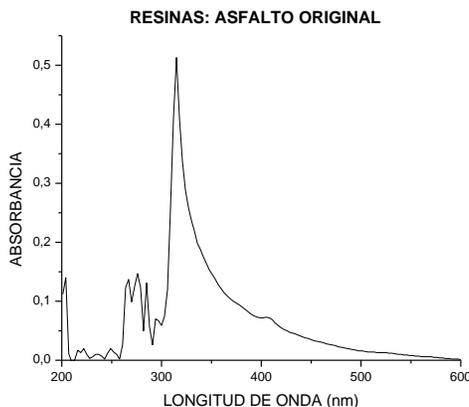
Tabla 19. Absorciones de los espectros UV-Vis para fracción malténica del asfalto original

Fracción malténica	Absorciones (nm)
Resinas	260-300-350-400
Aromáticos	325
Parafinas o saturados	290-320-340-400

3.3.5.1 Análisis del espectro Ultravioleta–Visible para Resinas

Las bandas de absorción debidas a las transiciones electrónicas propias de las resinas, se presentan en el espectro UV-Vis de la figura 35 y las absorciones se encuentran en la tabla 19.

Figura 35. Espectro UV–Vis de resinas del asfalto original



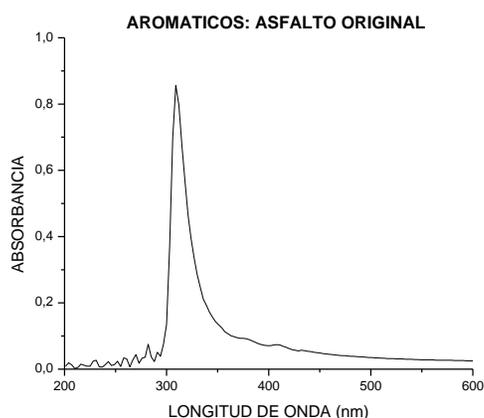
Las bandas presentes alrededor de 260 nm, son causadas por absorciones del solvente empleado (mezcla tolueno/acetona en relación 1:1), teóricamente se encuentran a 261 nm para el tolueno y 279 nm para la acetona. Entre 300 y 350 se encuentra una banda intensa, que indica la presencia de cromóforos de benceno, debida a transiciones tipo $\pi \rightarrow \pi^*$, de la banda B (bencenoide), ya que las resinas se componen de muchos grupos aromáticos derivados del benceno, entre ellos, el fenol, xilenol y cresol, dichas transiciones son ocasionadas por los electrones pi conjugados, que existen en las cadenas de anillos aromáticos policonjugados. Teniendo en cuenta que las resinas contienen grupos

auxocrómicos (OH, NH₂) en los anillos aromáticos, hay un desplazamiento hacia longitudes de onda mayores de las bandas E (etilénica) y B (bencenoide), producidos por los pares de electrones libres, capaces de interactuar con los electrones pi del anillo, estas bandas son causadas por las transiciones $n \rightarrow \pi^*$ y se encuentran a 400 nm, de la figura 35.

3.3.5.2 Análisis del espectro Ultravioleta-Visible para aromáticos

En la figura 36 se muestra el espectro UV-Vis de la fracción aromática del asfalto original, teniendo en cuenta los datos de la tabla 19.

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



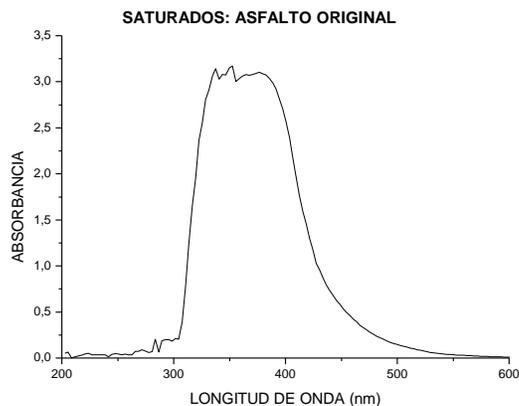
La banda de absorción intensa, presente a 325 nm, es ocasionada por cromóforos de benceno, cuya banda teórica es de 290 nm, lo que indica que hay un efecto batocrómico, producido por transiciones de tipo $\pi \rightarrow \pi^*$, debidas a bases nitrogenadas presentes en los grupos aromáticos del asfalto, ya que poseen heteroátomos como nitrógeno, formando moléculas de pirrol, piridina, indol, quinolina y porfirina.

3.3.5.3 Análisis del espectro Ultravioleta-Visible para parafinas o saturados

Las transiciones ocasionadas en la fracción de saturados del asfalto original, se presenta en la figura 37, por medio de bandas de absorción, cuyos valores se encuentran en la tabla 19.

Los hidrocarburos saturados solamente presentan enlaces de tipo σ , por esto solo son posibles transiciones $\sigma \rightarrow \sigma^*$ muy energéticas; sus bandas características se encuentran en la región del ultravioleta vacío, ya que son transparentes en la región del ultravioleta cercano no se presentan en el espectro de la figura 37.

Figura 37. Espectro UV-Vis de saturados del asfalto original



Las bandas observadas en el espectro UV-Vis de saturados del asfalto original, se presentan a longitudes de onda mayores a las esperadas, debido a que las parafinas o saturados del asfalto presentan tanto cadenas lineales como cíclicas, que provocan un desplazamiento de dichas bandas hacia la región del ultravioleta cercano, otra razón por la cual existe este desplazamiento, es por la posible presencia de heteroátomos en medio de su estructura, tales como, nitrógeno, azufre, oxígeno entre otros, que poseen electrones no enlazados del tipo n, provocando transiciones $n \rightarrow \sigma^*$ y $\sigma \rightarrow \sigma^*$, las primeras se encuentran a mayor longitud de onda.

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.

3.4 ANALISIS DEL ASFALTO MODIFICADO CON LATEX AL 1%, 3% Y 5%

Como se mencionó anteriormente, el asfalto es un compuesto termoplástico, complejo, derivado de la refinación del petróleo crudo. Este es un material de gran importancia para la industria de la construcción por sus propiedades de consistencia, adhesividad, impermeabilidad y durabilidad, y sobre todo por el bajo costo.

Este material es muy susceptible a los cambios de temperatura, sufre envejecimiento por intemperismo, es afectado por la oxidación y la fotodegradación, quebradizo a bajas temperaturas y fluye a temperaturas un poco arriba de la temperatura ambiente, además de tener una baja recuperación elástica, lo que limita ampliamente su rango de utilidad.

Para mejorar substancialmente las propiedades del asfalto, este tiene que ser aditivado o modificado. Una de las formas de mejorar sus propiedades es la modificación con polímeros, en este caso, con el látex natural.

Como se mencionó en la sección 2.1.3 se realizaron tres modificaciones en el asfalto con diferente concentración del látex al 1 %, 3 % y 5%, llevando a cabo el procedimiento de la figura 16.

Durante el proceso de la modificación se pudo observar que el látex fácilmente se integraba a la mezcla asfáltica, lo que al parecer indica buena compatibilidad con el asfalto original, ya que se disolvía rápidamente en dicho material, sin embargo, es necesario realizar diferentes análisis, como lo son, microscopía electrónica de fluorescencia, propiedades físicas, espectroscopía FTIR y UV-Vis.

3.4.1 ANALISIS DEL ASFALTO MODIFICADO CON LATEX AL 1%, 3% Y 5% POR MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE FLUORESCENCIA

Con el fin de mejorar las propiedades químicas y físicas del asfalto proveniente de la refinería de Barrancabermeja se realizó la aditivación del asfalto con el látex. En este caso se analizó la variación en las propiedades del asfalto con el látex natural.

Para iniciar, se realizó un estudio de la mezcla asfalto-látex mediante la técnica de microscopía de fluorescencia, para determinar la homogeneidad de dicha mezcla. Estas microfotografías se encuentran en la figura 38.

Figura 38. Microfotografías del asfalto modificado con látex al 1%, 3%, 5% y 10 %



Asfalto-Látex 1%



Asfalto-Látex 3%



Asfalto-Látex 5%



Asfalto-Látex 10%

En las microfotografías de la figura 38, se observa homogeneidad en las tres primeras mezclas, lo que indica, que hay una buena compatibilidad entre el polímero del látex y el asfalto, sin embargo, es necesario tener en cuenta las propiedades físicas, químicas y reológicas que presenta este material.

Además de la modificación del asfalto con látex al 1%, 3% y 5%, se realizó al 10%, con el fin de observar el comportamiento del polímero en mayor cantidad en el asfalto. La microfotografía muestra un gran cambio en cuanto a la homogeneidad, con respecto a las tres anteriores, debido a la presencia de fases, indicando una separación del polímero y el asfalto. La falta de homogeneidad en esta microfotografía puede ser atribuida al exceso de polímero que en el proceso de mezclado no alcanzó a reaccionar completamente y por ello hubo precipitación. Debido a esto, la mezcla asfalto látex 10% se descartó, sin realizar las demás pruebas, ya que a esta concentración no hay estabilidad del polímero en el asfalto, a las condiciones establecidas en la modificación.

3.4.2 ANALISIS DE LAS PROPIEDADES FISICAS DEL ASFALTO MODIFICADO CON LATEX AL 1%, 3% Y 5%

Los asfaltos modificados con polímeros presentan propiedades reológicas diferentes a la del cemento asfáltico original, por lo tanto, se hace necesario realizar los ensayos físicos, para determinar su comportamiento. En la tabla 20 se encuentran los datos de las propiedades físicas realizadas para el asfalto modificado con látex al 1%, 3% y 5%.

Tabla 20. Propiedades físicas de consistencia del asfalto modificado con látex al 1%, 3% y 5%.

PROPIEDAD FISICA	Asfalto original	Asfalto-Látex 1 %	Asfalto-Látex 3 %	Asfalto-Látex 5 %
Viscosidad a 60° C, 45 min	97391 cP	130972 cP	175769 cP	216000 cP
Penetración a 25° C, 100g, 5s	100	84	76	83
Punto de ablandamiento (agua destilada)	46.1 ° C	45.5° C	48.0° C	48.6° C
Ductilidad a 25° C, 5 cm/min	+100 cm	+100 cm	+100 cm	+100 cm
Recuperación elástica a 25° C	1.7 %	3.9 %	7.0 %	13.0 %

La tabla 20 muestra una tendencia creciente en la **viscosidad** (34-121%), conforme incrementa la cantidad de polímero. La viscosidad es un ensayo de consistencia. Se hace con el fin de determinar sus cualidades o poder ligante a la

temperatura normal en la carretera, ya que cuanto más rígido es el asfalto, mas fuertemente une el agregado en una mezcla asfáltica. Este efecto creciente en la viscosidad, indica que se endurece el asfalto a medida que aumenta la cantidad de látex (polímero).

En cuanto a la **penetración**, existe una tendencia decreciente a medida que aumenta la cantidad de polímero, por lo tanto el látex genera un endurecimiento en el asfalto, lo que puede ser bueno para cierto tipo de asfaltos que son blandos. Sin embargo, esta tendencia se pierde un poco en la última mezcla, ya que en este caso aumenta de nuevo, lo que puede indicar cierta inestabilidad a medida que aumenta la cantidad del modificante.

El ensayo del **punto de ablandamiento** es el método más sencillo para obtener la susceptibilidad térmica de los asfaltos. La consistencia del asfalto cambia con la temperatura, haciéndose mas blando en tiempo cálido y mas duro en tiempo frío; el asfalto expuesto a la intemperie se endurece constantemente como resultado de las influencias del clima. Los cambios de temperatura de punto de ablandamiento en estas mezclas son muy pequeños, indicando un mínimo cambio en la susceptibilidad térmica, sin embargo, los puntos de ablandamiento señalan la máxima temperatura soportada en la carretera, es decir, que no serviría para un clima caliente.

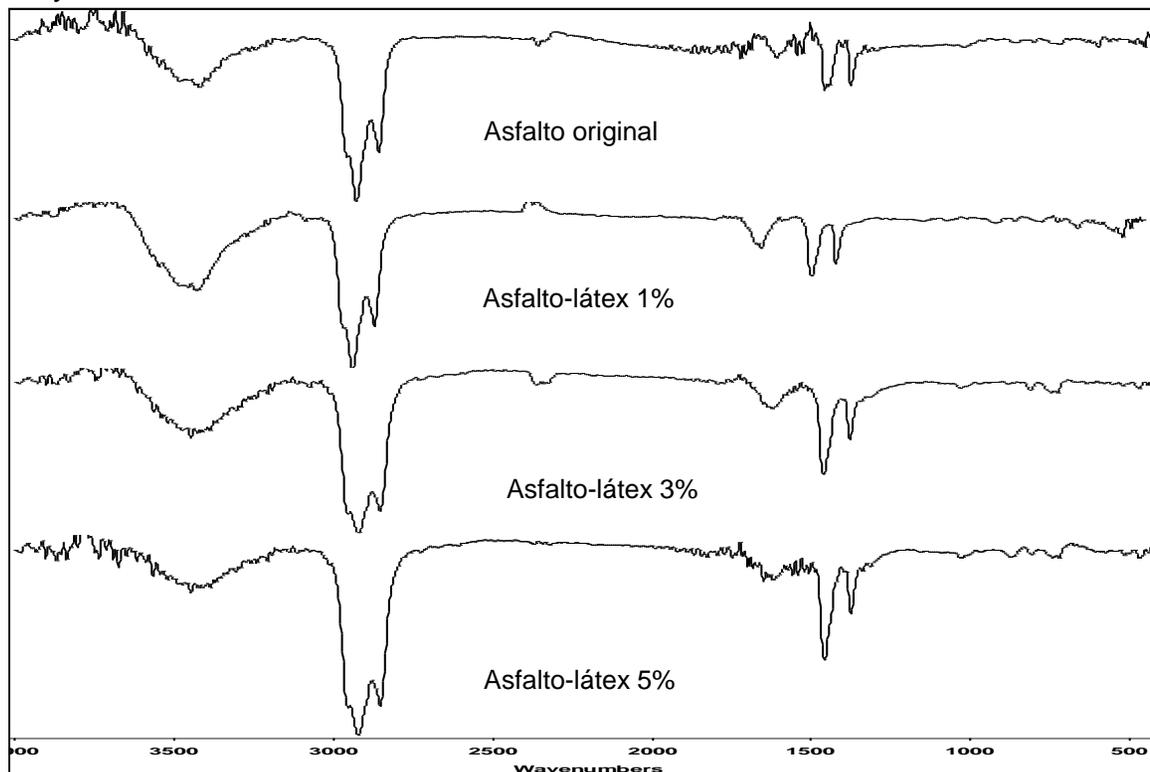
Respecto a la **recuperación elástica por torsión**, se realizó, ya que el polímero empleado es un elastómero. El cambio observado es un incremento de dicha propiedad, a medida que aumenta la cantidad de polímero, por lo tanto, se puede afirmar que este polímero ayuda a disminuir la deformación plástica de la capa asfáltica, causada por el tránsito vehicular.

En el ensayo de **ductilidad**, se obtuvo un valor mayor de 100 cm para todas las mezclas, lo que indica que se encuentran dentro de lo óptimo para asfaltos, ya que el mínimo valor debe ser 100 cm. Con este ensayo se prueba la deformación y capacidad de mantenerse coherente a la capa asfáltica después de ser sometido a la tracción vehicular, que como consecuencia provoca grietas en la carpeta de cemento asfáltico

3.4.3 ANALISIS POR ESPECTROSCOPIA IR DEL ASFALTO MODIFICADO CON LATEX AL 1%, 3% Y 5%

A las mezclas de asfalto con látex al 1%, 3% y 5%, se les realizó un estudio por espectroscopía de absorción infrarroja, para determinar sus principales bandas de absorción y finalmente compararlas con el asfalto original. En la figura 39 se encuentran dichos espectros infrarrojos.

Figura 39. Espectro Infrarrojo del asfalto original y modificado con látex al 1%, 3% y 5%.



En la tabla 21, se tiene una comparación de los grupos funcionales del asfalto original y modificado con látex al 1%, 3% y 5%.

Tabla 21. Bandas características en el infrarrojo del asfalto original, del asfalto modificado con látex al 1%, 3% y 5%.

Banda obtenida (cm ⁻¹)				Origen de la banda
Asfalto original	Asfalto-Látex			
	1%	3%	5%	
3385	3414	3431	3418	Frecuencia de tensión NH
2922	2922	2920	2921	Frecuencia de tensión CH olefínica (RR`C = CH-R)
2852	2852	2852	2852	
1700	–	–	–	Frecuencia de tensión C=O
1613	1633	1619	1649	Frecuencia de tensión C=C aromático
1463	1458	1458	1458	Vibración de flexión C-H intermedio (CH ₂)
1381	1382	1376	1375	Oscilaciones CH terminales (CH ₃)
1014	1032	1030	1031	Frecuencia de tensión, iones con azufre
870 – 810	872, 812	810	874	Metales (Vanadio)
750 – 700	743	743	743	Deformación de balanceo C-H (aromáticos y saturados)
650	650	650	650	Oscilaciones CH intermedios (CH ₂)
606 – 465	573, 465	490	490	Porfirinas -M (V, Fe, Cu, Ni)

En la tabla 21, se tienen las bandas características del asfalto original y asfalto modificado con látex natural al 1%, 3% y 5%. Todas sus bandas coinciden, solo la banda a 1700 cm^{-1} , no se observa en las tres modificaciones. Esta banda es ocasionada por una frecuencia de tensión C=O, debida posiblemente, al oxígeno del ambiente que es el causante del envejecimiento del asfalto, por lo tanto, al no encontrarse en el asfalto modificado, puede indicar que se ha evitado el envejecimiento.

3.5 ANALISIS DEL ASFALTO MODIFICADO AL 1%, 3% Y 5% CON LATEX ADITIVADO CON NH_4OH AL 3%

Con el fin de mejorar el aditivo látex, se realizó una modificación empleando el hidróxido de amonio (NH_4OH) como solvente. Una de las concentraciones utilizadas fue al 3% de hidróxido de amonio (NH_4OH) en el látex, el procedimiento de modificación del látex se menciona en la sección 2.3.1.

Este látex modificado con hidróxido de amonio (NH_4OH), fue adicionado al asfalto en tres concentraciones diferentes, que son al 1%, 3% y 5%, como se ilustra en la figura 17, sección 2.1.3, teniendo en cuenta el procedimiento de la figura 16.

Esta modificación del látex se realizó con el fin de aumentar su solubilidad y evitar que precipitara y/o formara caucho en el momento en que entra en contacto con el asfalto en el proceso de modificación, debido a que este procedimiento requiere de temperaturas altas, y el látex, de acuerdo a lo observado en el estudio físico, tiende a tomar una consistencia blanda y flexible en estas condiciones de temperatura ($140\text{-}160^\circ\text{ C}$).

Después de realizar el anterior proceso de modificación, se observó que a medida que se incrementó el porcentaje de látex modificado en el asfalto, aumentó notoriamente su viscosidad, dificultando la manipulación de este nuevo material.

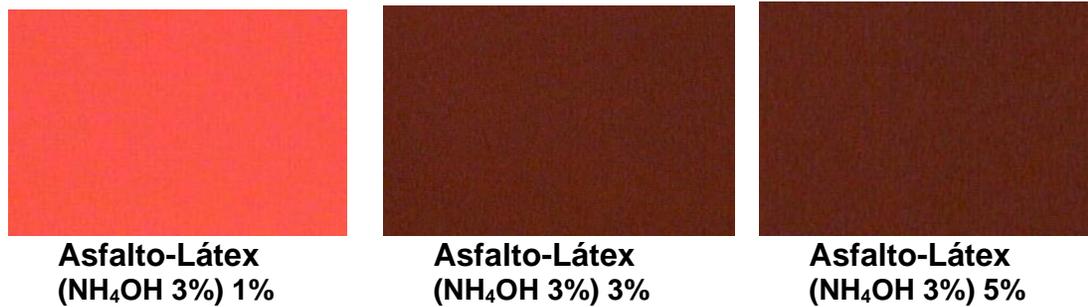
3.5.1 ANALISIS DEL ASFALTO MODIFICADO AL 1%, 3% Y 5% CON LATEX (NH_4OH 3%) POR MICROSCOPIA ELECTRONICA DE FLUORESCENCIA

Una estimación a priori de la compatibilidad del látex y el asfalto, se hace comparando los parámetros de solubilidad del polímero (látex) y del ligante (asfalto), ya que el polímero debe ser suficientemente compatible con el asfalto para no causar la separación de fases durante el almacenamiento, el transporte, el uso y el servicio.

En la figura 40 se muestran las microfotografías del asfalto modificado al 1%, 3% y

5% empleando como aditivo el látex con Hidróxido de Amonio (NH₄OH) al 3%, tomadas en la Unidad de Microscopia Electrónica de la Universidad del Cauca.

Figura 40. Microfotografías del asfalto modificado al 1%, 3% y 5% con látex aditivado con NH₄OH al 3%



Observando el estudio de las microfotografías anteriores, podemos apreciar que el asfalto modificado al 1%, 3% y 5% con látex modificado con hidróxido de amonio (NH₄OH) al 3%, presenta una superficie homogénea que pone de manifiesto la buena dispersión del polímero (látex modificado) en el asfalto.

3.5.2 ANALISIS DE LAS PROPIEDADES FISICAS DEL ASFALTO MODIFICADO AL 1%, 3% Y 5% CON LATEX ADITIVADO CON NH₄OH AL 3%

A cada una de las anteriores muestras de asfalto modificado se les realizó las respectivas pruebas físicas, descritas en la metodología, etapa II: propiedades físicas del asfalto, teniendo en cuenta las respectivas normas establecidas para los asfaltos empleados en vías. Los resultados de estas pruebas físicas se muestran a continuación en la tabla 22.

Tabla 22. Propiedades físicas de consistencia del asfalto modificado al 1%, 3% y 5% con látex aditivado con NH₄OH al 3%.

PROPIEDAD FISICA	Asfalto original	Asfalto-Látex (NH ₄ OH 3%)		
		1 %	3 %	5 %
Viscosidad A 60° C, 45 min	97391 cP	128529 cP	193542 cP	237500 cP
Penetración a 25° C, 100g, 5s	100	85	76	81
Punto de ablandamiento (agua destilada)	46.1 ° C	45.7° C	48.1° C	48.5° C
Ductilidad a 25° C, 5 cm/min	+100 cm	+100 cm	+100 cm	+100 cm
Recuperación elástica a 25° C	1.7%	5.6%	14 %	14.4 %

En la tabla 22 se observa el incremento de la viscosidad (32-144%), a medida que se aumenta el contenido de látex modificado con hidróxido de amonio al 3%.

La tendencia es la misma aunque no tan marcada como en el caso de la viscosidad, para el punto de ablandamiento y recuperación elástica. Se observa que estas dos propiedades aumentan a medida que se incrementa el contenido de polímero modificado (látex con NH_4OH al 3%).

Para el caso de la penetración se presenta una disminución cuando se incrementa el contenido de látex (1% y 3% en el asfalto), pero la penetración aumenta nuevamente cuando se adiciona más cantidad del mismo. Lo que indica que un exceso de polímero en el asfalto no es lo más recomendable ya que tiende a cambiar algunas de sus propiedades físicas.

En el ensayo de ductilidad, en todas las modificaciones se obtuvo un valor mayor de 100 cm, lo que indica que cumple con la norma establecida para asfaltos, que permite como mínimo valor 100 cm.

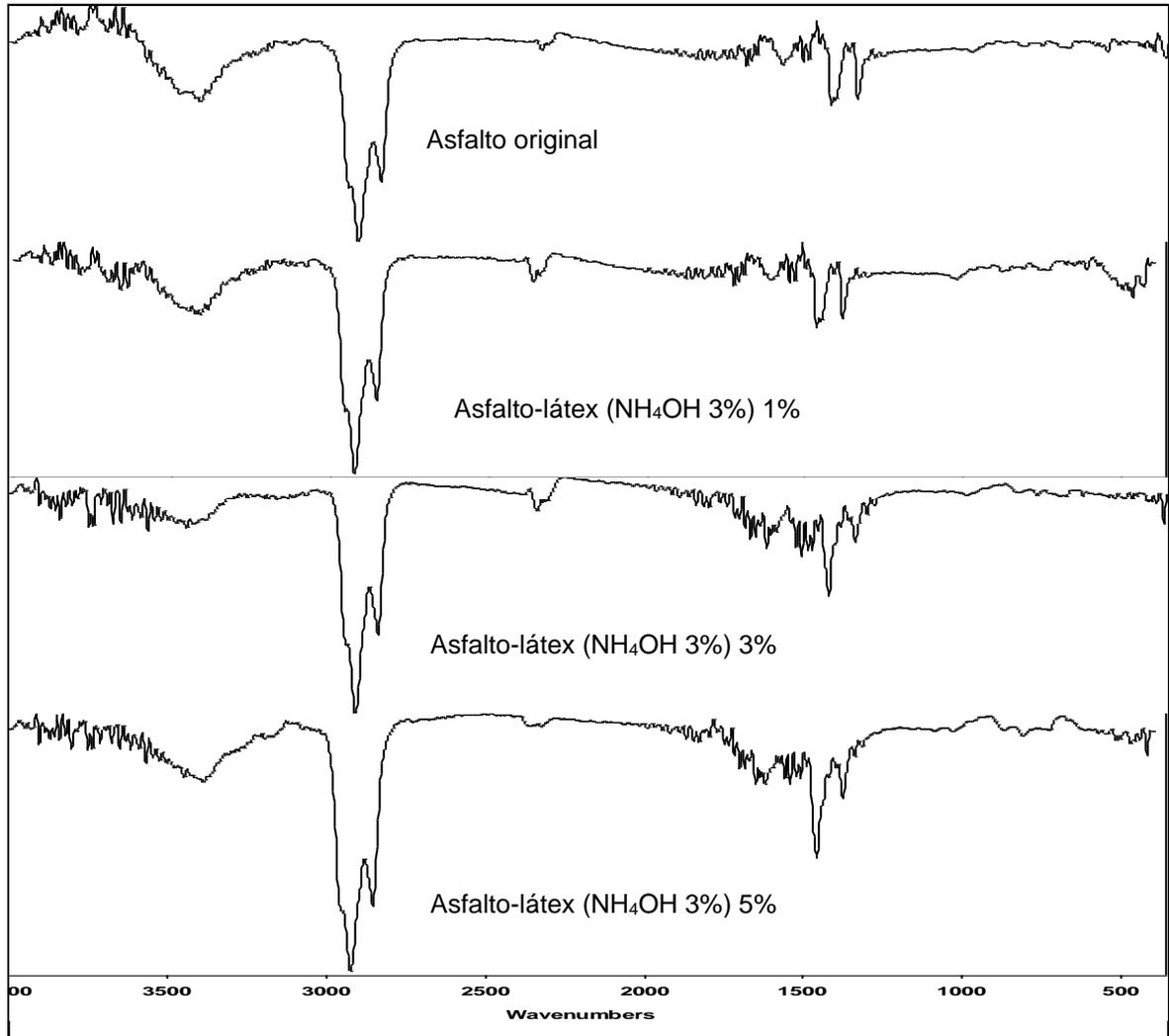
3.5.3 ANALISIS POR ESPECTROSCOPIA IR DEL ASFALTO MODIFICADO AL 1%, 3% Y 5% CON LATEX ADITIVADO CON NH_4OH AL 3%

En la figura 41 se presentan los espectros de infrarrojo del asfalto original y modificado al 1%, 3% y 5% con látex aditivado con NH_4OH al 3%. En la tabla 23 se muestra una lista de las bandas de absorción características para los grupos funcionales más comunes del asfalto original y las respectivas modificaciones.

Tabla 23. Bandas características en el infrarrojo del asfalto original y modificado al 1%, 3% y 5% con látex aditivado con NH_4OH al 3%.

Banda obtenida (cm^{-1})				Origen de la banda
Asfalto original	Asfalto-Látex (NH_4OH 3%)			
	1%	3%	5%	
3385	3411	3409	3385	Frecuencia de tensión NH
2922	2922	2923	2923	Frecuencia de tensión CH olefínica ($\text{RR}'\text{C} = \text{CH}-\text{R}$)
2852	2852	2853	2852	
1700	1725			Frecuencia de tensión C=O
1613	1610	1635	1619	Frecuencia de tensión C=C aromático
1463	1449	1457	1457	Vibración de flexión C-H intermedio (CH_2)
1381	1381	1375	1375	Oscilaciones CH terminales (CH_3)
1014	1022	1020	1025	Iones con azufre
870 – 810	868	812	811, 868	Metales (Vanadio)
750 – 700	733	748	730	Deformación de balanceo C-H (aromáticos y saturados)
650	660	640	645	Oscilaciones CH intermedios (CH_2)
606 – 465	467	500	503, 570	Porfirinas -M (V, Fe, Cu, Ni)

Figura 41. Espectro Infrarrojo del asfalto original y modificado al 1%, 3% y 5% con látex aditivado con NH_4OH al 3%



Como se aprecia en la tabla 23, las bandas representativas del asfalto original están presentes en cada una de las modificaciones del asfalto con látex aditivado con NH_4OH al 3%, sin embargo, algunas de las bandas de IR de los grupos funcionales varían de una modificación a otra, en intensidad y anchura de la banda. Esto puede ser causado por la interacción entre grupos funcionales del asfalto y el látex lo cual origina cambios en la frecuencia e intensidad de las bandas.

3.6 ANALISIS DEL ASFALTO MODIFICADO AL 1%, 3% Y 5% CON LATEX ADITIVADO CON NH₄OH AL 5%

Como ya se explicó en el aparte 3.2 de la modificación del látex y su respectivo análisis, el solvente escogido por preferencia, es el hidróxido de amonio, con el cual se llevó a cabo el procedimiento mencionado en la sección 2.3.1, donde se encuentra la modificación del látex con dicho solvente.

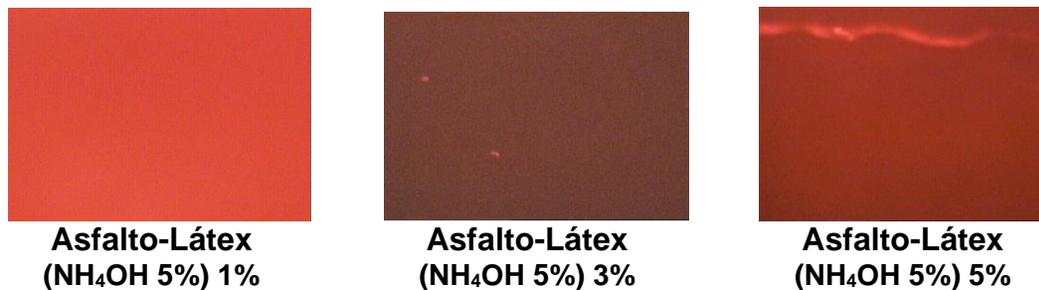
De acuerdo a este procedimiento se modificó el látex con dos concentraciones de hidróxido de amonio (NH₄OH), que son al 3% y 5%. En esta sección se analizó el látex modificado con hidróxido de amonio (NH₄OH) al 5%.

Este modificador se empleó como aditivo en el asfalto a tres concentraciones diferentes, como lo son al 1%, 3% y 5%. El estudio de estas tres mezclas se realizó mediante la microscopia de fluorescencia, las propiedades físicas y espectroscopia IR, para determinar los cambios presentados a medida que aumenta el solvente en el látex modificado.

3.6.1 ANALISIS DEL ASFALTO MODIFICADO AL 1%, 3% Y 5% CON LATEX ADITIVADO CON NH₄OH AL 5%, POR MICROSCOPIA ELECTRONICA DE FLUORESCENCIA

Durante el proceso de aditivación se observó que el material cada vez se volvía más pegajoso, presentando dificultad en el proceso de mezclado, por lo que se realizó un estudio por microscopía de fluorescencia, indicado en la figura 42, para determinar su homogeneidad.

Figura 42. Microfotografías del asfalto modificado al 1%, 3% y 5% con látex aditivado con NH₄OH al 5%.



Con base en las microfotografías de la figura 42, se tiene homogeneidad en la primera mezcla, mientras que en las otras dos no la hay, lo que indica, que un exceso de solvente de hidróxido de amonio (NH₄OH) no es bueno en la mezcla, ya que puede generar incompatibilidad entre el polímero y el asfalto, ocasionado por el aumento de plasticidad que generó precipitación del polímero.

3.6.2 ANALISIS DE LAS PROPIEDADES FISICAS DEL ASFALTO MODIFICADO AL 1%, 3% Y 5% CON LATEX ADITIVADO CON NH₄OH AL 5%

Para poder comprobar este comportamiento de las mezclas fue necesario realizar un análisis de las propiedades físicas, que se encuentran en la tabla 24.

Tabla 24. Propiedades físicas de consistencia del asfalto modificado al 1%, 3% y 5% con látex aditivado con NH₄OH al 5%.

PROPIEDAD FISICA	Asfalto original	Asfalto-Látex (NH ₄ OH 5%)		
		1 %	3 %	5 %
Viscosidad a 60° C, 45 min	97391 cP	128235 cP	167143 cP	255000 cP
Penetración a 25° C, 100g, 5s	100	86	89	83
Punto de ablandamiento (agua destilada)	46.1 ° C	45.8° C	48.5° C	48.7° C
Ductilidad a 25° C, 5 cm/min	+100 cm	+100 cm	+100 cm	+100 cm
Recuperación elástica a 25° C	1.7 %	8.8 %	18.0 %	22.2 %

Con respecto a la tabla 24, se tiene un incremento en la viscosidad conforme aumenta la cantidad de látex modificado con NH₄OH al 5%, es decir, que se endurece.

La penetración en estas modificaciones es muy variable, sin embargo, se encuentran en valores muy cercanos y en comparación con el asfalto original se endurecen.

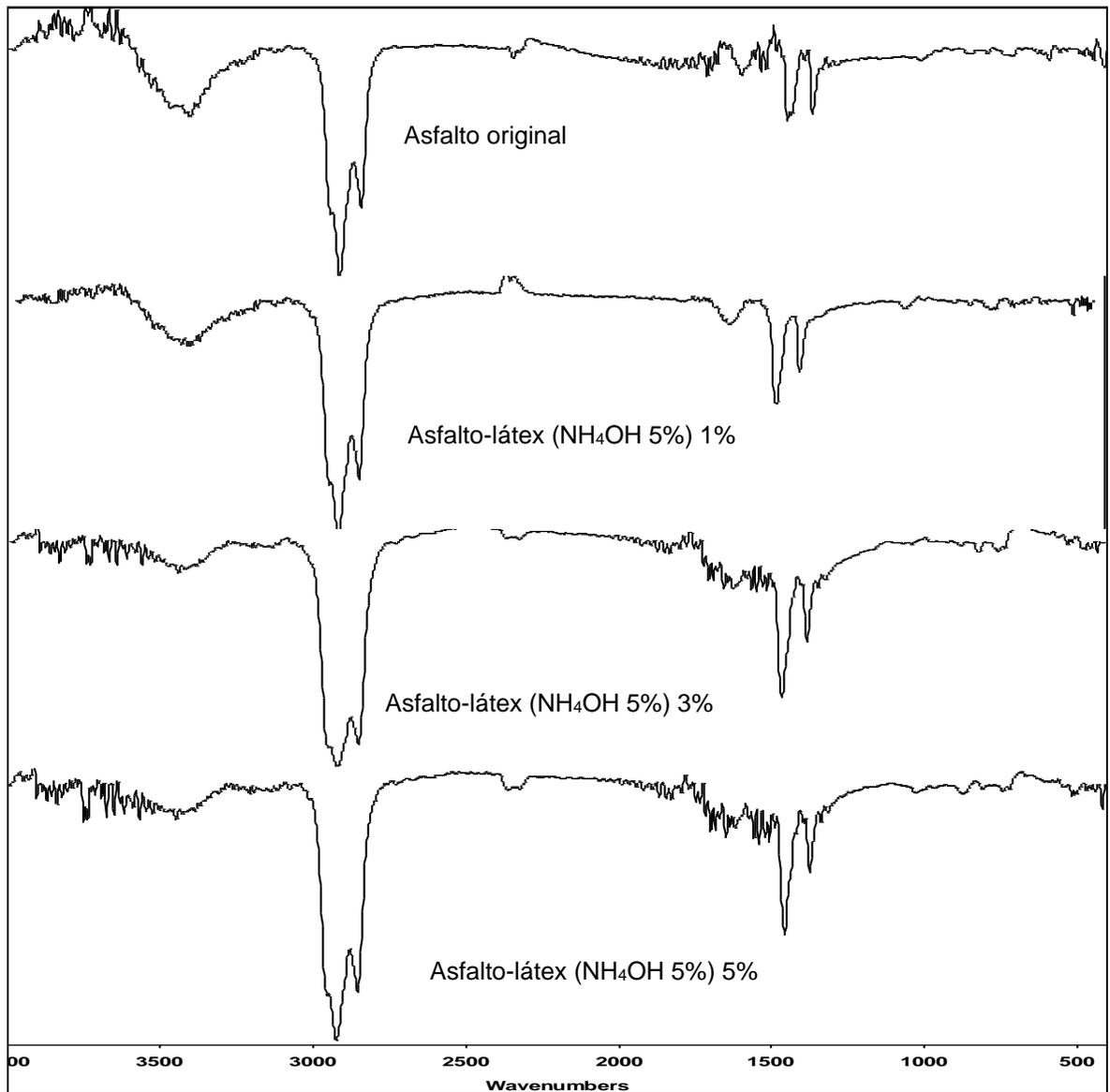
En cuanto al punto de ablandamiento, tiene una tendencia creciente, al aumentar el modificador, lo que indica que cada vez soporta mas el aumento en la temperatura, debido al endurecimiento que se ha ocasionado.

La recuperación elástica también aumenta, permitiendo una mayor resistencia a la deformación en la pavimentación. Este efecto es muy bueno, al igual que la ductilidad, y se corrobora con lo mencionado anteriormente del aumento en la plasticidad, causado por la mayor adición de solvente.

3.6.3 ANALISIS POR ESPECTROSCOPIA IR DEL ASFALTO MODIFICADO AL 1%, 3% Y 5% CON LÁTEX ADITIVADO CON NH₄OH AL 5%

En el análisis por espectroscopia de absorción infrarroja, se realizó al igual que en las modificaciones anteriores una comparación con el asfalto original para determinar sus principales bandas de absorción. En la figura 43 se encuentran los espectros infrarrojos.

Figura 43. Espectro Infrarrojo del asfalto original y modificado al 1%, 3% y 5% con látex aditivado con NH₄OH al 5%.



En la tabla 25, se tiene la comparación de las bandas representativas del asfalto original y modificado al 1%, 3% y 5%. con látex aditivado con NH₄OH al 5%.

Tabla 25. Bandas características en el infrarrojo del asfalto original y modificado al 1%, 3% y 5% con látex aditivado con NH₄OH al 5%.

Asfalto original	Banda obtenida (cm ⁻¹)			Origen de la banda
	Asfalto-Látex (NH ₄ OH 5%)			
	1%	3%	5%	
3385	3413	3450	3446	Frecuencia de tensión NH
2922	2922	2923	2922	Frecuencia de tensión CH olefínica (RR`C = CH-R)
2852	2852	2852	2852	
1700	–	1699	1699	Frecuencia de tensión C=O
1613	1615	1649	1649	Frecuencia de tensión C=C aromático
		1540	1507	
1463	1458	1458	1457	Vibración de flexión C–H intermedio (CH ₂)
1381	1379	1375	1375	Oscilaciones CH terminales (CH ₃)
1014	1030	1030	1030	Frecuencia de tensión, iones con azufre
870 – 810	812	810	878	Metales (Vanadio)
750 – 700	723	724	723	Deformación de balanceo C-H (aromáticos y saturados)
650	661	640	640	Oscilaciones CH intermedios (CH ₂)
606 – 465	554-465	518	540	Porfirinas –M (V, Fe, Cu, Ni)

Basándose en la tabla 25, donde se realiza una comparación con el asfalto original, se observa la presencia de las mismas bandas de absorción, indicando que las propiedades químicas del asfalto no varían significativamente. Aunque algunas bandas se desplazan, debido, a las interacciones ocasionadas por el nuevo aditivo que es el látex modificado con NH₄OH al 5%.

3.7 ANALISIS DE LAS MUESTRAS DE ASFALTO MODIFICADO CON LATEX AL 3% Y CON LATEX ADITIVADO CON NH₄OH AL 3%, QUE SE EMPLEARON EN EL PROCESO DE ALMACENAMIENTO

Para el procedimiento de almacenamiento, se escogió la muestra de asfalto modificado al 3% con látex aditivado con NH₄OH al 3%, de las mencionadas en las secciones 3.4, 3.5 y 3.6, que por sus características físicas, químicas y reológicas, tuvo buen comportamiento. Sin embargo, este comportamiento se analizó mejor durante el almacenamiento.

La muestra de asfalto modificado al 3% con látex aditivado con NH₄OH al 3%, se comparó con la muestra de asfalto modificado con látex al 3% (sin solvente), con el fin de estudiar el efecto del solvente en la mezcla; además estas dos muestras se compararon con el asfalto original (sin aditivo).

La muestra de asfalto modificado al 3% con látex aditivado con NH₄OH al 3%, se seleccionó como óptima, debido a los resultados obtenidos así:

- El estudio por microscopia de fluorescencia, donde se obtuvo una mezcla homogénea, lo que indica una buena compatibilidad en el sistema asfalto aditivo (asfalto modificado al 3% con látex aditivado con NH₄OH al 3%).
- En los ensayos realizados para las propiedades físicas, se tiene un mejoramiento en cuanto a ductilidad, recuperación elástica, viscosidad y penetración, sin que estos cambios fueran excesivamente grandes. Además, se encuentra dentro de los rangos óptimos para asfaltos empleados en vías, (ver anexos).
- Un aspecto a destacar en la muestra de asfalto modificado al 3% con látex aditivado con NH₄OH al 3%, es el buen manejo en el proceso de mezclado, ya que las otras modificaciones presentan una difícil manipulación, debido al incremento en la viscosidad y la plasticidad, a medida que se incrementó el polímero y el solvente. Por el contrario, con las muestras que contienen bajo contenido de polímero y solvente, no se observaron cambios significativos, como para ser seleccionados.

La modificación de asfalto con látex al 3%, se escogió para el proceso de almacenamiento, con el fin de establecer una comparación del comportamiento del polímero con y sin solvente.

3.7.1 ANALISIS DEL ASFALTO MODIFICADO CON LATEX AL 3%: DIA CERO.

Esta muestra de asfalto modificado, se escogió con el fin de observar el comportamiento del polímero sin solvente antes y durante el proceso de almacenamiento. El análisis se realizó empleando el método S.A.R.A., espectroscopia de absorción FTIR y espectroscopia de UV-Vis.

3.7.1.1 ANALISIS DE LAS PROPIEDADES QUIMICAS DEL ASFALTO MODIFICADO CON LATEX AL 3% (SARA).

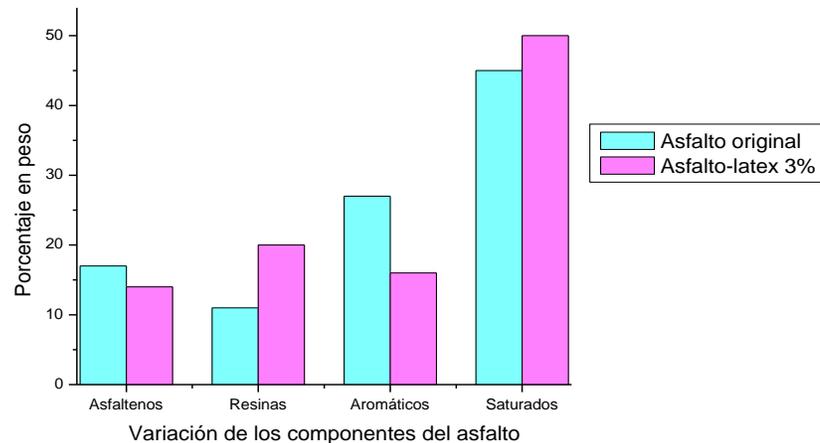
El método S.A.R.A., se empleó para la muestra de asfalto modificado con látex al 3%, después de ser preparado, como se indica en la sección 2.1.3, es decir, el día cero. En la tabla 26 se encuentran consignados los datos.

Tabla 26. Características de las fracciones separadas del asfalto original y modificado con látex al 3% por cromatografía de columna.

Muestra	Asfaltenos	Resinas	Aromáticos	Saturados
Asfalto original	17 %	11 %	27 %	45 %
Asfalto-Látex 3%	14 %	20 %	16 %	50 %

La tabla 26 muestra, una disminución en los asfaltenos y aromáticos, mientras que en las resinas y en los saturados se incrementan, lo que puede ser un indicio que parte del polímero se unió a la fracción resínica y a la fracción de saturados, esta diferencia se ve mucho mas marcada en la figura 44.

Figura 44. Variación del contenido de asfaltenos y maltenos en el asfalto original y modificado con látex al 3%, antes del almacenamiento: día cero



Con la disminución de asfaltenos, el envejecimiento se reduce, puesto que en los asfaltenos se concentran compuestos indeseables para el asfalto, como azufre y metales pesados.

Los maltenos están constituidos por anillos aromáticos, anillos nafténicos y cadenas parafínicas, por lo general existe mayor proporción de maltenos que asfaltenos, siendo estos quienes le dan la calidad al asfalto, es decir, que la naturaleza química de los maltenos regula en gran parte las propiedades químicas de los asfaltos.

Los asfaltenos son intrínsecamente muy adherentes, pero al estar rodeados de una cortina de resinas no intervienen directamente en la adherencia a los materiales pétreos. Su presencia es fundamental en las propiedades mecánicas del asfalto, pues el alto poder de adsorción de las resinas, proporciona a su núcleo una alta rigidez.

Los asfaltenos son los responsables de la dureza en el asfalto. Las resinas le proporcionan sus características cementantes o aglutinantes, son muy adherentes junto con los aromáticos y ácidos nafténicos. Los saturados le dan la consistencia necesaria para hacerlos trabajables y aumentar plasticidad al material.

Los saturados protegen al asfalto de la oxidación debido a su gran estabilidad química. Por lo tanto con este modificador, donde se incrementa la cantidad de

saturados, será mas resistente al envejecimiento, es decir, más durable, pero será igualmente muy deformable a temperaturas ordinarias.

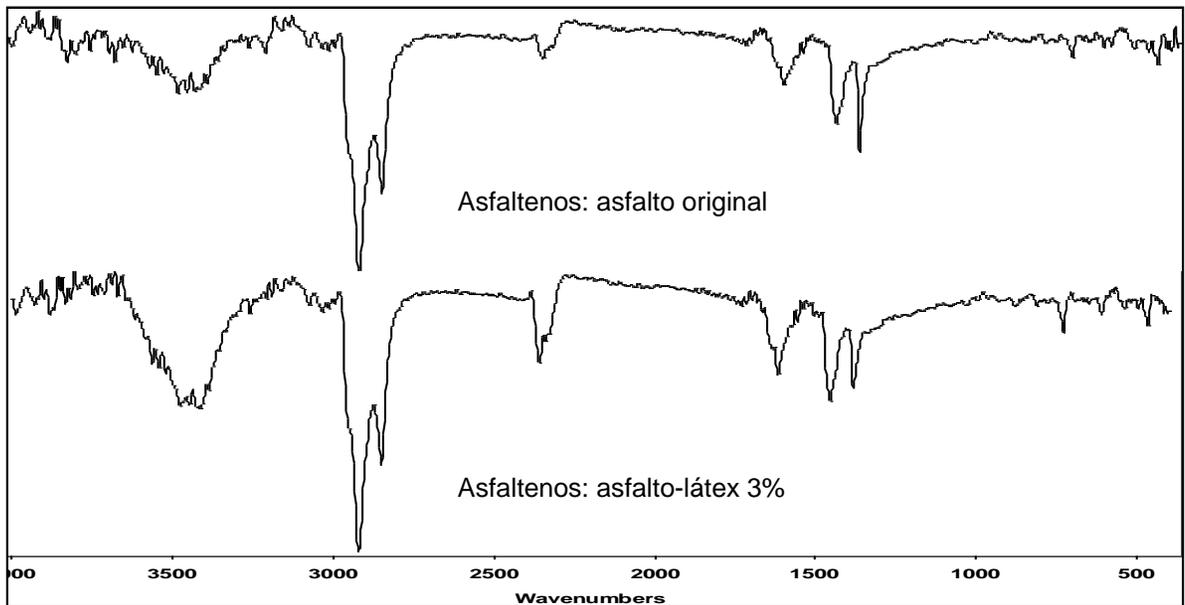
3.7.1.2 ANALISIS DE ESPECTROSCOPIA IR PARA LAS FRACCIONES ASFALTENICA Y MALTENICA DEL ASFALTO MODIFICADO CON LATEX AL 3%.

Con el fin de realizar un análisis previo de reacción entre el polímero y las fracciones del asfalto, se llevó acabo el análisis por espectroscopia de absorción infrarroja, además para complementar con el anterior análisis del S.A.R.A.

3.7.1.2.1 Análisis de espectroscopia Infrarroja para asfaltenos

La fracción de asfaltenos del asfalto modificado con látex al 3%, se analizó por espectroscopia de absorción infrarroja, para observar sus principales bandas de los grupos funcionales. Este espectro aparece en la figura 45.

Figura 45. Espectro Infrarrojo de Asfaltenos del asfalto original y modificado con látex al 3%.



Al comparar los espectros de la figura 45, correspondientes a los asfaltenos del asfalto original y modificado con látex al 3%, respectivamente, la tabla 27, muestra la coincidencia de bandas.

Tabla 27. Bandas características del espectro Infrarrojo para asfaltenos del asfalto original y modificado con látex al 3%.

Banda obtenida (cm ⁻¹)		Origen de la banda
Asfalto original	Asfalto-Látex 3%	
3447	3412	Hombro de tensión asimétrica -N-H
3020	3030	Frecuencia de tensión C-H aromático.
2920, 2849	2920, 2849	Banda de tensión -C-H producida por -CH ₃ , -CH ₂ , -CH, CHO
1615	1633	Tensión C=C de anillos aromáticos
1539	1530	Bandas con intensidad variables, vibración de tensión del C=C
1490	1490	Vibración de deformación N-H en tijera, débil, de amina secundaria
1454 1383	1454 1382	Banda de deformación del -C-H de metilenos.
862	863	Vibración de flexión C-H fuera del plano de un naftaleno β-sustituido
728	728	Deformación de C-H aromático, fuera del plano.
608	609	Vibración de tensión C-S banda débil.
474-421	474-421	Vibración de tensión del -C-S, cuando esta conjugado, banda débil.
465	465	Vibración de flexión C-H aromáticos sustituidos
465 - 606	465 - 606	Porfirinas -M (V, Fe, Cu, Ni)

Como se mencionó en la sección 1.4.2.5 los asfaltenos son moléculas de alto peso molecular y se caracterizan por poseer átomos, tales como, azufre, nitrógeno y oxígeno, además de contener metales pesados como Vanadio, Hierro y Níquel. En la tabla 27 no se observan cambios significativos, de las bandas correspondientes a los asfaltenos que se muestran en los espectros de la figura 45.

Diversos estudios muestran que los asfaltenos están formados por sistemas de anillos aromáticos polinucleares, rodeados de cadenas alquílicas, este carácter aromático tan marcado se observa en la tabla 27, con las bandas características de los aromáticos como lo son, la vibración de Tensión C=C de anillos aromáticos, ubicada a 1633 cm⁻¹, esto se corrobora con las bandas de vibración de tensión del C=C con intensidad variable a 1530 cm⁻¹, además de las bandas de deformación de C-H aromático, fuera del plano a 728 cm⁻¹ y la vibración de flexión C-H para aromáticos sustituidos. También se encuentra una banda a 863 cm⁻¹ ocasionada por la vibración de flexión C-H fuera del plano de un naftaleno β-sustituido, que indica la presencia de los anillos aromáticos polinucleares, esta banda es de baja intensidad y puede ser debido a la disminución en la cantidad de asfaltenos en la mezcla.

La presencia de los enlaces de nitrógeno se encuentran con la vibración de tensión asimétrica -N-H a 3412 cm⁻¹, confirmándose con la banda de vibración de deformación N-H en tijera, de amina secundaria a 1490 cm⁻¹, que por ser débil se encuentra solapada con otras bandas.

Las bandas a 609 y 421–474 cm^{-1} , correspondientes a vibraciones de tensión C–S, se caracterizan por ser débiles, por ello se pueden encontrar solapadas, sin embargo, confirman la presencia de azufre en la fracción de asfaltenos, al igual que en el asfalto original, ya que el asfalto por naturaleza contiene este átomo, mientras que el nitrógeno y el oxígeno lo pueden tomar del medio ambiente.

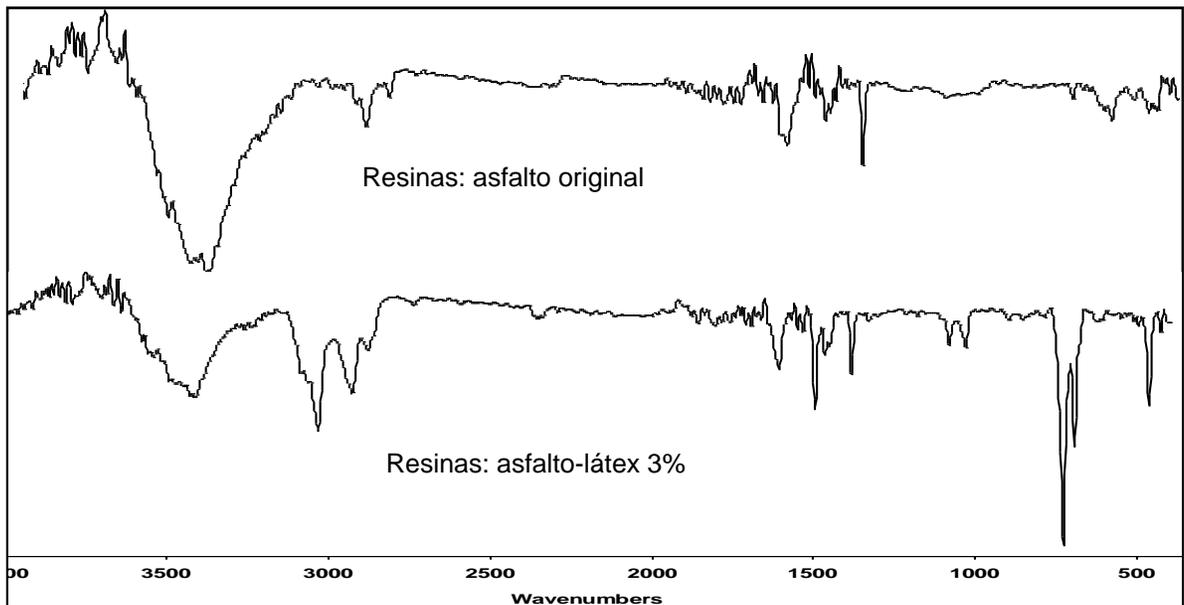
A 2920 y 2849 cm^{-1} se presentan las bandas de tensión –C–H producidas por –CH₃, –CH₂, –CH, CHO, a 1454 y 1382 cm^{-1} las bandas de deformación –C–H de metilenos asimétrica y simétrica, respectivamente.

Los metales pesados, que junto con el azufre conforman los compuestos indeseables del asfalto, se encuentran atribuidos a las bandas ubicadas a 465 – 606 cm^{-1} .

3.7.1.2.2 Análisis de espectroscopia Infrarroja para Resinas

En la figura 46 se muestra el espectro que corresponde al asfalto modificado con látex al 3%, que como se mencionó en la sección 3.7.1.1 es la fracción que se obtuvo en mayor cantidad, mediante el método S.A.R.A.

Figura 46. Espectro Infrarrojo de Resinas del asfalto original y modificado con látex al 3%.



En la figura 46 se observan los espectros de las resinas del asfalto original y modificado con látex al 3%, respectivamente, se comparan en la tabla 28.

Tabla 28. Bandas características del espectro Infrarrojo para Resinas del asfalto original y modificado con látex al 3%.

Banda obtenida (cm ⁻¹)		Origen de la banda
Asfalto original	Asfalto-Látex 3%	
3412	3411	Frecuencia de tensión O-H, N-H
3020	3030	Frecuencia de tensión C-H aromático.
2925, 2852	2926, 2878	Tensión C-H (CH ₃ , CH ₂ , C-H, CHO)
1686-1877	1686-1877	Armónicos, sobretonos de vibración de tensión C=C
1616, 1503, 1482	1605, 1549, 1495	Bandas con intensidad variables, vibración de tensión del C=C aromáticos.
1482	1495	Vibración de deformación N-H en tijera, débil, de amina secundaria
1450	1450	Deformación asimétrica metilenos
1383	1383	Vibración de deformación C-H simétrica
1383	1383	Vibración de tensión del -CO en el plano.
1275	1270	Vibración de deformación de aleteo y torsión del metileno
1126	1130	
1080	1080	Vibración de tensión C-N, C-C y vibración de deformación C-H en el plano.
1030	1030	
677-729	629-728	Deformación en abanico fuera del plano N-H
729, 690	728, 694	Deformación de C-H (Bandas fuertes) aromático, fuera del plano.
608	608	Vibración de tensión C-S
540, 490	463	Vibración de flexión C-H aromáticos sustituidos

En la tabla 28, se tienen algunas coincidencias de las bandas, es decir, los grupos aromáticos, aminos, enlaces C-S, C-H y C-C. Sin embargo, hay cambios con respecto a algunas bandas, como por ejemplo, a 3030 cm⁻¹, en el asfalto modificado se ve mucho mas pronunciada, siendo esta una vibración de tensión C-H aromático, que puede estar solapada por la vibración de tensión O-H, proveniente de un grupo ácido, lo que indica que hubo un aumento en la concentración, debido a la intensidad observada. Este grupo ácido se puede corroborar con la banda presente entre 1761 y 1800 cm⁻¹.

Las bandas ubicadas aproximadamente a 1616, 1503 y 1482 cm⁻¹, son debidas a vibraciones de tensión C=C aromáticos, presentan diferencias en su intensidad, al igual que las bandas entre 1686-1877 cm⁻¹, correspondientes a los armónicos ocasionados por vibraciones de tensión C=C aromáticos, estos sobretonos indican el grado de sustitución en los aromáticos y de acuerdo a su forma pueden ser, mono, Di-o, Di-m, o Di-p, sustituidos, sin embargo, debido a los múltiples picos y solapamiento de bandas no se puede destacar solo uno, y por la complejidad de las moléculas presentes en las resinas, pueden existir uno o mas.

El espectro del asfalto modificado con látex al 3%, presenta una banda con un cambio significativo a 728 cm⁻¹ y es debida a la vibración de deformación de C-H de aromático, fuera del plano, mientras que en las resinas del asfalto original se encuentra a 729 cm⁻¹, pero con una mínima intensidad y esta banda se caracteriza

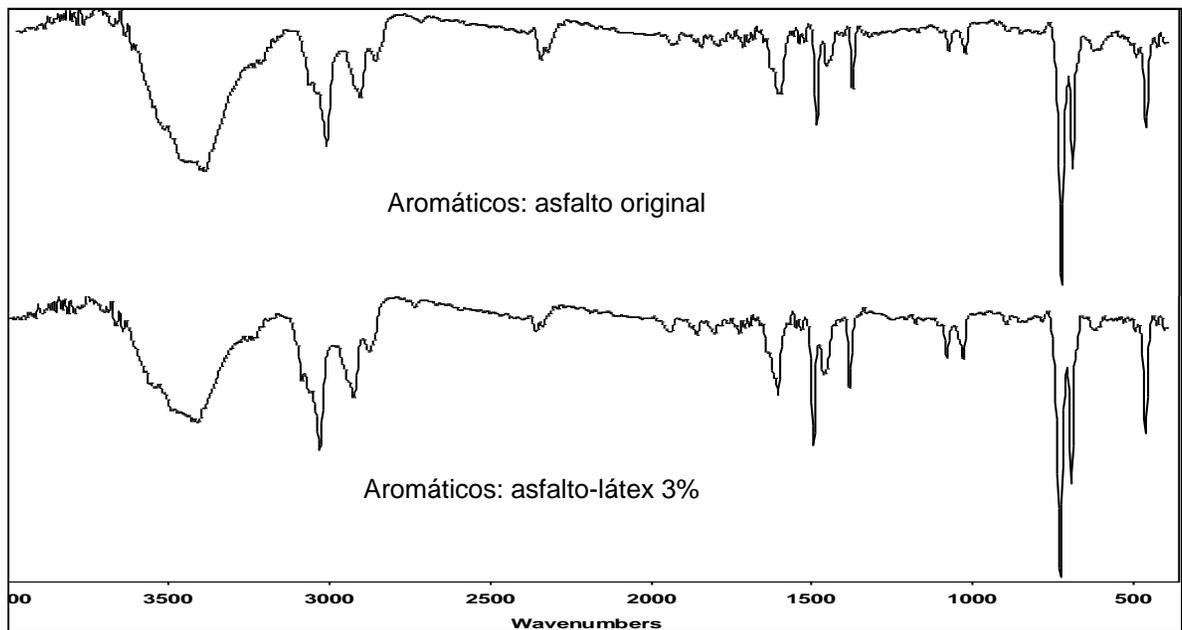
por ser fuerte. Esta banda indica que los grupos aromáticos si están aumentando y se unen en esta fracción de resinas, es decir, que el polímero se cicla de alguna manera para formar aromáticos.

Entre otras bandas se tienen: a 3411 cm^{-1} , que es una vibración de tensión N–H y O–H, la de nitrógeno se corrobora, con la vibración de deformación N–H en tijera, de amina secundaria a 1495 cm^{-1} , débil y con la vibración de deformación en abanico fuera del plano N–H a $629\text{--}728\text{ cm}^{-1}$. La presencia de azufre se tiene a 608 cm^{-1} con la vibración de tensión C–S, esta banda es débil, ya que en las resinas no hay mucho azufre presente.

3.7.1.2.3 Análisis de espectroscopia Infrarroja para aromáticos

Para la fracción de aromáticos se realizó el mismo análisis que para las dos fracciones anteriormente mencionadas. El espectro de esta fracción se tiene en la figura 47.

Figura 47. Espectro Infrarrojo de Aromáticos del asfalto original y modificado con látex al 3%.



En la tabla 29 se tiene una comparación de los espectros de la figura 47, correspondientes a los aromáticos del asfalto original y modificado con látex al 3%, respectivamente.

Tabla 29. Bandas características del espectro Infrarrojo para aromáticos del asfalto original y modificado con látex al 3%.

Banda obtenida (cm ⁻¹)		Origen de la banda
Asfalto original	Asfalto-Látex 3%.	
3410	3425	Vibración de tensión –N–H
3029	3028	Frecuencia de tensión C-H aromático.
2924	2923	Tensión asimétrica C–H (CH ₃ , CH ₂ , C–H, CHO)
2878	2876	Tensión simétrica metilos
2853–2924	2853–2924	Vibración de tensión C-H proporcionada por los ciclohexanos.
1686–1948	1686–1943	Armónicos y sobretonos de vibración de tensión C=C
1615,1533, 1495	1605, 1533, 1495	Bandas con intensidades variables, vibración de tensión de C=C aromáticos.
1495	1495	Vibración de deformación N–H en tijera, débil, de amina secundaria
1463	1462	Deformación asimétrica metilenos
1383	1383	Vibración de deformación C–H simétrica
1383	1383	Vibración de tensión del –CO en el plano.
1080 1030	1080 1030	Vibración de tensión C–N, C–C y vibración de deformación C–H en el plano.
821	820	Vibración de flexión C–H fuera del plano de un naftaleno β-sustituido
694–821	694–821	Deformación en abanico fuera del plano N–H
728 694	728 694	Deformación de C-H (Bandas fuertes) aromático, fuera del plano.
608	608	Oscilaciones C–H intermedios (CH ₂)
463	463	Vibración de flexión C–H aromáticos sustituidos

En la tabla comparativa, al igual que en los asfaltenos no se observan cambios significativos, solo en intensidades, que como ya se había mencionado anteriormente, dependen únicamente de la concentración de la muestra.

Las bandas más representativas observadas en la tabla 29, de la fracción aromática, son de grupos aromáticos y aminos, que son los característicos en esta fracción.

La banda a 3425 cm⁻¹ ocasionada por la vibración de tensión –N–H, representa la presencia de enlaces aminos, y se confirma con las bandas de deformación N–H en tijera, de amina secundaria a 1495 cm⁻¹, y la banda de deformación en abanico fuera del plano N–H a 694–821 cm⁻¹, estas dos son débiles y por ello se encuentran solapadas en la vibración de tensión de C=C de aromáticos y en la vibración de deformación C-H (Bandas fuertes) fuera del plano, de aromático.

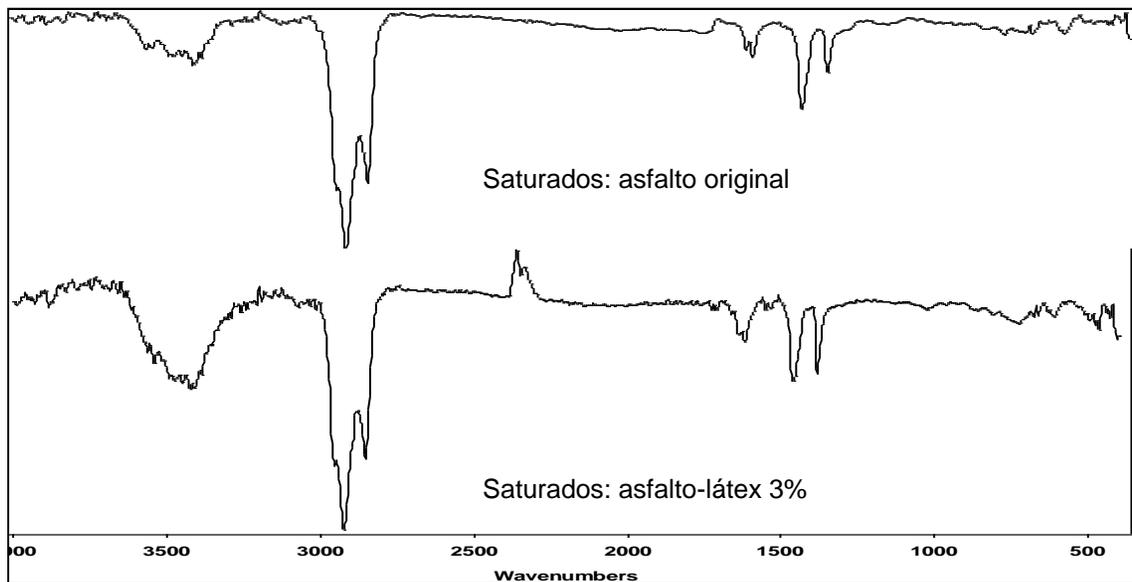
La fracción aromática se caracteriza por tener grupos no polares y por ello la separación con sílice, por lo tanto los grupos presentes son aromáticos no polares y no bencenoides. La vibración de flexión C–H fuera del plano de un naftaleno β-sustituido a 820 cm⁻¹ y la vibración de tensión C-H proporcionada por los

ciclohexanos a $2853\text{--}2924\text{ cm}^{-1}$, son algunos de estos ejemplos. Los grupos aromáticos en este espectro se tienen a 3028 cm^{-1} , ocasionada por la vibración de tensión C-H aromático, las bandas a 1605 , 1533 y 1495 cm^{-1} , debidas a la vibración de tensión de C=C aromáticos con intensidades variables y los armónicos o sobretonos de vibración de tensión C=C a $1686\text{--}1943\text{ cm}^{-1}$. Además de las vibraciones de deformación C-H (Bandas fuertes) aromática, fuera del plano a 728 y 694 cm^{-1} y las vibración de flexión C-H aromáticos sustituidos a 463 cm^{-1} , que son de intensidad mediana a débil y por lo tanto, pueden ser mono, orto, meta o para sustituidos.

3.7.1.2.4 Análisis de espectroscopia Infrarroja para parafinas o saturados

Al igual que en el análisis infrarrojo de los saturados del asfalto original, realizado en la sección 3.3.4.4, en la muestra de asfalto modificado con látex al 3%, también se obtuvo la fracción de saturados, para realizarle un análisis por espectroscopia de absorción IR, como se muestra a continuación en la figura 48.

Figura 48. Espectro Infrarrojo de Saturados del asfalto original y modificado con látex al 3%.



En la tabla 30 se tiene una comparación de las bandas más representativas en los espectros de infrarrojo de la fracción de saturados en el asfalto original y modificado con látex al 3%.

Tabla 30. Bandas características del espectro Infrarrojo para Saturados del asfalto original y modificado con látex al 3%.

Banda obtenida (cm ⁻¹)		Origen de la banda
Asfalto original	Asfalto-Látex 3%.	
2922	2923	Vibración de tensión C–H asimétrica.
2852	2853	Tensión simétrica C–H
1617	1617	Banda de tensión media C–C alifáticos.
1459	1461	Vibración de flexión C–H del ciclopentano y. Deformación asimétrica C–H de metilenos
1377	1382	Vibración de deformación C–H simétrica
725	724	Banda de deformación de balanceo C–H metileno –CH ₂ .
650	610	Oscilaciones C–H intermedios (CH ₂)

También se observa que no hay variación significativa de las principales bandas de los grupos funcionales presentes en los saturados, sin embargo, al comparar con el análisis del método S.A.R.A. del asfalto modificado con látex al 3%, donde hubo un aumento en los saturados, no se observa un gran cambio en las bandas, ya que lo que varía es la cantidad y no los principales grupos funcionales, y las pequeñas diferencias se tienen en las intensidades de dichas bandas.

3.7.1.3 ANALISIS DE ESPECTROSCOPIA UV-VIS PARA LA FRACCION MALTENICA DEL ASFALTO MODIFICADO CON LATEX AL 3%

En la tabla 31 se muestran las absorciones ocasionadas por las transiciones electrónicas de los espectros UV-Vis del asfalto modificado con látex al 3% y se realizó una comparación con el asfalto original, para determinar los cambios presentados.

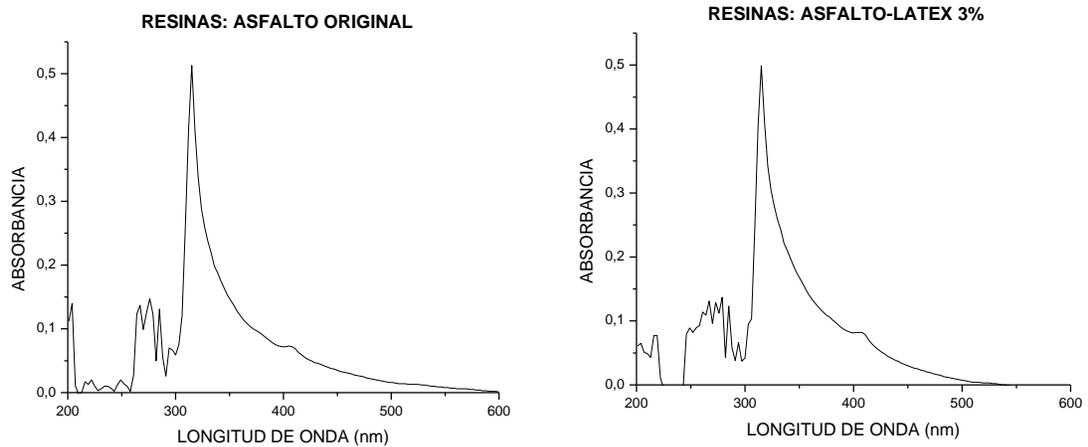
Tabla 31. Absorciones de los espectros UV-Vis para la fracción malténica del asfalto original y modificado con látex al 3%.

Fracción malténica	Absorciones (nm)	
	Asfalto original	Asfalto-látex 3%
Resinas	260-300-350-400	300-350-400
Aromáticos	325	325
Parafinas o saturados	290-320-340-400	340

3.7.1.3.1 Análisis del espectro Ultravioleta–Visible para Resinas

La comparación de los espectros UV-Vis de las resina de asfalto modificado con látex al 3% y original, se presenta en la figura 49 y sus bandas de absorción se encuentran en la tabla 31.

Figura 49. Espectro UV-Vis de resinas del asfalto original y modificado con látex al 3%.

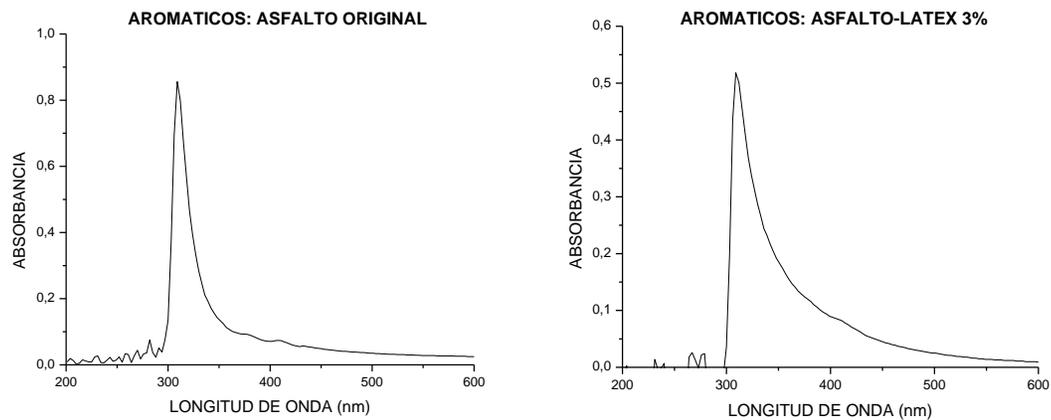


Los espectros de las resinas para el asfalto original y modificado, no presentan diferencias, ya que se mantienen las mismas absorciones; esto indica que las transiciones $\pi \rightarrow \pi^*$ y $n \rightarrow \pi^*$, debidas a los anillos aromáticos y grupos auxocrómicos presentes en esta fracción del asfalto; no son afectadas por el látex adicionado.

3.7.1.3.2 Análisis del espectro Ultravioleta-Visible para aromáticos

En la figura 50 se presentan los espectros UV-Vis para los aromáticos del asfalto original y modificado con látex 3%, cuyas bandas de absorción aparecen en la tabla 31.

Figura 50. Espectro UV-Vis de Aromáticos del asfalto original y modificado con látex al 3%.

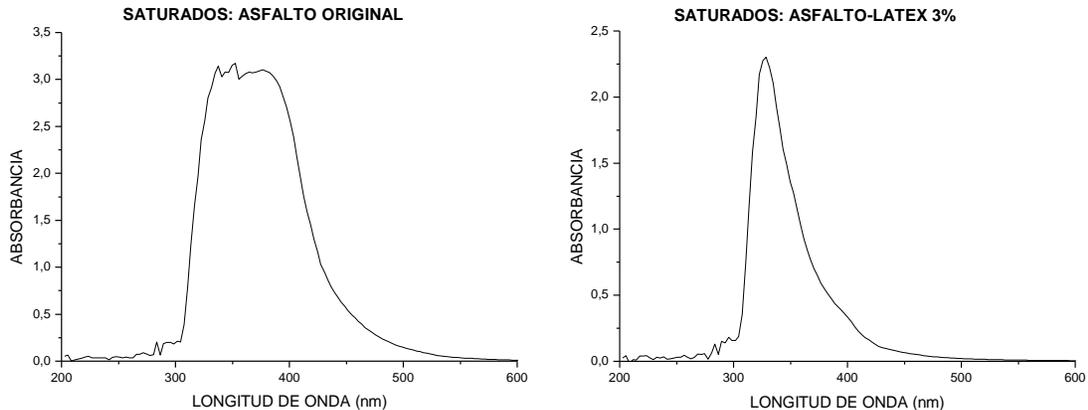


En los espectros de la fracción aromática para el asfalto original y modificado, no se observan cambios, ya que se conservan las bandas ocasionadas por transiciones tipo $\pi \rightarrow \pi^*$ debidas a bases nitrogenadas presentes en los grupos aromáticos del asfalto, por lo tanto se dice que el látex no altera significativamente las transiciones de la fracción aromática del asfalto original.

3.7.1.3.3 Análisis del espectro Ultravioleta-Visible para saturados

En la figura 51 se muestran los espectros de la fracción de saturados para el asfalto original y modificado con látex al 3%, y sus bandas de absorción se presentan en la tabla 31.

Figura 51. Espectro UV-Vis de saturados del asfalto original y modificado con látex al 3%.



La fracción de saturados de los asfaltos original y modificado con látex al 3%, presenta algunos cambios en sus espectros UV-Vis; la banda de absorción a 340 nm es más aguda en el asfalto modificado, mientras que en el original se observa una banda ancha a esta longitud de onda. Sin embargo, dichas absorciones se mantienen desplazadas a longitudes de onda mayores a las esperadas (UV-lejano).

3.7.2 ANALISIS DEL ASFALTO MODIFICADO AL 3% CON LATEX ADITIVADO CON NH₄OH AL 3%: DIA CERO.

Como se mencionó, la concentración de polímero adicionado al asfalto que logró mejorar sus propiedades físicas y químicas fue la del 3% con látex aditivado al 3% con hidróxido de amonio, modificación que logró reducir los efectos de temperatura sobre el polímero.

3.7.2.1 ANALISIS DE LAS PROPIEDADES QUIMICAS DEL ASFALTO MODIFICADO AL 3% CON LÁTEX ADITIVADO CON NH₄OH AL 3%: (SARA).

Para separar las diferentes fracciones del asfalto modificado al 3%, con látex aditivado con NH₄OH al 3% se empleó el mismo procedimiento utilizado en la separación de los componentes del asfalto original descrito en la sección 2.3.4.

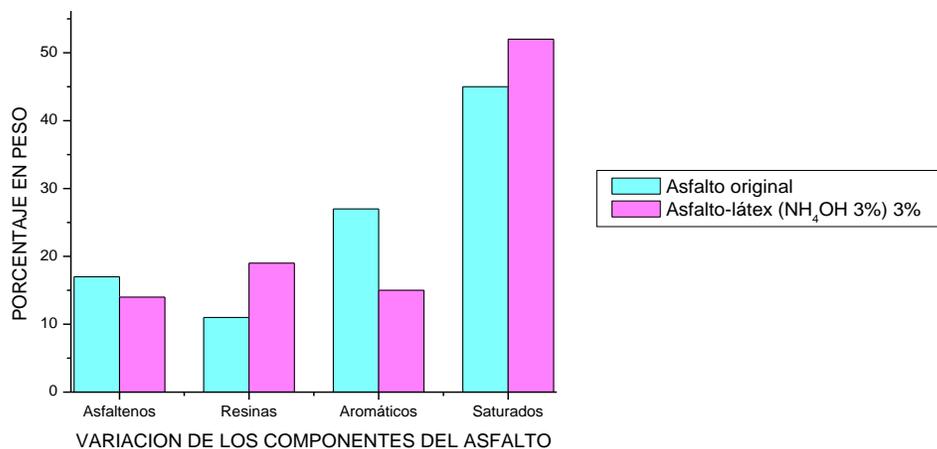
En la tabla 32 se muestran los resultados de cada una de las separaciones realizadas al asfalto original y al asfalto modificado con látex.

Tabla 32. Características de las fracciones separadas del asfalto original y modificado al 3% con látex aditivado con NH₄OH al 3% por cromatografía de columna.

Muestra	Asfaltenos	Resinas	Aromáticos	Saturados
Asfalto original	17 %	11 %	27 %	45 %
Asfalto-látex (NH ₄ OH 3%) 3%	14 %	19 %	15 %	52 %

Comparando los porcentajes obtenidos de las diferentes fracciones del asfalto modificado al 3% con látex aditivado con NH₄OH al 3% con los de las fracciones del asfalto original, se nota el incremento de saturados y resinas, y de la disminución de aromáticos y asfaltenos, lo que indica que el polímero se ha unido a estas fracciones, ya sea ciclado (en las resinas) o lineal (en los saturados). En la figura 52 se observa mucho mejor esta tendencia.

Figura 52. Variación del contenido de asfaltenos y maltenos en el asfalto original y modificado al 3% con látex aditivado con NH₄OH al 3%, al día cero.



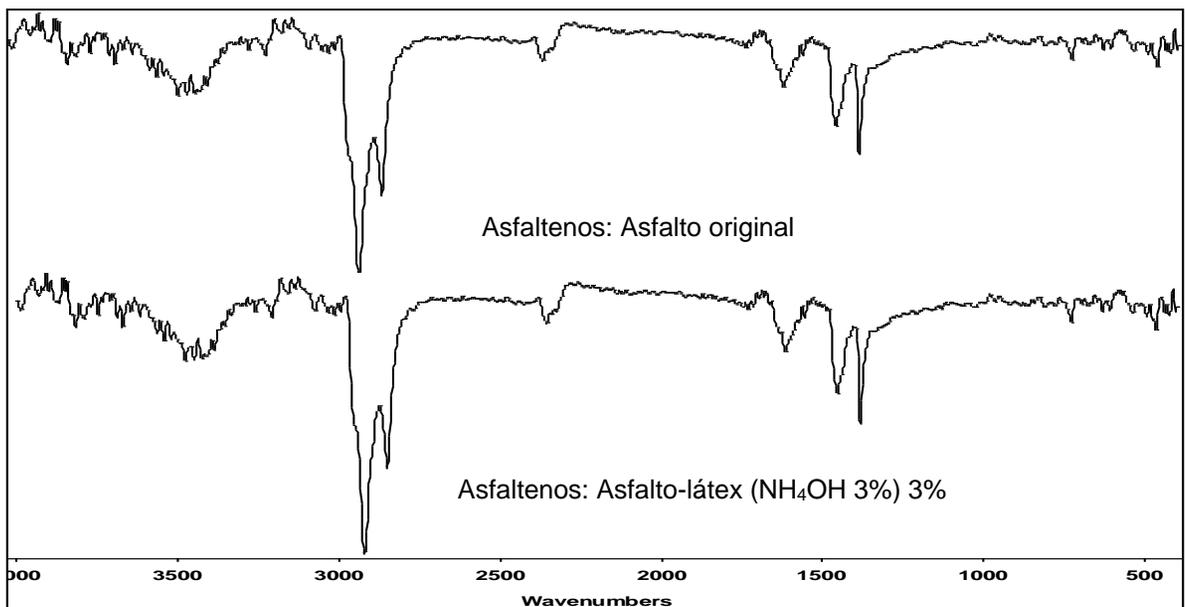
3.7.2.2 ANALISIS DE ESPECTROSCOPIA IR PARA LAS FRACCIONES ASFALTENICA Y MALTENICA DEL ASFALTO MODIFICADO AL 3% CON LATEX ADITIVADO CON NH₄OH AL 3%

Este estudio de espectroscopia infrarroja esta enfocado fundamentalmente a la determinación de grupos funcionales característicos de la fracción asfáltica y malténica del asfalto modificado al 3% con látex aditivado con NH₄OH al 3% para realizar una comparación de las bandas representativas del las fracciones del asfalto original.

3.7.2.2.1 Análisis de espectroscopia Infrarroja para asfaltenos

En la figura 53 se aprecian los espectros infrarrojos de las fracciones asfálticas del asfalto original y modificado al 3% con látex aditivado con NH₄OH al 3%.

Figura 53. Espectro Infrarrojo de Asfaltenos del asfalto original y modificado al 3% con látex aditivado con NH₄OH al 3%.



En la tabla 33 se muestran las bandas características de los grupos funcionales en los asfaltenos del asfalto original y modificado.

Tabla 33. Bandas características del espectro Infrarrojo de asfaltenos del asfalto original y modificado al 3% con látex aditivado con NH₄OH al 3%.

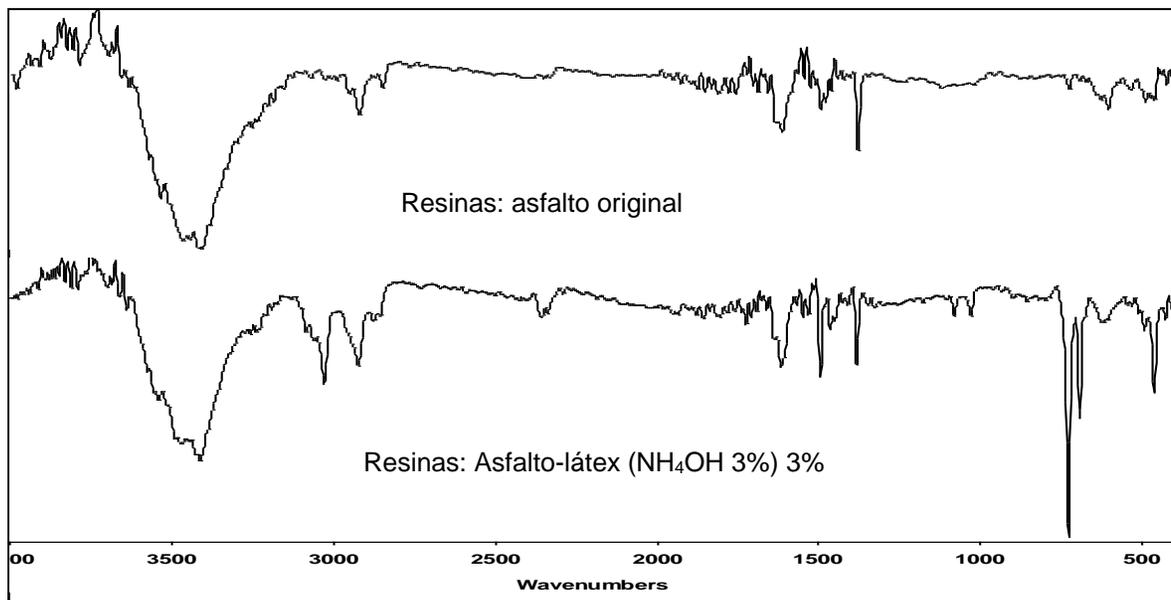
Banda obtenida (cm ⁻¹)		Origen de la banda
Asfalto original	Asfalto-látex 3% (NH ₄ OH 3%)	
3447	3413	Hombro de tensión asimétrica grupos –N–H
2920	2920	Banda de tensión –C–H producida por –CH ₃ , –CH ₂ , –CH, CHO
2849	2849	
3010	3020	Frecuencia de tensión C–H aromático
1615	1617	Tensión C=C de anillos aromáticos
1383	1383	Banda de deformación asimétrica del –C–H metilos.
1454	1454	
862	859	Vibración de flexión C–H fuera del plano de un naftaleno β-sustituido
608	610	Vibración de tensión C–S banda débil.
728, 830	728, 859	Deformaciones del C–H fuera del plano aromático
474-421	498	Vibración de tensión del –C–S, conjugando, débil.

Comparando los espectros de la figura 53, se observa que en ambos aparecen las bandas representativas de los asfaltenos, coincidiendo sus espectros al igual que en el asfalto modificado con látex al 3%, que se muestra en la sección 3.7.1.2.1.

3.7.2.2.2 Análisis de espectroscopia Infrarroja para Resinas

En la figura 54 se observan los espectros de infrarrojo de las resinas del asfalto original y modificado al 3% con látex aditivado con NH₄OH al 3%.

Figura 54. Espectro Infrarrojo de resinas del asfalto original y modificado al 3% con látex aditivado con NH₄OH al 3%.



En la tabla 34 se muestra una lista de las bandas de absorción características para los grupos funcionales más comunes de las resinas.

Tabla 34. Bandas características del espectro Infrarrojo para Resinas del asfalto original y modificado al 3% con látex aditivado con NH_4OH al 3%.

Banda obtenida (cm^{-1})		Origen de la banda
Asfalto original	Asfalto-látex 3% (NH_4OH 3%)	
3412	3412	Frecuencia de tensión O–H, N–H
2925	2924	Vibraciones de tensión C–H (CH_3 , CH_2 , C–H, CHO)
2852	2857	
3090	3060	Frecuencia de tensión C–H aromático
3040	3028	
1686–1729	1720-1960	Armónicos y sobretonos de vibración de tensión C=C
1616	1464	Bandas con intensidad variables, vibración de tensión del C=C aromáticos.
1503	1495	
1434	1616	
1275, 1126	1383	Vibración de deformación de aleteo y torsión del metileno
728–677	790-900	Deformación de abanico fuera del plano N–H
608	629	Vibración de tensión C–S
729	740, 700	Deformaciones del C–H fuera del plano aromático
1110–1290	1080	C–O alcoholes, ácidos carboxílicos
1692–1761	1725	C=O ácidos carboxílicos

Como se aprecia en los espectros de la figura 54 se encuentran varias similitudes en las bandas más representativas de las resinas, sin embargo, también se pueden observar algunas diferencias con respecto a la aparición de nuevas bandas y el cambio en intensidad debido a la interacción entre las moléculas.

Las similitudes se encuentran en la banda intensa y ancha que aparecen en la región de $3000\text{-}3750\text{ cm}^{-1}$ que es característica de frecuencias de tensión de O–H de los grupos fenólicos constituyentes de los ácidos orgánicos que están presentes en las resinas, al igual que las bandas de tensión de los grupos N–H que se encuentran solapadas por las anteriores bandas. Aparecen las bandas a $790\text{-}900\text{ cm}^{-1}$ que corresponden a la deformación de abanico fuera del plano N–H que sobresalen un poco en comparación con las del asfalto original.

A 1080 cm^{-1} se observa la banda de C–O proveniente de alcoholes y ácidos carboxílicos, esta banda se ratifica con la absorción presentada a 1725 cm^{-1} que es características del grupo C=O de los ácidos carboxílicos que conforman parte de las resinas.

Además aparecen las bandas representativas de un compuesto aromático como la frecuencia de tensión C–H (3060 cm^{-1} y 3028 cm^{-1}) de mayor intensidad comparadas con las del asfalto original, los armónicos o sobretonos de vibración de tensión C=C ($1720\text{-}1960\text{ cm}^{-1}$) y las bandas con intensidades variables de

vibración de tensión del C=C aromáticos (1464 cm^{-1} , 1495 cm^{-1} , 1616 cm^{-1}). Aparecen bandas mas intensas en el asfalto modificado a 2924 cm^{-1} y 2857 cm^{-1} que corresponden a la tensión C–H (CH_3 , CH_2 , C–H, CHO).

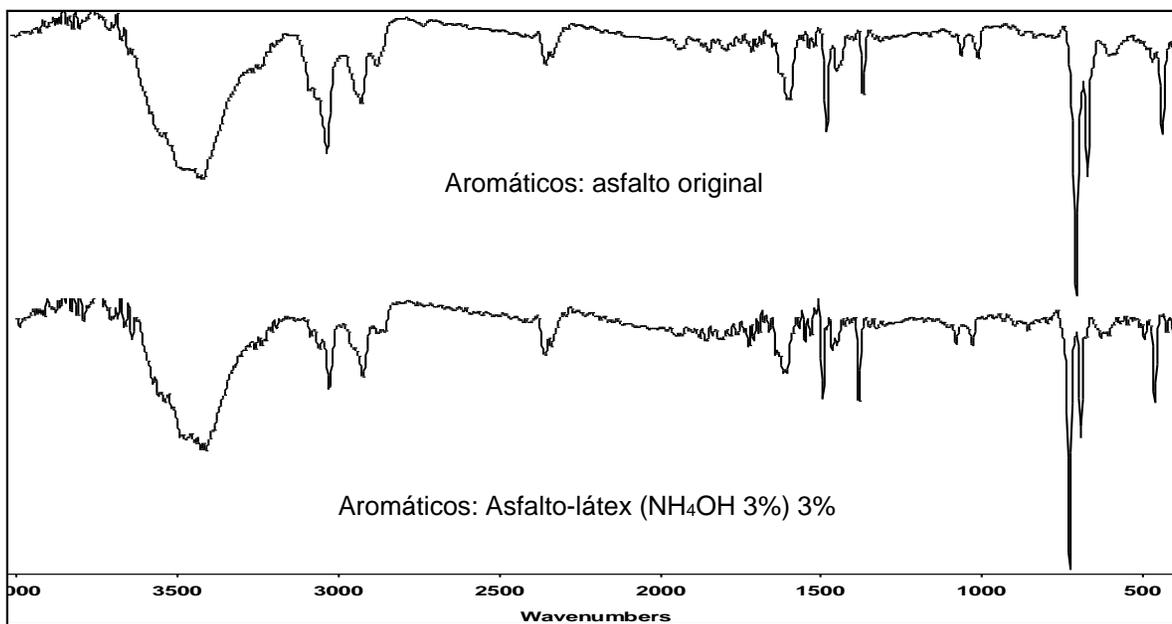
También se observa en ambos espectros la banda a 629 cm^{-1} que corresponde a la vibración de tensión C–S.

En el espectro de las resinas del asfalto modificado, aparecen a diferencia del asfalto original unas bandas intensas a 740 cm^{-1} y 700 cm^{-1} que corresponden a deformaciones del C–H aromático fuera del plano, esto debido posiblemente al incremento de compuestos aromáticos.

3.7.2.2.3 Análisis de espectroscopia Infrarroja para aromáticos

En la figura 55 se muestran los espectros IR de la fracción aromática del asfalto original y modificado al 3% con látex aditivado con NH_4OH al 3%.

Figura 55. Espectro Infrarrojo de Aromáticos del asfalto original y modificado al 3% con látex aditivado con NH_4OH al 3%.



En la tabla 35 se encuentran las absorciones más representativas del espectro infrarrojo de los compuestos aromáticos del asfalto original y modificado.

Tabla 35. Bandas características del espectro Infrarrojo para aromáticos del asfalto original y modificado al 3% con látex aditivado con NH₄OH al 3%.

Banda obtenida (cm ⁻¹)		Origen de la banda
Asfalto original	Asfalto-látex 3% (NH ₄ OH 3%)	
3410	3412	Hombro de tensión asimétrica grupos –N–H
3029	3027	Frecuencia de tensión C-H aromático
2924	2924	Tensión C–H (CH ₃ , CH ₂ , C–H, CHO)
2878	2878	
2878	2878	Tensión simétrica metilos
2924	2924	Tensión asimétrica metilenos
1463	1464	Deformación asimétrica metilos
1686-1729	1720-1930	Armónicos y sobretonos de vibración de tensión C=C
1615,1533, 1495	1520 1616	Bandas con intensidad variables, vibración de tensión del C=C aromáticos.
1350 1290	1345 1250	Vibración de tensión del C–N cuando están conjugados, 2 picos corresponde al pirrol.
1383	1383	Vibración de tensión del –CO en el plano.
694-821	857	Deformación de abanico fuera del plano N–H
728 694	728 694	Deformación C–H (Bandas fuertes) aromáticos
1030 1080	1030 1080	Vibración de tensión C–N, C–C y vibración de deformación C–H en el plano.

Como ya se ha mencionado, las absorciones características de los compuestos aromáticos se deben a la presencia del sistema π cíclico. En los espectros de la figura 55 se aprecian las bandas características de los compuestos aromáticos del asfalto original y modificado al 3% con látex aditivado con NH₄OH al 3%. Al comparar estos espectros no se encuentran grandes diferencias aunque se puede observar el aumento en intensidad de algunas bandas en el asfalto modificado con látex.

No se encuentran diferencias en las bandas correspondientes a la vibración de tensión asimétrica proporcionado por los grupos –N–H en el rango de frecuencias de 3000–3750 cm⁻¹. La presencia de grupos amino se corrobora con la banda presente a 857 cm⁻¹ perteneciente a la deformación en abanico fuera del plano de N–H.

Una de las diferencias, aunque no muy marcada, se encuentra en las bandas de 1520 cm⁻¹ y 1616 cm⁻¹, que son de mayor intensidad en el asfalto modificado comparadas con las del asfalto original, debido al incremento de compuestos aromáticos provenientes posiblemente de algunos de los componentes del látex (proteínas, resinas).

También se encuentran diferencias en la región de 1667–2000 cm⁻¹ que corresponde a los armónicos y sobretonos de vibración de tensión C=C, lo que manifiesta el grado de sustitución de los anillos aromáticos. En lo que respecta a

las bandas características de los aromáticos a $3000-3100\text{ cm}^{-1}$, que corresponde a las frecuencias de tensión C–H, en el asfalto original se encuentran un poco más pronunciadas comparadas con las del asfalto modificado, sin embargo, no se observan diferencias en las deformaciones C-H ubicadas a $675-900\text{ cm}^{-1}$.

La banda a 1383 cm^{-1} de vibración de tensión del –CO en el plano aumenta su intensidad por la presencia de estos grupos provenientes del látex.

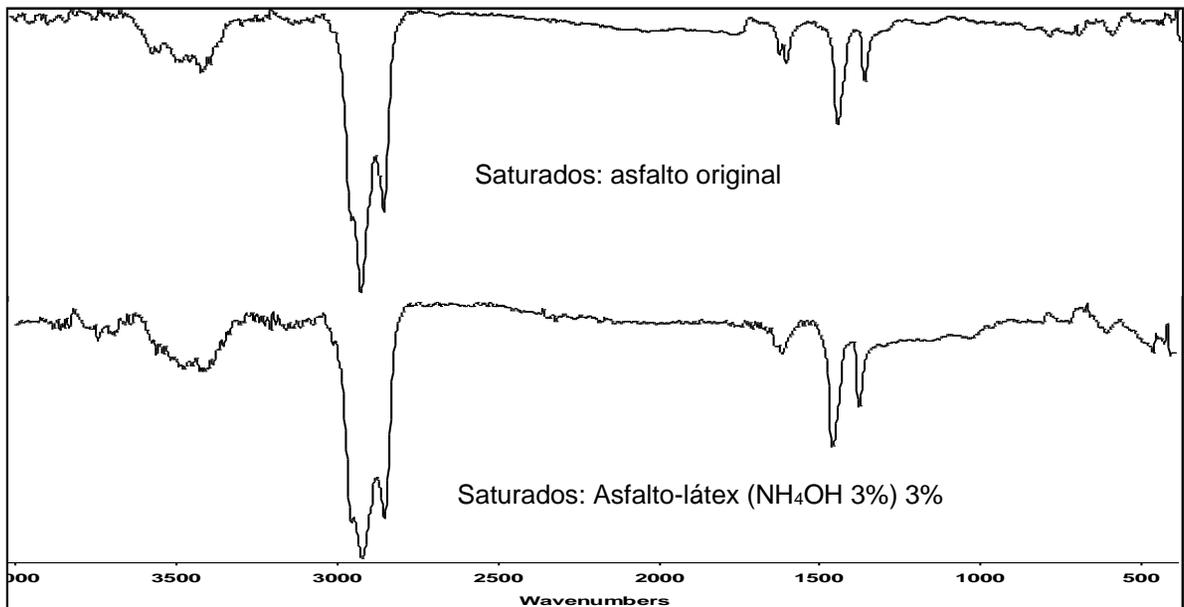
A 1345 cm^{-1} y 1250 cm^{-1} aparecen unas pequeñas bandas que corresponden a la vibración de tensión del C–N cuando están conjugados, en comparación con las del asfalto original se encuentran más pronunciadas debido al incremento de nitrógeno en el asfalto.

Las bandas de 2924 cm^{-1} y 2878 cm^{-1} que corresponden a la absorción de tensión C–H proveniente de las tensiones simétricas y asimétricas de los enlaces C–H de metilos y metilenos se encuentran de mayor intensidad en el asfalto modificado debido al incremento de las cadenas alifáticas.

3.7.2.2.4 Análisis de espectroscopia Infrarroja para parafinas o saturados

En la figura 56 se muestran los espectros IR de la fracción saturada del asfalto original y modificado al 3% con látex aditivado con NH_4OH al 3%.

Figura 56. Espectro Infrarrojo de saturados del asfalto original y modificado al 3% con látex aditivado con NH_4OH al 3%.



En la tabla 36, se encuentran resumidas las bandas obtenidas en el espectro infrarrojo de saturados del asfalto original y modificado al 3% con látex aditivado con NH_4OH al 3%.

Tabla 36. Bandas características del espectro Infrarrojo para Saturados del asfalto original y modificado al 3% con látex aditivado con NH_4OH al 3%.

Banda obtenida (cm^{-1})		Origen de la banda
Asfalto original	Asfalto-látex 3% (NH_4OH 3%)	
2922	2852	Vibración de alargamiento proporcionada por C–H tensión asimétrica.
2852	2923	
1617	1617	Banda de tensión media proporcionada por enlaces C–C alifáticos.
1459	1460	Banda de vibración de flexión C-H del ciclopentano.
1377	1378	Banda de vibración C–H asimétrica
725	740	Banda de vibración de oscilación del metileno $-\text{CH}_2$.

En ambos espectros aparecen las bandas representativas de los compuestos saturados. Solo se encuentran algunas diferencias en la intensidad de algunas bandas como las que aparecen entre 465 cm^{-1} y 811 cm^{-1} que corresponden a vibraciones de oscilación de grupos como metileno $-\text{CH}_2$ y también un aumento de la banda de vibración C–H asimétrica a 1378 cm^{-1} . Este aumento en intensidad de las bandas en el asfalto modificado se debe a la presencia de estos grupos en el látex.

3.7.2.3 ANALISIS DE ESPECTROSCOPIA UV-VIS PARA LA FRACCION MALTENICA DEL ASFALTO MODIFICADO AL 3% CON LATEX ADITIVADO CON NH_4OH AL 3%

En la tabla 37 se encuentran resumidas las bandas de absorción en UV-Vis para la fracción de maltenos del asfalto original y modificado al 3% con látex aditivado con NH_4OH al 3%.

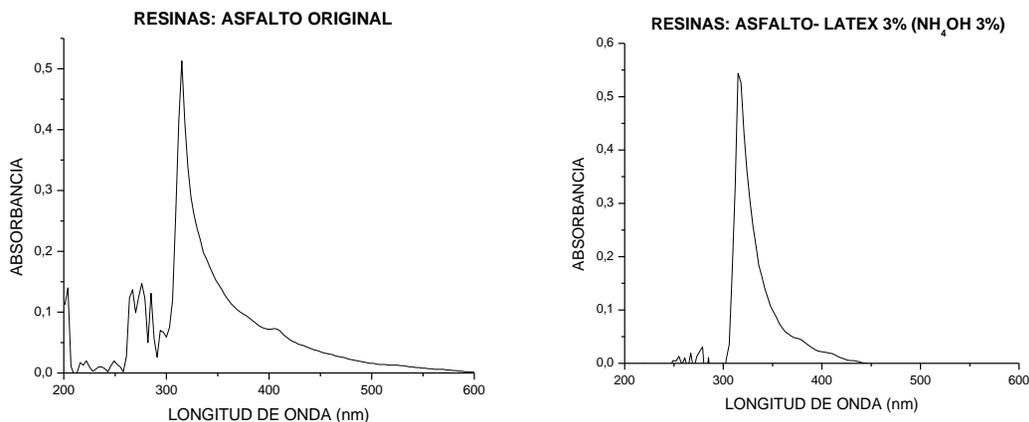
Tabla 37. Absorciones de los espectros UV-Vis para la fracción malténica del asfalto original y modificado al 3% con látex aditivado con NH_4OH al 3%.

Fracción malténica	Absorciones (nm)	
	Asfalto original	Asfalto-látex 3% (NH_4OH 3%)
Resinas	260-300-350-400	260-350-400
Aromáticos	325	325
Saturados	290-320-340-400	340

3.7.2.3.1 Análisis del espectro Ultravioleta Visible para Resinas

En la figura 57 se observan los espectros UV-Vis de la fracción resínica del asfalto original y modificado al 3% con látex aditivado con NH_4OH al 3%, de acuerdo a las absorciones reportadas en la tabla 37.

Figura 57. Espectro UV-Vis de resinas del asfalto original y modificado al 3% con látex (NH_4OH 3%)



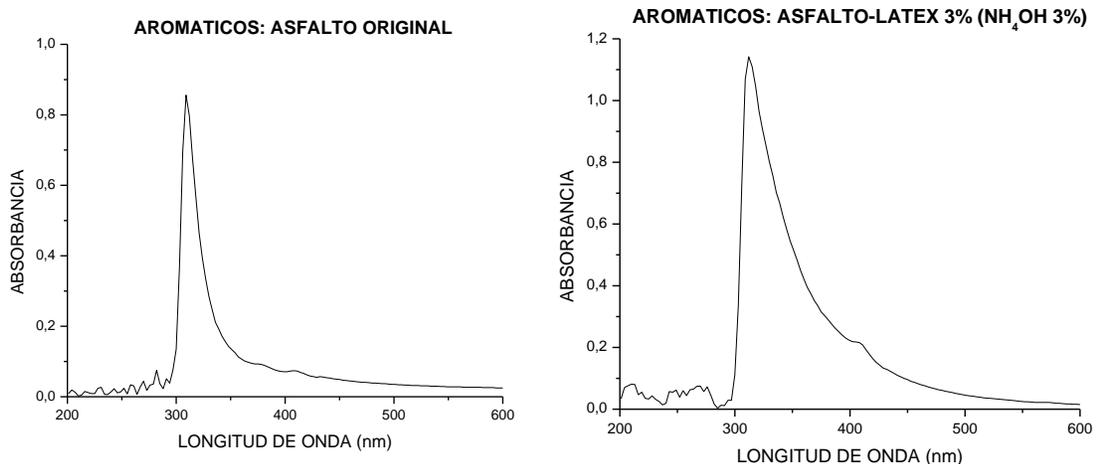
Los espectros de las resinas para el asfalto original y modificado, no presentan diferencias significativas, ya que se mantienen las mismas absorciones; indicando la presencia de las transiciones $\pi \rightarrow \pi^*$ y $n \rightarrow \pi^*$, debidas a los anillos aromáticos y grupos auxocrómicos presentes en esta fracción del asfalto. Sin embargo, la absorción a 400 nm, debida a grupos auxocrómicos (OH , NH_2) en los anillos aromáticos, dentro de las moléculas de resinas, se observa con menor intensidad, y un poco desplazada hacia longitudes de onda inferiores, debido al efecto hipsocrómico ocasionado por la baja polaridad del solvente (NH_4OH).

3.7.2.3.2 Análisis del espectro Ultravioleta Visible para aromáticos

En la figura 58 se encuentran los espectros UV-Vis de la fracción aromática del asfalto original y modificado al 3% con látex aditivado con NH_4OH al 3%, según la tabla 37 de comparación.

La fracción aromática de las muestras de asfalto original y modificado al 3% con látex aditivado con NH_4OH al 3%, no presentan cambios significativos, indicando que las transiciones tipo $\pi \rightarrow \pi^*$, se encuentran presentes, debidas a que en los grupos aromáticos se tienen bases nitrogenadas, que no son alterada químicamente por el modificador empleado.

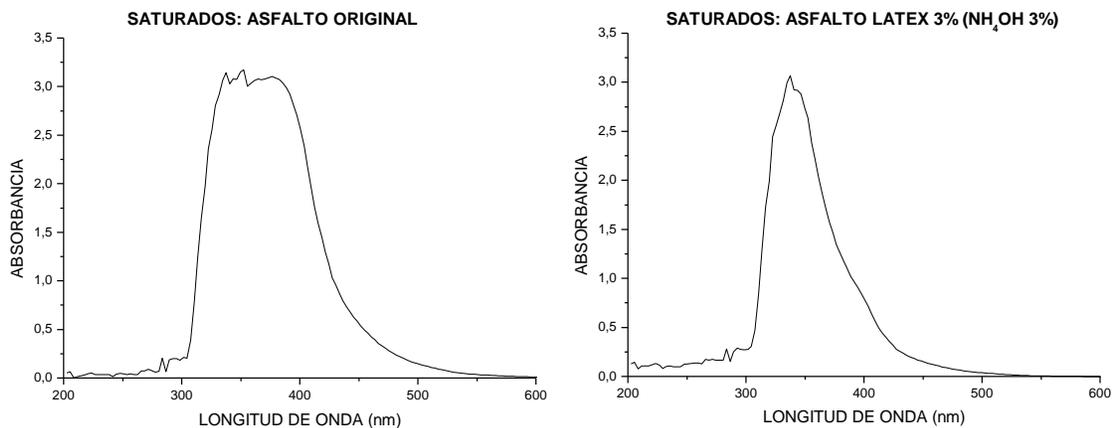
Figura 58. Espectro UV-Vis de Aromáticos del asfalto original y modificado al 3% con látex aditivado con NH_4OH al 3%.



3.7.2.3.3 Análisis del espectro Ultravioleta Visible para parafinas o saturados

Los espectros UV-Vis de los saturados del asfalto original y modificado al 3% con látex aditivado con NH_4OH al 3%, se encuentran en la figura 59, con el fin de observar los cambios presentados.

Figura 59. Espectro ultravioleta de saturados del asfalto original y modificado al 3% con látex aditivado con NH_4OH al 3%.

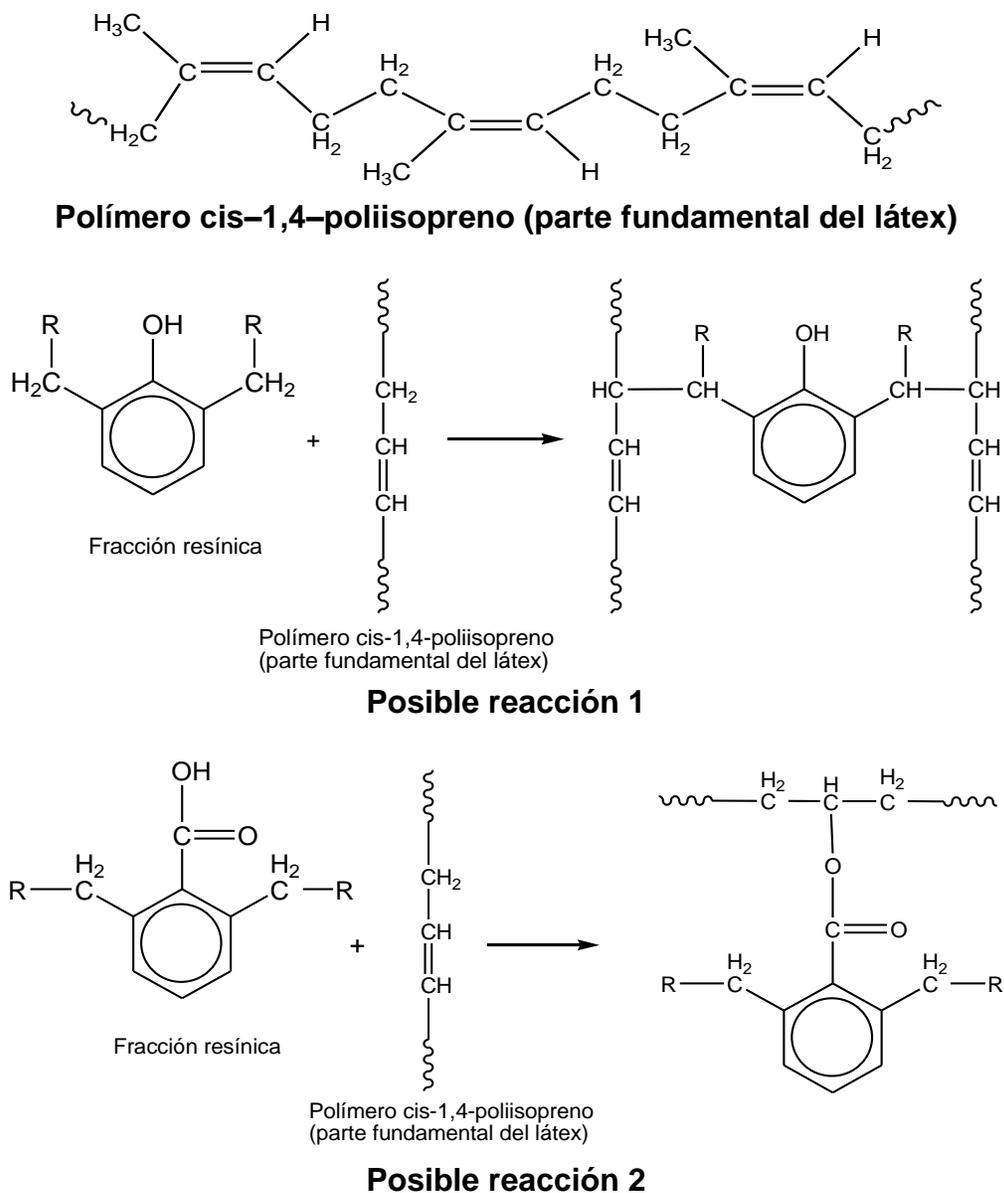


Al igual que en el espectro UV-Vis del asfalto modificado con látex al 3%, analizado en la sección 3.7.1.3.3, se observa que la banda a 340 nm es mas aguda en los asfaltos modificados, que en el asfalto original. Sin embargo estas bandas se mantienen desplazadas a longitudes de onda superiores a las esperadas, que son en el UV-vacío (lejano).

3.7.3 POSIBLE REACCION DEL POLIMERO CIS-1,4-POLIISOPRENO CON LA PARTE ACTIVA DEL ASFALTO

Teniendo en cuenta el análisis realizado en las secciones 3.7.1 y 3.7.2, respecto al asfalto modificado con látex al 3% y al 3% con látex aditivado con NH₄OH al 3%, se puede decir que el polímero reacciona con la fracción resínica, dado al incremento de éstas, por lo tanto, se establecen posibles reacciones del polímero cis-1,4-poliisopreno y la fracción de resinas, que se indican en la figura 60.

Figura 60. Posibles reacciones del polímero cis-1,4-poliisopreno y la fracción resínica del asfalto.



Los polímeros pueden presentar ramificaciones y diferentes ordenamientos, distinguiéndose una parte cristalina y una parte amorfa.

Los términos cristalino y amorfo se utilizan normalmente para indicar las regiones ordenadas y desordenadas de los polímeros, respectivamente. Algunos polímeros son completamente amorfos, otros son altamente cristalinos, dependiendo de las condiciones de cristalización. Un mismo polímero puede ser amorfo y cristalino a la vez, presentando el término semi-cristalino, por lo general, ningún polímero es completamente cristalino.

El polímero del látex (cis-1,4-poliisopreno) que se observa en la figura 60, presenta una estructura amorfa, debido a que sus ramificaciones están distribuidas al azar y no simétricamente como los polímeros de tipo cristalino. Teniendo en cuenta, que el asfalto es una macromolécula amorfa, tipo coloidal, puede presentar reacción con el polímero cis-1,4-poliisopreno, por tener enlaces dobles conjugados.

Las resinas tienen grupos nucleofílicos (aromáticos), que pueden representar en cierta forma la parte cristalina y sus ramificaciones la parte amorfa, por lo general, la parte cristalina no reacciona, la parte amorfa si. Por ello se espera una posible reacción de la parte amorfa del polímero, con la parte amorfa de la resina del asfalto, representada en la posible reacción 1.

Teniendo en cuenta que las resinas también tienen grupos carboxílicos, es posible presentar un esquema 2, de la reacción de las resinas del asfalto con el polímero cis-1,4-poliisopreno del látex, donde ocurre un rompimiento del doble enlace del polímero y se liga a la resina a través del grupo hidroxilo (que pertenece al grupo carboxílico). En la posible reacción 2, al igual que en la reacción 1, se da la unión por medio de la parte amorfa del polímero con la parte amorfa de la fracción resínica del asfalto.

Los constituyentes del asfalto forman una solución coloidal en la que un grupo de moléculas pesadas (asfaltenos) están rodeados por moléculas mas ligeras (resinas y aromáticos), sin que exista una separación entre ellas, todos estos se encuentran dispersos en los aceites saturados. Por lo tanto, debido a que el polímero tiene una estructura larga y ramificada, presenta una dispersión en la estructura coloidal del asfalto, donde sus ramificaciones interactúan con los saturados.

3.8 ANALISIS DEL ASFALTO ORIGINAL Y DEL ASFALTO MODIFICADO CON LATEX AL 3% Y AL 3% CON LATEX ADITIVADO CON NH₄OH AL 3%, ANTES Y EN EL PROCESO DE ALMACENAMIENTO

Las características físicas, resultantes de la mezcla asfalto-polímero, dependen del tipo de asfalto, de la cantidad y tipo de polímero, de la compatibilidad entre los constituyentes, del proceso de mezclado y de las historias térmicas de los materiales. El polímero debe tener cierto grado de compatibilidad con el asfalto de tal forma que no ocurra separación de fases, ya que en este caso las propiedades no son mejoradas.

Existen unas propiedades particulares que son necesarias de evaluar en los asfaltos modificados, como son, la estabilidad al almacenamiento en caliente, las propiedades mecánicas y las características elásticas.

Cuando un asfalto en película delgada se expone a las inclemencias atmosféricas, a veces pierde parte de su plasticidad y se hace quebradizo a causa de ciertos cambios físicos y químicos. Este deterioro del material se llama envejecimiento.

El envejecimiento del asfalto de un pavimento por endurecimiento progresivo da lugar en ocasiones a la formación de finas grietas. Cuando este proceso continua, las grietas se ensanchan, y el agua superficial penetra por las grietas abiertas, cambiando las propiedades físicas, químicas y reológicas del material. El envejecimiento de los asfaltos de pavimentación se produce principalmente por oxidación y volatilización de compuestos. Otros factores que suelen contribuir a su deterioro son las ondas más cortas de la luz, rayos ultravioleta, que influyen sobre las propiedades físicas, químicas y reológicas del asfalto.

Para el análisis de la estabilidad del polímero en el asfalto, es necesario realizar un estudio de almacenamiento, para con ello, estimar si el sistema asfalto-aditivo es estable o no lo es.

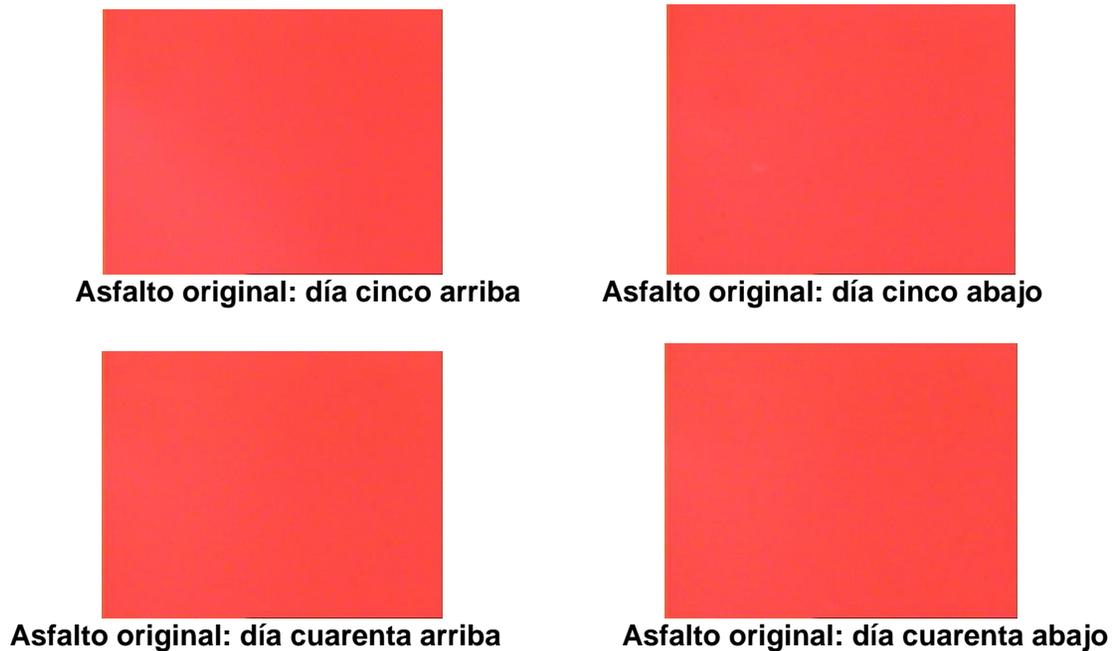
3.8.1 ANALISIS DEL ASFALTO ORIGINAL ANTES Y EN EL PROCESO DE ALMACENAMIENTO: DIA CERO, CINCO Y CUARENTA.

La muestra de asfalto original se almacenó según el procedimiento del numeral 2.3.3, con el fin de observar el comportamiento antes, durante y después del calentamiento y finalmente compararse con las muestras de asfalto modificado con látex al 3% y al 3% con látex aditivado con NH₄OH al 3%.

3.8.1.1 ANALISIS DEL ASFALTO ORIGINAL POR MICROSCOPIA ELECTRONICA DE FLUORESCENCIA AL DIA CERO, CINCO Y CUARENTA

En la figura 61 se encuentran las microfotografías realizadas al asfalto original después del proceso de almacenamiento, es decir, día cinco y día cuarenta, correspondientes a las fracciones de la parte superior e inferior del recipiente que lo contiene.

Figura 61. Microfotografías del asfalto original, al día cinco y cuarenta



La muestra de asfalto original se almacenó en un recipiente herméticamente cerrado, como se indica en la sección 2.3.3, figura 19, durante cinco días con una temperatura constante de 165° C, a esta muestra se le tomo una microfotografía de fluorescencia, para la cual se determinó homogeneidad, tanto en la muestra de asfalto de la parte superior como en la parte inferior, esto indica que hay compatibilidad entre los componentes de dicho asfalto.

El día cuarenta, se refiere al asfalto almacenado durante treinta y cinco días adicionales a temperatura ambiente después de cinco días a la temperatura de 165° C, esto con el fin de realizar el mismo análisis por microscopia electrónica de fluorescencia, y compararlo con el día cero y cinco. Con dicha microfotografía se obtuvo la misma homogeneidad que al día cinco de almacenamiento, lo que indica que esta muestra mantuvo su homogeneidad durante este periodo.

3.8.1.2 ANALISIS DE LAS PROPIEDADES FISICAS DEL ASFALTO ORIGINAL AL DÍA CERO, CINCO Y CUARENTA

Como se mencionó, las propiedades físicas en los asfaltos, proporcionan gran información acerca de cómo será su comportamiento en el uso vial. Para ello se realizó el estudio de asfalto original, con el fin de comparar con las muestras modificadas durante el proceso de almacenamiento. Los datos se muestran en la tabla 38.

Tabla 38. Propiedades físicas de consistencia del asfalto original, al día cero, cinco y cuarenta.

PROPIEDAD FISICA	Asfalto original				
	Día cero	Día cinco		Día cuarenta	
		Arriba	Abajo	Arriba	Abajo
Viscosidad (cP)	97391	118816	119737	121944	120000
Penetración (1/10 mm)	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
Recuperación elástica	1.7%	1.7%	1.7%	1.7%	1.7%
Peso específico del asfalto sólido (g/mL)	1.00986	1.00802	1.00778	1.00706	1.00698

En el asfalto original se observan cambios entre el día cero y cinco, debido al efecto de la temperatura. El cambio más notorio, es la viscosidad, ya que se da un incremento al día cinco, indicando que se ha endurecido, mientras que al día cuarenta los valores se mantienen constantes al día cinco, por lo tanto, quien afecta significativamente en las propiedades físicas es el incremento de la temperatura.

Otra propiedad, afectada es la penetración, cuyo comportamiento es decreciente en el día cinco, con respecto al día cero y continua disminuyendo en el día cuarenta, lo que revela, la inestabilidad en dicho asfalto. Esta disminución en la penetración, representa el endurecimiento del asfalto, corroborándose con la viscosidad.

En cuanto a los ensayos de punto de ablandamiento, ductilidad, recuperación elástica y peso específico, tienen cambios muy pequeños, por lo tanto, se puede decir que es constante.

3.8.1.3 ANALISIS DE LAS PROPIEDADES QUIMICAS DEL ASFALTO ORIGINAL (SARA), AL DIA CERO, CINCO Y CUARENTA

En la sección 3.3.3 se estudio las fracciones asfáltica y malténica del asfalto original, según el método empleado, S.A.R.A. En esta sección se analizó, como cambian estos valores con la temperatura, al día cinco y cuarenta, de acuerdo a los datos de la tabla 39.

Tabla 39. Características 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 propiedades químicas del asfalto original, se encuentran alteradas por la temperatura de calentamiento, es decir, que las cantidades de las fracciones no se conservan con respecto al día cero.

Al día cinco, disminuyen los asfaltenos y los aromáticos, las resinas aumentan y los saturados se mantienen constantes, debido a la inestabilidad del asfalto original frente a la temperatura, ya que los grupos aromáticos de las fracciones asfáltica y aromática, se ligan a las resinas.

Al día cuarenta, la tendencia presentada al día cinco se mantiene, sin embargo, la fracción saturada se incrementa progresivamente, debido a que se presenta una diferencia de densidades en esta fracción.

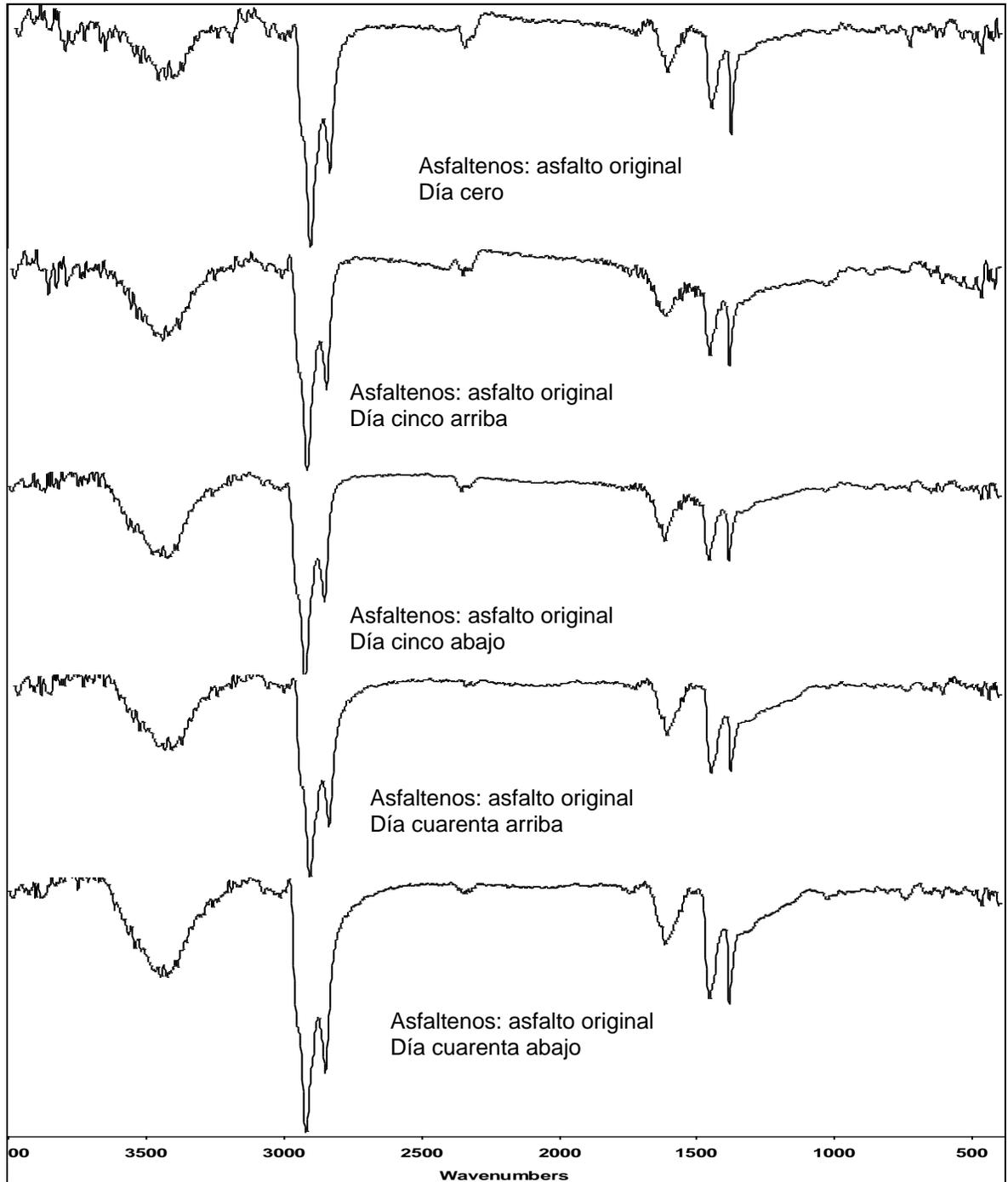
3.8.1.4 ANALISIS DE ESPECTROSCOPIA IR PARA LAS FRACCIONES ASFALTENICA Y MALTENICA DEL ASFALTO ORIGINAL AL DIA CERO, CINCO Y CUARENTA

El siguiente análisis se encuentra enfocado al estudio de los grupos funcionales presentes en el asfalto original, mediante la técnica de espectroscopia infrarroja.

3.8.1.4.1 Análisis de espectroscopia Infrarroja para asfaltenos

Los espectros de los asfaltenos en el asfalto original, al día cero, cinco y cuarenta se muestran en la figura 62.

Figura 62. Espectro Infrarrojo de Asfaltenos del Asfalto original al día cero, cinco y cuarenta



En la tabla 40, se muestran las bandas de absorción en el infrarrojo del asfalto original al día cero, cinco y cuarenta.

Tabla 40. 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

No existe un cambio notorio, por lo tanto, esta fracción no se encuentra alterada significativamente por la acción del calentamiento a 165° C (día cinco).

Pasados treinta y cinco días adicionales al día cinco, a temperatura ambiente, tampoco se observaron cambios significativos, lo que indica que los grupos funcionales de los asfaltenos como son, aromáticos, aminos, enlaces con azufre y metales pesados, se mantienen en la estructura de la macromolécula de asfaltenos.

3.8.1.4.2 Análisis de espectroscopia Infrarroja para Resinas

Los espectros de resinas para el asfalto original, al día cero, cinco y cuarenta se ilustran en la figura 63.

En la tabal 41, se resumen las principales bandas de absorción en el infrarrojo para la fracción resínica de los días, cero, cinco y cuarenta, para ser analizados en cuanto a sus intensidades y ubicación.

Figura 63. Espectro Infrarrojo de Resinas del Asfalto original, al día cero, cinco y cuarenta

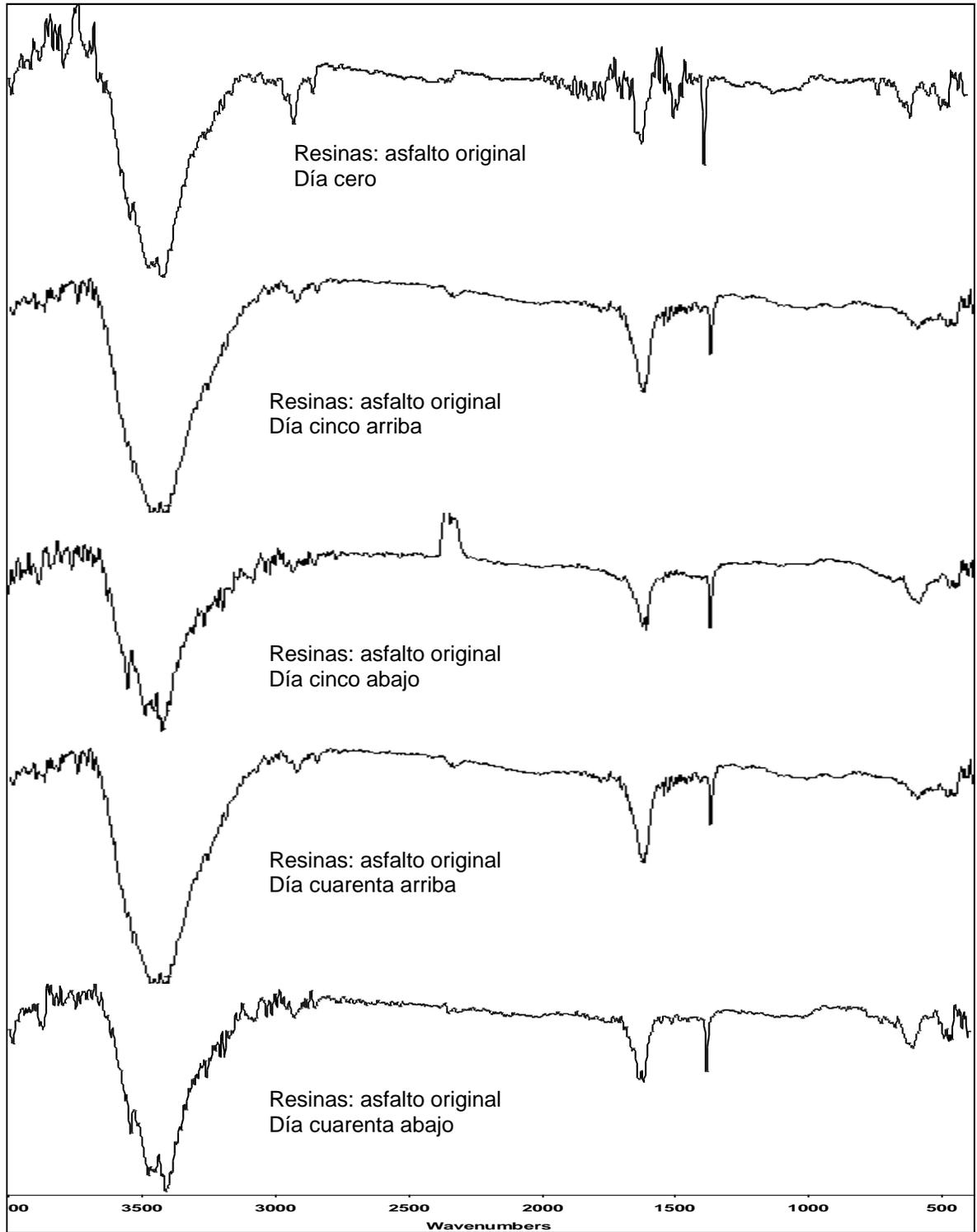


Tabla 41. Bandas características del espectro Infrarrojo para Resinas del Asfalto original, al día cero, cinco y cuarenta.

Banda obtenida (cm ⁻¹)	Día cero	Día cinco		Día cuarenta	
		Arriba	Abajo	Arriba	Abajo
Tensión O-H, N-H	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 N-H en tijera, débil, de amina secundaria	1482	1482	1482	1482	1483
Deformación asimétrica metilenos	1450	1450	1450	1450	1450
Deformación C-H simétrica	1383	1383	1383	1383	1383
Tensión del -CO en el plano.	1383	1383	1383	1383	1383
Deformación de aleteo y torsión del metileno	1275 1126	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 aromáticos sustituídos	540 490	540 477	541 477	540 477	530 476

Con respecto a las resinas en el asfalto original al día cinco, se observa algún cambio después de compararlo con el día cero; así:

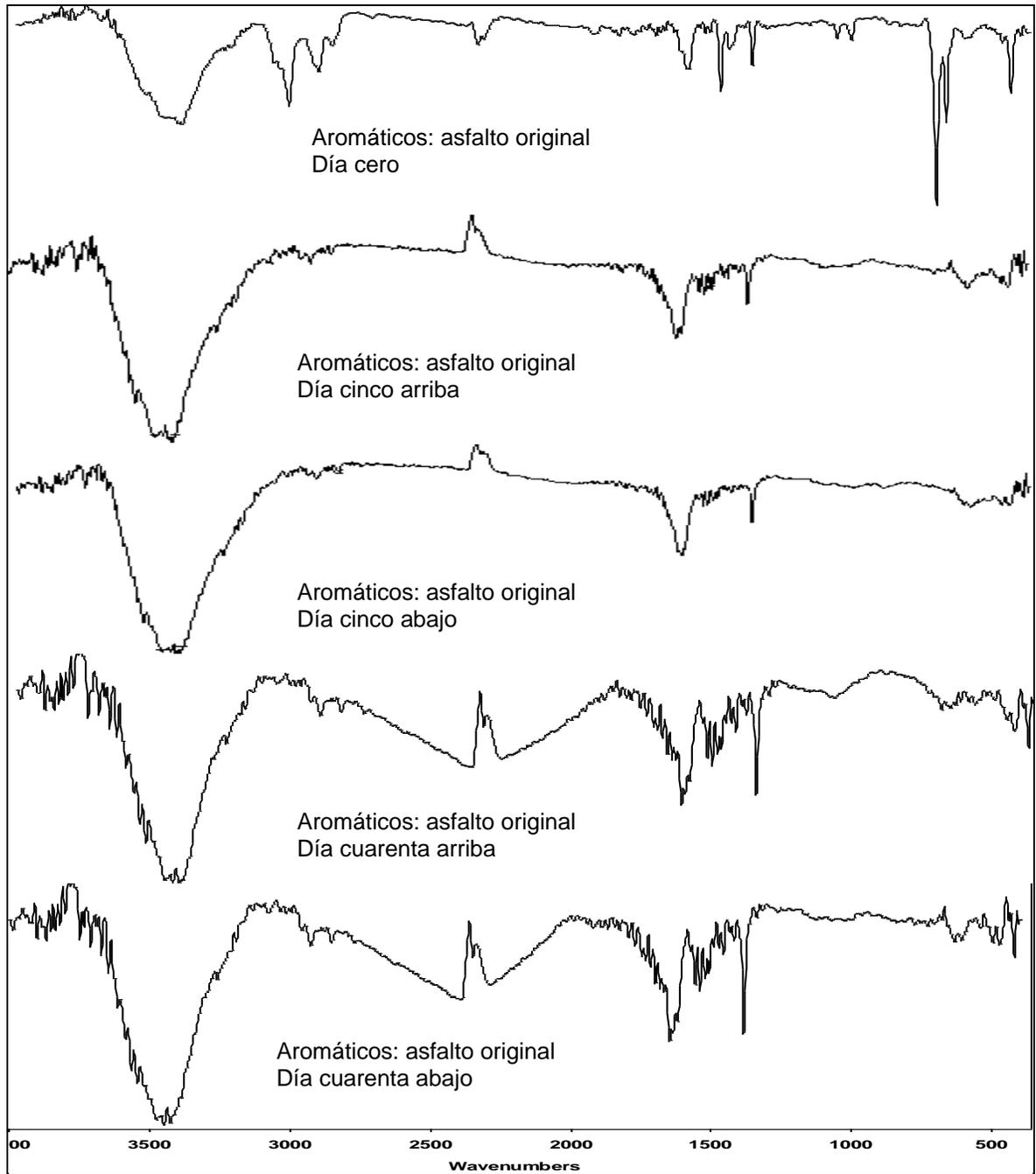
- Las vibraciones de tensión C-H a 2925 y 2852 cm⁻¹, en la muestra del día cero y al día cinco tienden a desaparecer, esto puede ser debido a que las moléculas saturadas presentes en las resinas se están ciclando, o simplemente la vibración de las cadenas disminuyen por solapamiento de otras moléculas más grandes y complejas.
- Las vibraciones ocasionadas por anillos aromáticos, también disminuyen en su intensidad, tales como: los armónicos o sobretonos de tensión C=C entre 1686-1877 cm⁻¹, las bandas con intensidades variables de tensión C=C aromático a 1616, 1503 y 1482 cm⁻¹, y la deformación C-H aromático, fuera del plano a 729 y 690 cm⁻¹.

En la muestra del día cuarenta, se mantienen constantes los valores con el día cinco.

3.8.1.4.3 Análisis de espectroscopia Infrarroja para aromáticos

En la figura 64 se observan los espectros infrarrojo de aromáticos para el asfalto original al día cero, cinco y cuarenta.

Figura 64. Espectro Infrarrojo de Aromáticos del Asfalto original, al día cero, cinco y cuarenta



En la tabla 42 se resumen las bandas de absorción en el infrarrojo de la fracción aromática para el asfalto original, antes y después del proceso de almacenamiento, es decir, al día cero, cinco y cuarenta.

Tabla 42. Bandas características del espectro Infrarrojo para aromáticos del Asfalto original, al día cero, cinco y cuarenta.

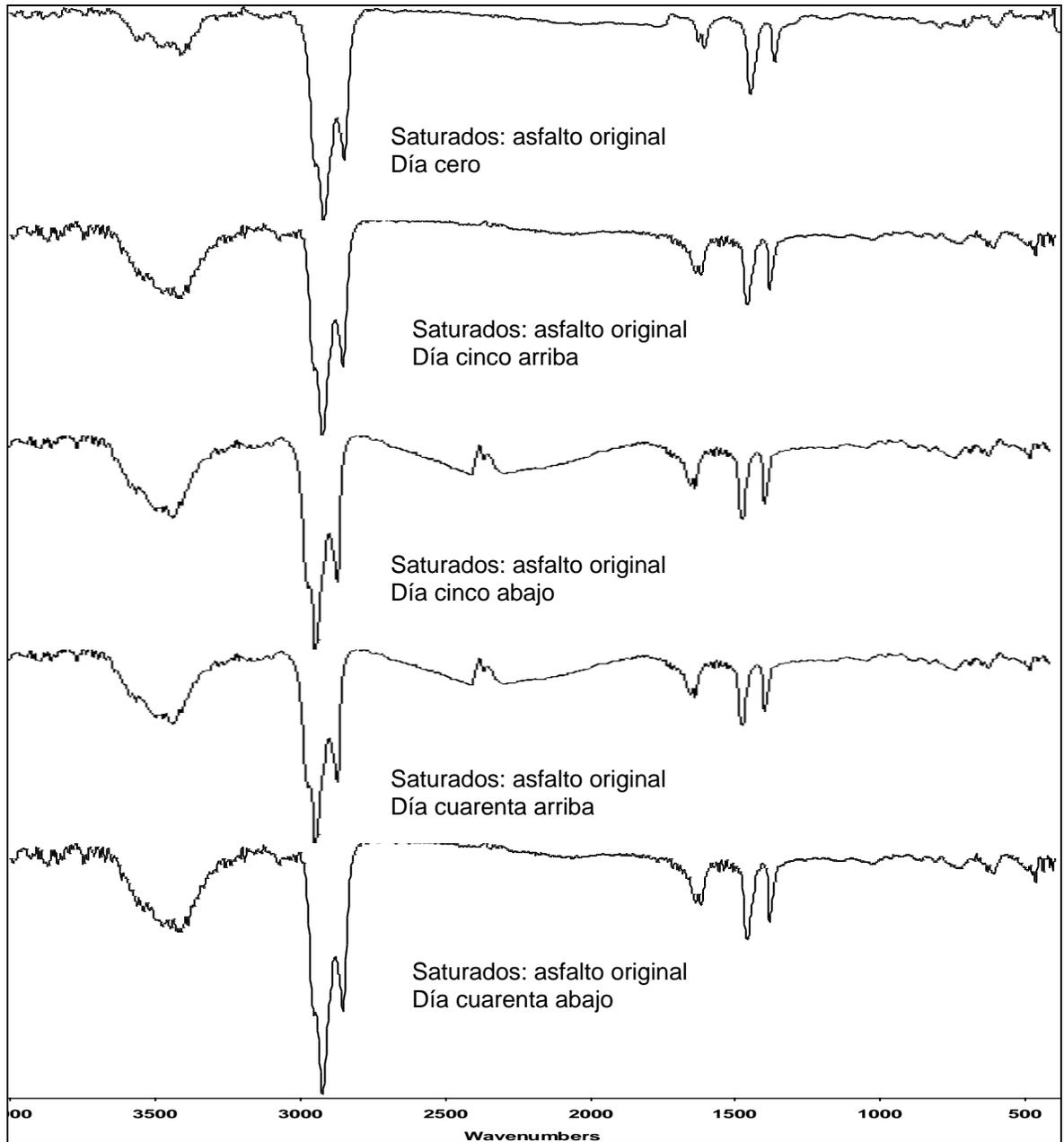
Banda obtenida (cm ⁻¹)	Día cero	Día cinco		Día cuarenta	
		Arriba	Abajo	Arriba	Abajo
Tensión N-H	3410	3413	3425	3425	3425
Tensión C-H aromático.	3029	3033	3030	3030	3030
Tensión asimétrica C-H (CH ₃ , CH ₂ , C-H, CHO)	2924	2927	2927	2926	2957
Tensión simétrica metilos	2878	2823	2823	2851	2851
Tensión 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 1533 1495	1647 1539 1489	1635 1506 1486	1648 1507 1472	1648 1520 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 del -CO en el plano.	1383	1383	1383	1383	1383
Tensión C-N, C-C y deformación C-H en el plano	1080 1030	1080 1030	1080 1030	1080 1030	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	728 709	728 710
Oscilaciones C-H (CH ₂)	607	608	598	608	608
Flexión C-H aromáticos sustit.	463	467	476	438	419

En la fracción aromática, para el asfalto original al día cinco, los cambios más notorios son en intensidades, como se mencionó solo depende de la concentración. Estas bandas son las de aromáticos, tales como: la vibración de tensión C-H aromático a 3029 cm⁻¹ y la vibración de deformación C-H aromático, fuera del plano a 728 y 694 cm⁻¹, que se caracterizan por tener una intensidad de media a alta, como se observa en el espectro del asfalto original al día cero. Esto se corrobora con el análisis S.A.R.A., realizado en la sección anterior, ya que al día cinco disminuye la cantidad de aromáticos con respecto al día cero. De igual manera, se observa una disminución en dichas intensidades al día cuarenta, con respecto al día cinco.

3.8.1.4.4 Análisis de espectroscopia Infrarroja para parafinas o saturados

Los espectros infrarrojos de la fracción saturada del asfalto original al día cero, cinco y cuarenta, se muestran en la figura 65.

Figura 65. Espectro Infrarrojo de Saturados del Asfalto original, al día cero, cinco y cuarenta



En la tabla 43 se tiene una comparación de las bandas más representativas en los espectros de infrarrojo de la fracción de saturados en el asfalto original al día cero, cinco y cuarenta.

Tabla 43. 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
Flexión C–H ciclopentano y. 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

Teniendo en cuenta los espectros de los saturados del asfalto original, al día cero, cinco y cuarenta, no se observa cambio alguno, es decir, que esta fracción al igual que los asfaltenos tienden a mantenerse constante, aun con el efecto de la temperatura.

3.8.1.5 ANALISIS DE ESPECTROSCOPIA UV-VIS PARA LA FRACCION MALTENICA DEL ASFALTO ORIGINAL AL DIA CERO Y CINCO.

Para complementar el estudio espectroscópico del asfalto original antes y después del proceso de almacenamiento, se utilizará la espectroscopia UV-Vis. Teniendo en cuenta que esta técnica sirve para determinar el tipo de transiciones, de acuerdo al cromóforo presente, se realizo solo para las muestras del día cero y cinco, ya que en el anterior estudio no se observo cambio significativo en el día cuarenta, estas absorciones se muestran en la tabla 44.

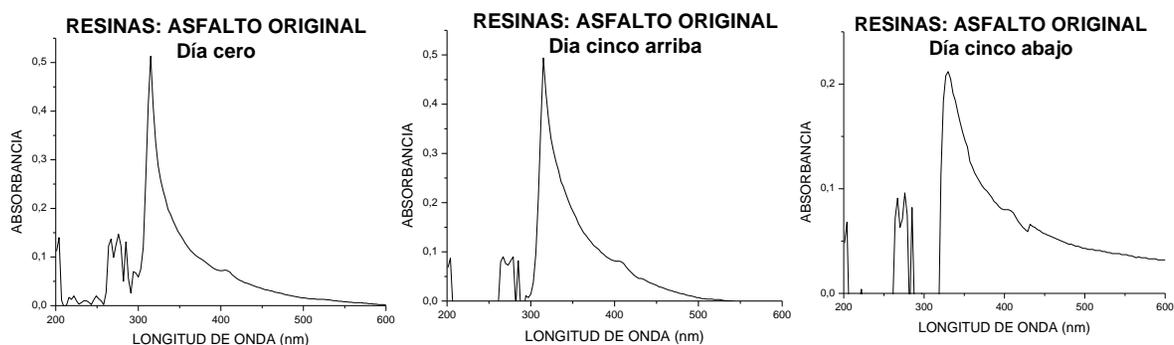
Tabla 44. Absorciones de los espectros UV-Vis para la fracción malténica del asfalto original al día cero y cinco.

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	325	325	325
Saturados	290-320-340-400	340	340

3.8.1.5.1 Análisis del espectro Ultravioleta–Visible para Resinas

En la figura 66 se observan los espectros UV-Vis de la fracción resínica correspondiente al asfalto original, al día cero y cinco.

Figura 66. Espectro UV-Vis de resinas del asfalto original, al día cero y cinco

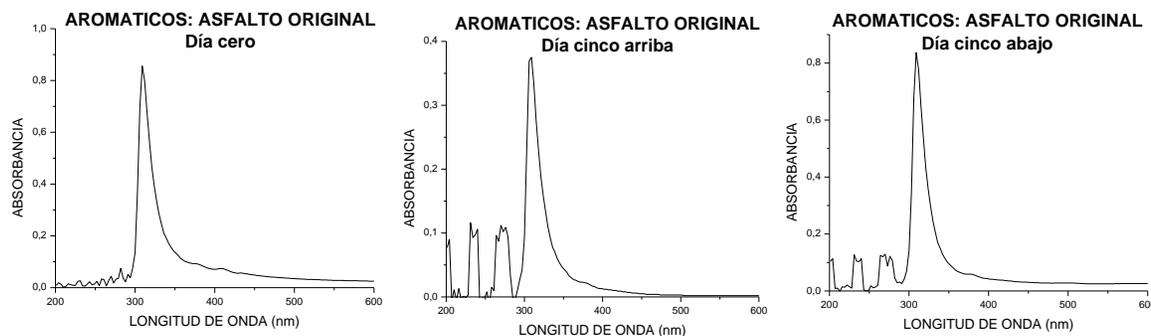


En los espectros UV-Vis de las resinas del asfalto original, se mantienen las transiciones $\pi \rightarrow \pi^*$ y $n \rightarrow \pi^*$, ocasionadas por los anillos aromáticos y grupos auxocrómicos, que se encuentran en la macromolécula de dicha fracción. Esto indica que no existen cambios representativos, por lo tanto, la temperatura no afecta la absorción de estas transiciones en el UV-Vis.

3.8.1.5.2 Análisis del espectro Ultravioleta–Visible para aromáticos

En la figura 67 se ilustran los espectros UV-Vis para los aromáticos del asfalto original, al día cero y cinco.

Figura 67. Espectro UV-Vis de Aromáticos del asfalto original



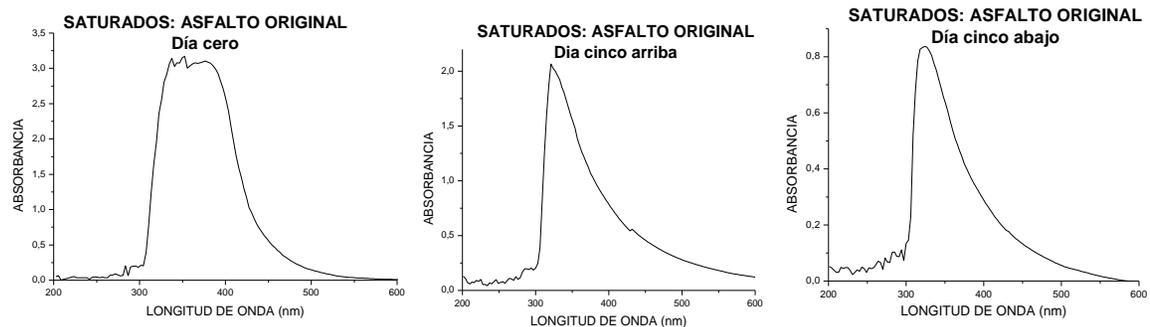
En los espectros de la fracción aromática, para el asfalto original, al día cero y cinco no se observa cambio alguno, ya que las bandas ocasionadas por transiciones tipo $\pi \rightarrow \pi^*$, se conservan, estas se deben a bases nitrogenadas

presentes en los grupos aromáticos del asfalto. Con esto se tiene la baja influencia de la temperatura, para la detección de los cromóforos en esta técnica.

3.8.1.5.3 Análisis del espectro Ultravioleta–Visible para saturados

A continuación en la figura 68, se encuentran los espectros UV-Vis de los saturados del asfalto original al día cero y cinco.

Figura 68. Espectro UV-Vis de saturados del Asfalto original



En cuanto a la fracción saturada del asfalto original, al día cinco, se observa una banda más aguda cerca de los 340 nm, con respecto al día cero. Sin embargo, no se encuentran las esperadas, ya que se dan en el ultravioleta lejano y las presentes pueden ser debidas a transiciones $n \rightarrow \sigma^*$, ocasionadas por un desplazamiento hacia el ultravioleta cercano, por presencia de heteroátomos en medio de su estructura, tales como, nitrógeno, azufre, oxígeno entre otros.

3.8.2 ANALISIS DEL ASFALTO MODIFICADO CON LATEX AL 3%, ANTES Y DURANTE EL PROCESO DE ALMACENAMIENTO: DIA CERO, CINCO Y CUARENTA

Como se mencionó anteriormente, todos los materiales bituminosos utilizados en la construcción de capas de rodadura asfáltica, cambian con el tiempo, de una u otra forma bajo la acción de factores externos e internos. La consistencia del asfalto cambia con la temperatura haciéndose mas blando en tiempo cálido y mas duro en tiempo frío. El asfalto expuesto a la intemperie se endurece constantemente como resultado de las influencias del clima.

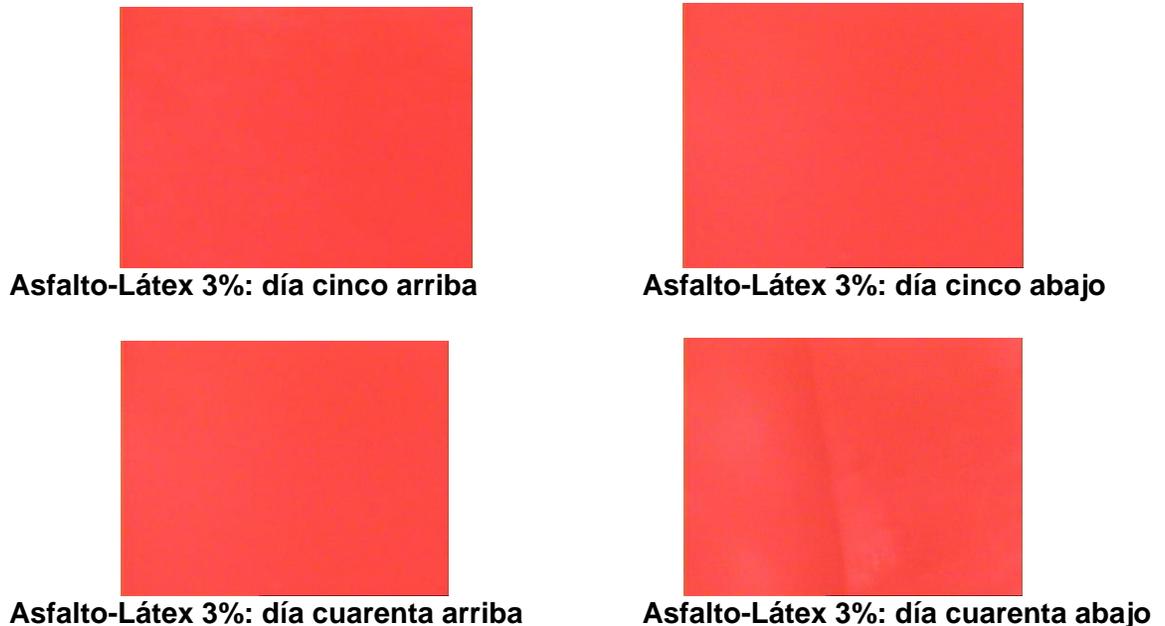
La durabilidad de un cemento asfáltico, es la capacidad para mantener las propiedades ligantes y cohesivas en la mezcla, antes y después de su envejecimiento. Las cualidades del cemento asfáltico deben mantenerse a lo largo de la vida útil de la carretera con el objeto de que cumpla la misión que tiene encomendada. Por este motivo se realizo el análisis del asfalto modificado con látex al 3% durante el almacenamiento, tal como lo indica la norma I.N.V. E – 726,

mencionada en la sección 1.4.7.6.7. Esta norma establece un ensayo que a nivel macro se lleva a cabo, como es el almacenamiento a 165° C, del asfalto empleado para vías. Para cumplir con esta norma se desarrollo el procedimiento indicado en la sección 2.3.3, en un recipiente herméticamente cerrado, con el fin de evitar perdida de componentes del asfalto por volatilización. Las muestras obtenidas de este recipiente se recolectaron de la parte de abajo y de arriba, para una mejor comparación. A dichas muestras almacenadas, se le realizo un estudio físico, químico y reológico, para observar el comportamiento del polímero en el asfalto.

3.8.2.1 ANALISIS DEL ASFALTO MODIFICADO CON LATEX AL 3% POR MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE FLUORESCENCIA, AL DIA CERO, CINCO Y CUARENTA.

Al igual que como se analizó en la sección 3.4.1, donde se muestran diferentes modificaciones con látex, entre ellas el asfalto-látex al 3%, en el día cero, se muestra el cambio presente durante el almacenamiento, mediante la técnica de microscopia electrónica de fluorescencia, estas se encuentran consignadas en la figura 69.

Figura 69. Microfotografías del asfalto-látex 3%, al día cinco y cuarenta



Teniendo en cuenta la microfotografía del asfalto modificado con látex al 3%, representado en la figura 40 (día cero), donde se observa total homogeneidad, se realizó una comparación con las microfotografías que se muestran en la figura 70, correspondientes al asfalto modificado con látex al 3%, durante el almacenamiento, es decir, al día cinco y cuarenta.

Con dicha comparación, se obtuvo igual homogeneidad en todas las muestras, tanto en la parte de arriba como en la de abajo, con lo que se puede decir, que existe cierta compatibilidad en el sistema asfalto-aditivo, sin embargo, es importante tener en cuenta los demás análisis, para conocer donde hubo cambios.

3.8.2.2 ANALISIS DE LAS PROPIEDADES FISICAS DEL ASFALTO MODIFICADO CON LATEX AL 3%, AL DIA CERO, CINCO Y CUARENTA

Como se mencionó anteriormente el asfalto es un material susceptible a los cambios de temperatura, por lo tanto, las propiedades físicas y químicas pueden alterarse por dichos cambios. En la tabla 45, se muestran las propiedades físicas del asfalto-látex 3% en el almacenamiento.

Tabla 45. Propiedades físicas del asfalto-látex 3%, al día cero, cinco y cuarenta.

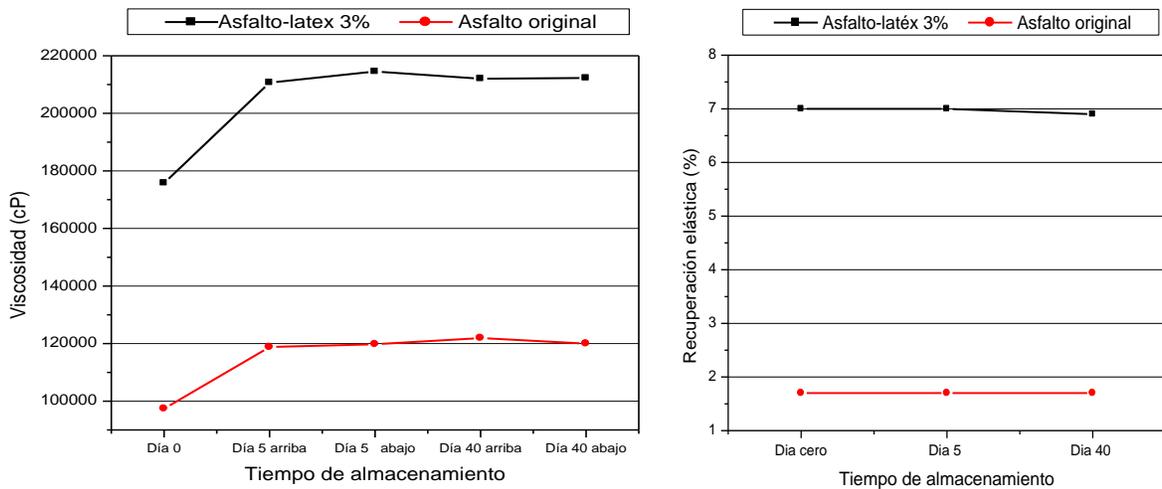
PROPIEDAD FISICA	Día cero	Día cinco		Día cuarenta	
		Arriba	Abajo	Arriba	Abajo
Viscosidad (cP)	175769	210682	213545	212045	212273
Penetración (1/10 mm)	76	74	76	77	77
Punto de ablandamiento	47.3 ° C	47.7° C	47.8° C	48.5° C	48.6° C
Ductilidad (cm)	+100	+100	+100	+100	+100
Recuperación elástica	7.0%	7.0%	7.1%	6.9%	6.9%
Peso específico del asfalto sólido (g/mL)	1.00656	1.00701	1.00709	1.00717	1.00727

La viscosidad en el asfalto modificado, se observa afectada después del calentamiento a 165° C al que fue sometida la muestra durante cinco días de almacenamiento. El cambio entre el día cero y el día cinco, fue significativo, lo que indica que este asfalto, aun modificado es muy susceptible a la temperatura, y por lo tanto se endurece al existir este efecto. El cambio que se presenta entre las muestras tomadas de la parte superior e inferior, es muy pequeño, por lo tanto se considera uniforme dicho material.

Sin embargo, es importante resaltar que, después de treinta y cinco días que se mantuvo almacenada la muestra a temperatura ambiente y cerrada herméticamente (día cuarenta), no hubo gran cambio con respecto al día cinco y dentro de las fracciones de arriba y abajo, se mantuvo un valor constante. Con esto se manifiesta el efecto que se presenta sobre la muestra de asfalto modificado, debido al calentamiento.

En la figura 70 se observa la variación en la viscosidad y recuperación elástica, con respecto a las muestras de asfalto original y modificado con látex al 3%, durante el proceso de almacenamiento, al día cero, cinco y cuarenta.

Figura 70. Variación de la viscosidad y recuperación elástica del asfalto original y del asfalto modificado con látex al 3%, al día cero, cinco y cuarenta



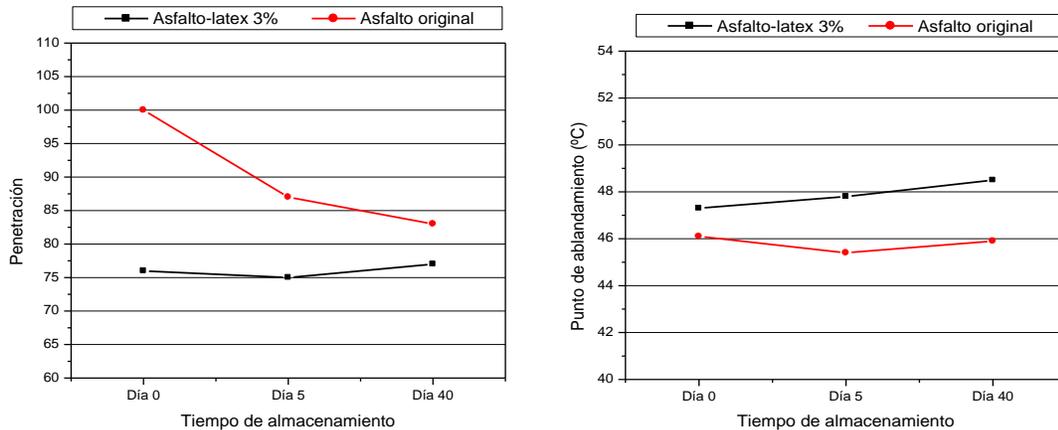
Las diferencias que existen en el asfalto original y modificado con látex al 3%, en cuanto a la viscosidad, se observan muy marcadas, tal como se mencionó en la sección 3.4.2, debido al efecto del polímero sobre el asfalto, que genera un aumento en la dureza y por lo tanto el incremento en dicha viscosidad. La misma tendencia ocurre con la recuperación elástica, donde el polímero mejora las propiedades elásticas del asfalto original.

Comparando los datos reportados en la tabla 45 de propiedades físicas, referente a los ensayos de penetración y punto de ablandamiento, se observa que los resultados obtenidos para el asfalto-látex al 3% antes y durante el proceso de almacenamiento, presentan una mínima variación. Esto indica que se ha logrado una estabilidad en el asfalto modificado durante el incremento de temperatura en el almacenamiento, además entre las fracciones, tanto de la parte superior como inferior se mantienen constantes los valores. La variación de estos ensayos físicos en el asfalto original y modificado con látex al 3%, se ilustra en la figura 71.

Los resultados de las propiedades físicas de penetración y punto de ablandamiento, varían entre la muestra de asfalto original y modificado con látex al 3%, antes y durante el almacenamiento, sobresaliendo el efecto que causa el polímero a la consistencia del asfalto original, presentando un aumento significativo en el punto de ablandamiento y una reducción notoria en la penetración.

En cuanto a la ductilidad, se mantiene por encima de 100 cm en el asfalto modificado con látex al 3% antes y durante el proceso de almacenamiento.

Figura 71. Variación de los ensayos de penetración y punto de ablandamiento en el asfalto original y modificado con látex al 3%, al día cero, cinco y cuarenta



Otra prueba a tener en cuenta, es el peso específico o densidad relativa a 25° C, cuyos datos se encuentran reportados en la tabla 45. La densidad en el asfalto, varía según su origen y proceso de obtención, como regla general todos los asfaltos deben presentar una densidad cercana a la unidad. De acuerdo a los datos obtenidos para el asfalto modificado con látex al 3%, la regla se cumple, antes y después del almacenamiento, además, en las fracciones superior e inferior, los valores son muy semejantes, por lo que se puede aclarar la homogeneidad en la muestra completa.

3.8.2.3 ANALISIS DE LAS PROPIEDADES QUIMICAS DEL ASFALTO MODIFICADO CON LATEX AL 3% (SARA), AL DIA CERO, CINCO Y CUARENTA

En la sección 3.7.1.1, se realizó el análisis por el método S.A.R.A., para la muestra del asfalto modificado con látex al 3%, al día cero. En este numeral se estudió el efecto de la temperatura en la muestra de asfalto modificado con látex al 3%, al día cinco y a temperatura ambiente, día cuarenta, en la tabla 46 se muestran estos valores.

Tabla 46. Características de las fracciones separadas del asfalto modificado con látex al 3%, por cromatografía de columna.

Compuesto	Asfalto original	Asfalto modificado con látex al 3%				
		Día 0	Día 5		Día 40	
			Arriba	Abajo	Arriba	Abajo
Asfaltenos	17 %	14 %	11 %	11 %	10 %	10 %
Resinas	11 %	20 %	22 %	25 %	22 %	21 %
Aromáticos	27 %	16 %	13 %	13 %	13 %	14 %
Saturados	45 %	50 %	54 %	51 %	55 %	55 %

Como se analizó en la sección 3.7.1.1, las fracciones que se incrementaron son las resinas y los saturados, mediante el método S.A.R.A. En la muestra de asfalto modificado con látex al 3%, después del calentamiento a 165° C, día cinco, se observa la misma tendencia del día cero.

En el día cuarenta, la tendencia se mantiene con relación a la muestra del día cero y cinco, es decir, el aumento de las fracciones resínica y saturada. Dentro de esta muestra en el día cuarenta sin calentamiento, se mantienen constantes los datos de la parte de arriba y abajo, indicando homogeneidad después de enfriarse la muestra.

3.8.2.4 ANALISIS DE ESPECTROSCOPIA IR PARA LAS FRACCIONES ASFALTENICA Y MALTENICA DEL ASFALTO MODIFICADO CON LATEX AL 3%, AL DIA CERO, CINCO Y CUARENTA

En la sección 3.7.1.2 se realizó el análisis por espectroscopia infrarroja del asfalto modificado con látex al 3% antes del proceso de almacenamiento, a continuación se estudian los cambios presentes en la muestra de asfalto modificado con látex 3% en el día cinco y cuarenta, por espectroscopia infrarroja.

3.8.2.4.1 Análisis de espectroscopia Infrarroja para asfaltenos

En la figura 72 se muestra el espectro infrarrojo de la muestra de asfalto modificado con látex al 3%, al día cero, cinco y cuarenta.

Las bandas de absorción en el infrarrojo de los asfaltenos para la muestra de asfalto modificado con látex al 3%, se resumen en la tabla 47.

En el asfalto modificado con látex al 3%, después del almacenamiento, día cinco y cuarenta, se observan las bandas características de los principales grupos funcionales presentes en la fracción asfáltica obtenida en el método S.A.R.A., tales como, aromático, enlaces C-N, N-H, C-C, C-H, C-S y C=C.

Al día cinco y cuarenta, el asfalto modificado con látex al 3%, presenta dichas bandas representativas, al igual que la muestra en el día cero analizada en el numeral 3.7.1.2.1, tanto en las fracciones superior como inferior, es decir, que no se presentan cambios significativos.

Figura 72. Espectro Infrarrojo de Asfaltenos del asfalto modificado con látex al 3% al día cero, cinco y cuarenta.

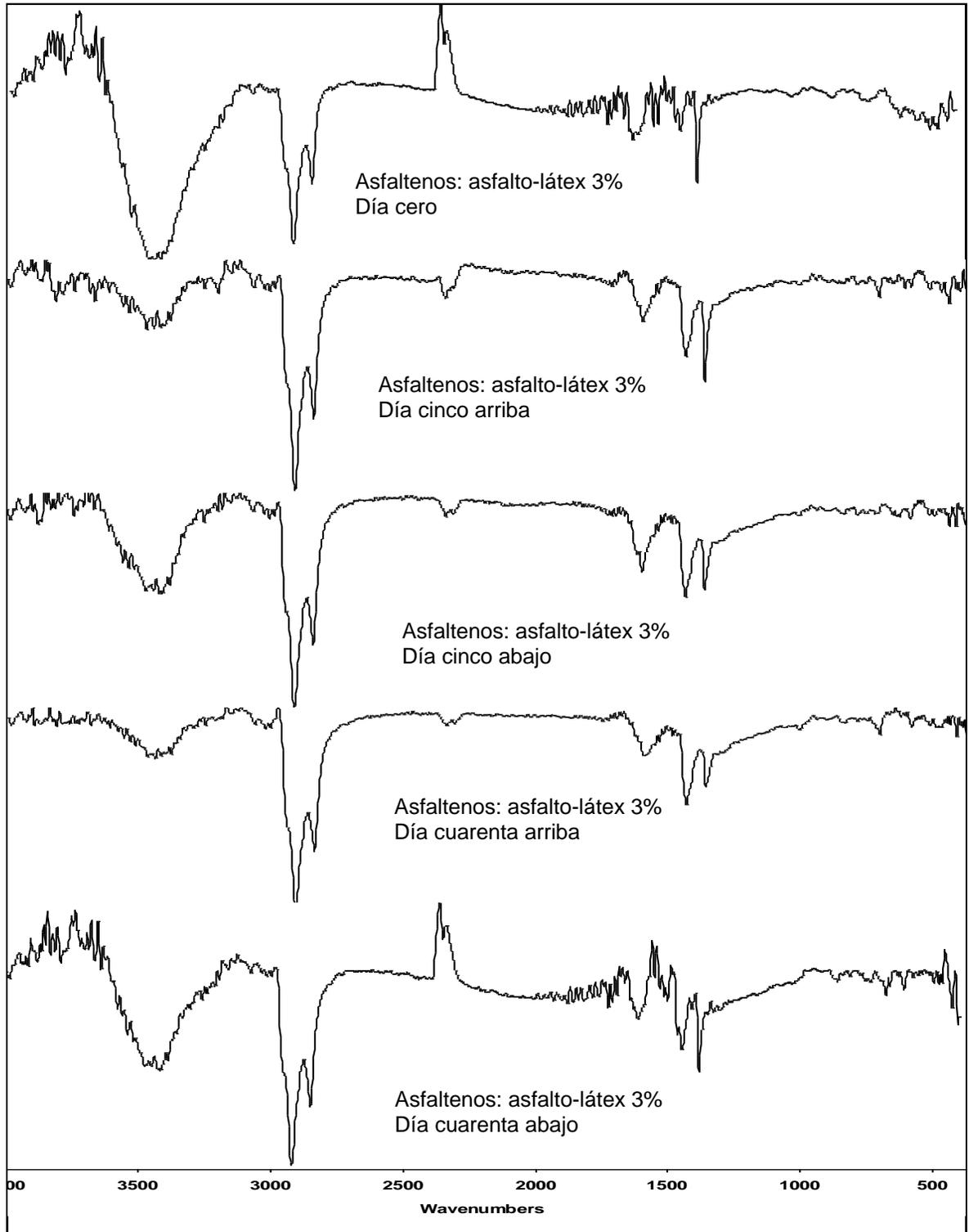


Tabla 47. Bandas características del espectro Infrarrojo para asfaltenos del asfalto modificado con látex al 3%, al día cero, cinco y cuarenta.

Banda obtenida (cm^{-1})	Día cero	Día cinco		Día cuarenta	
		Arriba	Abajo	Arriba	Abajo
Tensión asimétrica –N-H	3412	3413	3446	3424	3414
Tensión C-H aromático.	3030	3010	3013	3020	3020
Tensión –C-H producida por –CH ₃ , -CH ₂ , -CH, CHO	2920 2849	2920 2849	2920 2849	2920 2849	2920 2849
Tensión C=C aromáticos	1633	1616	1613	1613	1612
Tensión del C=C aromático	1530	1530	1530	1530	1530
Deformación N–H en tijera, débil, de amina secundaria	1490	1490	1490	1501	1481
Deformación asimétrica –C–H metilos.	1454 1382	1454 1382	1454 1381	1446 1382	1446 1382
Deformación asimétrica metilenos	1454	1454	1454	1446	1446
Flexión C–H fuera del plano de un naftaleno β -sustituido	863	859	859	859	841
Deformación de C–H aromático, fuera del plano	728	728	728	710	736
Tensión C–S banda débil.	609	610		608	608
Tensión del –C–S, cuando esta conjugado, banda débil.	421-474	421-474	421-474	421-474	421-474
Flexión C–H aromáticos sustit.	465	464	464	420	427

3.8.2.4.2 Análisis de espectroscopia Infrarroja para Resinas

En la figura 73 se observan las bandas de absorción en el infrarrojo de la fracción resínica, para el asfalto modificado con látex al 3% al día cero, cinco y cuarenta.

En la tabla 48 aparecen las bandas características de las resinas del asfalto modificado con látex al 3%, al día cero, cinco y cuarenta.

Después del almacenamiento al día cinco, se encuentran las mismas bandas, que en las del día cuarenta de almacenamiento y al día cero, lo que indica homogeneidad en el sistema asfalto modificado con látex al 3%, ya que las bandas aparecen tanto en la parte superior como inferior.

Sin embargo, con respecto al asfalto original al día cero, como ya se mencionó en la sección 3.7.1.2.2, aparecen dos bandas características de grupos aromáticos, tales como: a 728 cm^{-1} , debida a la vibración de deformación de C-H de aromático, fuera del plano y la banda ubicada a 3030 cm^{-1} , ocasionada por una vibración de tensión C-H aromático. Con esto se demuestra el aumento en los grupos aromáticos dentro de la fracción resínica, es decir, que el polímero al unirse en el asfalto por dicha fracción se cicla de alguna manera para formar aromáticos. Además, esta banda se presenta en el asfalto modificado al día cero, cinco y

cuarenta, tanto en la parte de arriba como en la de abajo, indicando así homogeneidad en la muestra inicialmente modificada.

Figura 73. Espectro Infrarrojo de Resinas del asfalto modificado con látex al 3%, al día cero, cinco y cuarenta

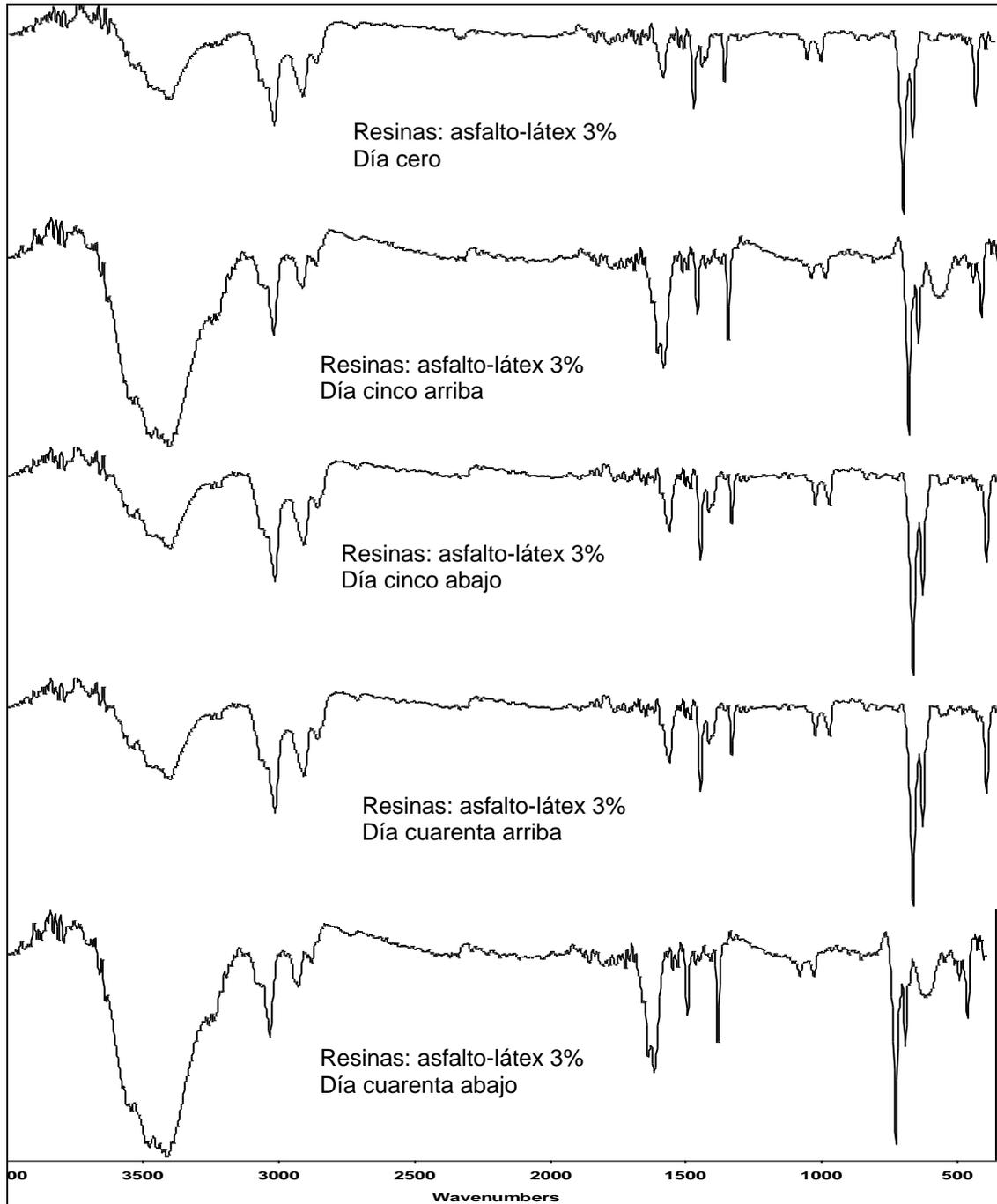


Tabla 48. Bandas características del espectro Infrarrojo para Resinas del asfalto modificado con látex al 3%, al día cero, cinco y cuarenta.

Banda obtenida (cm ⁻¹)	Día cero	Día cinco		Día cuarenta	
		Arriba	Abajo	Arriba	Abajo
Tensión –N–H	3425	3411	3425	3414	3413
Tensión C-H aromático.	3028	3031	3030	3030	3030
Tensión asimétrica C–H (CH ₃ , CH ₂ , C–H, CHO)	2923	2926	2926	2961	2961
Tensión simétrica metilos	2876	2893	2877	2880	2880
Tensión C-H proporcionada por los ciclohexanos.	2853– 2924	2893– 2926	2877– 2926	2880– 2921	2880– 2921
Armónicos y sobretonos de vibración de tensión C=C	1686– 1943	1686– 1943	1686– 1943	1686– 1943	1686– 1943
Bandas con intensidades variables, vibración de tensión de C=C aromáticos.	1605 1533 1495	1617 1513 1495	1606 1549 1495	1606 1549 1495	1617 1513 1495
Deformación N–H en tijera, débil, de amina secundaria	1495	1495	1495	1495	1495
Deformación asimétrica metilenos	1462	1464	1464	1464	1464
Deformación C–H simétrica	1383	1383	1383	1383	1383
Tensión del –CO en el plano.	1383	1383	1383	1383	1383
Tensión C–N, C–C y deformación C–H en el plano.	1080 1030	1080 1029	1081 1030	1081 1030	1080 1029
Flexión C–H fuera del plano de un naftaleno β-sustituido	820	821	820	820	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	728 693	728 694	728 694	728 693
Oscilaciones C–H (CH ₂)	608	606	607	607	606
Flexión C–H aromáticos sustit.	463	463	463	463	463

3.8.2.4.3 Análisis de espectroscopia Infrarroja para aromáticos

En la figura 74, se observan los espectros del asfalto modificado con látex al 3%, al día cinco y cuarenta, que posteriormente se compararan con el espectro del día cero, estudiado en la sección 3.7.1.2.3.

Con la tabla 49, se establece una comparación de la fracción aromática del asfalto modificado con látex al 3%, antes y durante el almacenamiento, es decir, al día cero, cinco y cuarenta.

Figura 74. Espectro Infrarrojo de Aromáticos del asfalto modificado con látex al 3%, al día cero, cinco y cuarenta.

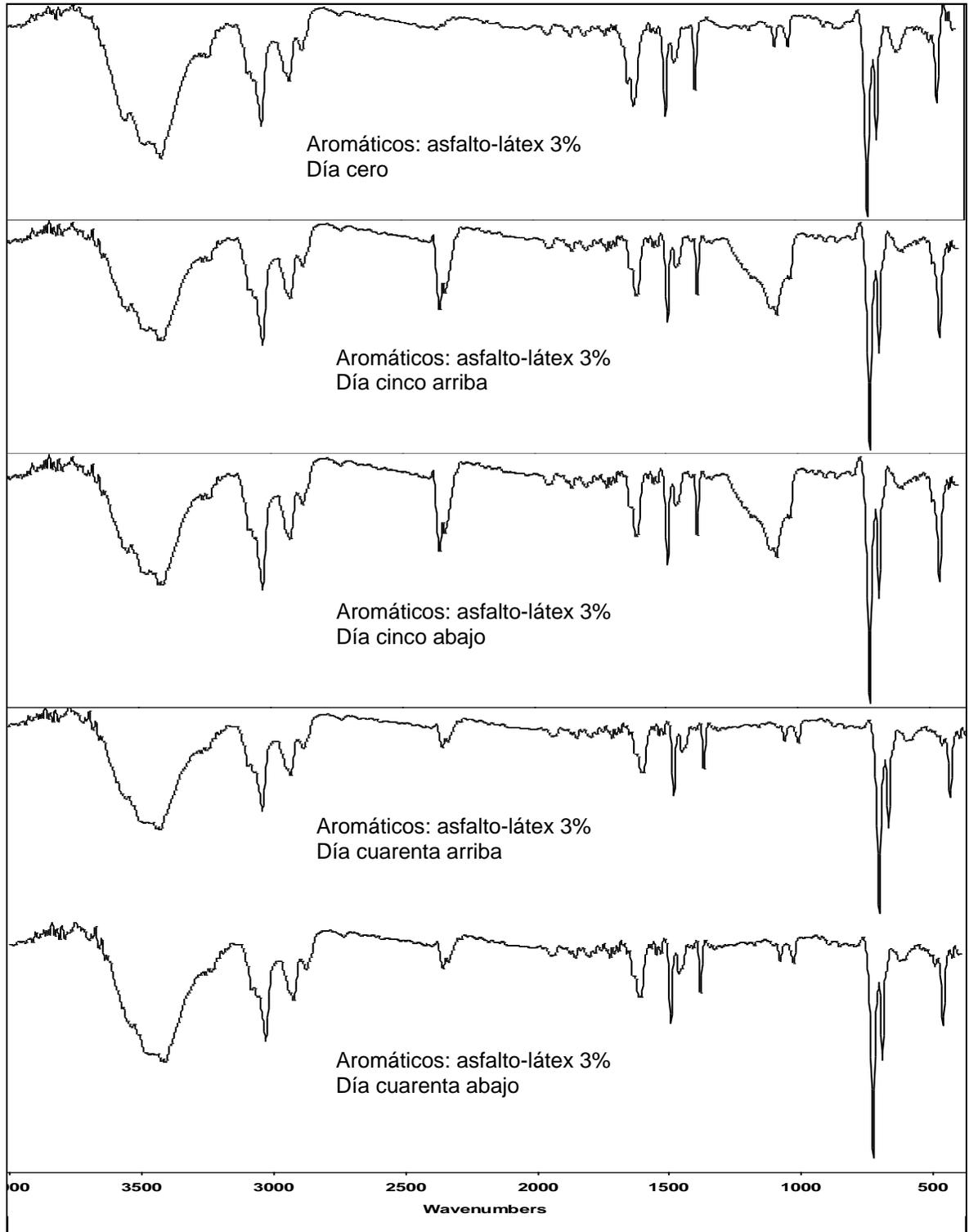


Tabla 49. Bandas características del espectro Infrarrojo para aromáticos del asfalto modificado con látex al 3%, al día cero, cinco y cuarenta.

Banda obtenida (cm ⁻¹)	Día cero	Día cinco		Día cuarenta	
		Arriba	Abajo	Arriba	Abajo
Tensión –N–H	3425	3410	3412	3412	3410
Tensión C-H aromático.	3028	3030	3030	3030	3030
Tensión asimétrica C–H (CH ₃ , CH ₂ , C–H, CHO)	2923	2926	2924	2924	2926
Tensión simétrica metilos	2876	2876	2878	2878	2876
Tensión C-H proporcionada por los ciclohexanos.	2853– 2924	2876- 2926	2878- 2924	2878- 2924	2876-2926
Armónicos y sobretonos de vibración de tensión C=C	1686– 1943	1686– 1943	1686– 1943	1686– 1943	1686–1943
Bandas con intensidades variables, vibración de tensión de C=C aromáticos.	1605 1533 1495	1615 1534 1495	1617 1533 1495	1617 1533 1495	1615 1534 1495
Deformación N–H en tijera, débil, de amina secundaria	1495	1495	1495	1495	1495
Deformación asimétrica metilenos	1462	1463	1462	1462	1463
Deformación C–H simétrica	1383	1383	1383	1383	1383
Tensión del –CO en el plano.	1383	1383	1383	1383	1383
Tensión C–N, C–C y Deformación C–H en el plano.	1080 1030	1082	1082	1080	1080
Deformación de 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
Oscilaciones C–H (CH ₂)	608	610	610	610	610
Flexión C–H aromáticos sustit.	463	463	464	464	463

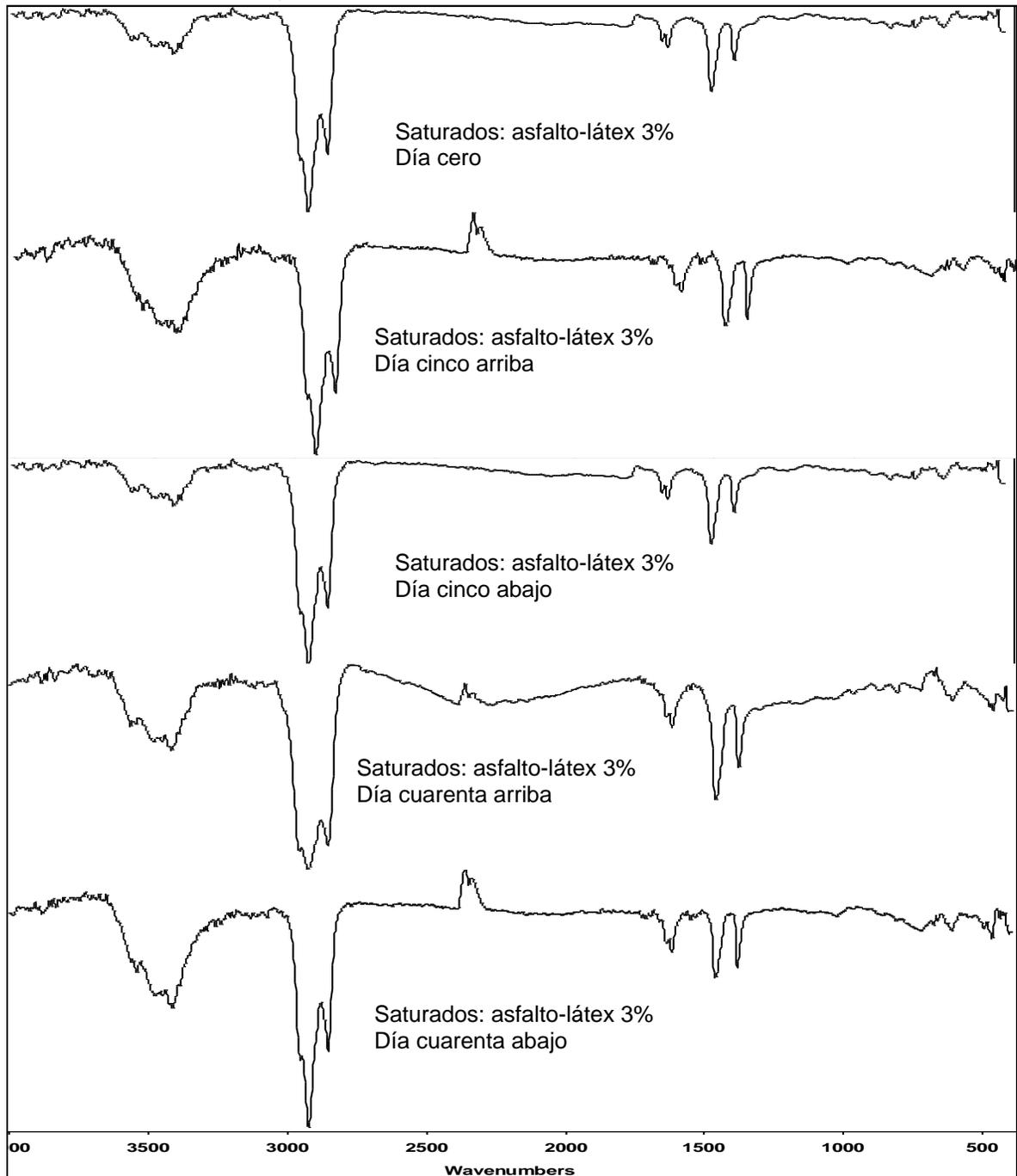
Comparando los espectros IR de los aromáticos del asfalto modificado con látex al 3% de los días cinco y cero, se observa similitud en las principales bandas, sin embargo, la banda presente a 1082 cm⁻¹, ocasionada por la vibración de tensión C–N, C–C y deformación C–H en el plano, es ancha y de mayor intensidad, tanto en la parte de arriba como en la de abajo, debido a la incorporación del polímero en el asfalto.

Al día cuarenta de almacenamiento, no se encuentran cambios con respecto al día cero, pero la banda a 1082 cm⁻¹, mencionada anteriormente, es de menor intensidad comparada con el día cinco, debido a interacciones del polímero con el asfalto.

3.8.2.4.4 Análisis de espectroscopia Infrarroja para parafinas o saturados

Los espectros IR de la fracción saturada del asfalto modificado con látex al 3%, al día cero, cinco y cuarenta, se encuentran consignados en la figura 75.

Figura 75. Espectro Infrarrojo de Saturados del asfalto modificado con látex al 3%, al día cero, cinco y cuarenta.



En la tabla 50 se tiene una comparación de las bandas más representativas en los espectros IR, de la fracción de saturados en el asfalto modificado con látex al 3%, a los días, cero, cinco y cuarenta.

Tabla 50. Bandas características del espectro Infrarrojo para Saturados del asfalto original y del asfalto modificado con látex al 3%, al día cero, cinco y cuarenta.

Banda obtenida (cm ⁻¹)	Día cero	Día cinco		Día cuarenta	
		Arriba	Abajo	Arriba	Abajo
Tensión C–H asimétrica.	2923	2923	2923	2922	2923
Tensión simétrica C–H	2853	2852	2852	2852	2852
Tensión media C–C alifáticos.	1617	1617	1620	1617	1617
Flexión C–H ciclopentano y. Deformación asimétrica C–H metilenos	1461	1460	1461	1461	1461
Deformación C–H simétrica	1382	1378	1381	1381	1381
Deformación de balanceo C–H del metileno –CH ₂ .	724	724	722	730	730
Oscilaciones C–H (CH ₂)	610	610	610	610	610

Las bandas obtenidas en la fracción saturada del asfalto modificado con látex al 3%, antes y durante el almacenamiento, son muy semejantes, lo que indica que las propiedades químicas no han sido alteradas en cuanto a sus vibraciones intermoleculares. Los grupos representativos de los saturados están conformados por enlaces C-C y C-H, ya mencionados en la tabla 50.

3.8.2.5 ANALISIS DE ESPECTROSCOPIA UV-VIS PARA LA FRACCION MALTENICA DEL ASFALTO MODIFICADO CON LATEX AL 3%, AL DIA CERO Y CINCO.

Como se mencionó en la sección 3.8.1.5 el análisis realizado por espectroscopia ultravioleta visible, se llevo a cabo al día cero y cinco. En la tabla 51 se muestran las absorciones de los espectros UV-Vis para la fracción malténica del asfalto original y modificado con látex al 3%, al día cero y cinco.

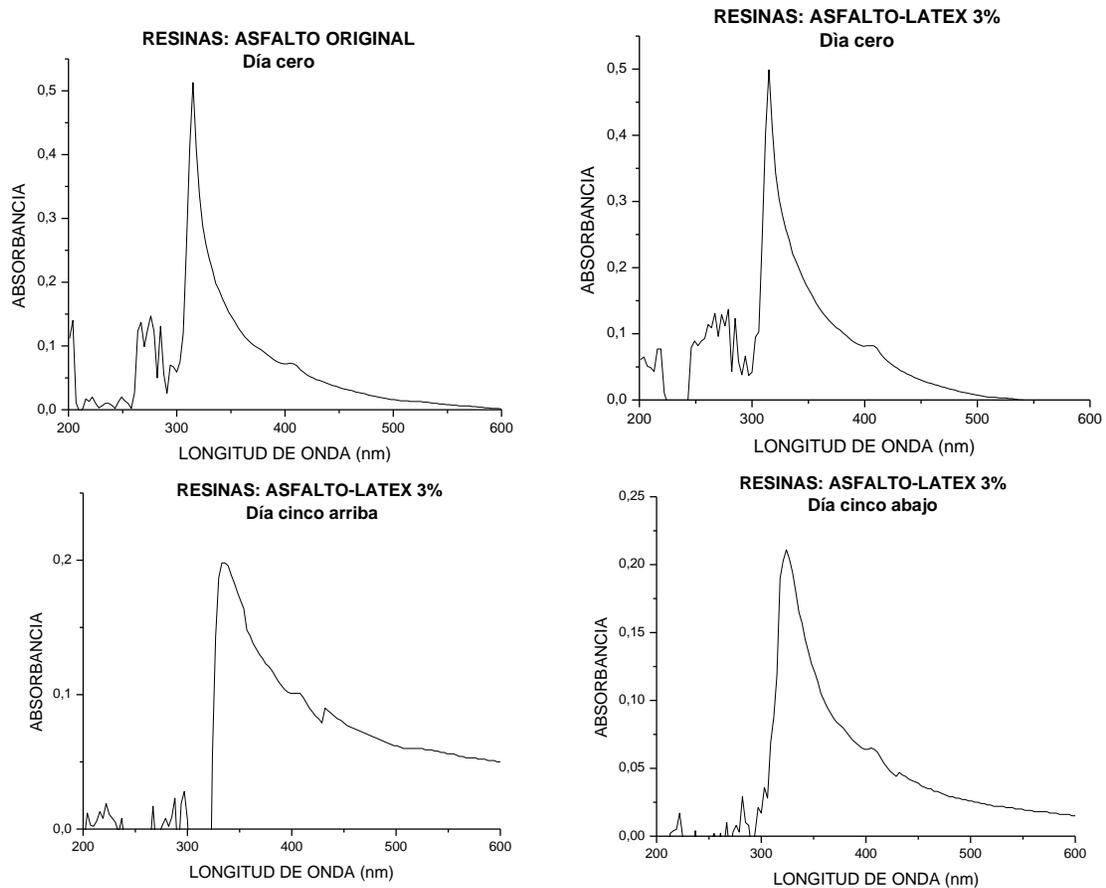
Tabla 51. Absorciones de los espectros UV-Vis para la fracción malténica del asfalto original y modificado con látex al 3%, al día cero y cinco.

Fracción malténica	Asfalto original Día cero	Asfalto-látex 3%		
		Día cero	Día cinco	
			Arriba	Abajo
Resinas	260-300-350-400	260-350-400	260-350-400	260-300-350-400
Aromáticos	325	325	325	325
Saturados	290-320-340-400	340	340	340

3.8.2.5.1 Análisis del espectro Ultravioleta–Visible para Resinas

En la figura 76 se muestran los espectros correspondientes a las resinas del asfalto modificado con látex al día cero y cinco, además de las resinas del asfalto original, que se observa en la tabla 51.

Figura 76. Espectro UV-Vis de resinas del asfalto original y modificado con látex al 3%, al día cero y cinco.

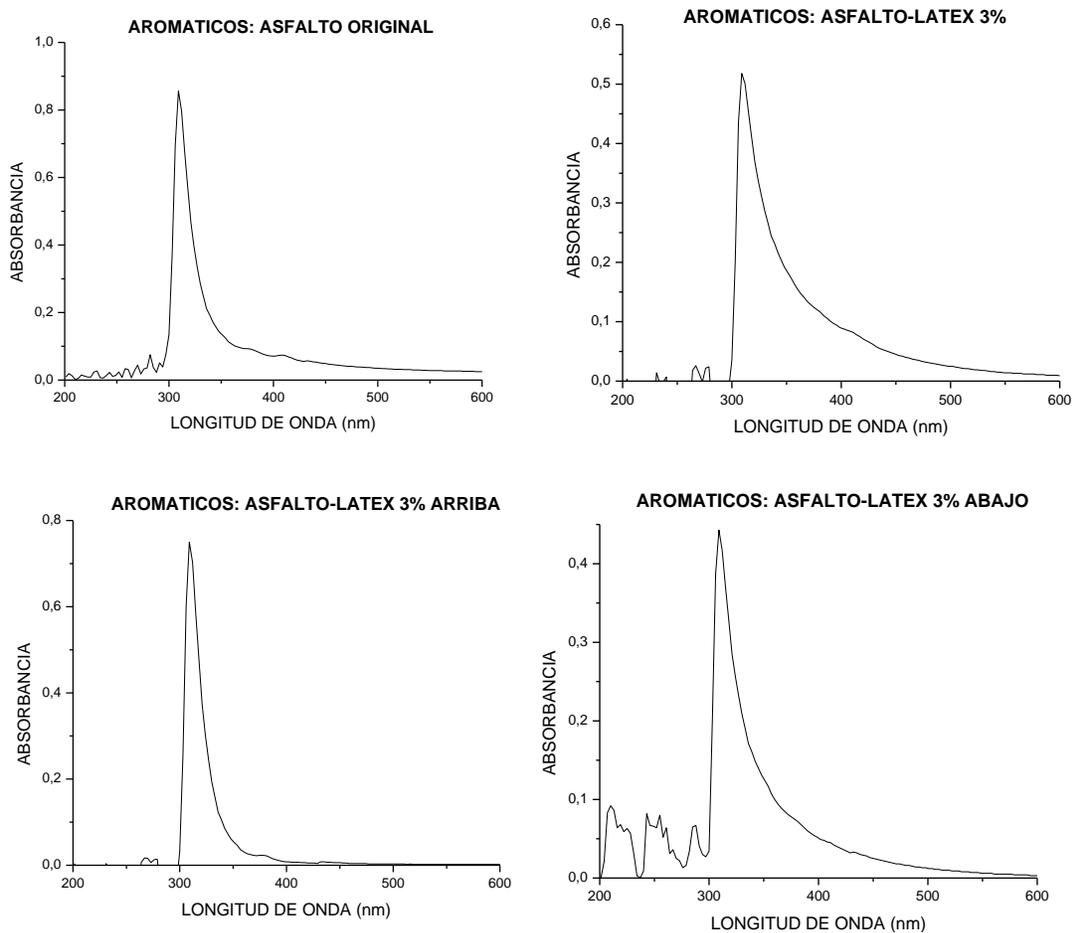


En la fracción resínica del asfalto modificado con látex al 3%, al día cero y cinco, analizado por UV-Vis, no se observan cambios en los espectros, es decir, que las absorciones debidas a los anillos aromáticos y grupos auxocrómicos con transiciones tipo $\pi \rightarrow \pi^*$ y $n \rightarrow \pi^*$, se encuentran tal como se esperaba. Por lo tanto, el polímero y la acción de la temperatura no afectan directamente las transiciones electrónicas de las moléculas que constituyen la fracción resínica, ya que en los cuatro espectros de la figura 76 se mantienen constantes.

3.8.2.5.2 Análisis del espectro Ultravioleta-Visible para aromáticos

La fracción aromática del asfalto modificado con látex al 3%, al día cero y cinco se analiza mediante espectroscopia UV-Vis, tal como se muestra en la figura 77, que serán comparadas con el asfalto original.

Figura 77. Espectro UV-Vis de Aromáticos del asfalto original y modificado con látex al 3%, al día cero y cinco.

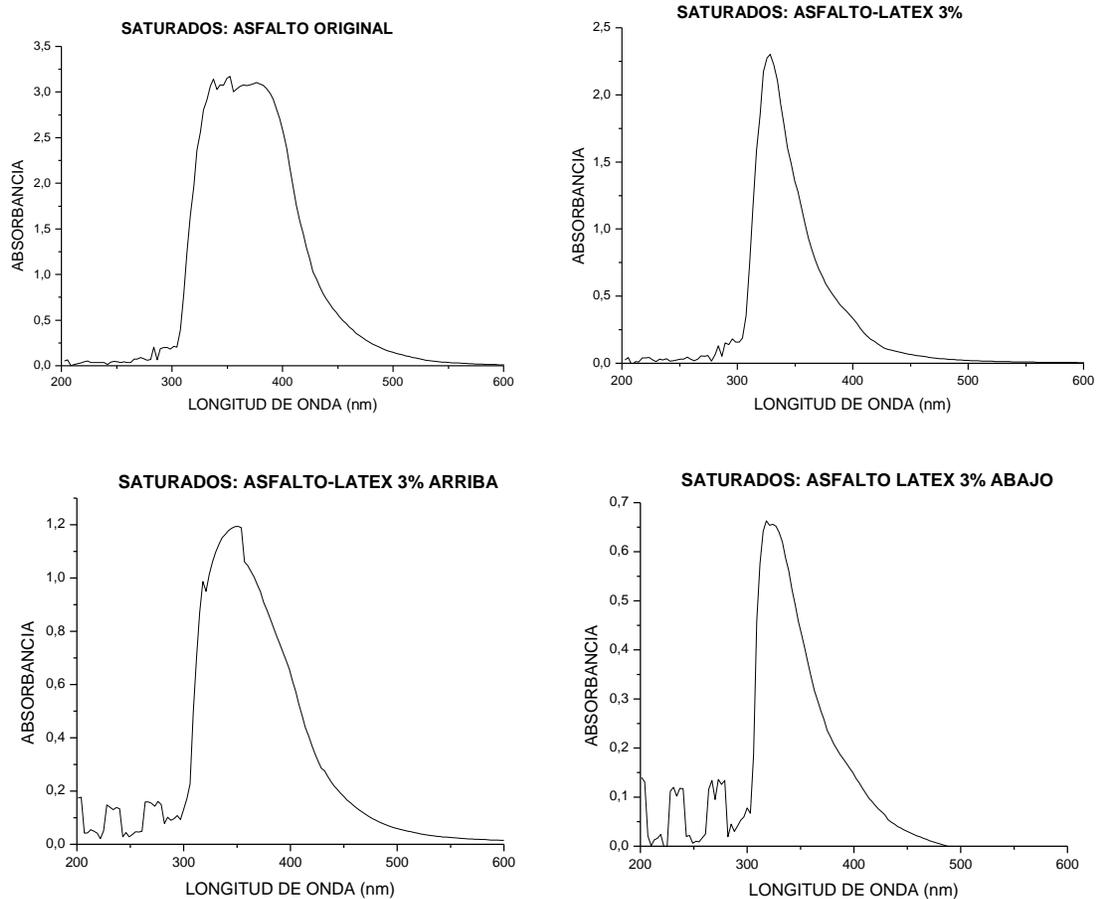


En los aromáticos, al igual que en las resinas del asfalto modificado con látex al 3%, las bandas representativas se mantienen. Cuyas transiciones tipo $\pi \rightarrow \pi^*$ son debidas a bases nitrogenadas presentes en los grupos aromáticos del asfalto. Indicando que mediante esta técnica, la fracción no se encuentra alterada por efectos externos.

3.8.2.5.3 Análisis del espectro Ultravioleta-Visible para saturados

Los espectros ultravioleta visible de la fracción saturada del asfalto modificado con látex al 3%, al día cero y cinco, se observan en la figura 78, al igual que el espectro del asfalto original.

Figura 78. Espectro UV-Vis de saturados del asfalto original y modificado con látex al 3%, al día cero y cinco



En los espectros que se muestran en la figura 78, no se observan las bandas esperadas para la fracción saturada, correspondientes a cadenas lineales y cíclicas, ya que deben ser en el ultravioleta lejano y por la resolución del instrumento no detecta a menores longitudes de onda de 200 nm, sin embargo, la banda ubicada a aproximadamente 340 nm, es ocasionada por un desplazamiento, por heteroátomos como: azufre, nitrógeno, entre otros, o por el aumento en el número de átomos de carbono en la cadena.

3.8.3 ANALISIS DEL ASFALTO MODIFICADO AL 3% CON LATEX ADITIVADO CON NH₄OH AL 3%, ANTES Y DURANTE EL PROCESO DE ALMACENAMIENTO: DIA CERO, CINCO Y CUARENTA

El proceso de almacenamiento del asfalto modificado al 3% con látex aditivado con NH₄OH al 3% se describe en la norma de Estabilidad al almacenamiento de asfaltos (Norma I.N.V. E – 726), sección 2.1.3.1, adicionalmente a lo que establece esta norma, el asfalto modificado se almacenó hasta el día cuarenta con

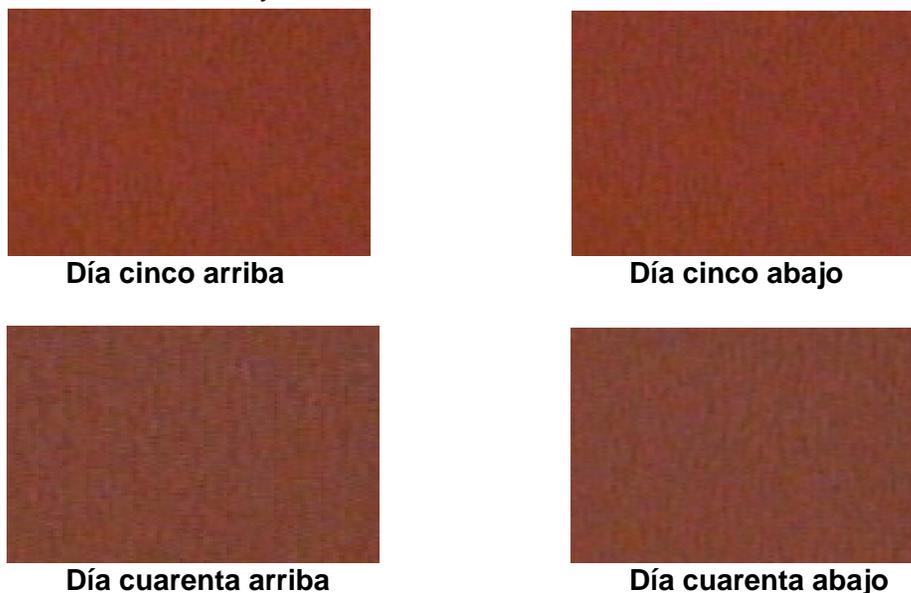
el fin de tener un rango mas amplio de comparación de los cambios físicos y químicos como se indica en la sección 2.3.3.

Transcurrido el tiempo de cada almacenamiento (a cinco y cuarenta días) se muestreo por la parte inferior y superior del recipiente, a las muestras recogidas se les determinó las respectivas propiedades físicas como se indica en la sección 2.1.2.2, estudio por microscopia electrónica, separación de las diferentes fracciones que componen este tipo de asfalto modificado indicada en la sección 2.3.4 y por último el análisis por espectroscopia IR.

3.8.3.1 ANALISIS DEL ASFALTO MODIFICADO AL 3% CON LATEX (NH₄OH 3%) AL DIA CINCO Y CUARENTA DE ALMACENAMIENTO POR MICROSCOPIA ELECTRONICA DE FLUORESCENCIA

Se realizó un estudio por microscopia de fluorescencia, indicado en la figura 79 para determinar la homogeneidad del asfalto modificado en la parte superior e inferior al día cinco y cuarenta de almacenamiento.

Figura 79. Microfotografías del asfalto modificado al 3% con látex aditivado con NH₄OH al 3%, al día cinco y cuarenta.



En las anteriores microfotografías podemos observar, que en ambos sistemas almacenados (día cinco y cuarenta), el asfalto presenta compatibilidad con el polímero (látex), que se evidencia por la presencia de una sola fase en las microfotografías tomadas a la parte superior e inferior de cada almacenamiento.

3.8.3.2 ANALISIS DE LAS PROPIEDADES FISICAS DEL ASFALTO MODIFICADO AL 3% CON LATEX ADITIVADO CON NH₄OH AL 3%, AL DIA CERO, CINCO Y CUARENTA

En la tabla 52 se consignan los valores de los ensayos físicos realizados al asfalto modificado al 3% con látex aditivado con NH₄OH al 3%, en el día cero analizados en la sección 3.5.2 y al día cinco y cuarenta de almacenamiento. Para estos dos últimos días fue necesario tomar muestras representativas de la parte de abajo y de arriba del recipiente que contenía la muestra de asfalto modificado con el fin de establecer una comparación.

Tabla 52. Propiedades físicas de consistencia del asfalto modificado al 3% con látex aditivado con NH₄OH al 3% al día cero, cinco y cuarenta.

PROPIEDAD FISICA	Asfalto modificado al 3% con látex (NH ₄ OH 3%)				
	Día cero	Día cinco		Día cuarenta	
		Abajo	Arriba	Abajo	Arriba
Viscosidad (cP)	193542	192955	193682	194167	193958
Penetración (1/10 mm)	76	76	75	77	77
Punto de ablandamiento	48.1° C	48.4 ° C	48.4 ° C	48.6 ° C	48.5 ° C
Ductilidad (cm)	+100	+100	+100	+100	+100
Recuperación elástica	14%	14%	14%	14%	14%
Peso específico del asfalto sólido (g/mL)	1.00626	1.00654	1.00446	1.00659	1.00450

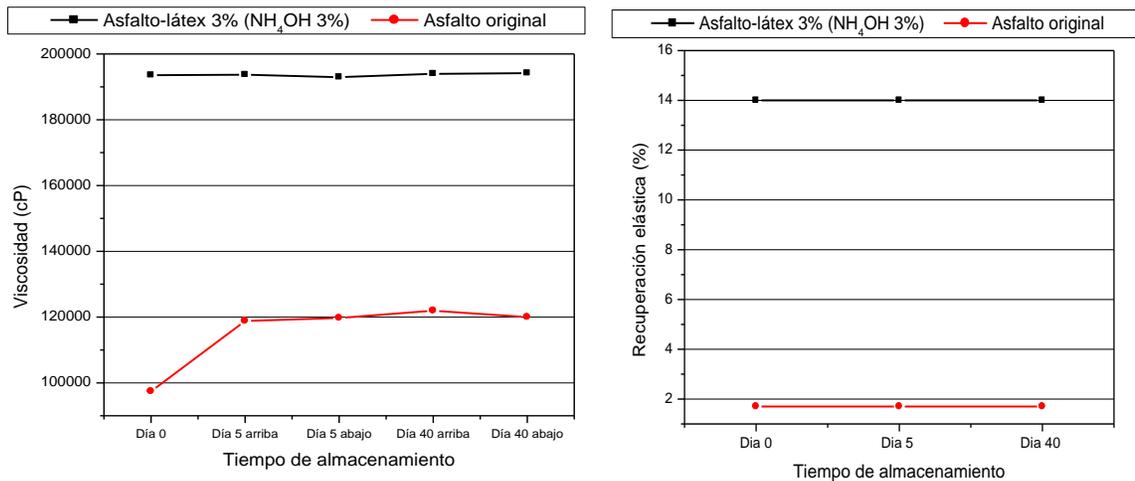
En la tabla 52, se observa un comportamiento constante de las propiedades físicas como: viscosidad, punto de ablandamiento, penetración, recuperación elástica, ductilidad y peso específico, tanto del día cero como en los días cinco y cuarenta respectivamente. Lo que corrobora la gran estabilidad del sistema modificado en el almacenamiento, debido a que sus propiedades físicas permanecen constantes.

En lo que se refiere a los ensayos de viscosidad, penetración y recuperación elástica, aparecen cambios notorios, con respecto al comportamiento del asfalto original en el proceso de almacenamiento, realizado en la sección 3.8.1.2. En la figura 80, se muestra la variación de viscosidad y recuperación elástica del asfalto modificado al 3% con látex aditivado con NH₄OH al 3%, frente al asfalto original, a los días cero, cinco y cuarenta.

Como se aprecia en la figura 80, el asfalto modificado al 3% con látex aditivado con NH₄OH al 3%, presenta un comportamiento constante en la viscosidad a los días cero, cinco y cuarenta; mientras que en el asfalto original no se observa el mismo comportamiento, ya que a medida que se aumentan los días de almacenamiento el valor de la viscosidad aumenta y estos valores no permanecen constantes al hacer la comparación entre la parte superior e inferior en un mismo

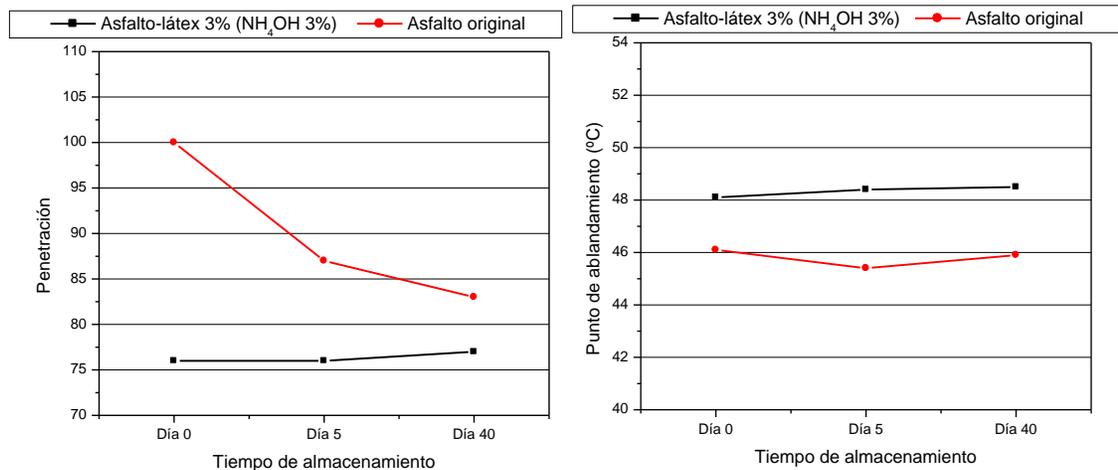
día de almacenamiento. En la recuperación elástica los valores permanecen constantes durante el proceso de almacenamiento, en el asfalto original y modificado al 3% con látex aditivado con NH_4OH al 3%, sin embargo, como se menciona en la sección 3.5.2, el polímero con la ayuda del solvente incrementa las propiedades elásticas del asfalto.

Figura 80. Variación de la viscosidad y recuperación elástica del asfalto original y modificado al 3% con látex aditivado con NH_4OH al 3%, a los días cero, cinco y cuarenta



En la figura 81 se observan las variaciones de penetración y punto de ablandamiento del asfalto original y modificado al 3% con látex aditivado con NH_4OH al 3%, antes y después del proceso de almacenamiento.

Figura 81. Variación de la penetración y punto de ablandamiento del asfalto original y modificado al 3% con látex aditivado con NH_4OH al 3% a los días cero, cinco y cuarenta.



En la figura 81, se muestran los valores constantes de penetración y punto de ablandamiento al día cero cinco y cuarenta, del asfalto modificado al 3% con látex aditivado con NH₄OH al 3%, mientras que el asfalto original presenta variaciones. Al comparar estas dos muestras se observó que varían, debido al efecto del polímero en el asfalto, ya que genera endurecimiento, y por ello la disminución de la penetración, que conlleva al aumento en el punto de ablandamiento, por ser inversamente proporcionales. Esto se corrobora con el aumento en la viscosidad observado en la figura 80.

3.8.3.3 ANALISIS DE LAS PROPIEDADES QUIMICAS (SARA), DEL ASFALTO MODIFICADO AL 3% CON LATEX ADITIVADO CON NH₄OH AL 3%, AL DIA CERO, CINCO Y CUARENTA

Los resultados de la separación de las fracciones del asfalto modificado, almacenado a los días cinco y cuarenta se muestran a continuación en la tabla 53 también se incluyen los datos obtenidos de este mismo asfalto al día cero cuyo respectivo análisis se encuentra en la sección 3.4.2.1.

Tabla 53. Porcentajes de las fracciones separadas del asfalto modificado al 3% con látex aditivado con NH₄OH al 3%, al día cero, cinco y cuarenta

Asfalto modificado 3% con látex (NH ₄ OH 3%)		Saturados	Aromáticos	Resinas	Asfaltenos
		%	%	%	%
Día cero		52	15	19	14
Día cinco	Abajo	53	14	19	14
	Arriba	54	14	19	13
Día cuarenta	Abajo	53	14	19	14
	Arriba	53	14	19	14

Haciendo una comparación de las diferentes fracciones del asfalto al día cinco con el día cuarenta de almacenamiento, tanto de las muestras de la parte de abajo y de arriba del recipiente, no se encuentran diferencias entre sí, en esta muestra de asfalto modificado al 3% con látex aditivado con NH₄OH al 3%. La misma similitud se observa al comparar el día cinco y cuarenta con el día cero.

Teniendo en cuenta los anteriores resultados, se deduce que las propiedades químicas del asfalto modificado al 3% con látex aditivado con NH₄OH al 3%, no se alteran durante el almacenamiento.

3.8.3.4 ANALISIS POR ESPECTROSCOPIA IR DE LA FRACCION ASFALTENICA Y MALTENICA DEL ASFALTO MODIFICADO AL 3% CON LATEX ADITIVADO CON NH₄OH AL 3%, AL DIA CERO, CINCO Y CUARENTA

Por espectroscopia infrarroja, se analizan las bandas características de los diferentes grupos que componen las fracciones del asfalto, con el fin de establecer una comparación en los días de almacenamiento (día cinco y cuarenta) del asfalto modificado al 3% con látex aditivado con NH₄OH al 3%. Para llevar a cabo este estudio, fue necesario tomar muestras de asfalto de la parte de abajo y de arriba en los días cinco y cuarenta de almacenamiento. La separación de las fracciones (saturados, aromáticos, resinas y asfaltenos) que componen el asfalto se realizó llevando a cabo el procedimiento descrito en la sección 2.3.4.

3.8.3.4.1 Análisis de espectroscopia Infrarroja para asfaltenos

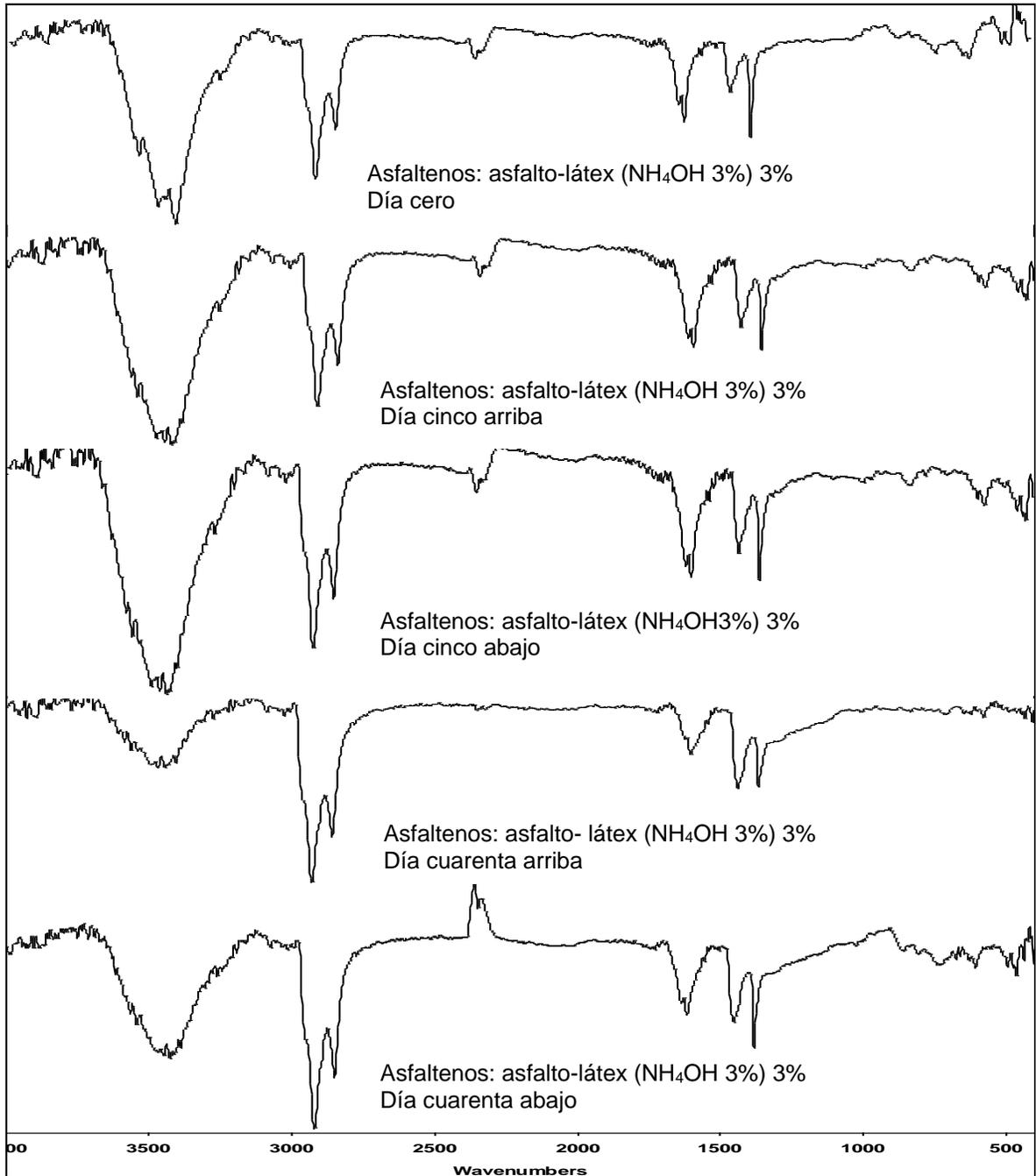
Los espectros IR de los asfaltenos del asfalto modificado al 3% con látex aditivado con NH₄OH al 3%, al día cero, cinco y cuarenta, se muestran en a figura 82.

En la tabla 54 se encuentran las bandas representativas de los asfaltenos del asfalto modificado al 3% con látex aditivado con NH₄OH al 3%, al día cero, cinco (arriba y abajo) y cuarenta (arriba y abajo) de almacenamiento.

Tabla 54. Bandas características del espectro Infrarrojo de la fracción asfáltica del asfalto modificado al 3% con látex aditivado con NH₄OH al 3%, al día cero, cinco y cuarenta

Banda obtenida (cm ⁻¹)					Origen de la banda
Asfalto modificado al 3% con látex (NH ₄ OH 3%)					
Día cero	Día Cinco		Día Cuarenta		
	Abajo	Arriba	Abajo	Arriba	
3413	3416	3415	3417	3415	Tensión asimétrica N-H
2849	2849	2849	2849	2850	Tensión -C-H
2920	2918	2919	2919	2920	
3020	3023	3022	3021	3020	
1617	1615	1617	1617	1615	Tensión C=C de aromáticos
1383	1381	1383	1383	1383	Deformación del -C-H metilos.
1454	1454	1454	1454	1454	
859	860	862	859	860	Flexión C-H fuera del plano de un naftaleno β-sustituido
610	610	608	608	611	Tensión C-S banda débil.
728	729	730	735	733	Deformaciones del C-H fuera del plano aromático
859	860	860	857	859	
498	488	486	465	466	Tensión del -C-S, cuando esta conjugando, banda débil.

Figura 82. Espectro Infrarrojo de asfaltenos del asfalto modificado al 3% con látex aditivado con NH_4OH al 3%, al día cero, cinco y cuarenta.

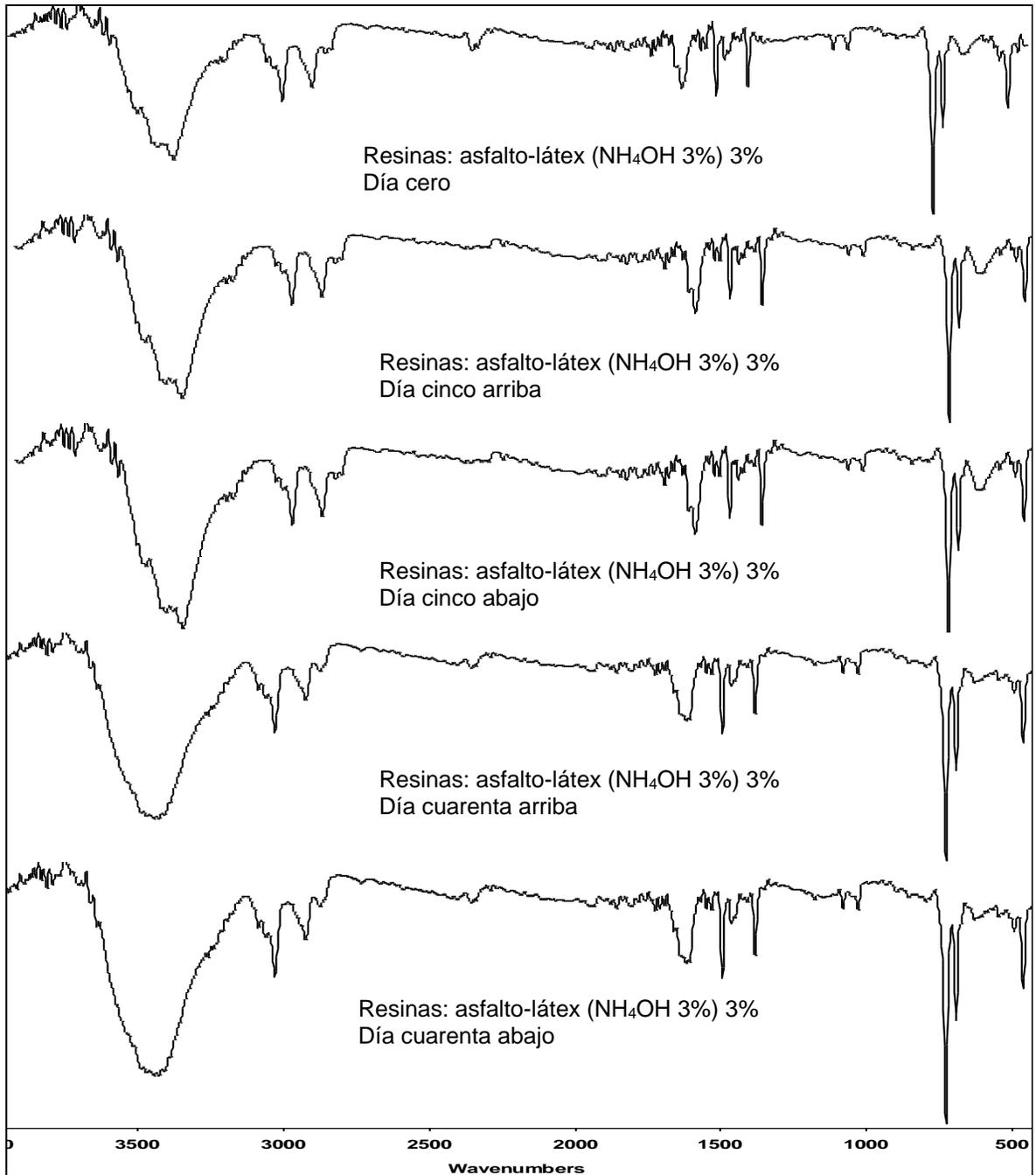


Comparando los espectros de la fracción asfáltica de la figura 82, se observan las absorciones características, es decir, que no se presentan cambios representativos a los días cero, cinco y cuarenta., en la muestra de asfalto modificado al 3% con látex aditivado con NH_4OH al 3%.

3.8.3.4.2 Análisis de espectroscopia Infrarroja para Resinas

En la figura 83 se observan los espectros IR de las resinas del asfalto modificado al 3% con látex aditivado con NH_4OH al 3%, al día cero, cinco y cuarenta.

Figura 83. Espectro Infrarrojo de resinas del asfalto modificado al 3% con látex aditivado con NH_4OH al 3%, al día cero, cinco y cuarenta.



En la tabla 55 se encuentran las bandas representativas de las resinas del asfalto modificado al 3% con látex aditivado con NH_4OH al 3%, al día cero, cinco (arriba y abajo) y al día cuarenta (arriba y abajo) de almacenamiento.

Tabla 55. Bandas características del espectro infrarrojo de las Resinas del asfalto modificado al 3% con látex aditivado con NH_4OH al 3%, al día cero, cinco y cuarenta

Banda obtenida (cm^{-1})					Origen de la banda
Asfalto modificado al 3% con látex (NH_4OH 3%)					
Día cero	Día cinco		Día cuarenta		
	Abajo	Arriba	Abajo	Arriba	
3412	3411	3411	3413	3413	Tensión O-H, N-H
3200-3300	3220-3300	3200-3000	3200-3300	3210-3300	Tensión ácidos carboxílicos
2857	2876	2876	2875	2875	Tensión C-H
2924	2924	2924	2923	2923	
3028	3028	3028	3028	3028	Tensión C-H aromático
3060	3059	3060	3059	3059	
1720-1960	1724-1908	1720-1910	1724-1910	1720-1900	Armónicos y sobretonos de vibración de tensión C=C
1464	1448	1450	1450	1458	Bandas con intensidad variables, vibración de tensión del C=C aromáticos.
1495	1495	1493	1463	1460	
1616	1616	1615	1606	1610	
1383	1383	1383	1383	1383	Vibración de deformación de aleteo y torsión del metileno
790-900	840-850	840-860	798-810	798-810	Deformación de abanico fuera del plano N-H
629	629	629	620	620	Vibración de tensión C-S
740	694	694	694	694	Deformaciones del C-H fuera del plano aromático
700	728	728	728	728	
1080	1080	1080	1081	1081	C-O alcoholes, ácidos carboxílicos
1725	1725	1725	1725	1725	C=O ácidos carboxílicos

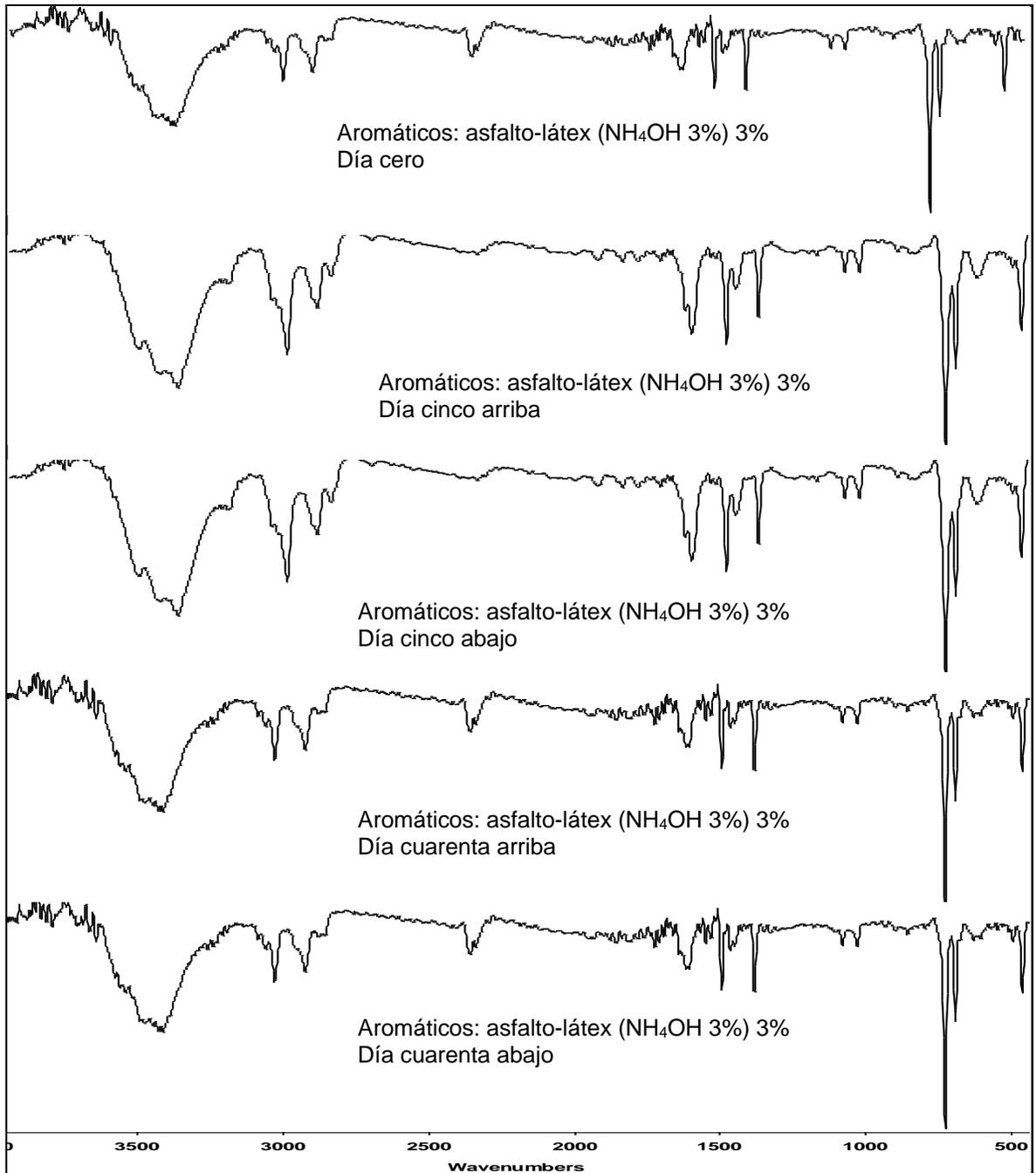
Al comparar los espectros tomados de las resinas de la parte de abajo y de arriba en cada almacenamiento del día cinco y cuarenta respectivamente, no se observan diferencias en cuanto a cambios de frecuencia e intensidad de las bandas. Sin embargo, la absorción a 2924 cm^{-1} correspondiente a la tensión de grupos C-H, se encuentra de mayor intensidad en los espectros del día cinco de almacenamiento. De igual forma se encuentra la banda a 629 cm^{-1} característica de vibraciones de tensión C-S, esto debido posiblemente a que hay una mayor interacción de los grupos o moléculas en el día cinco de almacenamiento por las altas temperaturas a que fue sometido el sistema, lo cual ayuda a que se faciliten las interacciones entre los diferentes grupos que hacen parte de esta fracción.

En los espectros de los dos sistemas almacenados con su estado inicial, se observan las bandas características de las resinas y no se destacan diferencias en cuanto a frecuencias de absorción e intensidad de las bandas.

3.8.3.4.3 Análisis de espectroscopia Infrarroja para aromáticos

Los espectros IR de aromáticos del asfalto modificado al 3% con látex aditivado con NH_4OH al 3%, al día cero, cinco y cuarenta se muestran en la figura 84.

Figura 84. Espectro Infrarrojo de Aromáticos del asfalto modificado al 3% con látex aditivado con NH_4OH al 3%, al día cero, cinco y cuarenta.



En la tabla 56 se encuentran las bandas representativas de los aromáticos del asfalto modificado al 3% con látex aditivado con NH_4OH al 3%, a los días cero, cinco y cuarenta.

Tabla 56. Bandas características del espectro Infrarrojo para aromáticos del asfalto modificado al 3% con látex aditivado con NH_4OH al 3%, a los días cero, cinco y cuarenta

Banda obtenida (cm^{-1})					Origen de la banda
Asfalto modificado al 3% con látex (NH_4OH 3%)					
Día cero	Día cinco		Día cuarenta		
	Abajo	Arriba	Abajo	Arriba	
3412	3424	3422	3415	3416	Tensión –N-H
3027	3030	3029	3027	3029	Tensión C-H aromático
2878	2878	2878	2878	2878	Tensión C-H
2924	2924	2924	2924	2924	
2878	2878	2878	2878	2878	Tensión simétrica metilos
2924	2924	2924	2924	2924	Tensión asimétrica metilenos
1464	1462	1460	1462	1460	Deformación asimétrica metilos
1720-1930	1709-1946	1708-1950	1710-1900	1712-1905	Armónicos y sobretonos de vibración de tensión C=C
1520	1495	1494	1495	1494	Bandas de intensidad variable, tensión C=C aromáticos
1616	1616	1616	1616	1615	
694	694	694	694	694	Deformación C-H (Bandas fuertes) aromáticos
728	728	728	728	728	
1250	1230	1231	1230	1231	Vibración de tensión del C-N cuando están conjugados, 2 picos corresponde al pirrol.
1345	1310	1310	1300	1302	
1383	1383	1383	1383	1383	Tensión –CO en el plano.
857	873	896	874	874	Deformación de abanico fuera del plano N-H
1030	1030	1030	1030	1030	Tensión C–N, C–C y deformación C–H en el plano.
1080	1080	1080	1080	1080	

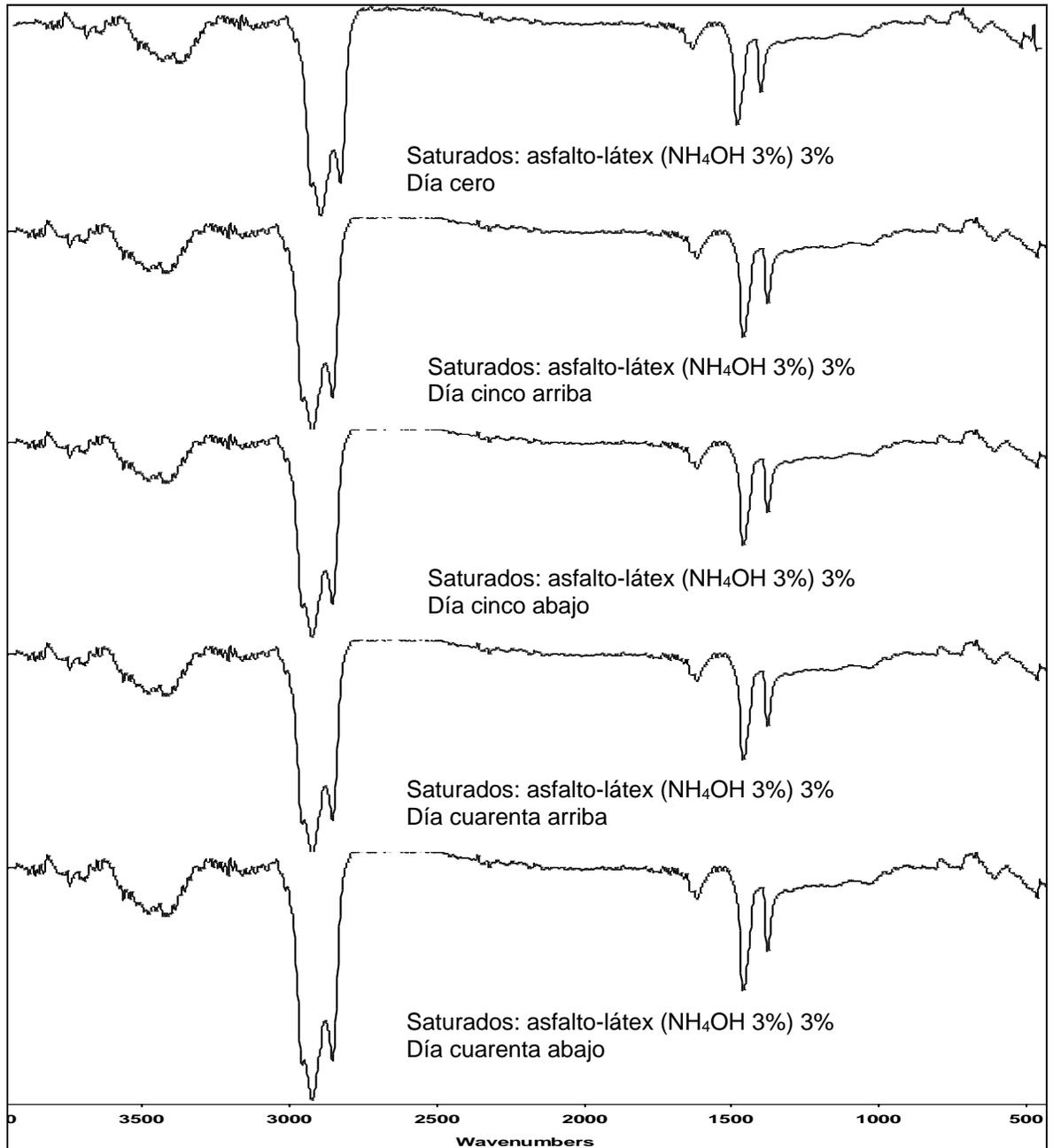
Teniendo en cuenta los espectros de la figura 84, se conservan las bandas representativas en esta fracción aromática. En los espectros tomados a la parte inferior y superior en cada almacenamiento (días cinco y cuarenta) no se observan diferencias en aumento o disminución de intensidad de bandas.

Al comparar los espectros del día cinco con los del día cero y cuarenta, se observa que las bandas a 1495cm^{-1} y 1616cm^{-1} que pertenecen a vibraciones de tensión C=C aromáticos, se encuentran de mayor intensidad. Esta diferencia probablemente es debida, a que los grupos reaccionen mas fácilmente debido al incremento de temperatura al que esta sometido el sistema en esta etapa de almacenamiento.

3.8.3.4.4 Análisis de espectroscopia Infrarroja para parafinas o saturados

Los espectros de infrarrojo de la fracción de saturados del asfalto modificado al 3% con látex aditivado con NH_4OH al 3%, al día cero, cinco y cuarenta, se observan en la figura 85.

Figura 85. Espectro Infrarrojo de saturados del asfalto modificado al 3% con látex aditivado con NH_4OH al 3%, al día cero, cinco y cuarenta.



En la tabla 57 se consignan las bandas representativas de saturados del asfalto modificado al 3% con látex aditivado con NH₄OH al 3%, a los días cero, cinco (arriba y abajo) y cuarenta (arriba y abajo) de almacenamiento.

Tabla 57. Bandas características del espectro Infrarrojo para Saturados del asfalto modificado al 3% con látex aditivado con NH₄OH al 3%, a los días cero, cinco y cuarenta.

Banda obtenida (cm ⁻¹)					Origen de la banda
Asfalto modificado al 3% con látex (NH ₄ OH 3%)					
Día cero	Día cinco		Día cuarenta		
	Abajo	Arriba	Abajo	Arriba	
2852	2852	2852	2851	2851	Vibración de alargamiento por C-H tensión asimétrica.
2923	2923	2924	2923	2923	
1617	1617	1617	1617	1617	Tensión media enlaces C-C alifáticos
1460	1459	1460	1460	1460	Flexión C-H del ciclopentano.
1378	1378	1379	1377	1377	Vibración C-H asimétrica
740	724	724	740	740	Vibración de oscilación metileno -CH ₂ .

En los espectros de la figura 85, pertenecientes al día cero, cinco y cuarenta, aparecen las bandas representativas de los compuestos saturados. No se observan diferencias en intensidad y cambios de frecuencia de las bandas.

Teniendo en cuenta el análisis realizado a las diferentes fracciones del asfalto modificado al 3% con látex aditivado con NH₄OH al 3%, se observa que este sistema almacenado a los días cinco y cuarenta, no sufre cambios en su composición comparándolo con su estado inicial (día cero), esto es corroborado con los resultados de los porcentajes de la separación de este asfalto modificado analizado anteriormente en el apartado 3.8.3.3.

3.8.3.5 ANALISIS DE ESPECTROSCOPIA UV-VIS PARA LA FRACCION MALTÉNICA DEL ASFALTO MODIFICADO AL 3% CON LATEX ADITIVADO CON NH₄OH AL 3%, AL DIA CERO Y CINCO

Tal como se mencionó en los numerales 3.8.1.5 y 3.8.2.5, el análisis mediante la técnica de espectroscopia UV-Vis, se realizó al día cero y cinco. En la tabla 58 se encuentran las absorciones resumidas para la fracción de maltenos del asfalto modificado al 3% con látex aditivado con NH₄OH al 3%.

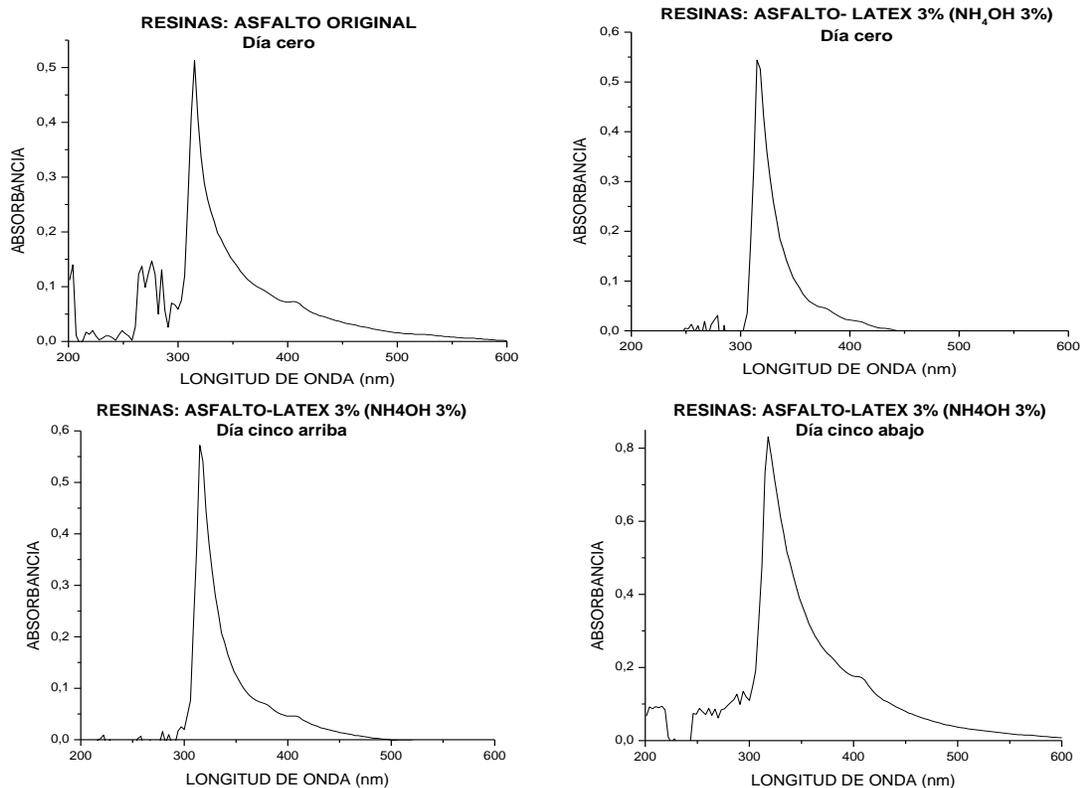
Tabla 58. Absorciones de los espectros UV-Vis para la fracción malténica del asfalto original y modificado al 3% con látex aditivado con NH₄OH al 3%, al día cero y cinco

Fracción malténica	Asfalto original Día cero	Asfalto-látex 3%		
		Día cero	Día cinco	
			Arriba	Abajo
Resinas	260-300-350-400	260-350-400	260-350-400	260-350-400
Aromáticos	325	325	325	325
Saturados	290-320-340-400	340	340	340

3.8.3.5.1 Análisis del espectro Ultravioleta Visible para Resinas

En la figura 86 se observan los espectros UV-Vis de la fracción resínica del asfalto original y modificado al 3% con látex aditivado con NH₄OH al 3%, al día cero y cinco, de acuerdo a las absorciones reportadas en la tabla 58.

Figura 86. Espectro UV-Vis de resinas del asfalto original y modificado al 3% con látex aditivado con NH₄OH al 3%, al día cero y cinco.



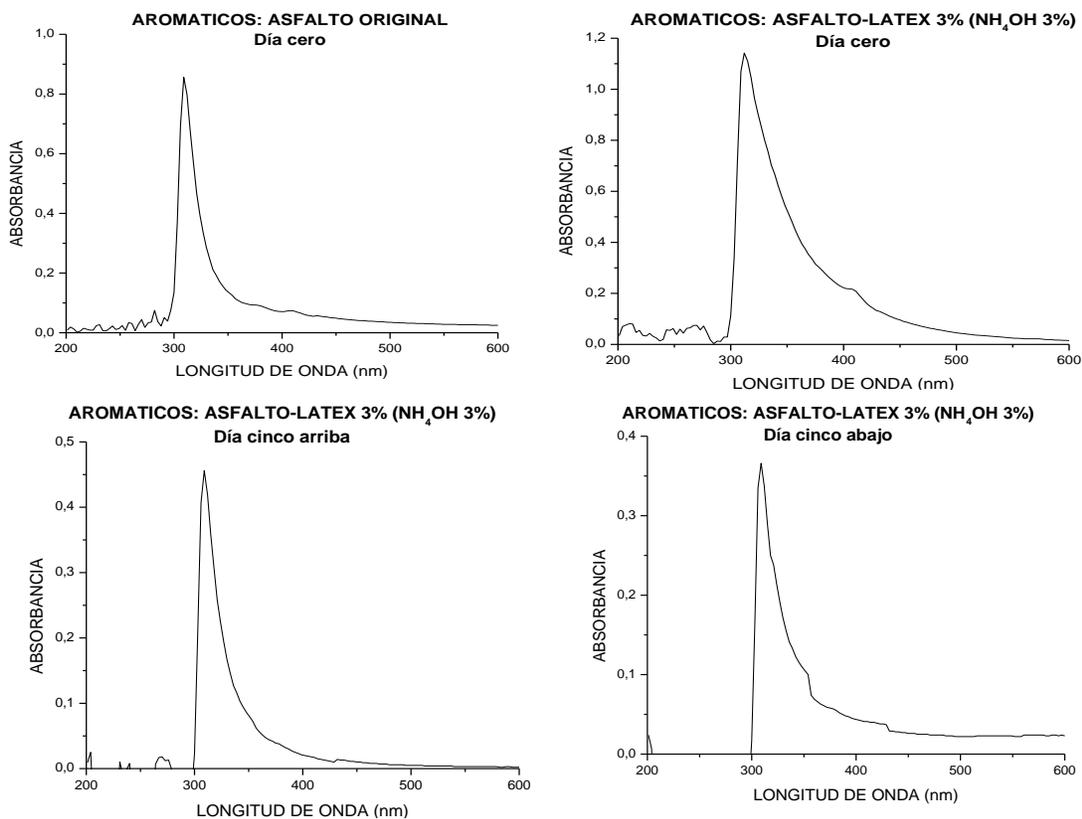
En los espectros de las resinas para el asfalto original y modificado, tanto al día cero como para el día cinco, no se presentan cambios significativos, los que indica la presencia de las transiciones $\pi \rightarrow \pi^*$ y $n \rightarrow \pi^*$, ocasionadas por los anillos

aromáticos y grupos auxocrómicos presentes en esta fracción del asfalto. Como se mencionó en la sección 3.7.2.3.1, la absorción a 400 nm, debida a grupos auxocrómicos (OH, NH₂) en los anillos aromáticos, dentro de las macromoléculas de resinas, se observa con menor intensidad, y un poco desplazada hacia longitudes de onda inferiores, debido al efecto hipsocrómico ocasionado por la baja polaridad del solvente (NH₄OH), pero en el día cinco se mantiene, el efecto puede ser debido al solvente, para preparar la solución a analizar en el UV-Vis (acetona-tolueno 1:1), que se puede corroborar con el aumento en la intensidad de la banda de absorción a 260 nm, debida a este solvente.

3.8.3.5.2 Análisis del espectro Ultravioleta Visible para aromáticos

En la figura 87 se encuentran los espectros UV-Vis de la fracción aromática del asfalto original y modificado al 3% con látex aditivado con NH₄OH al 3%, al día cero y cinco.

Figura 87. Espectro UV-Vis de Aromáticos del asfalto modificado al 3% con látex aditivado con NH₄OH al 3%, al día cero, cinco y cuarenta.



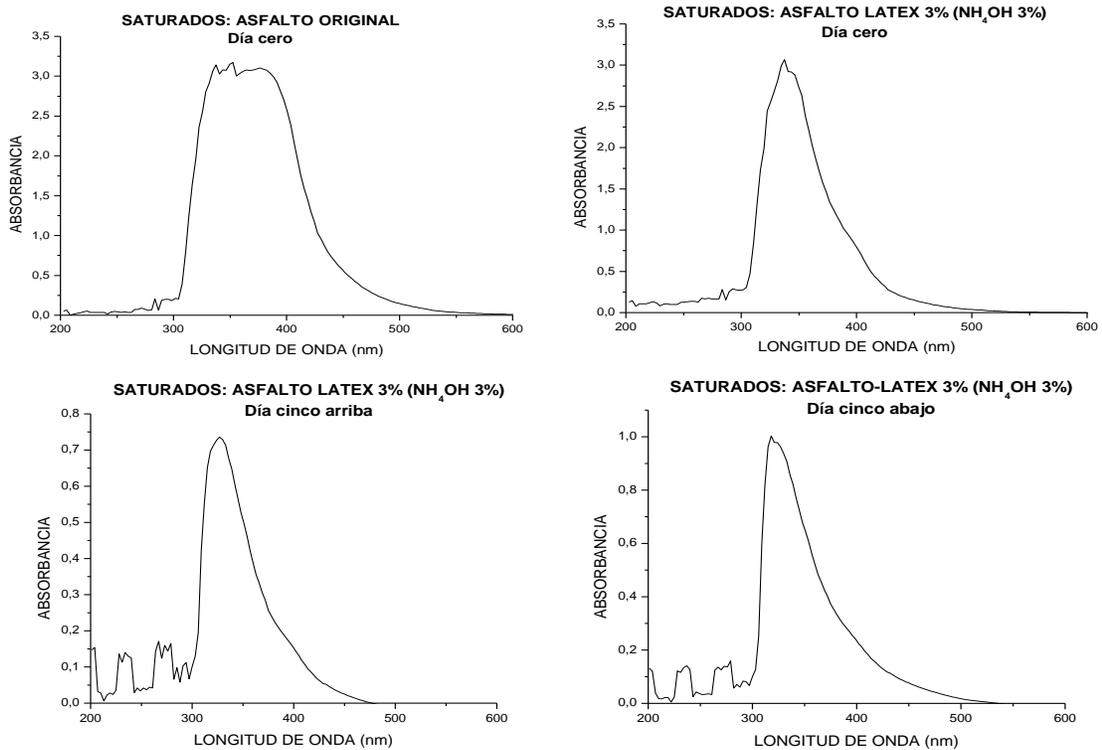
Para los espectros de la fracción aromática en las muestras de asfalto original y modificado al 3% con látex aditivado con NH₄OH al 3%, al día cero y cinco, no

presentan diferencias significativas, indicando que las transiciones tipo $\pi \rightarrow \pi^*$, se encuentran presentes, debidas a las bases nitrogenadas que existen en los grupos aromáticos, por lo tanto los efectos externos, como la temperatura y los solventes, no alteran la estructura electrónica principal de esta fracción.

3.8.3.5.3 Análisis del espectro Ultravioleta Visible para parafinas o saturados

Los espectros UV-Vis de los saturados del asfalto original y modificado al 3% con látex aditivado con NH_4OH al 3%, al día cero y cinco, se encuentran en la figura 88, con el fin de observar los cambios presentes.

Figura 88. Espectro ultravioleta de saturados del asfalto modificado al 3% con látex aditivado con NH_4OH al 3%, al día cero y cinco.



Como se ha observado en todos los espectros de la fracción saturada, las bandas esperadas no se detectan, debido a que se esperaba que aparezcan en la región del ultravioleta lejano. Por lo tanto, la banda que se observa cada vez más aguda (en comparación con el asfalto original), cerca de los 340 nm, es ocasionada por la posible presencia de heteroátomos en medio de su estructura, tales como, nitrógeno, azufre, oxígeno entre otros, que poseen electrones no enlazados del tipo n , provocando transiciones $n \rightarrow \sigma^*$ y $\sigma \rightarrow \sigma^*$ (las primeras se encuentran a mayor longitud de onda), o a consecuencia del incremento de número de átomos de carbono.

4. CONCLUSIONES

- De acuerdo al comportamiento del asfalto original durante el proceso de almacenamiento, se observó, gran inestabilidad en cuanto a su comportamiento, químico y físico, por lo tanto, es importante la aditivación de dicho asfalto, con el fin de mejorar este comportamiento, para lo cual se utilizó el látex (caucho natural).
- Se realizaron modificaciones al asfalto original con látex natural a diferentes concentraciones 1%, 3%, 5% y 10%, descartando la concentración del 10%, debido a que precipitó el polímero, como se comprueba en la microfotografía de dicha concentración.
- Debido a las propiedades físicas y químicas del látex, como a su poder coagulante a temperaturas inferiores a las de mezclado, fue necesario buscar un método que evite la coagulación y posterior precipitación del polímero en el asfalto. Se logró evitar la coagulación del látex adicionando como solvente el hidróxido de amonio (NH_4OH) al 3% y 5%.
- En la modificación del asfalto con látex aditivado con NH_4OH al 3%, se observó un mejor comportamiento que en las modificaciones con látex sin aditivar, aumentando propiedades como, viscosidad y punto de ablandamiento, mientras la penetración disminuye, lo que indica un endurecimiento en el asfalto; en cuanto a la recuperación elástica se observó un incremento, mejorando así la elasticidad del asfalto.
- El asfalto modificado al 1%, 3% y 5% con látex aditivado con NH_4OH al 5%, fue descartado por su difícil proceso de mezclado y calentamiento, dicha dificultad deteriora el asfalto en sus propiedades químicas, físicas y reológicas, haciendo de éste, un material no apto para pavimentación vial.
- En el asfalto modificado con látex al 3%, se obtuvo una pequeña inestabilidad en el día cinco después del proceso de almacenamiento, en cuanto a la viscosidad, debido al efecto de la temperatura, que genera una transformación de los componentes del asfalto, esto se observó con el incremento de resinas y saturados al día cinco de almacenamiento y la disminución de asfaltenos y

aromáticos, por estas razones, es importante aditivar el látex con hidróxido de amonio (NH_4OH), con el fin de estabilizar el nuevo material.

- La concentración óptima de látex que mejoró las propiedades físicas y químicas del asfalto original fue la del 3% de látex aditivado con Hidróxido de Amonio (NH_4OH) al 3%. Con esta aditivación del látex se logró aumentar su solubilidad y evitar fenómenos de precipitación en el proceso de mezclado y almacenamiento del asfalto, debido a las altas temperaturas que requiere este proceso.
- Las técnicas empleadas como, Espectroscopia Infrarroja con Transformada rápida de Fourier y Ultravioleta – Visible, son importantes para la identificación de grupos funcionales para el análisis realizado al látex, al asfalto en sus diferentes modificaciones y las fracciones obtenidas a través de las separaciones cromatográficas del asfalto.
- El sistema, asfalto modificado al 3% con látex aditivado con NH_4OH al 3% presentó gran estabilidad en el almacenamiento a los días cero, cinco y cuarenta, ya que no se presentan cambios, esto se corrobora con: el estudio de microscopia de fluorescencia, presentando una superficie homogénea, en el análisis de las propiedades físicas (viscosidad, penetración, punto de ablandamiento, recuperación elástica, ductilidad y peso específico), en las propiedades químicas (SARA), en el estudio por espectroscopia de infrarrojo y UV-Vis.
- ❖ El látex como modificador en el asfalto, incrementa las fracciones resínicas y saturadas, por lo tanto, se recomienda emplearlo en un asfalto que tenga bajo contenido en dichas fracciones.
- ❖ Para conocer el comportamiento del asfalto modificado al 3% con látex natural y con látex aditivado con hidróxido de amonio al 3%, en carretera, se recomienda realizar otros tipos de ensayo, donde se evalúe, la resistencia a la carga y durabilidad.

BIBLIOGRAFIA

(1) Monografía. Origen y Composición del Petróleo. Disponible en Internet: <http://www.monografias.com/trabajos11/cuadun/cuadun.shtml>. Fecha de consulta 19 de diciembre de 2005.

(2) ARENAS, H. Tecnología del Cemento Asfáltico. Segunda edición; Editorial FAID. Cali 2000.

(3) Monografía. Asfaltos Modificados con Polímeros. Disponible en Internet: <http://www.monografias.com>. Fecha de consulta 13 de diciembre de 2005.

(4) Polímeros. Disponible en Internet: <http://www.textoscientificos.com/polimeros>. Fecha de consulta 13 de diciembre de 2005.

(5) Monografía. Asfaltos Modificados con Polímeros. Disponible en Internet: <http://www.monografias.com/asfaltosmodificadosconpolimeros>. Fecha de consulta 20 de diciembre de 2005.

(6) Winkipedia. Disponible en Internet: <http://www.Winkipedia.Licornegro>. Fecha de consulta 13 de diciembre de 2005.

(7) El asfalto. Disponible en Internet: <http://www.arqhys.com/arquitectura/asfalto.html>. Fecha de consulta 31 de enero de 2006.

(8) Papelnet. Disponible en Internet: <http://www.Winkipedia>. Fecha de consulta 22 de diciembre de 2005.

(9) Producción de papel. Disponible en Internet: [http://uicnchile.terra-australis.org/Celulosa/procesoproductivo.htm#PROCESO %20 PRODUCTIVO](http://uicnchile.terra-australis.org/Celulosa/procesoproductivo.htm#PROCESO%20PRODUCTIVO). Fecha de consulta 2 de febrero de 2006.

(10) Origen del Asfalto. Disponible en Internet: http://www.e-asfalto.com/orig_asf/origenasf.htm Fecha de consulta 31 de enero de 2006.

(11) BUSTAMANTE A., SOGAMOSO I. A., GARZON F. Efecto del Lignosulfonato Sobre las Propiedades Ingenieriles de los Suelos Expansivos del Norte de Cali. Facultad de Ingeniería. Pontificia Universidad Javeriana. Diciembre de 2004. Cali. Colombia

(12) Monografía. El petróleo y su proceso de refinación. Disponible en Internet: <http://www.monografias.com/trabajos/petroleo>. Fecha de consulta 13 de enero de 2006.

(13) Enciclopedia virtual. Disponible en Internet: http://www.clinicaarquero.com/18_glosario.html. Fecha de consulta 19 de enero de 2006.

(14) Elastómeros. Disponible en Internet: <http://www.pslc.ws/spanish/elas.htm>. Fecha de consulta 19 de enero de 2006.

(15) Caucho Natural. Enciclopedia Encarta. Disponible en Internet: <http://www.encarta.com>. Fecha de consulta 19 de enero de 2006.

(16) Caucho Natural. Textos Científicos. Disponible en Internet: <http://www.textoscientificoscauchonatural.htm>. Fecha de consulta 21 de febrero de 2006.

(17) 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 2000.

(18) SKOOG D., HOLLER F., Principios de Análisis Instrumental, Quinta Edición, Mc Graw Hill, 2001, España.

(19) HARRIS D., Análisis Químico Cuantitativo, Grupo Editorial Iberoamerica, 1992, México.

(20) ARENAS, H. Tecnología del Cemento Asfáltico, Producción intelectual Profesor de la Universidad del Cauca, Popayán, 1992.

(21) AGNOSDER, J. Asfalto y Emulsiones Asfálticas, Instituto de Postgrados en Vías e Ingeniería Civil, Universidad del Cauca, Popayán, 1988.

(22) RUIZ, C. E. Pavimentos, Universidad Nacional de Colombia, Manizales, 1975.

(23) WADE, L. G. Química Orgánica, segunda edición, Prentice Hall Hispanoamericana S.A, México, 1993.

(24) MORRISON, R. T. y BOYD, R.N. Química Orgánica, Quinta edición, Pearson Educación, México, 1998.

(25) 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.

(26) ZULUAGA, F., INSUASTY, B., YATES, B., Análisis Orgánico Clásico y Espectral. Facultad de ciencias. Departamento de Química. Universidad del Valle. Santiago de Cali, Mayo 2000.

(27) Secretaria General Técnica. Oficina de Investigaciones y Desarrollo Tecnológico. Ministerio de Transporte. Instituto Nacional de Vías. República de Colombia. Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras. Santafé de Bogotá D.C., 1998.

ANEXOS

ANEXO A. 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 sílice gel, distribuidos en una columna superior y una inferior, respectivamente. En los diagramas esquemáticos de las figuras 7 y 9, se aprecia que la fracción malténica del asfalto, obtenida de la separación por precipitación con n-pentano, es incorporada a la columna y eluida 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 de arcilla) y los aromáticos (columna de sílice gel), los cuales son desorbidos mediante la adición de solventes adecuados, como, la mezcla benceno/acetona 1:1 y tolueno, respectivamente.

ANEXO B. VISCOSIDAD ROTACIONAL BROOKFIELD DE CEMENTOS ASFALTICOS (ASTM D-4402)

1. CONTENIDO

Este manual describe el procedimiento de prueba para determinar la viscosidad rotacional Brookfield de los cementos asfálticos, a que se refiere la Norma N CMT 4 05 002, Calidad de Materiales Asfaltos Modificado, en muestras tomadas conforme al manual M MMP 4 05 001, Muestreo de Materiales Asfálticos.

2. OBJETIVO DE LA PRUEBA

Esta prueba permite determinar la consistencia de los cementos asfáltico, en un rango de 38 a 260° C, mediante la determinación de la resistencia que ofrece una muestra de prueba a la deformación. La prueba consiste en determinar el para de torsión que es necesario aplicar en un eje rotacional, en el seno de una muestra de prueba colocada dentro de un contenedor, bajo condiciones controladas de temperatura, para que gire a una cierta velocidad.

3. EQUIPO

El equipo para la ejecución de la prueba estará en condiciones de operación, calibrado, limpio y completo en todas sus partes.

El equipo Brookfield Thermosel de este manual cuenta con:

- Viscosímetro Brookfield estándar. Dependiendo del rango de viscosidad, puede ser modelo tipo LV, RV, HA, o HB, de acuerdo con las recomendaciones del fabricante.
- Sistema de lectura digital.
- Extensión de guía o rotor.
- Sistema Thermosel, formado por un contenedor y una cámara de pruebas térmicas; un controlador de temperatura y un dispositivo graficador.

4. PREPARACION DEL EQUIPO

- Previamente a la realización de la prueba, el equipo estará debidamente calibrado, considerando las instrucciones del fabricante.
- Se selecciona el rotor adecuado de acuerdo con las recomendaciones del fabricante y se coloca este en la cámara de prueba.
- Se fijan los controles para precalentar el equipo hasta la temperatura de prueba y se espera por aproximadamente 1.5 h o hasta que la temperatura de equilibrio se haya alcanzado en la cámara de prueba y el rotor.
- Se retira la cámara de prueba y se vierte en ella la muestra como se indica en la siguiente cláusula.

5. PREPARACION DE LA MUESTRA

La preparación de la muestra de cemento asfáltico, obtenida según se establece en el Manual M MMP 4 05 001, Muestreo de Materiales Asfálticos, se hace de la siguiente manera:

- Se evita el sobrecalentamiento de la muestra o su inflamación.
- Se elige el volumen de la muestra de prueba, entre 8 y 10 mL, según el rotor seleccionado y de acuerdo con las recomendaciones del fabricante del equipo; se puede calcular la masa de muestra necesaria considerando su masa específica o densidad.
- Se evita exceder el llenado del contenedor, ya que el resultado de la prueba es muy sensible a la cantidad de muestra que se utilice. El nivel superior de la muestra debe interceptar al brazo del rotor, aproximadamente 3.2 mm arriba de la parte superior de la interfase entre el cuerpo cónico del rotor y su brazo.
- Se agita suficientemente la muestra para homogeneizarla.

6. PROCEDIMIENTO DE LA PRUEBA

Si la prueba se va a realizar a distintas temperaturas, se inicia con la temperatura menor. Se sigue el procedimiento que se describe a continuación para cada una de las temperaturas.

- Una vez preparada la muestra, se coloca de nuevo la cámara de prueba en el contenedor térmico.
- Se ajusta el rotor, introduciéndolo despacio y con cuidado hasta que esté sumergido a la profundidad indicada; entonces se mueve la cámara de prueba en un plano horizontal hasta que el rotor esté localizado aproximadamente en el centro de la misma. Es posible que para seleccionar el rotor adecuado, sea necesario realizar la prueba con distintos rotores.
- Se deja reposar la muestra de prueba aproximadamente 15 min, para permitir que se equilibre su temperatura.
- Si se utilizan modelos tipo RV, HA o HB, se hace funcionar el viscosímetro a 20 rpm; si se trata de modelos tipo LV, se hace rotar a 12 rpm, de acuerdo con lo indicado por el fabricante del equipo. Si la lectura del aparato esta entre 2 y 98 unidades, se hacen y registran tres lecturas a intervalos de 60s.
- Si la lectura es mayor de 98 unidades, se disminuye la velocidad del rotor. Si la lectura sigue siendo mayor de 98, se cambia el rotor por el siguiente más pequeño. Al hacer esto, es necesario ajustar el volumen de la muestra de prueba, como se indica en el numeral 5, de este manual. Cuando la lectura esté entre 2 y 98, se registran las lecturas como se indica en la fracción anterior.

7. CALCULOS Y RESULTADOS

Se reporta como resultado de esta prueba, en Pa s, el promedio de las lecturas observadas en el viscosímetro para cada temperatura de prueba, indicando el número de rotor utilizado. En caso necesario, se harán las conversiones de unidades necesarias, de acuerdo con las instrucciones del fabricante.

8. PRECAUCIONES PARA EVITAR ERRORES

Para evitar errores durante la ejecución de la prueba, se observan las siguientes precauciones:

- Realizar la prueba en un lugar cerrado, con ventilación indirecta, limpio y libre de corrientes de aire, de cambios de temperatura y de partículas que provoquen la contaminación de las muestras de prueba.
- Verificar que el equipo esté calibrado de acuerdo con las instrucciones del fabricante.
- Mantener constante la velocidad del rotor durante la lectura de las mediciones.

- Cuidar que todo el equipo esté perfectamente limpio, para que al hacer la prueba la muestra no se mezcle con agentes extraños y se altere el resultado. Se cuida de manera especial la limpieza del rotor. Después de cada determinación, el equipo se limpia utilizando una estopa impregnada con un disolvente apropiado.

ANEXO C. PENETRACION DE LOS MATERIALES ASFÁLTICOS (Norma ASTM D – 5 o 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. APARATOS Y MATERIAL NECESARIOS

2.1 Penetrómetro: El aparato para la medida de las penetraciones se denomina penetrómetro y, en esencia estará constituido por un mecanismo que permita el movimiento vertical sin rozamiento apreciable de un vástago o soporte móvil al cual pueda fijarse firmemente por su parte inferior, la aguja de penetración; y que permita, además, la colocación sobre el mismo, de diferentes cargas suplementarias; el aparato deberá estar calibrado para dar directamente la lectura en unidades de penetración, según el numeral 1.2. El peso del vástago será de 47.5 ± 0.05 g, y el peso total del conjunto móvil formado por el vástago juntamente con la aguja, de 50.0 ± 0.05 g.

Se deberá disponer igualmente, de pesas individuales suplementarias de 50.0 ± 0.05 g y 100.0 ± 0.05 g para obtener otras cargas totales móviles de acuerdo con las condiciones del ensayo. El penetrómetro deberá estar provisto, además, de una base de apoyo para la colocación del recipiente

con la muestra, de forma plana y que forme un ángulo de 90 grados con el sistema móvil, así como de un nivel de burbuja y tornillos de nivelación.

- Este vástago deberá poderse separar fácilmente del conjunto del penetrómetro para verificar y ajustar correctamente su peso.
- En el caso de aparatos fabricados con anterioridad a Enero 1/76, éstos podrán ajustarse a la norma presente o a la AASHTO T 49-74.

2.2 Aguja de penetración: La aguja será de acero inoxidable endurecido y templado, (ASTM Grado 440 C ó similar), con una dureza Rockwell C54 a C60, (0.039 a 0.040), tendrá unos 50 mm (2") de longitud y entre 1.00 y 1.02 mm de diámetro, con uno de sus extremos simétricamente afilado hasta formar un cono de ángulo comprendido entre 8°40' y 9°40' en toda su longitud, y cuyo eje sea coaxial con el de la aguja; la variación total axial entre las intersecciones de las superficies del cono y del cilindro, medida como proyección sobre el eje de simetría de la aguja, no deberá exceder de 0.0127 mm (0.0005"). Después de dada la conicidad, se corta su punta para formar un cono truncado, cuya base tenga un diámetro comprendido entre 0.14 y 0.16 mm (0.055 y 0.063") y esté situado en un plano perpendicular al eje de la aguja, con una tolerancia máxima de 2 grados y con sus bordes filosos y libres de rebabas.

La textura de la superficie cónica, medida según la norma (American National Standard B-46.1), deberá tener una rugosidad media superficial comprendida entre 0.2 y 0.3 μm (8 a 12 μ "). La aguja irá montada rígida y coaxialmente en un casquillo cilíndrico, de latón o acero inoxidable, de 3.2 \pm 0.05 (0.126 \pm 0.002") de diámetro y 38 \pm 1 mm (1.5 \pm 0.002") de largo, debiendo quedar una longitud libre de aguja entre 40 y 45 mm (1.57 a 1.77"). La excentricidad, o distancia máxima al eje del casquillo, desde cualquier punto de la superficie de la aguja, incluida su punta, no excederá de 1 mm. El peso total del conjunto casquillo-aguja será de 2.5 \pm 0.05 g, permitiéndose para su ajuste un pequeño agujero o rebaje sobre el casquillo; igualmente, irá grabada sobre éste la identificación individual de la aguja, no autorizándose la repetición de una misma identificación hasta pasados 3 años.

- Las agujas que cumplan los requisitos de control exigidos en este numeral deberán hacerlo constar así en su correspondiente certificado.

2.3 Recipiente o molde para la muestra: Los recipientes para las muestras serán de metal o vidrio, de forma cilíndrica y fondo plano, y con las siguientes dimensiones interiores:

	Diámetro mm (")	Profundidad mm (")
Penetración hasta 200	55 (2.17)	35 (1.38)
Penetración entre 200 y 350	70 (2.75)	45 (1.77)

2.4 Baño de agua: Para la inmersión de los recipientes con las muestras, se dispondrá de un baño de agua con una capacidad mínima de 10 litros y provisto de un dispositivo capaz de mantener la temperatura especificada para el ensayo con una variación de $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ (0.2°F). El baño irá equipado con una placa soporte perforada, colocada a una distancia no menor de 50 mm del fondo, ni mayor de 100 mm del nivel superior del líquido en el baño. Si la penetración se va a realizar en el mismo baño de agua, éste deberá disponer, además, de una plataforma resistente para soportar el penetrómetro. Para ensayos de penetración a bajas temperaturas, pueden utilizarse salmueras como líquido del baño.

2.5 Baño auxiliar: El ensayo de penetración puede realizarse igualmente en un baño de agua auxiliar, metálico, de vidrio o plástico, y que proporcione una base firme y estable a los recipientes para las muestras impidiendo, además, cualquier oscilación o basculamiento de los mismos durante el ensayo. Su capacidad deberá ser aproximadamente de 2 litros y con suficiente profundidad para permitir que los recipientes con las muestras queden completamente sumergidos.

2.6 Dispositivo medidor de tiempo: Control de precisión. La precisión de los instrumentos empleados para medir la duración de los tiempos de carga, deberá comprobarse inmediatamente antes de cada ensayo.

- Penetrómetros manuales: Cuando se empleen penetrómetros de este tipo, el tiempo del ensayo deberá medirse mediante un reloj eléctrico, un cronómetro u otro instrumento cualquiera graduado en 0.1 s o menos, y que tenga una exactitud de ± 0.1 s en un intervalo de 60 s. Puede utilizarse igualmente un contador sonoro que emita una señal cada 0.5 s, y en el que la cuenta de 11 señales equivalga a un tiempo total de 5 ± 0.1 s.
- Penetrómetros automáticos: En estos aparatos, el dispositivo medidor de tiempo estará calibrado para proporcionar el tiempo del ensayo con exactitud de ± 0.1 s.

2.7 Termómetros: Para controlar las temperaturas del ensayo en el baño de agua se dispondrá de termómetros de mercurio con varilla de vidrio, de inmersión total, y con las características principales:

Nota: Para las restantes características de los termómetros, puede consultarse la especificación ASTM E – 1. Los termómetros utilizados en el

baño de agua deberán ser calibrados como máximo cada seis meses, pudiéndose emplear el método ASTM E – 11.

3. PROCEDIMIENTO

3.1 Preparación de la muestra: Se tomarán las precauciones necesarias para que la muestra del ensayo sea verdaderamente representativa, de aspecto homogéneo y sin contaminación. De la muestra de laboratorio, se separarán con una espátula caliente unos 400 a 500 g de material que se colocarán en un recipiente, que se calienta cuidadosamente agitándolo para evitar sobrecalentamientos locales y para homogeneizar el material, hasta que alcance la fluidez que permita su vertido en los moldes para las probetas. Las temperaturas de calentamiento no excederán a las del Punto de Ablandamiento (Norma INV E - 712, método de anillo y bola) de cada material en más de 100 °C (180°F). El tiempo total de calentamiento no excederá 30 minutos, evitándose la formación de burbujas de aire. A continuación, se llena el molde para la probeta calentado a una temperatura semejante a la del material, y hasta una altura que, medida a la temperatura del ensayo, sea superior al menos en 10 mm a la penetración supuesta. Se preparará un total de dos moldes por cada muestra de material y ensayo de iguales características. Después de llenar los moldes, se cubren con un vaso de vidrio invertido, de dimensiones apropiadas, para protegerlos del polvo y permitir la eliminación de posibles burbujas de aire, y se dejan enfriar al aire a una temperatura entre 20° y 30°C, (68° y 86°F), por un período entre 1 y 1.5 horas, si se emplean pequeños, y entre 1.5 y 2 horas si se utilizan los de mayor tamaño. Finalmente, se sumergen los recipientes en el baño de agua a la temperatura especificada, manteniéndolos así durante los mismos períodos de enfriamiento.

3.2 Condiciones del ensayo: Las condiciones normalizadas del ensayo son respectivamente, de 25°C (77°F), 100 g y 5 s para la temperatura, la carga y el tiempo de duración de la misma. Sin embargo, se admite emplear otras condiciones de ensayo, como por ejemplo:

°C	Temperatura (°F)	Carga (g)	Tiempo (s)
0	(32)	200	60
4	(39.2)	200	60
25	(77)	100	25
25	(77)	50	5
46.1	(115°)	50	5

Cuando las condiciones del ensayo no se mencionan expresamente, se entenderá que serán las normalizadas, debiéndose especificar claramente en los demás casos las condiciones especiales que podrán emplearse.

3.3 Ejecución del ensayo: Primero se comprueba que el vástago soporte de la aguja está perfectamente limpio y seco, y que se deslice en forma suave y sin rozamiento sobre su guía. La aguja de penetración se limpia con tolueno u otro disolvente apropiado y se seca con un paño limpio, fijándola firmemente en su soporte. Salvo que se especifique otra carga, se coloca el peso suplementario de 50 g sobre el vástago, para obtener el peso móvil total de 100 ± 0.1 g.

El ensayo de penetración puede realizarse directamente en el baño de agua, colocando el penetrómetro sobre la plataforma que para este fin debe tener el baño, y sobre la base del penetrómetro el recipiente con la muestra, el cual debe quedar completamente sumergido. La penetración puede igualmente llevarse a cabo en el baño auxiliar colocado sobre la base del penetrómetro, conectándolo directamente al baño de agua mediante un sistema de alimentación en circuito cerrado, que mantenga constante la temperatura de ambos baños. El recipiente con la muestra se coloca en el baño auxiliar, completamente sumergido. Si el ensayo se realiza para un arbitraje, las penetraciones a temperaturas diferentes a la normalizada, se realizarán directamente en el baño de agua.

- Cuando no se disponga de un sistema de alimentación como el descrito en el párrafo anterior, la penetración puede también realizarse mediante un pequeño baño auxiliar de unos 400 cm^3 , de fondo plano y suficiente profundidad, el cual deberá mantenerse sumergido en el baño principal hasta la realización del ensayo. La muestra se pasa al baño pequeño, se cubre completamente con agua procedente del baño principal, a la temperatura de ensayo y el conjunto se sitúa sobre la base del penetrómetro.
- Puede ser conveniente dotar a este baño con un tipo de soporte, así como un sistema que proporcione un apoyo con 3 puntos de contacto al recipiente para la muestra.

Una vez transcurridos los tiempos de inmersión prescritos en el numeral 3.1, se aproxima la aguja del penetrómetro hasta que su punta toque justamente la superficie de la muestra, sin que penetre, lo cual se facilita aproximando la aguja y su imagen reflejada mediante una lámpara auxiliar, convenientemente colocada. Se anota la lectura o se pone en cero el penetrómetro y se suelta seguidamente el mecanismo que libera la aguja durante el tiempo especificado. Finalmente, se lee y anota la distancia, expresada en décimas de milímetro, que haya penetrado la aguja en la muestra.

Si el recipiente con la muestra se mueve durante la penetración, se anula el resultado. Cuando se utilice el baño pequeño auxiliar, el conjunto del

recipiente y el baño, se retornarán al baño principal hasta cuando se vaya a efectuar la penetración siguiente. Igualmente, si la penetración no se ha realizado al cabo de 2 minutos, se devuelve el conjunto recipiente-baño, al baño principal de agua y se opera con una pareja distinta.

Se realizarán al menos tres penetraciones en cada recipiente, sobre diferentes puntos de la superficie separados, como mínimo, 10 mm (3/8") entre sí y de las paredes del recipiente. Después de cada penetración, se desmonta y saca la aguja y se limpia cuidadosamente con un trapo limpio y seco. Cuando las penetraciones obtenidas sean mas profundas de 200, se usarán al menos tres agujas, dejándolas en la muestra hasta que las tres determinaciones se hayan completado.

Los aparatos y el procedimiento descrito anteriormente son de aplicación general para materiales con penetraciones hasta de 350. El método, sin embargo, puede ser utilizado para determinaciones de penetración de 500, utilizando moldes y agujas especiales. El recipiente para la muestra debe tener al menos, 60 mm de profundidad. El volumen total del material en el recipiente no deberá exceder de 125 ml para permitir las variaciones propias de la muestra, por cambio de temperatura. La aguja que se emplee deberá cumplir con los requisitos de calidad, dimensiones y peso exigidos en el numeral 2.2., con excepción de su longitud libre, que será como mínimo de 50 mm.

- Puede obtenerse un valor aproximado de la penetración de estos materiales, utilizando el recipiente convencional de 70 mm de diámetro, la aguja normalizada en el aparte 2.2 y una carga móvil total de 50 g. La penetración buscada se calcula, entonces, multiplicando el valor obtenido en estas condiciones por $\sqrt{2}$, o sea:

$$\text{Penetración (100 g)} = \text{Penetración (50 g)} \times 1.414$$

En estos casos, el resultado se debe expresar como aproximado, indicando el procedimiento de obtención.

4. RESULTADOS

4.1 El resultado del ensayo será el promedio de tres penetraciones cuyos valores no difieran en más de las siguientes cantidades:

Penetración	0 a 49	50 a 149	150 a 249	mayor de 249
Diferencia máxima entre valores extremos	2	4	6	8

4.2 Si se excede la tolerancia anterior, se repite el ensayo utilizando el segundo molde con muestra previamente preparada. Si se excediera de

nuevo la correspondiente tolerancia, se anulan los resultados obtenidos y se procederá a la realización de un nuevo ensayo.

ANEXO D. PUNTO DE ABLANDAMIENTO DE MATERIALES BITUMINOSOS (APARATO DE ANILLO Y BOLA) (Norma ASTM D – 36 o 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. EQUIPOS Y MATERIALES

4.1 Anillos, de bronce, de bordes cuadrados, conforme con las dimensiones exigidas.

4.2 Platos de base, hechos de material no absorbente, con espesor suficiente para prevenir la deformación y de tamaño adecuado para mantener dos o más anillos. Los platos serán planos.

4.3 Bolas: esferas de acero, de 9.5 mm de diámetro (3/8"), pesando cada una 3.5 ± 0.05 g.

4.4 Guías de contacto de las bolas, de bronce, con la forma, apariencia y dimensiones exigidas.

4.5 Baño: recipiente de vidrio que se pueda calentar, con un diámetro interno no menor de 85 mm, y altura entre la base y el borde de 120 mm como mínimo, con capacidad de 800 ml.

4.6 Soporte de anillos y montaje completo: Un soporte de bronce diseñado, para sostener los dos anillos en posición horizontal con la forma y dimensiones mostradas exigidas.

La base de los anillos colocada $25 \text{ mm} \pm 0.8 \text{ mm}$ (1 ± 0.03 ") por encima de la superficie superior del plato de base. La superficie inferior de este último deberá estar $16 \pm 3 \text{ mm}$ ($5/8 \pm 1/8$ ") por encima del fondo del baño.

4.7 Termómetros: Serán de tres tipos, con las características definidas en la Especificación ASTM E – 1:

El termómetro adecuado se colocará en el montaje exigido, cuidando que el extremo del bulbo esté a nivel con el fondo de los anillos y dentro de los 13 mm (0.5") alrededor de ellos, pero sin tocar los anillos ni el soporte.

4.8 Líquido para el baño: se debe tener en cuenta que:

- Agua destilada recién hervida, para evitar la formación de burbujas sobre la superficie del espécimen.
- Glicerina USP; se debe tener mucho cuidado porque su punto de ignición es de 160°C (320°F).
- Glicol etileno, con punto de ebullición entre 195 y 197°C (383 y 387°F). Deben tomarse precauciones porque esta sustancia es tóxica cuando se ingiere o sus vapores son inhalados. Su contacto prolongado con la piel es dañino. Su punto de ignición es 115°C (239°F). Cuando se usa este líquido en el baño, el ensayo deberá efectuarse en un laboratorio ventilado y con campana extractora de vapores, con capacidad para asegurar la remoción de los gases tóxicos.

4.9 Agentes aislantes: Consisten en aceites o grasas con siliconas que se usan para evitar la adherencia del producto bituminoso sobre el plato de base, cuando se hacen los discos. Se coloca en una ligera capa sobre la

superficie que se quiere proteger. También se pueden usar mezclas de glicerina con talco, dextrin o arcilla china. Cuando se usen siliconas, se debe evitar la contaminación de otros elementos del equipo de ensayo, pues puede producir errores en las determinaciones de penetración o punto de ignición. En estos casos, se deben emplear guantes desechables de caucho.

5. PREPARACION DE ESPECIMENES

5.1 Antes de iniciar labores debe verificarse que todo haya sido planeado (equipos, materiales, etc.) para terminar el ensayo dentro de 6 horas. Caliéntese la muestra de material bituminoso en forma cuidadosa, agitándola frecuentemente para evitar sobrecalentamientos localizados, hasta asegurar que esté suficientemente fluida para poderla verter. Al agitarse, deberá evitarse la formación de burbujas. El calentamiento de la muestra no debe tomar más de 2 horas; y, en ningún caso, la temperatura será mayor que 110°C (200°F) por encima del punto de ablandamiento esperado. Si el ensayo debe repetirse, no se recalentará la muestra, sino que deberá utilizarse una muestra fresca.

5.2 Caliéntense los dos anillos de bronce sin el plato de base, aproximadamente a la misma temperatura del producto asfáltico, y colóquense sobre el plato de base, tratado con un agente aislante.

5.3 Viértase, con un ligero exceso, el producto bituminoso dentro de los anillos y déjese enfriar a temperatura ambiente durante 30 minutos. Para materiales que estén blandos a la temperatura ambiente, enfríense los especímenes, al menos durante 30 minutos a una temperatura inferior 10°C (18°F) por debajo del punto de ablandamiento esperado. Desde el momento en que se forman los discos, no deberán transcurrir más de 240 minutos hasta la terminación del ensayo.

5.4 Cuando los especímenes estén fríos, córtese el exceso de material de la parte superior, con un cuchillo o espátula precalentada, para que la superficie del disco coincida con el nivel superior del anillo.

6. PROCEDIMIENTO

6.1 Escójense, dependiendo del punto de ablandamiento esperado, el baño líquido y el termómetro adecuado, entre los siguientes casos:

- Baño con agua destilada recién hervida, para ablandamiento esperado entre 30 y 80°C (86 y 176°F); úsese un termómetro 15C (ó 15F) ó 113C (ó 113F). La temperatura al comenzar el baño deberá ser de $5 \pm 1^\circ\text{C}$ ($41 \pm 2^\circ\text{F}$).

- Baño con glicerina USP, para obtener ablandamientos por encima de 80°C (176°F) y hasta 157°C (315°F); úsese un termómetro 16C (ó 16F) ó 113C (ó 113F). La temperatura de iniciación del baño deberá ser de $30 \pm 1^\circ\text{C}$ ($86 \pm 2^\circ\text{F}$).
- Baño con glicol etileno para ablandamiento entre 30°C (86°F) y 110°C (230°F); úsese un termómetro 113C (ó 113F). La temperatura de iniciación del baño deberá ser de $5 \pm 1^\circ\text{C}$ ($41 \pm 2^\circ\text{F}$).

6.2 Hágase el montaje de los aparatos en un laboratorio ventilado, colocando los anillos con los especímenes, las guías para las bolas y los termómetros en posición, y llénese el baño con el líquido apropiado hasta una altura de 105 ± 3 mm. Si se usa glicol etileno, asegúrese que el ventilador de la campana extractora esté funcionando antes de depositar el líquido. Usando unas tenazas apropiadas, colóquense las dos bolas en el fondo del baño para que adquieran la misma temperatura de iniciación que el resto del montaje.

6.3 Colóquese todo el conjunto del baño, en agua con hielo o caliéntese muy suavemente, para alcanzar y mantener durante 15 minutos la temperatura de iniciación apropiada. Cuídese de no contaminar el líquido del baño.

6.4 Usando otra vez las tenazas, colóquese cada una de las bolas en la guía para su centrado.

6.5 Caliéntese el baño en forma pausada, para asegurar que la rata de elevación de la temperatura sea constante a 5°C (9°F)/minuto. Protéjase el baño de corrientes de aire usando pantallas, si es necesario. No promedie la rata de elevación de temperatura durante el período del ensayo. La máxima variación permitida para un período de 1 minuto, después de transcurridos los 3 primeros minutos, será de $\pm 0.5^\circ\text{C}$ ($\pm 1^\circ\text{F}$). Repítase cualquier ensayo en el cual la rata de elevación de la temperatura no caiga dentro de estos límites.

6.6 Anótese para cada anillo y bola, la temperatura indicada por el termómetro en el momento en que el producto bituminoso rodeando la bola, toca el fondo del baño. No se debe hacer corrección por la parte emergente del termómetro. Si la diferencia entre las dos temperaturas excede de 1°C (2°F), repítase el ensayo.

7. CALCULOS

7.1 Para un espécimen de un producto bituminoso dado, el punto de ablandamiento determinado en un baño con agua, será inferior que el

determinado con glicerina. Ya que la determinación del punto de ablandamiento es necesariamente arbitraria, esta diferencia es importante solamente para puntos de ablandamiento ligeramente por encima de los 80°C (176°F).

7.2 El cambio de agua por glicerina para puntos de ablandamiento por encima de 80°C, crea una discontinuidad. Los más bajos puntos de ablandamiento que es posible obtener con baños de glicerina, son del orden de 84.5°C (184°F). En estos casos, la corrección será de -4.2°C (-7.6°F). Si se necesita resolver una discrepancia, se repetirá el ensayo. Bajo cualquier circunstancia, si el valor medio de las dos temperaturas determinadas en glicerina, es de 80.0°C (176°F), o más bajo, repítase el ensayo utilizando baño de agua.

7.3 Para convertir puntos de ablandamiento ligeramente por encima de 80°C (176°F) determinados en agua, en aquellos determinados en glicerina, la corrección es de + 4.2°C (+ 7.6°F). Para dilucidar discrepancias, repítase el ensayo en glicerina. Bajo cualquier circunstancia, si el valor medio de las dos temperaturas determinadas en agua es de 85°C (185.0°F) o más alto, repítase el ensayo en glicerina.

7.4 Los resultados obtenidos usando glicol etileno, variarán de los obtenidos usando agua y glicerina, en cantidades calculadas con las siguientes fórmulas:

$$PA_g = 1.026583 \times PA_e - 1.334968^\circ\text{C}$$

$$PA_a = 0.974118 \times PA_e - 1.444590^\circ\text{C}$$

Donde: PA_g = Punto de ablandamiento en glicerina
 PA_a = Punto de ablandamiento en agua
 PA_e = Punto de ablandamiento en glicol etileno.

8. INFORME

8.1 Cuando se utilicen termómetros 15°C (ó 15F), repórtense las temperaturas con aproximación de 0.2°C (0.5°F). Cuando se utilicen los termómetros 16°C (ó 16F) ó 113°C (ó 113F), repórtense las temperaturas con aproximación de 0.5°C (1.0°F).

8.2 Infórmese la clase de líquido que fue utilizado para el baño durante el ensayo.

ANEXO E. DUCTILIDAD DE LOS MATERIALES ASFÁLTICOS (ASTM D – 113 o 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. EQUIPO Y MATERIALES

2.1 Moldes: Los moldes para fabricar las probetas serán de bronce, con la forma y dimensiones exigidas. Un molde correctamente montado, proporcionará probetas para ensayo con las siguientes dimensiones:

Longitud total	75.0 ± 0.5 mm
Distancia entre pinzas	30.0 ± 0.3 mm
Ancho de boca de las pinzas	20.0 ± 0.2 mm
Ancho de la sección mínima (equidistante entre pinzas)	10.0 ± 0.1 mm
Espesor uniforme	10.0 ± 0.1 mm

2.2 Placa: Para el llenado de los moldes, se dispondrá de una placa de bronce plana, provista de un tornillo lateral de sujeción y con la forma y dimensiones exigidas.

2.3 Baño de agua: Un baño de agua que pueda mantener la temperatura de ensayo con una variación máxima de 0.1°C (0.2°F). Su volumen de agua no será inferior a 10 litros y estará equipado con una placa perforada para la colocación de las probetas, situada a una distancia mínima de 50 mm del fondo y 100 mm de la superficie.

2.4 Ductilómetro: El aparato para el ensayo de tracción se denomina ductilómetro y, en esencia, consta de un tanque de agua en el que se sumergen las probetas, provisto de un mecanismo de arrastre que no produzca vibraciones, capaz de separar a la velocidad especificada un

extremo de la probeta del otro, que permanece fijo. La tolerancia máxima admitida en la velocidad especificada será del 5%.

2.5 Termómetros.- Para su empleo durante la inmersión en el baño de agua, se empleará un termómetro de inmersión total con las respectivas características:

Si la ductilidad se realiza a 25°C (77°F), puede utilizarse el termómetro con referencia ASTM D 5 utilizado en el ensayo de penetración.

3. PROCEDIMIENTO

3.1 Preparación de las probetas: Para evitar la adherencia del material a la placa y partes interiores del molde, se cubren éstas con una ligera película de una mezcla de partes iguales de glicerina y dextrina, (Véase Nota 1), montándose a continuación el molde exigido, sujetándolo sobre la placa mediante el tornillo lateral. La placa con el molde se colocan sobre una superficie horizontal, debiendo comprobarse que todas las piezas del molde apoyen completamente sobre la placa.

El material asfáltico se calienta cuidadosamente, agitándolo en cuanto su consistencia lo permita para prevenir los sobrecalentamientos locales, hasta que esté lo suficientemente fluido para verterlo. Se pasa entonces a través del tamiz de 0.297 mm (No.50), se homogeniza completamente y se procede al llenado de los moldes. El llenado en los moldes se hará con cuidado, procurando no distorsionar el correcto montaje de sus piezas, vertiendo el material en forma de chorro fino en un recorrido alternativo de extremo a extremo, hasta que se llene completamente y con un ligero exceso, evitando la inclusión de burbujas de aire. La probeta, dentro del molde y protegida del polvo, se deja enfriar a temperatura ambiente durante 30 a 40 minutos, sumergiéndola a continuación en el baño de agua a la temperatura de ensayo durante otros 30 minutos. Seguidamente se quita el exceso de material del molde con una espátula recta caliente, hasta dejar la probeta perfectamente enrasada.

El conjunto de la placa, molde y probeta se introduce de nuevo en el baño de agua, manteniéndolo a la temperatura de ensayo con una variación máxima de 0.1°C, (0.2°F), durante un tiempo comprendido entre 85 y 95 minutos. A continuación, se retira la placa del molde, se quitan las piezas laterales y se da comienzo al ensayo.

Nota 1: En algunas normas se sigue recomendando, para evitar la adherencia del material, el empleo de la amalgama de mercurio. Puede consultarse a este fin la Norma ASTM D 113-85, que incluye, además, una

detallada relación de las precauciones que hay que tomar en el manejo y utilización de estos productos.

3.2 Ejecución del ensayo: La probeta se monta en el ductilómetro, introduciendo cada pareja de clavijas de los sistemas fijo y móvil en los correspondientes orificios de cada pinza, poniendo a continuación en marcha el mecanismo de arrastre del ensayo a la velocidad especificada hasta que se produzca la rotura, midiéndose la distancia en cm que se hayan separado ambas pinzas hasta este instante.

Durante la realización del ensayo la probeta, al irse estirando, deberá permanecer en todo momento sumergida en el agua del ductilómetro, sin aproximarse a la superficie o al fondo una distancia menor de 25 mm. La temperatura del agua será la normalizada, con una tolerancia de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ($\pm 1^{\circ}\text{F}$). En un ensayo normal, el material asfáltico entre las pinzas se va paulatinamente estirando hasta formar un hilo, produciéndose la rotura en un punto en el que el hilo no tiene apenas sección transversal. Si durante el ensayo, el material bituminoso al estirarse tiene tendencia a subir hasta la superficie del agua o tocar la placa de fondo del ductilómetro, deberá ajustarse la densidad relativa del agua a la del material ensayado, añadiendo alcohol metílico o cloruro de sodio según el caso, hasta conseguir que el hilo quede lo más recto posible, sin elevarse o descender.

4. RESULTADOS

4.1 La distancia en cm que se han separado las pinzas desde su posición inicial hasta que se produce la rotura en un ensayo normal, es del valor de la ductilidad de una probeta.

4.2 Se ensayarán tres probetas por muestra, y el valor medio obtenido en un ensayo normal se expresará como el resultado de la ductilidad, especificando las condiciones de velocidad y temperatura a las que se haya realizado el ensayo.

4.3 Si no puede conseguirse que un ensayo se desarrolle en las condiciones normales anteriores, se informará que la ductilidad no se puede realizar en esas condiciones.

Nota 2: Los criterios de precisión están tomados de la Norma ASTM D 113.

ANEXO F. RECUPERACION ELASTICA POR TORSION DE ASFALTOS MODIFICADOS (I.N.V. E – 727)

1. OBJETO Y CAMPO DE APLICACION

1.1 Esta norma describe el procedimiento que se debe seguir para determinar el grado de elasticidad 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 La incorporación al ligante de algunos tipos de polímeros proporciona a aquél una elasticidad mayor que la que presenta sin el polímero.

1.4 En el procedimiento que se describe, un cilindro de dimensiones especificadas se sumerge en la muestra del ligante bituminoso modificado. Mediante un dispositivo de torsión se gira el cilindro 180° y se determina, después de 30 minutos, el ángulo recuperado por él.

2. APARATOS Y MATERIAL NECESARIOS

2.1 Aparato de torsión. Un aparato, para imponer un esfuerzo de torsión a la muestra, con las dimensiones y forma exigidas, constituido fundamentalmente por: cilindro metálico, semicorona con escala graduada de 0 a 180°, baño de agua y recipiente para la muestra.

2.2 Termómetro. Para controlar la temperatura del baño de agua, graduado en 0,1 °C y escala de 19 a 27 °C (por ejemplo, el termómetro ASTM 17C, utilizado en la norma E-706).

2.3 Cronómetro, o temporizador para medir tiempos de 30 min \pm 1 s.

2.4 Material de uso general en laboratorio. Estufa, cápsula, varillas vidrio, espátulas, disolventes, 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 a su vez presentará aspecto homogéneo y no estará contaminada.

3.2 Una cantidad suficiente de la muestra de laboratorio se calienta con cuidado y con agitación continua hasta conseguir una consistencia de la misma que permita su vertido.

3.3 Se ajusta el cilindro del aparato de torsión de forma que su base inferior quede a una distancia de 20 mm del fondo del recipiente para ensayo situado en posición centrada, ajustado en el resalte que para tal fin se dispone en el fondo del baño.

3.4 Se transfiere, por vertido, la muestra al recipiente de ensayo en cantidad suficiente para enrasarla con la marca grabada de que dispone el cilindro a 10 mm de su base inferior.

3.5 Se deja enfriar el conjunto recipiente - muestra a temperatura ambiente, durante 1 hora como mínimo. A continuación, se hace circular agua por el baño termostático a temperatura de $25 \pm 0,1$ °C, durante al menos 90 minutos, para equilibrar la temperatura del agua del baño y de la muestra. El nivel del agua en el baño estará suficientemente por encima del recipiente con la muestra.

3.6 Transcurridos los 90 minutos antes referidos, se introduce el pasador en el alojamiento que al efecto tiene el cilindro y con su ayuda se hace girar éste 180° en sentido de las agujas del reloj desde 180 a 0°, en un tiempo comprendido entre 3 y 5 segundos. Inmediatamente se retira de su alojamiento el pasador y después de 30 minutos \pm 15 segundos, se procede a la lectura indicada por la varilla sobre la semicorona graduada. La lectura al final del ensayo es el valor del ángulo recuperado.

4. RESULTADOS

4.1 El resultado se expresa, como recuperación elástica por torsión, en porcentaje del ángulo recuperado con respecto al inicial de 180°.

$$\text{Recuperación elástica por torsión } Re_t = \frac{L}{180} \times 100$$

Donde L = ángulo recuperado

4.2 No se ha determinado la precisión del ensayo.

ANEXO G. PESO ESPECIFICO Y PESO UNITARIO DE PRODUCTOS ASFALTICOS SOLIDOS Y SEMISOLIDOS (ASTM D – 70 o 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, se expresa así:

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

3. EQUIPO Y MATERIALES

3.1 Picnómetro: Recipiente de vidrio de forma cilíndrica o cónica, con boca esmerilada en la cual debe ajustar exactamente y sin fugas, un tapón de vidrio de 22 a 26 mm de diámetro, en el centro del cual llevará un orificio de 1.0 a 2.0 mm de diámetro. La superficie superior del tapón será plana y pulida, y la inferior tendrá forma cóncava para facilitar la expulsión del aire del picnómetro, el cual tendrá una capacidad de 24 a 30 ml y un peso, incluido el tapón, no superior a 40 g. La altura de la sección cóncava deberá ser de 4.0 a 6.0 mm en el centro.

- El picnómetro de Gay-Lussac, es apropiado para líquidos no volátiles, excepto los de alta viscosidad; su capacidad será de 10 a 25 ml.
- Los picnómetros de boca ancha denominados de Hubbard, adecuados para líquidos viscosos y materiales semisólidos y sólidos; su capacidad es de 24 a 30 ml.

3.2 Baño de agua: Un baño de agua provisto de termostato que pueda regular la temperatura del ensayo con una precisión de ±0.1°C (0.2°F)

3.3 Termómetros: Calibrados y con liquido de vidrio transparente de inmersión total, del rango apropiado con gradaciones de por lo menos cada

0.1°C (0.2°F) y un error máximo de escala de 0.1°C (0.2°F) de acuerdo con la especificación E1 de la ASTM. Los termómetros generalmente utilizados son de 63°C pero puede emplearse cualquier otro termómetro con precisión igual.

3.4 Recipiente o vaso de vidrio: De forma baja y de boca ancha de 600 ml de capacidad.

3.5 Balanza: Con capacidad mínima de 150 g y precisión de ± 0.1 mg.

3.6 Soporte del picnómetro: Es conveniente disponer de soportes adecuados que mantengan los picnómetros verticales y a la profundidad correcta.

3.7 Agua destilada o desionizada: Para llenar del picnómetro y el vaso; deberá disponerse de agua desionizada o agua destilada recién hervida y enfriada.

3.8 Acetona líquida de limpieza: Para la limpieza completa de los picnómetros, se deberá utilizar cualquier producto detergente adecuado, no recomendándose el empleo de mezcla crómica, por los riesgos que implica su utilización.

4. PREPARACION DEL EQUIPO

4.1 Llénese parcialmente el vaso de vidrio de boca ancha con agua preparada según el numeral 3.7 hasta un nivel tal, que cuando se sumerja el picnómetro, la parte superior de este diste más de 40 mm de la superficie.

4.2 Una vez ajustada la temperatura del baño a la del ensayo con la precisión de $\pm 0.1^\circ\text{C}$ (0.2°F), se sumerge parcialmente el vaso en el baño, debiendo quedar su boca por encima de la superficie y su fondo a una profundidad no menor de 100 mm, sujetándolo firmemente en esta posición.

5. CALIBRACION DEL PICNOMETRO

5.1 Se limpia perfectamente el picnómetro y su tapón con el líquido de limpieza, enjuagándolo a continuación con agua destilada, después con acetona y secándolo finalmente, utilizando si fuera preciso, una corriente filtrada de aire. Esta operación de limpieza debe realizarse antes de cada calibración, o bien cuando se observe cualquier falla en el escurrimiento uniforme de los líquidos, en las paredes interiores del picnómetro o en el capilar del tapón. Normalmente, basta limpiar bien el picnómetro entre cada

determinación con algún disolvente adecuado, como éter de petróleo, seguido de un secado al vacío.

5.2 Después de secado, se deja que el picnómetro alcance la temperatura ambiente y se pesa con aproximación de 1 mg. El peso del picnómetro vacío, se designa por A.

5.3 Se seca el vaso del baño y se llena el picnómetro con agua destilada o desionizada, colocando suavemente el tapón, sin apretarlo. Se sumerge completamente el picnómetro en el vaso y se aprieta entonces el tapón, no debiendo quedar burbujas de aire ocluidas en el picnómetro en esta operación. El vaso con el picnómetro se vuelve a colocar en el baño de agua.

- Es recomendable que el agua o la muestra en el picnómetro tenga una temperatura ligeramente inferior a la de ensayo antes de sumergir el picnómetro en el vaso. Si la temperatura de ensayo es inferior a la ambiente, utilícese un baño auxiliar a menor temperatura. Es importante que no queden burbujas de aire en el líquido, y será necesario esperar hasta cuando éstas alcancen la superficie, para colocar el tapón.

5.4 Se deja el picnómetro en el interior del vaso por un mínimo de 30 minutos, se saca del agua e inmediatamente se seca la superficie superior del tapón pasando suavemente y una sola vez un paño seco por la misma; a continuación, se seca rápidamente el resto del picnómetro y se pesa con aproximación de 0.1 mg. El peso del picnómetro lleno de agua, se designa por B.

- En ningún caso se volverá a secar la parte superior del tapón aunque se forme una pequeña gota de agua a través del orificio, debido a la expansión. Si durante la pesada se condensase humedad en el picnómetro, séquese su parte exterior rápidamente excluyendo el tapón, antes de pesarlo. Si la temperatura de ensayo es más alta que la ambiente, deberá esperarse hasta cuando el picnómetro alcance ésta antes de ser pesado.

5.5 Si se va a determinar el peso específico referido al agua, a una temperatura distinta de 25°C (77°F), o si se desea el peso unitario a una temperatura que no sea la de 25°C (77°F), deberá volverse a calibrar el picnómetro a dicha temperatura.

6. PROCEDIMIENTO

6.1 Preparación de la muestra: Caliéntese con cuidado la muestra, agitándola para evitar sobrecalentamientos locales hasta que llegue a ser suficientemente fluida para que pueda ser vertida. En ningún caso deberá elevarse la temperatura a más de 56°C (100°F) por encima del punto de ablandamiento esperado, si el material es alquitrán; ni en más de 111°C (200°F) por encima del punto de ablandamiento esperado, para el asfalto. No debe calentarse por más de 30 minutos y debe evitarse que queden burbujas de aire dentro de la muestra. La muestra debe ser representativa de la existente en el laboratorio y deberá ser homogénea y no estar contaminada.

6.2 Viértase una cantidad de muestra suficiente dentro del picnómetro limpio y seco previamente calentado, llenándolo hasta tres cuartos de su capacidad. Tómense precauciones para evitar que el material se ponga en contacto con las paredes del picnómetro por encima del nivel final y para evitar la inclusión de burbujas de aire. Déjese enfriar el picnómetro con su contenido hasta la temperatura ambiente durante un período no menor de 40 minutos y pésese con el tapón, con aproximación a 1 mg. El peso del picnómetro con la muestra, se designa como C.

- Si inadvertidamente quedaron burbujas incluidas, remuévalas calentando la superficie de asfalto en el picnómetro con una llama "suave" de un mechero Bunsen. Para evitar sobrecalentamiento, no debe permitirse que permanezca la llama en contacto con el asfalto en ningún momento durante más de algunos segundos.

6.3 Remuévase el vaso del baño de agua. Llénese el picnómetro que contiene el asfalto con agua destilada fresca hervida o desionizada, colocando firmemente el tapón en el picnómetro. No deben permitirse burbujas de aire en el picnómetro. Colóquese el picnómetro en el vaso y apriétese firmemente el tapón. Retórnese luego el vaso al baño de agua.

6.4 Manténgase el picnómetro dentro del baño de agua durante un período no menor de 30 minutos. Sáquese el picnómetro del baño. Sequése y pésese empleando el mismo procedimiento y tiempo empleados en el numeral 5.4. Este peso del picnómetro con la muestra y con agua, se designa como D.

7. CALCULOS

7.1 Calcúlese el peso específico con aproximación a 0.001 así:

$$\text{Peso Específico} = (C-A)/[(B-A) - (D-C)]$$

Donde:

- A = Peso del picnómetro (incluido el tapón)
- B = Peso del picnómetro con agua
- C = Peso del picnómetro parcialmente lleno con asfalto
- D = Peso del picnómetro con asfalto y con agua.

7.2 Calcúlese el peso unitario con aproximación a 0.001 en la siguiente forma:

$$\text{Peso unitario} = \text{peso específico} \times W_T$$

Donde: W_T = peso unitario del agua a la temperatura de ensayo en las unidades deseadas.

Pueden emplearse para el agua los siguientes pesos unitarios:

Temperatura de ensayo		Peso unitario del agua	
°C	(°F)	g/cm ³	(lbs/gal)
15.6	(60°)	0.9990	(8.337)
25	(77°)	0.9971	(8.321)

8. INFORME

8.1 Infórmese el peso específico y el peso unitario con aproximación a tres decimales, así como la temperatura del ensayo de 25/25°C (77/77°F) o de 15.6/15.6°C (60/60°F).

ANEXO H. ESTABILIDAD AL ALMACENAMIENTO DE ASFALTOS (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 específicas.

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.

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 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 $165 \pm 2^\circ\text{C}$ 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 $60 \pm 1 \text{ cm}^3$ del contenido, que se recogen en una cápsula de porcelana previamente identificada con, p.ej., 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 con, p, ej., 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: $\Delta P = P_{\text{sup}} - P_{\text{inf}} \text{ (0,1 mm)}$

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

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

ANEXO I. ESPECIFICACIONES PARA CEMENTOS ASFÁLTICOS ASTM D – 946

	GRADO DE PENETRACION									
	40	50	60	70	85	100	120	150	200	300
	Mín.	Max.	Mín.	Max.	Mín.	Max.	Mín.	Max.	Mín.	Max.
Penetración a 25° C, 100g., 5s	40	50	60	70	85	100	120	150	200	300
Punto de inflamación, °F (copa abierta de cleveland)	450	–	450	–	450	–	425	–	350	–
Ductilidad 25° C, 5 cm/min.	100	–	100	–	100	–	100	–	100*	–
Penetración al residuo lámina delgada, %	55 +	–	52 +	–	47 +	–	42 +	–	37 +	–
Ductilidad 25° C, 5 cm/min, al residuo	–	–	50	–	75	–	100	–	100*	–
Solubilidad en tricloroetileno	99.0	–	99.0	–	99.0	–	99.0	–	99.0	–

* Si la ductilidad a 25° C es menor que 100 cm., el material se aceptaría si la ductilidad a 15.5° C es mínimo de 100 cm. a una velocidad de 5 cm/min.

ANEXO J. ESPECIFICACIONES PARA CEMENTOS ASFÁLTICOS ASTM D – 3381

	GRADO DE PENETRACION				
	AC – 2.5	AC – 5	AC – 10	AC – 20	AC – 40
Viscosidad a 60° C, P	250 ± 50	500 ± 100	1000 ± 200	2000 ± 400	4000 ± 800
Viscosidad a 135° C, min, cSt	80	110	150	210	300
Penetración a 25° C, 100g., 5s	200	120	70	40	20
Punto de inflamación, copa abierta de cleveland. °F (° C)	325 (163)	350 (177)	425 (219)	450 (232)	450 (232)
Solubilidad en tricloroetileno, min., % <u>Análisis al residuo de lámina delgada.</u>	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0
Viscosidad 25° C, max., P	1250	2500	5000	10000	20000
Ductilidad 25° C, 5 cm/min. Min., cm.	100*	100	50	20	10

* Si la ductilidad esta por debajo de 100 cm. el material se aceptaría si la ductilidad a 15.5° C es mínimo 100 cm. a una velocidad de 5 cm/min.